

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



FACULTE DES MATHÉMATIQUES ET SCIENCE DE LA MATIÈRE

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : physique énergétique et énergie renouvelable

Présenté par:

BENAMMAR Roumaïssa et GOURI Kaouther

Thème :

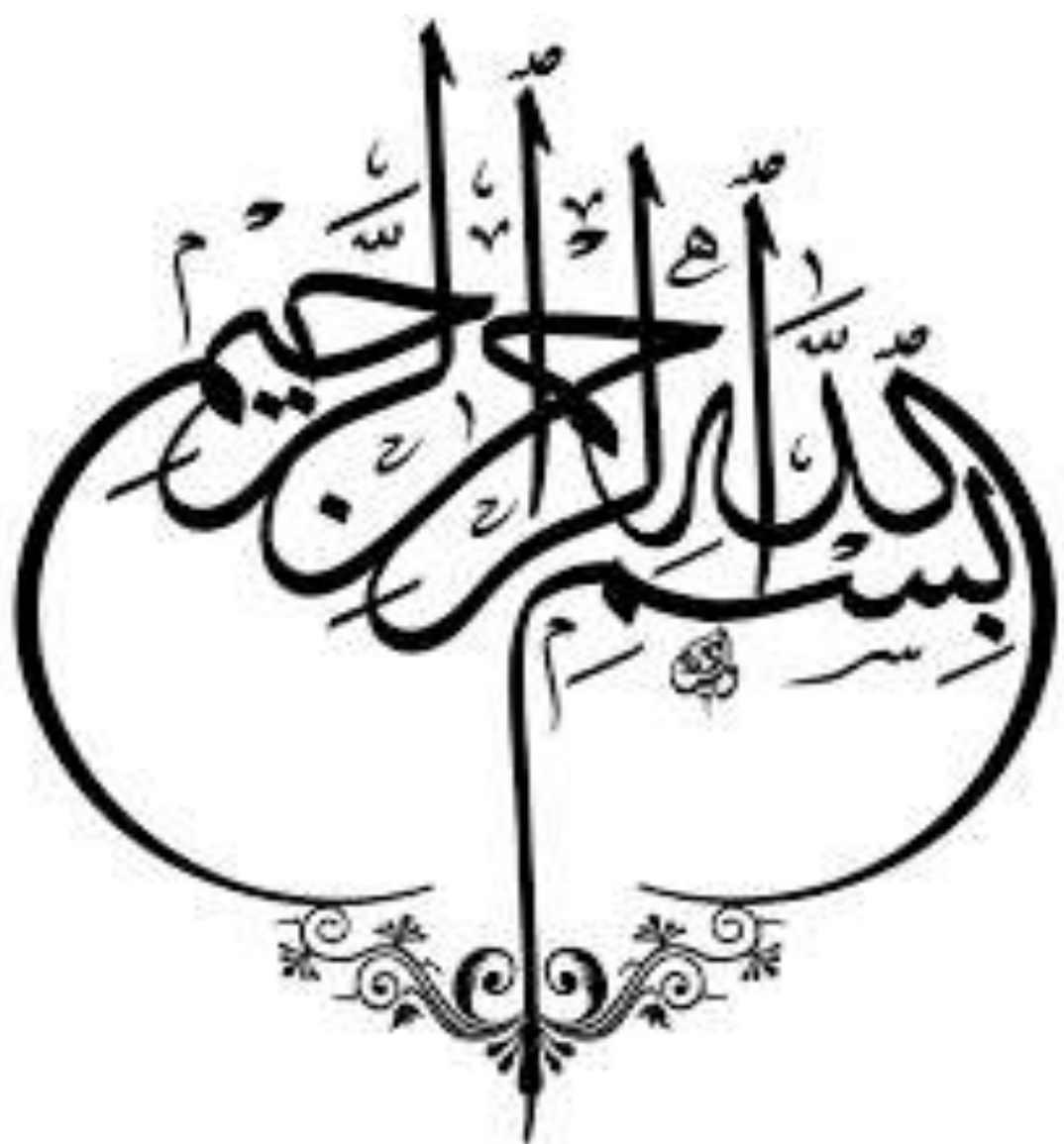
Séchage Solaire des Produits Agricoles

Soutenu le : 05 / 06 / 2018

Devant le jury :

- | | | | |
|---------------------|------------|-------------|-----------|
| ‣ BOUGUETTAIA Hamza | Professeur | UKM Ouargla | Président |
| ‣ BECHKI Djamel | MCA | UKM Ouargla | Examineur |
| ‣ BOUGHALI Slimane | MCA | UKM Ouargla | Encadreur |

Année Universitaire 2017 / 2018



Remerciement

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

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr. BOUGHALI Slimane**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait **Mr. BOUGUETTAIA Hamza** en étant président du jury et **Mr. BECHKI Djamel** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

*Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenu de près ou de loin principalement à tous les employés de l'Université **KASDI MERBAH OUARGLA**.*

Dédicace

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis,
à toi Mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ;

Maman que j'adore.

Aux personnes qui m'ont toujours aimés et aidés et encouragés, qui étaient toujours à mes côtés,

mes frères et mes sœurs.

Et spécialement pour mon frère Djamel.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mon fiancé MOHAMMED, et bien sûr à sa famille.

A mon binôme Kaouther, Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.



Roumaissa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mon mari et bien sûr A mes frères et sœurs

A mon binôme ROUMAÏSSA,

Et À tous ceux qui nous ont aidés dans ce travail,

Je vous dis merci



Kawthar

Résumé

L'objectif de notre travail consiste à bien comprendre le mécanisme physique de l'opération de séchage qui est entre autre qu'un transfert de chaleur et de masse.

D'autre part on s'est intéressé à l'amélioration du capteur solaire plan à air. De même on a étudié les paramètres de l'air asséchant (température et vitesse et humidité) sur le produit, avec les différents types de séchoir solaire pour la conservation du produit.

Mots clés : séchage – séchoir solaire – capteur solaire – produit agricole – température – rayonnement solaire.

ملخص

الهدف من عملنا هو فهم الآلية الفيزيائية لعملية التجفيف والتي هي من بين أمور أخرى لنقل الحرارة والكتلة، من ناحية أخرى نهتم بتحسين اللواقط الشمسية (مجمعات الطاقة الشمسية).

وبالمثل، تم دراسة معايير تجفيف الهواء المدروسة (درجة الحرارة والسرعة والرطوبة) على المنتج، مع أنواع مختلفة من المجفف الشمسي للحفاظ على المنتج.

الكلمات المفتاحية: التجفيف – المجفف الشمسي – اللاقط الشمسي – المنتج الزراعي – درجة الحرارة – الاشعاع الشمسي

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
------------------------------	-----------

Chapitre I Gisement solaire.

I.1 Présentation générale du système solaire	03
I.2 Le soleil en tant qu'étoile	03
I.3 Paramètres physiques du soleil	03
I.4 L'énergie solaire	05
I.5. Le rayonnement solaire	06
I.6.Irradiation solaire	07
I.7. Superficie du site d'Ouargla	08
I.7.1 Climat de la région d'Ouargla	09
I.7.2.Durée d'insolation	09
I.7.3. Température	10
I.7.4. Humidité	10
I.7.5.Vents.	11

Chapitre II Généralités sur le séchage

II.1.Séchage	13
II.2. Différentes méthodes de séchage	14
II.3. Caractéristiques de l'air de séchage	15
II.3.1 Humidité.	15
II.3.2 Température.	16
II.3.3 Vitesse	16
II.4. Principes de séchage	17
II.5. Modes de séchage	19
II.6. Transfert de Chaleur et de matière	20
II.7.Cinétique du séchage	22
II.8. Différents modèles des cinétiques de séchage	24
II.9. Séchage et qualité	25
II.9.1. Types de modification de la qualité.	25

II.9.2. Le problème du stockage	26
II.10. Domaines d'utilisations	27
II.10.1. Industrie agroalimentaire.	27
II.10.2. Industrie du bois.	27
II.10.3. Industrie alimentaires et pharmaceutiques.	28

Chapitre (III) : Les séchoirs solaires

III.1. Classifications des séchoirs industriels	29
III.2. Différents types des séchoirs solaires	29
III.2.1. Les séchoirs naturels	30
III.2.2. Séchoirs solaires direct.	31
III.2. 3. Séchoirs solaires indirects	32
III.2.4. Les séchoirs solaires tunnels	33
III.3. les capteurs solaires	33
III.3.1. Types de capteur solaire.	34
III.3.2. Présentation du capteur solaire plan à air.	35
III.3.3. Composants du capteur solaire plan	36
III.3.4. Amélioration des capteurs solaires plans a air	36
Conclusion générale	
Références bibliographiques	

Liste des figures

N° de figure	Designation	Page
Figure (I.1)	le système solaire.	03
Figure(I.2)	la structure stellaire du soleil.	05
Figure(I.3)	la longueur d'onde de rayonnement solaire	06
Figure(I.4)	les composants du rayonnement solaire.	07
Figure(I.5)	global irradiation solaire du monde.	07
Figure (I.6)	irradiation solaire en l'Algérie.	08
Figure (I.7)	le site d'Ouargla.	08
Figure (I.8)	Cumul insolation en heure (2014)	09
Figure (I.9)	Température moyenne en °C (2014).	10
Figure (I.10)	Humidité moyenne en % (2014).	10
Figure (I.11)	La vitesse de vente en km/h (2014).	11
Figure (II.1)	les étapes de séchage solaire naturel de tomate.	12
Figure (II.2)	Séchage isenthalpique par entrainement.	17
Figure (II.3)	Transfert entre l'air et la surface du produit.	21
Figure (II.4)	représentation schématique d'un solide humide	22
Figure (II.5)	Cinétique de séchage.	23
Figure (II.6)	Effets mécaniques du séchage.	26
Figure (III.1)	Schéma du séchage solaire en plein air	30
Figure (III.2)	Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle.	31
Figure (III.3)	Schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée.	31
Figure (III.4)	Schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle	32
Figure (III.5)	Schéma d'un séchoir solaire tunnel	33
Figure (III.6)	Capteur plan non vitrés	34
Figure (III.7)	Schéma d'un capteur plan à air	35
Figure (III.8)	Capteur solaire pour le chauffage d'eau.	35
Figure (III.9)	Configuration et schéma de principe d'un capteur solaire plan à air	36
Figure (III.10)	Composants d'un capteur solaire plan.	36
Figure (III.11)	Capteur muni d'obstacles.	37
Figure (III.12)	Schéma du dispositif expérimental	38
Figure (III.13)	Schéma descriptif des chicane	38
Figure (III.14)	Schéma d'un élément du capteur	39

Liste des tableaux

N° de Tableau	Designation	Page
Tab (I.1)	Cumul insolation en heure (2014)	09
Tab (I.2)	Température moyenne en °C (2014)	10
Tab (I.3)	Humidité moyenne en % (2014)	10
Tab (I.4)	La vitesse de vente en km/h (2014)	11

Liste de symboles

Symbole	Désignation	Unité
H_a	Humidité absolue	$\text{kg}_v \cdot \text{kg}_{as}^{-1}$
H_r	Humidité relative.	%
P_v	Pression partielle de la vapeur dans le mélange	"pascal (Pa)"
P_s	Pression de saturation	" pascal (Pa)"
\dot{m}_v	Flux massique de vapeur	J/kg.K
m_s	Masse du solide sec	"kg"
λ	Conductivité thermique de la pellicule de produit	W/m.K
Q	la quantité de chaleur transférée par unité de temps	W
A	surface d'échange	m ²
h	coefficient d'échange par convection	W /m ² • K
T ₁	Température de la source émettrice	K
T ₂	Température du produit	K
A ₁	Surface de l'émetteur infrarouge	m ²
A ₂	Surface du corps recevant le rayonnement	m ²
φ	Facteur de forme	
ε_1	Emissivité de l'émetteur	
ε_2	Emissivité du produit	
\dot{Q}_x	allure de transfert de chaleur dans le sens des x	W
\dot{m}_x	allure de transfert de matière diffusante dans le sens des x	kg /s
D_c	coefficient de diffusion (ou diffusivité).	
K	Constante de séchage.	
A	Constantes de séchage	
A	Constantes de séchage	
B	Constantes de séchage	

Introduction Générale

Introduction générale :

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), mais l'augmentation des prix et la pénurie de carburants conduits à des études et recherches profondes sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source énergétique alternative.

L'énergie soleil est gratuit et brille pour tout le monde. L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m² sur le plan horizontal. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles. [1]

L'augmentation de la production de certains produits agricoles s'est réalisée en un temps très court, les capacités de stockage par les chambres froides n'ont pas suivi le même rythme. Donc la question qui est posée: Quelles sont les techniques ou les procédés qui peuvent nous solutionner le problème?

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits et légumes est l'un des processus des grands consommateurs d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des pertes après la récolte.[1]

Le séchage solaire des récoltes, fruits et légumes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air. Il a été employé pour sécher des grains, des viandes et d'autres produits agricoles. Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle au soleil dans l'ouvert sans aides techniques. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maint problème, parmi ces derniers on cite :sont le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, coût de main d'œuvre élevé, nécessité des zones vastes, infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, à l'exemple des séchoirs solaires.[1]

L'opération de séchage des produits agro-alimentaires est simple dans son principe, mais élaborée dans son mécanisme, elle consiste à un transfert de chaleur et de masse couplés. Les mécanismes physiques qui contrôlent ces transferts de matière sont divers ; ils dépendent de la structure et de la composition des produits, mais aussi probablement des procédés utilisés pour générer ces transferts. Par souci de simplification ces transferts sont généralement modélisés par les lois de Fick qui supposent un mécanisme purement diffusif.[3]

Ce travail contribue à l'amélioration des connaissances dans le domaine du séchage solaire des produits, où nous tirons ce qui suit:

- les propriétés organo-léptiques du produit séché doivent être conservées à la fin de l'opération.

Le présent travail comporte trois 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.

Chapitre I

Gisement Solaire

Chapitre (I) : Gisement Solaire

I.1 Présentation générale du système solaire :

Le système solaire peut être défini comme étant l'ensemble des objets soumis au champ de gravitation du Soleil. D'autres effets dus à la proximité du Soleil peuvent également être considérés, comme la pression de radiation ou l'interaction avec le vent solaire.[10]



Figure (I.1): le système solaire.

I.2 Le soleil en tant qu'étoile :

Notre Soleil est la seule étoile suffisamment proche pour observer les détails sur sa surface. Nous pouvons observer des taches solaires, des trous coronaux, ...etc. résumés comme des phénomènes d'activité solaire. Par conséquent, l'étude du Soleil est importante pour l'astrophysique en général. Théories sur la structure et l'évolution stellaires peut être étudié en détail sur le Soleil.

D'autre part, le soleil est le facteur déterminant du climat sur la Terre et la structure de la magnétosphère de la Terre déterminant et influençant ainsi l'environnement spatial proche de la Terre. Le soleil fournit l'entrée principale pour la soi-disant météo spatiale. D'autres entrées sont des météorites, des débris spatiaux, etc.[3]

I.3 Paramètres physiques du soleil :

Le soleil est un pseudo sphère de plasma (matière ionisée) dont le rayon est égal à 695980 km soit 109 fois le rayon de la terre. Il est situé à une distance moyenne de 149598000km de la terre. Le diamètre angulaire du soleil, vu par un observateur terrestre a pour valeur moyenne 32' Le soleil est formé d'une masse gazeuse de $1.9891 \cdot 10^{30}$ kg composée des éléments hydrogène, hélium et d'un mélange comportant tous les autres éléments du

tableau de Mendeliev, ces composantes sont dans des proportions respectives de 80%, 19% et 1%. Sa densité est de 1,41 celle de la terre est égale à 5,5 [2]

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

❖ Le noyau:

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

❖ Une zone radiative:

Zone de combustion de type radiatif de 500.000 km d'épaisseur à travers laquelle l'énergie est véhiculée uniquement par rayonnement[2].

❖ Une zone convective:

Zone convective de 100.000 km d'épaisseur à travers laquelle l'énergie est entraînée par des mouvements de convection[2].

❖ La photosphère:

D'une épaisseur de 400km seulement, la température à sa surface est de l'ordre de 4500°K, au-delà de la photosphère la structure du soleil est généralement connue sous le nom d'atmosphère solaire[2].

❖ La chromosphère:

D'une épaisseur de 8000 km, ou la température augmente de 4500°K à 50.000°K vers l'extérieur[2].

❖ La couronne solaire:

Représentant l'auréole du soleil, s'étend jusqu'à 250 10⁶ km dans l'espace interplanétaire. La température varie de 1 à 2 millions de degrés [2].

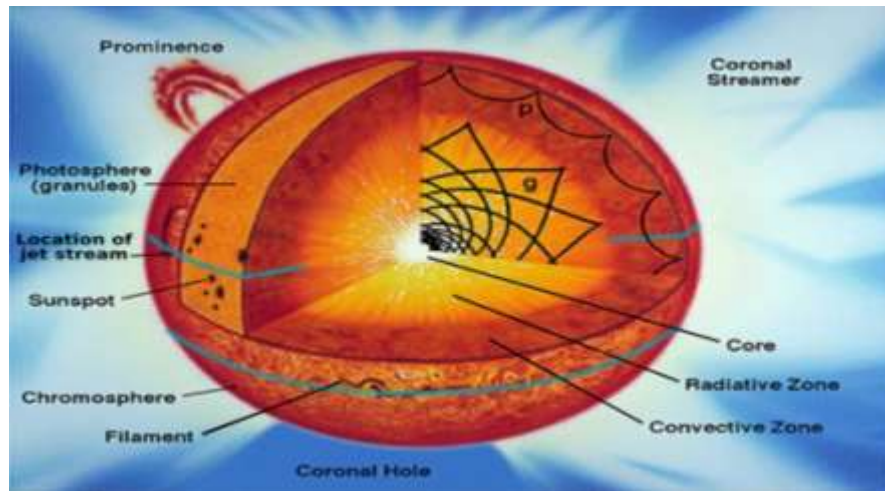


Figure (I.2): la structure stellaire du soleil.

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.4.1Energie solaire photovoltaïque :

Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux solaires photovoltaïques. L'énergie solaire photovoltaïque est également appelée énergie photovoltaïque[4].

I.4.2 Energie solaire thermique :

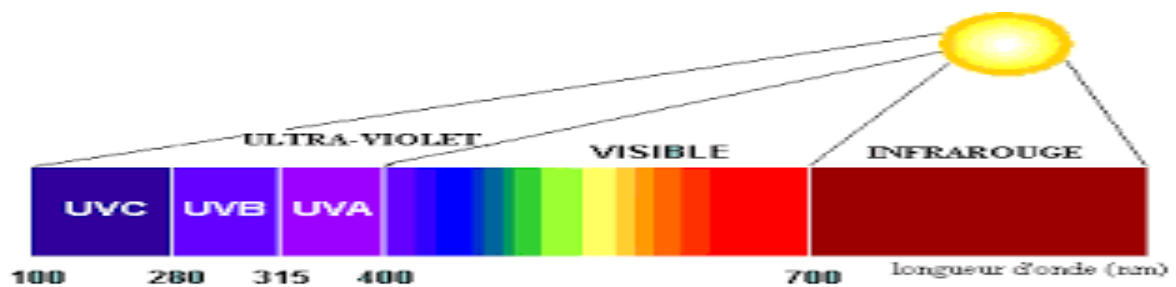
Désigne l'énergie récupérée sous forme de chaleur à partir de la lumière du soleil. L'énergie solaire thermique peut être utilisée de façon passive ou active. On parle de solaire thermique passif pour les installations permettant de chauffer directement un bâtiment par ses surfaces vitrées (effet de serre) ou l'accumulation de chaleur sur des murs exposés au rayonnement solaire. Le solaire thermique actif consiste à récupérer la chaleur du soleil dans des panneaux solaires ou capteurs solaires thermiques dans lesquels circule un fluide

caloporteur. Ce fluide chauffé dans les panneaux solaires peut stocker sa chaleur dans un ballon à accumulation qui alimente ensuite un circuit de chauffage[4].

I.5. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est une énergie produite par le soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur terre et exploitable pour la production d'électricité ou énergie thermique[4].

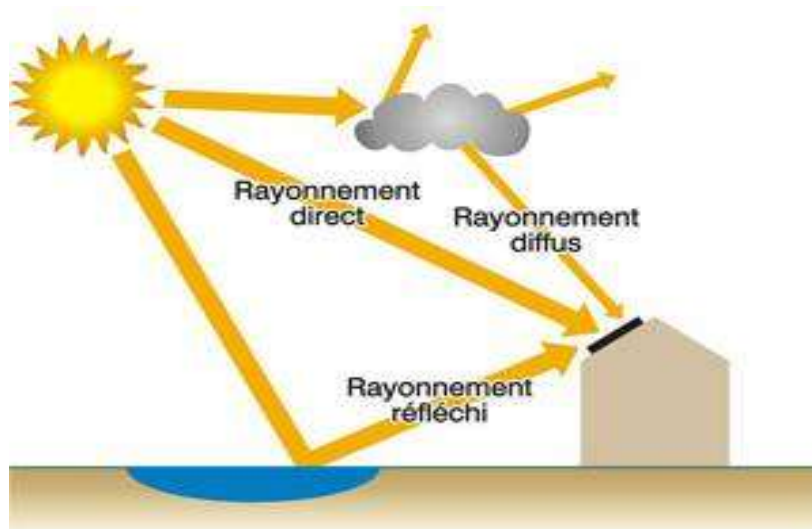
Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 °K. A une telle température, 40% de l'énergie est émis dans le domaine visible. La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction. Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune[4].



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'enseillement 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'enseillement diffus**, il s'agit des rayonnements émis par la voute céleste, les nuages.
Cette part peut être très importante par temps couvert.
- ❖ **L'enseillement réfléchi**, il s'agit des rayonnements réfléchis par l'environnement immédiat du capteur[4].

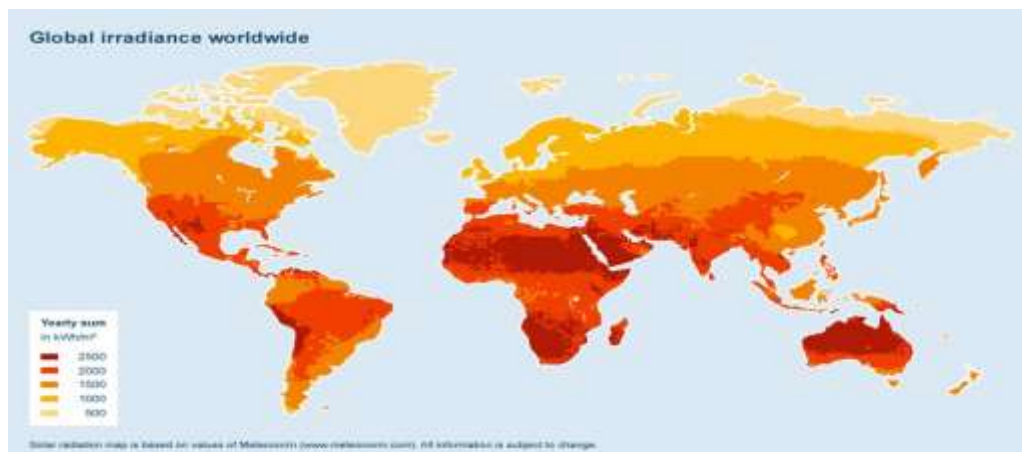


Figure(I.4): les composants du rayonnement solaire.

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 [4].



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 de Ouargla recevant jusqu’à 2100 kWh /m² [4].

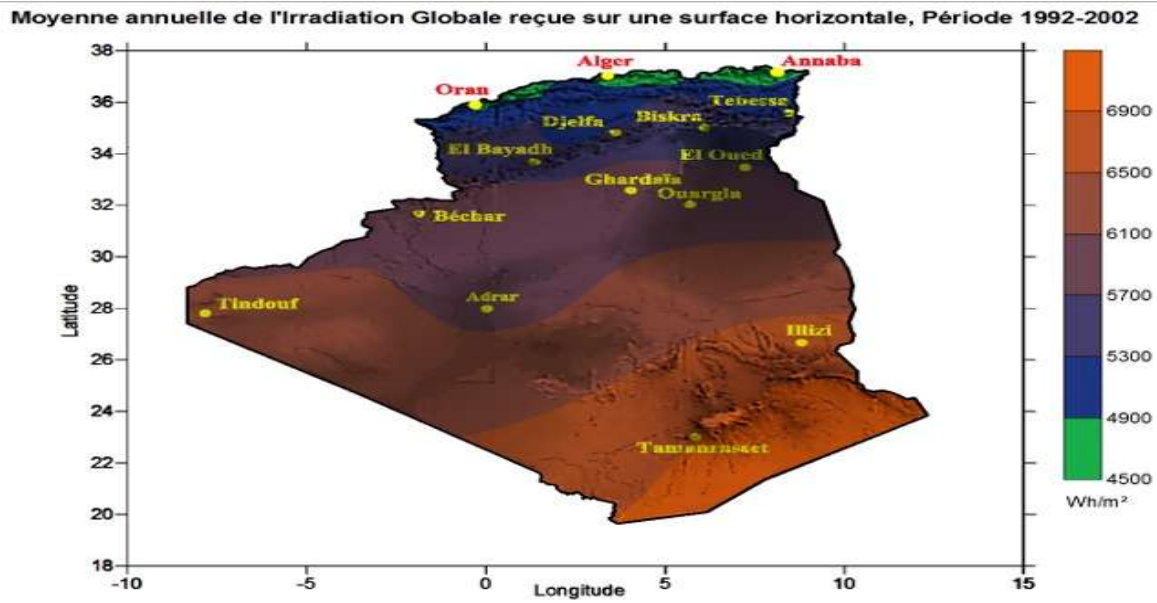


Figure (I.6): irradiation solaire en l'Algérie.

I.7. Superficie du site d'Ouargla :

La Wilaya de Ouargla est située au Sud-est du pays couvrant une superficie de 163230 km². Elle demeure une des collectivités administratives les plus étendues du pays.

- les coordonnées géographiques de la ville d'Ouargla sont :

Altitude : 141 m

Latitude : 31° 57 Nord

Longitude : 5° 24 Est

Albédo(ρ) : 0.31

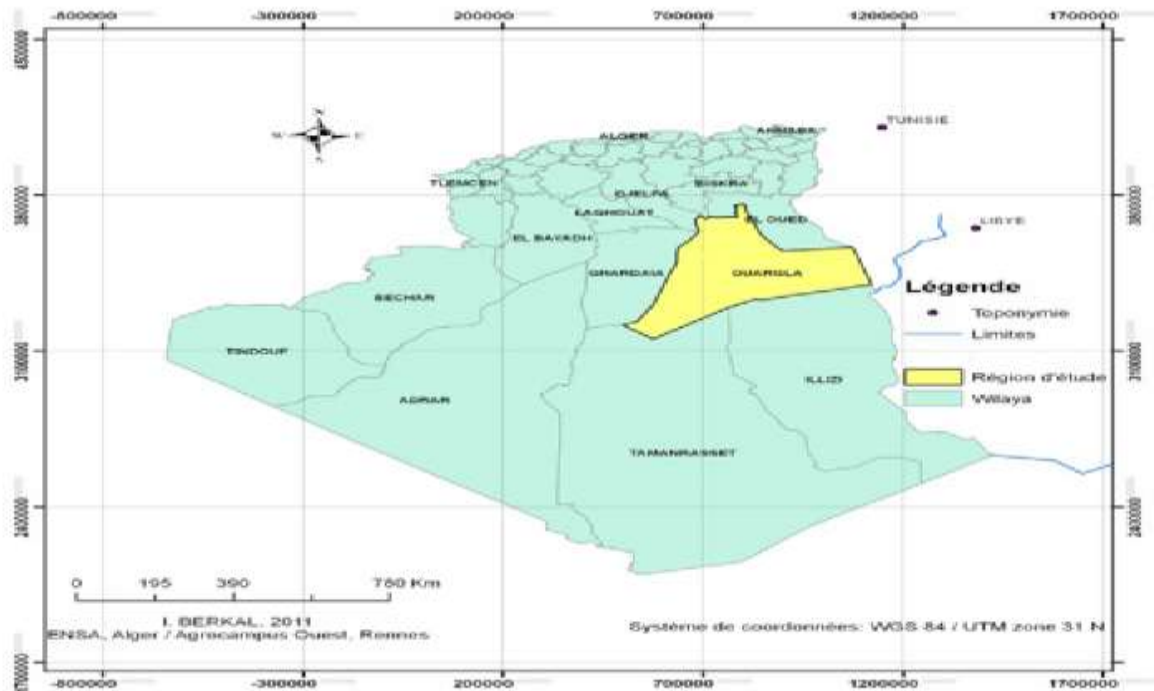


Figure (I.7): le site d'Ouargla.

I.7.1 Climat de la région d’Ouargla :

La wilaya de Ouargla est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduite, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l’écosystème.

Les températures moyennes mensuelles enregistrées au mois le plus chaud (juillet) sont de 44.6 °C. Alors que celles du mois le plus froid (Décembre) sont de 5.9 °C.

Les précipitations sont rares et irrégulières une moyen de 95.1 mm par an.

La force de vent peut être observé à toute époque de l’année, avec une vitesse moyenne égale à 18.6 km / h.

L’humidité relative enregistre un moyen de 51.75 %. Alors que l’évaporation est très importante avec une moyenne de 236.2 mm.

I.7.2.Durée d’insolation :

En se basant sur les données mesurées pour l’année 2014 par la station météo d’Ouargla, on remarque:

La ville d’Ouargla reçoit une quantité de lumière solaire très forte, avec une durée annuelle de 3236.4 heures.

Tab (I.1): Cumul insolation en heure

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Ins(h)	246.7	244.4	252.5	309.5	316.9	225.3	208.5	320.8	259.5	288.3	224.2	249.8

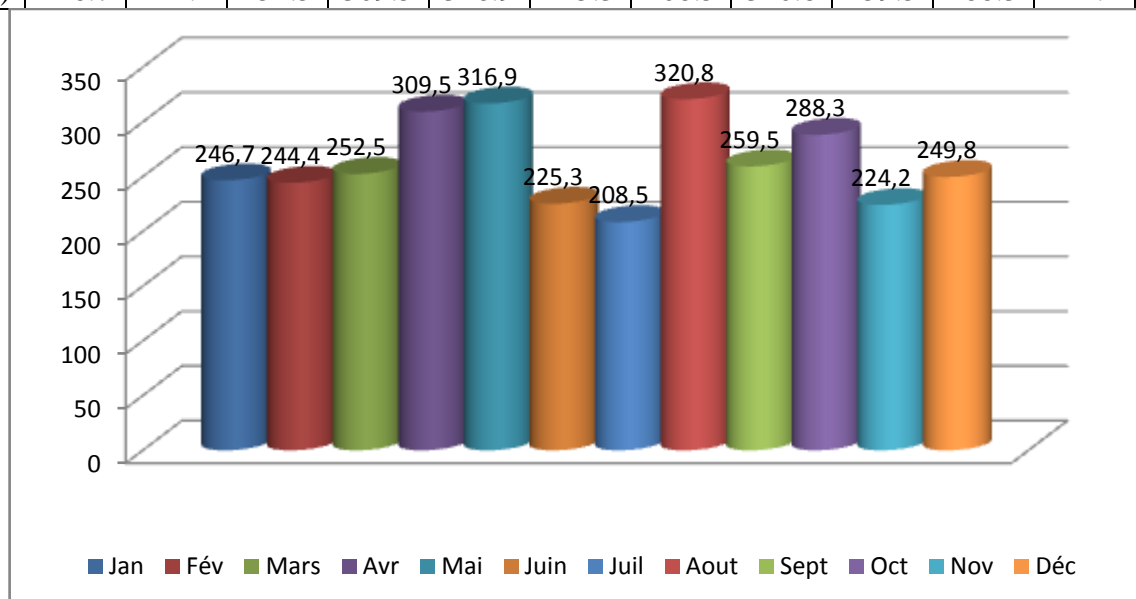


Figure (I.8): Cumul insolation en heure

I.7.3. Température :

La région d'Ouargla est caractérisée par un climat saharien aride. Les températures sont très élevées en été, la moyenne de température 42.8 °C en été et 20.4 °C en hiver.

Tab (I.2):Température moyenne en °C

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Tm°C	19.4	22.8	23.8	31.4	35.2	39.7	44.6	44.1	40.6	32.9	25.7	19.0

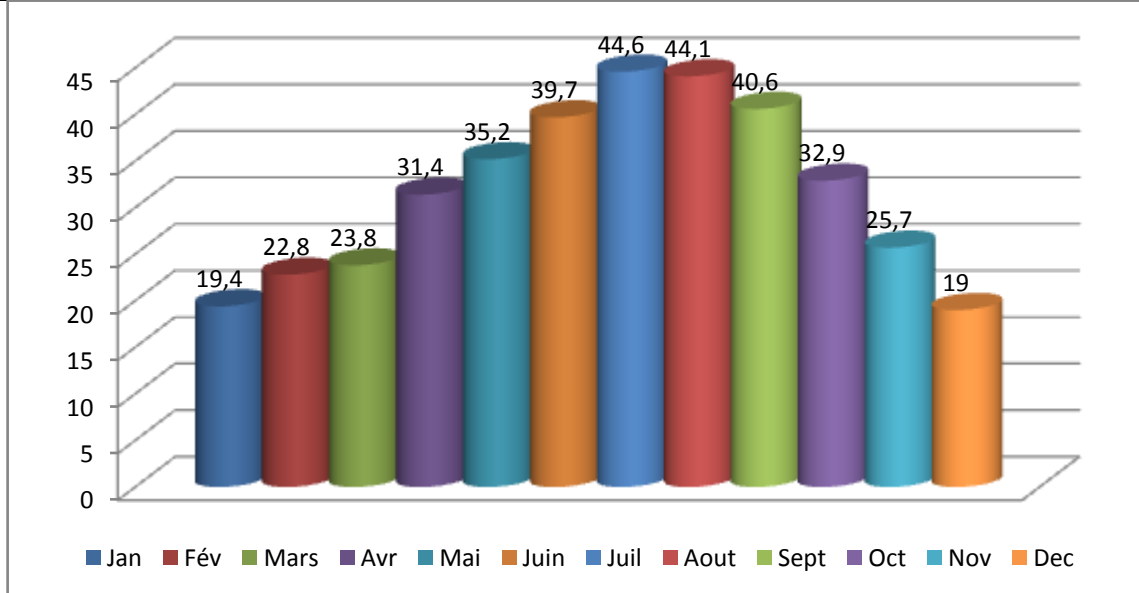


Figure (I.9): Température moyenne en °C.

I.7.4. Humidité :

L'humidité au cours de l'année, est en moyenne 51.75 %

Tab (I.3): Humidité moyenne en %.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
H %	81	63	58	42	43	40	27	33	39	48	48	79

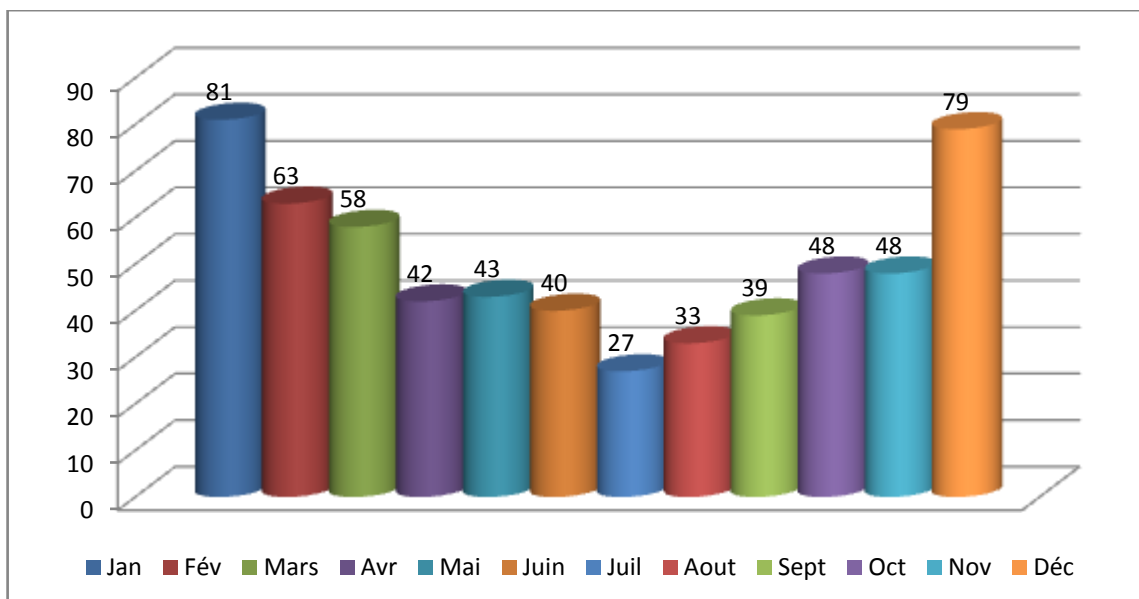


Figure (I.10): Humidité moyenne en %.

I.7.5.Vents :

Le moyenne annuel de la vitesse des vents est 18.6 km /h.

Tab (I.4): la vitesse de vente en km/h .

Moins	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
V(km/h)	14	20	26	14	29	20	15	16	16	14	20	20

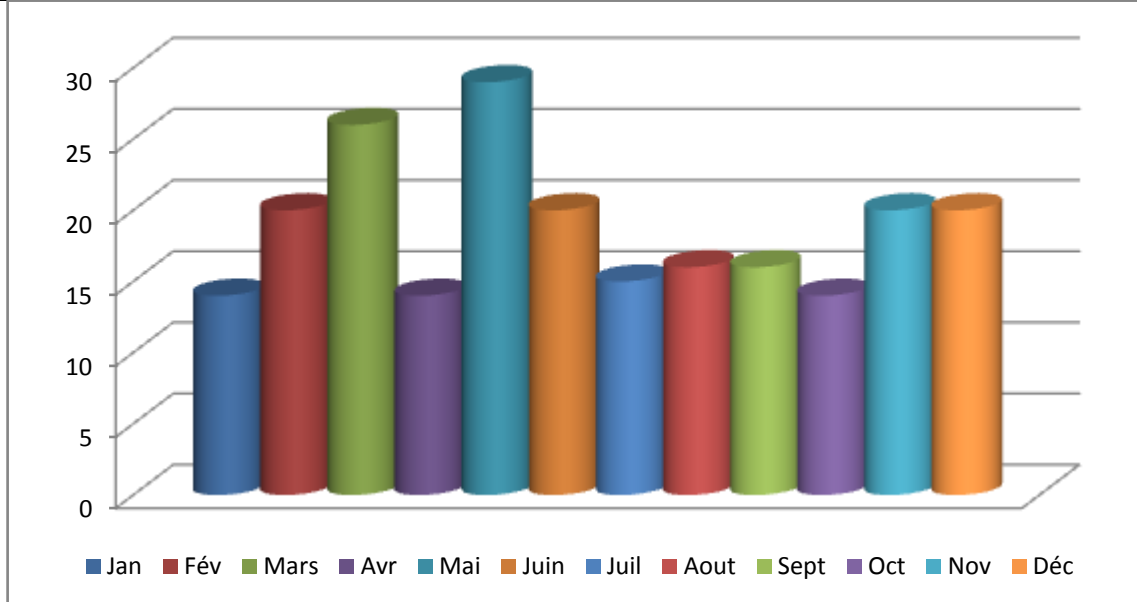


Figure (I.11): la vitesse de vente en km/h .

Chapitre II

Généralités sur le séchage

Chapitre (II) : Généralités sur le séchage.

II.1.Séchage :

II .1.1.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. L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.

Le séchage a pour but d'éliminer plus ou moins complètement le liquide d'hydratation.



Figure (II.1): les étapes de séchage solaire naturel de tomate.

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, 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) [4].

II.1.3. Théories descriptives du phénomène 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:

- Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) :

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. 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.

Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques, en la simple différence de concentration et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce 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 [1].

- Théorie capillaire :

Cette théorie repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion, dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsqu'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on observe une élévation du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie est appliquée à des produits poreux ou à des produits granulaires. Ceaglske et Hougen démontrent que pour le séchage d'un solide granulaire, l'écoulement de l'eau est entièrement dû aux forces capillaires, et totalement indépendantes de la concentration.

Krisher 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[1].

- Théorie Whitaker (1977)

Whitaker propose une nouvelle façon d'écrire les équations de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il applique un système d'équations de conservation de chaleur et de masse, pour les trois phases contenues dans le milieu (solides, liquide et gaz) et

les lois de la thermodynamique. Ensuite il applique pour chacune de phases la prise de moyenne avec certaines simplifications, en prenant un volume élémentaire représentatif à l'échelle des pores; ces paramètres permettent de considérer le milieu poreux comme un milieu continu équivalent. Il aboutit à un système d'équations permettant de calculer les différents paramètres décrivant le séchage.

Cette étude peut être considérée comme le point de départ de nouvelles et modernes théories, puisqu'elle donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux[1].

- Théorie de Luikov (1934)

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[1].

- Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938) :

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. Berger et Pei proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillaires et au gradient de concentration, et la diffusion de vapeur est due au gradient de pression de la vapeur[1].

- Théorie de Philip et De Vries (1957) :

Philip et De Vries, proposent que le mouvement de l'eau soit dû à la capillarité et à la diffusion de la vapeur. Cette théorie est basée sur le développement d'un système d'équations décrivant l'humidité et le transfert de chaleur dans les matériaux poreux[1].

II.2. Différentes méthodes de séchage :

II.2.1 Séchage mécanique :

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, Centrifugation, compression et filtration) [6].

II.2.2 Séchage chimique :

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium,...) pour extraire l'eau [5].

II.2.3 Séchage thermique :

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur [7].

II.3. Caractéristiques de l'air de séchage :

II.3.1 Humidité :

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

II.3.1.1 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 :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} [\text{kg}_v \cdot \text{kg}_{\text{as}}^{-1}] \quad (\text{II.1})$$

II.3.1.2 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.

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} 100 \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad (\text{II.2})$$

P_v : pression partielle de la vapeur dans le mélange.

P_s : pression de saturation .

II.3.2 Température :

II.3.2.1 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 [5].

II.3.2.2 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 [5].

II.3.3 Vitesse :

On appelle vitesse de séchage la masse de liquide évaporée pendant l'unité de temps à travers une surface unitaire d'évaporation.

Cette vitesse est donnée par :

$$\frac{\dot{m}_v}{A} = - \frac{m_s}{A} \frac{dH}{d\tau} \quad (\text{II.3})$$

\dot{m}_v = flux massique de vapeur.

m_s = masse du solide sec.

$\frac{dH}{d\tau}$ = variation de l'humidité du solide avec le temps.

A = surface à travers laquelle se produit l'évaporation.

Le signe – indiquant que l'humidité diminue avec le temps.

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 gaz sécheur.
- les conditions de mise en contact des deux phases ainsi que du mode de transfert de la chaleur [8].

II.4. Principes de séchage :

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

II.4.1 Séchage par « Ebullition »

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 total ambiante **Pt** :

$$P = Pt \quad (*)$$

- Pour l'eau pure, à pression atmosphérique, la température nécessaire est 100 °C.
- Pour des solutions aqueuses, la pression de vapeur d'eau est abaissée par la présence des corps dissous : la température nécessaire est donc supérieure à 100 °C.
- Pour des « solides » humides enfin, les phénomènes sont analogues : selon l'état de l'eau dans le produit, celle-ci bout à 100°C ou plus haut.

Dans tous les cas, la température d'ébullition dépend aussi de la pression, et en particulier est plus basse sous vide.

Cette opération, utilisée en industries alimentaires et pharmaceutiques, s'effectue généralement sous vide, sur le produit préalablement congelé.

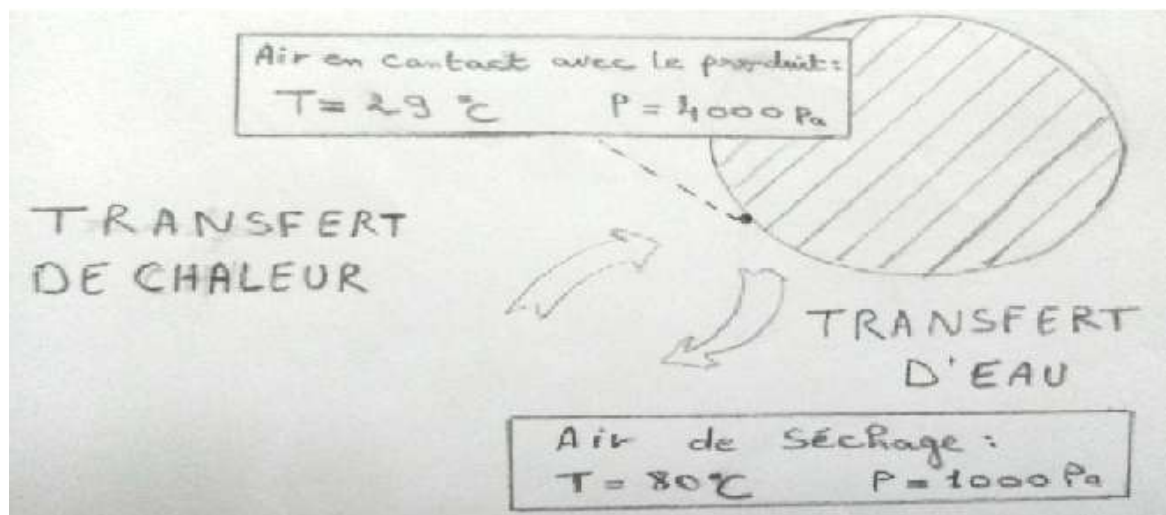
II.4.2 Séchage par « Entrainement » :

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 :

_ Qu'un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.

_ Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Un exemple, typique du début de séchage d'un produit très hydraté, est donné en (fig.II.2). Les concentrations de l'air en eau sont exprimées en pressions partielles d'eau (Pa = Pascal).



Figure(II.2): Séchage isenthalpique par entrainement.

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.

On remarque que la température de surface du produit (29°C dans l'exemple précédent) est loin des 100°C que demanderait l'ébullition à la pression atmosphérique [9].

II.5. Modes de séchage :

II.5.1 Séchage par conduction :

Dans le séchage par conduction. La matière à sécher se trouve en contact avec une paroi solide, portée à température élevée par circulation d'un fluide caloporteur (fumées, vapeur d'eau, eau chaude).

Sous l'action de la chaleur ainsi transmise par conduction, le liquide s'évapore ou se vaporise selon que la température est inférieure ou supérieure au point d'ébullition. La vapeur fumée est entraînée par action d'un léger courant de gaz auxiliaire au par dépression.

Pour que le transfert de chaleur de la paroi à la matière en cause, se réalise dans de bonnes conditions, il faut que les caractères physiques de cette matière favorisent l'établissement d'un bon contact. C'est ce qui explique que le séchage indirect convienne aux liquides, aux solides pâteux ou pulvérulents ou en suspension ainsi qu'aux solides en feuilles (papier, tissu).

Etant donné que la conductivité thermique d'un solide mouillé n'est pas homogène - elle se compose des conductivités thermiques du solide sec, des pores remplis de liquide et des pores d'un mélange vapeur /gaz - sa valeur varie en fonction de la teneur en humidité du solide.

La couche du solide en contact avec la paroi se sèche en premier lieu, et l'épaisseur de la couche sèche augmente au cours de l'opération. Pour limiter le temps de séjour que le produit sec doit subir à température élevée on doit éviter des couches de solide trop importantes [8].

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation:

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad (II.4)$$

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.5.2 Séchage par convection :

En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques [1].

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = h A (T_a - T_s) \quad (II.5)$$

Avec :

- Q (W) : la quantité de chaleur transférée par unité de temps.
- A (m^2): surface d'échange.
- $(T_a - T_s)$ ($^{\circ}K$) : l'écart entre la température d'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher.
- h ($W / m^2 \cdot K$) : coefficient d'échange par convection.

II.5.3 Séchage par rayonnement :

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. La quantité de chaleur transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par [1]:

$$Q = A_1 \cdot C \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \cdot \varphi \quad (II. 6)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (II.7)$$

Avec:

T_1 : Température de la source émettrice (K).

T_2 : Température du produit (K).

A_1 : Surface de l'émetteur infrarouge (m^2).

A_2 : Surface du corps recevant le rayonnement (m^2).

φ : Facteur de forme.

ε_1 : Emissivité de l'émetteur.

ε_2 : Emissivité du produit.

II.6. Transfert de Chaleur et de matière :

II.6.1 .Transfert de chaleur et matière dans le produit agricole :

La chaleur diffuse dans un milieu lorsque la température n'y est pas la même partout. Plus précisément, pour un milieu immobile, on écrit la loi de Fourier, où intervient le gradient de température [9]:

$$\dot{Q}_x = -A \cdot \lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \quad (\text{II.8})$$

\dot{Q}_x = Allure de transfert de chaleur dans le sens des x (W).

A = Surface d'échange compté perpendiculairement aux x (m^2).

$\frac{\delta T}{\delta x}$ = Gradient de température dans le sens des x ($^{\circ}C/m$).

_ De même, il y a **transfert de matière** lorsque dans un milieu existe un gradient de concentration en une substance susceptible de diffuser. La loi de Fick, pour un milieu immobile, dit [9] :

$$\dot{m}_x = -S \cdot D_c \cdot \frac{\delta C}{\delta x} \quad (\text{II.9})$$

\dot{m}_x = Allure de transfert de matière diffusante dans le sens des x (kg /s).

D_c = coefficient de diffusion (ou diffusivité).

$\frac{\delta C}{\delta x}$ = Gradient de concentration de matière dans le sens des x (unités de concentration/m).

II.6.2. Transfert de chaleur et matière dans l'air entourant le produit :

Dans la pratique industrielle, l'air est le plus souvent en régime turbulent dans le séchoir. Il s'établit alors une "**couche limite**" (fig.II.3): au voisinage immédiat du produit (sur une épaisseur de l'ordre du dixième de millimètre), s'établit un écoulement en régime surtout

laminaire. L'air (A) au contact du produit est considéré comme immobile et en équilibre de température et d'humidité avec la surface du produit.

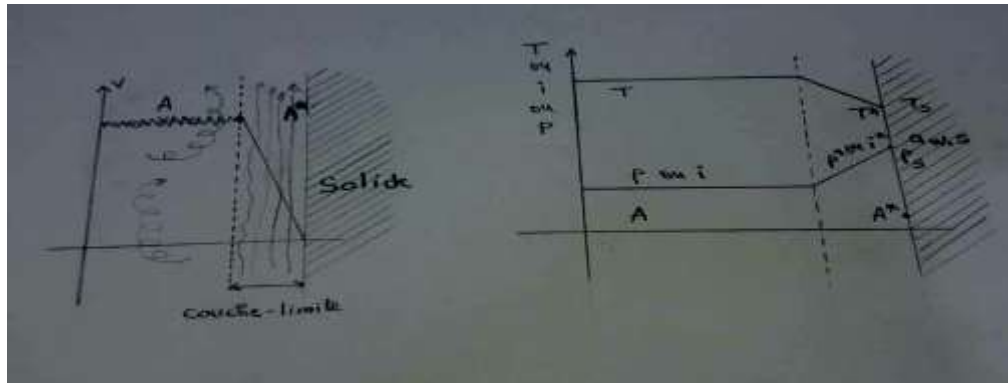


Figure (II.3): Transfert entre l'air et la surface du produit.

Ces phénomènes caractérisent la convection de chaleur et de matière. On admet alors que toute la résistance aux transferts se situe dans la couche-limite, que les équations de Fourier et de Fick s'appliquent malgré le mouvement de l'air.

II.6.3. Transfert de l'eau en séchage :

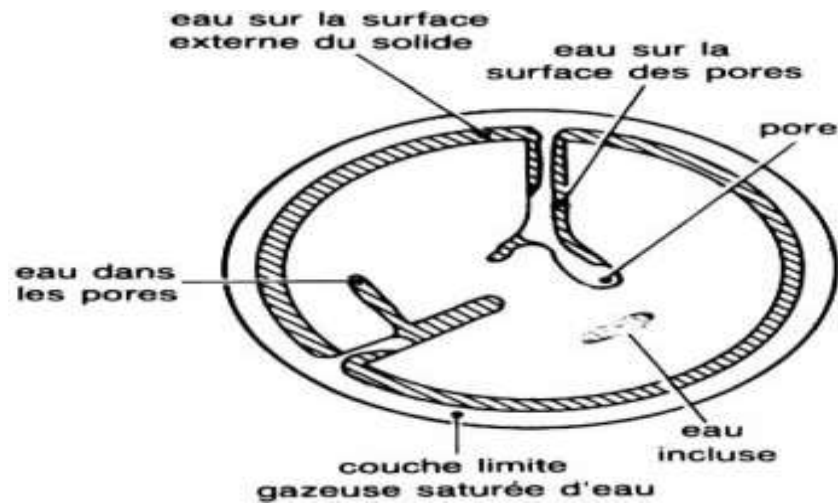
Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure II.4) [1].

Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur, dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le produit, influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est important) [5].

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque 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.

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 [1].



Figure(II.4) : Représentation schématique d'un solide humide

II.7. Cinétique du séchage :

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps, au celle donnant la vitesse de séchage $\left(-\frac{dx}{dt}\right)$ en fonction de x. Ces courbes sont généralement obtenues pour différents

Conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles Caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Sur la courbe schématique présentée à la Figure (II.5), on peut distinguer trois phases:

II.7.1. Période de mise en température (Période 0) :

L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide correspondant à l'environnement séchant (zone A-B). Cette période est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est important.

I.7.2. Période à vitesse constant :

Durant cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet

des forces capillaires, l'équilibre entre la diffusion dans la couche limite (à l'interface air matériau) et les mécanismes de transfert d'humidité interne au sein du produit vers la surface est établi, la température reste uniforme dans le produit car le flux de chaleur échangé avec l'air chaud est entièrement utilisé pour la vaporisation de l'eau à la surface, cette période s'achève lorsque les forces capillaires ne peuvent plus soutenir la vaporisation l'eau de surface, et couvre généralement une grande partie du temps de séchage.

II.7.3. Période de ralentissement :

Pendant cette phase, les forces capillaires ne sont plus suffisantes pour acheminer l'eau vers la surface du produit. La vitesse de séchage ne peut plus être maintenue constante et elle commence à décroître.

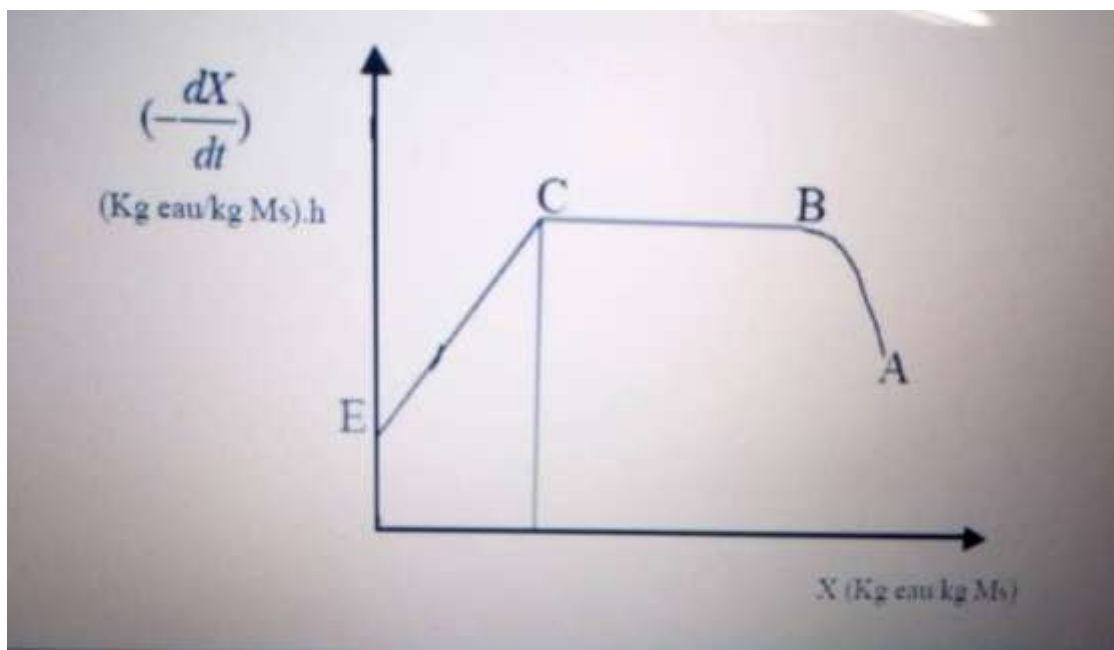


Figure (II.5): Cinétique de séchage.

En réalité, le séchage est beaucoup plus complexe car le déplacement de l'eau est influencé par plusieurs phénomènes :

- Les forces de capillarité qui entraînent une migration de l'eau en sens inverse du gradient de température.
- Les différences de pression partielles qui entraînent un déplacement de l'eau sous forme vapeur.
- La migration des matières solubles (sucre, sels) à la surface qui entraînent une résistance supplémentaire.

- La résistance au déplacement est fonction de la structure cellulaire ou fibreuse du produit.
- La déformation du produit très importante pour les produits biologiques.

II.8. Différents modèles des cinétiques de séchage :

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de changement d'humidité, et le transfert de chaleur et de masse dans le séchage.

Ces modèles sont classés en trois types :

II.8.1. Les modèles empiriques

Ces modèles sont basés sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est limitée car chacun d'eux est spécifique au type de produit ainsi aux conditions expérimentales de son séchage. Les modèles ne sont donc pas extrapolables au delà des limites de l'expérience[].

II.8.1.1. Modèle empirique de Wang Singh (1978) :

Wang Singh a proposé un modèle empirique, pour décrire les caractéristiques de séchage du produit utilisé, suivant l'équation:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 1 + at + bt^2$$

a et b sont des constantes de séchage.

II.8.2. Les modèles diffusifs : (Modèle de Lewis (1921))

Le modèle de Lewis est la solution générale de la loi de Fick. Ce modèle considère que la diffusion basée sur la migration d'humidité. Le modèle simple de Lewis est donné comme suit:

$$\frac{dX}{dt} = -k (X - X_e)$$

La forme générale du modèle de Lewis prend la forme exponentielle suivante :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k t)$$

k: est une constante de séchage, qui dépend de la température, l'humidité absolue et la vitesse de l'air ainsi du diamètre du produit utilisé.

Ce modèle a été utilisé par Kiranoudis et autres, pour décrire les courbes de séchage [1].

II.8.3. Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse :

Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les modèles qui détaillent le plus finement les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage.

Ils permettent de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur. Les travaux de Luikov, Philip et De Varies, Krischer, Glaser et Whitaker ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse. Les plus connus de ces modèles sont les suivants:

II.8.3.1 Modèle de Henderson et Pabis (1961) :

C'est la solution de la deuxième équation de Fick.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = A \cdot \exp(-kt)$$

A et k sont des constantes de séchage.

Ce modèle a été utilisé par Sebaii et autres, pour estimer le temps de séchage

II.8.3.2. Modèle de Page (1949) :

Page a proposé une équation de séchage de la forme suivante:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k t^n)$$

k et n sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et de la nature du produit, Ce modèle a été utilisé par I. Doymaz [1].

II.8.3.3. Modèle Logarithmique :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-k t) + c$$

k, a et c sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et sa vitesse. Ce modèle a été utilisé par Inci Türk et Phelivan ,pour décrire les courbes de séchage [1].

II.9.Séchage et qualité :

La destination alimentaire du produit rend nécessaire une attention particulière à la qualité du produit fabriqué.

II.9.1. Types de modification de la qualité :**II.9.1.1. Modifications biochimiques dues à la température :**

Une température élevée pendant un certain temps provoque sur les produits biologiques des modifications, généralement considérées comme défavorables, dont les principales sont les suivantes :

_ Réactions de Maillard (petit, 1964), c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle, notamment de lysine.

_ Oxydations de matières grasses (rancissement).

_ Destruction de vitamines.

_ Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant (cas de l'utilisation d'additifs protéiques en charcuterie ou pâtisserie).

_ Réactions enzymatiques : si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elle produit leurs effets : brunissement des poly phénols, hydrolyse des liquides, Etc.[9]

II.9.1.2. Pertes d'arômes :

Le séchage étant un procédé de séparation fondé sur la volatilité, il est normal que non seulement l'eau, mais tous les autres produits volatils soient également éliminés du produit. C'est le cas des arômes que contiennent naturellement les produits biologiques destinés à l'alimentation.

En réalité toutefois, la perte d'arômes est moindre que celle à laquelle on pourrait s'attendre sur la base de leurs volatilités.

II.9.1.3. Modifications physiques et mécaniques :

Outre cette évaporation d'arômes, le séchage provoque diverses altérations physiques et mécaniques notamment :

- _ Fusion et migration de matières grasses.
- _ Modifications de forme (fig.II.6) : les solides se recroquevillent (exemple : morceaux de légumes), se craquèlent (cas des pâtes alimentaires) et ces déformations ne sont généralement pas annulées lors de la réhydratation. C'est l'avantage principal de la lyophilisation de conserver intégralement la forme et la dimension du produit, rendant en même temps sa réhydratation très facile.

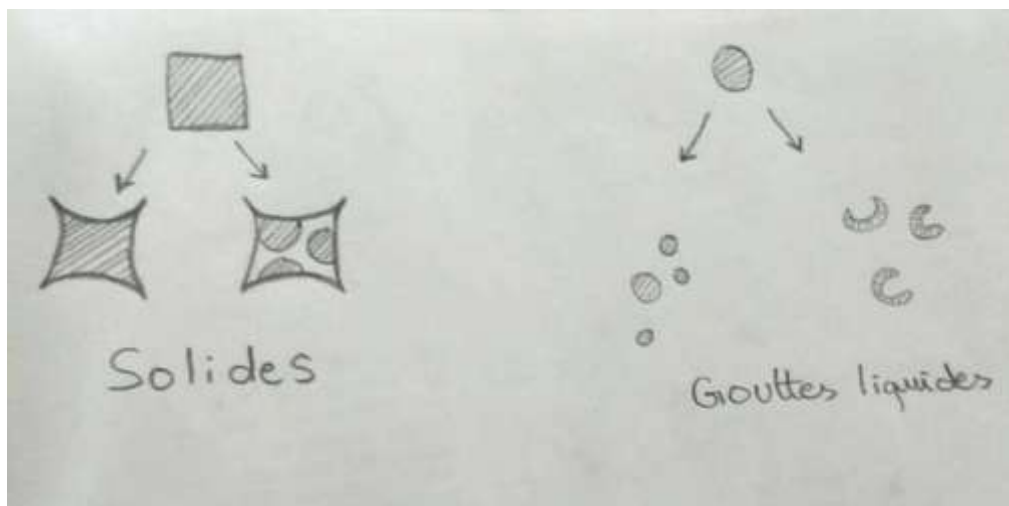


Figure (II.6): Effets mécaniques du séchage.

II.9.2. Le problème du stockage :

Beaucoup des idées précédentes sont valables pour la période de stockage : modifications biochimiques et pertes d'arômes. Un facteur supplémentaire est le risque de reprise d'humidité, dont les effets sont désastreux : collage, moisissure,....

Mise à part la température de conservation, importante mais sur laquelle on a peu de prise (l'intérêt du séchage étant de ne pas nécessiter de stockage réfrigéré), c'est donc sur l'**emballage** que repose la conservation de la qualité lors du stockage :

- _ Étanche à l'eau, il évite la reprise d'humidité.
- _ Étanche à l'oxygène, quand nécessaire, il réduit les oxydations, on peut aller jusqu'à la conservation en atmosphère inerte (azote, CO₂ ou vide).

_ Etanche aux arômes, il empêche leur départ.

_ Opaque, il réduit l'allure d'éventuelles réactions catalysées par la lumière (oxydations, décolorations).

_ Sa résistance mécanique empêche les brisures ou cassures du produit lorsqu'il est fragile.

II.10. Domaines d'utilisations :

II.10.1. Industrie agroalimentaire :

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage.

Le séchage peut être une étape nécessaire à la conservation de l'aliment. Il existe moins de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire. On peut citer par exemple :

- les pâtes alimentaires.
- le sucre cristallisé est obtenu par évaporation.
- les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation.
- le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché jusqu'à devenir du sel raffiné.
- Certains produits en poudre : cacao, lait.

II.10.2. Industrie du bois :

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois [4].

II.10.3. Industries alimentaires et pharmaceutiques :

- Séchage des plantes médicinales à la ferme.
- Séchage des feuilles de la menthe verte.

(Dans ce cas on utilise l'opération de **lyophilisation**, où l'eau est sublimée (passage direct de l'état de glace à l'état de vapeur). S'effectue généralement sous vide, sur le produit préalablement congelé).

Chapitre III

Les séchoirs solaires

Chapitre (III) : Les séchoirs solaires

III.1. Définition :

Le séchoir solaire consiste en une caisse plate (absorbeur) qui est inclinée et qui est ouverte en bas et en haut pour que l'air puisse circuler. La caisse est couverte d'une vitre ou d'une feuille de plastique transparent. Au fond de la caisse il y a une tôle ondulée peinte en noir. La couleur noire absorbe le rayonnement solaire et chauffe l'air dans la caisse. [14]

III.1. Classifications des séchoirs industriels :

Les séchoirs industriels sont classés selon :

a) Propriété physique de la matière

Les propriétés physiques de la matière à sécher sont le facteur le plus important pour le choix du séchoir.

b) Méthode d'approvisionnement en énergie

Lorsque l'énergie est fournie au produit (transfert de chaleur par convection) par l'air chauffé, le séchoir est classé de type convectif. Si la chaleur est transférée au produit avec un contact direct, le séchoir est classé de type conductif.

c) la gamme de température

Les systèmes de séchage peuvent être classifiés selon la gamme de température de fonctionnement, soit à hautes températures ou à basses températures. Les types de séchoir à hautes températures soient , sont employés lorsque le produit nécessite un gaz très chaud, et reste en continuité jusqu'à ce que le produit soit séché (le bois par exemple). Pour les types de séchoir à basses températures, ces dernières soient inférieures à 100°C.

d) mode de répartition des nourritures

- Séchage en couche mince:

Les fruits et légumes sont posés sur des claies, et séchés en couche mince lorsque l'air chaud traverse les produits de bas vers le haut.

- Séchage en couche épaisse:

Ce mode de séchage est généralement utilisé pour les fourrages, les céréales, le café etc. l'air chaud est soufflé dans un amas des produits, reposant sur une grille perforée [1].

III.2. Différents types des séchoirs solaires :

Il y a plusieurs types des séchoirs Solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité. On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects.[1]

- ❖ Un séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement les produits, le séchoir indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement.
- ❖ Un séchoir est à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon et un séchoir en convection ventilée (forcée) si elle est assurée par une action mécanique[11].

III.2.1. Les séchoirs naturels:

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposés même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant (figure III.1).

- ❖ Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de 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 aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.
- ❖ Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché 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, poussières) [1].

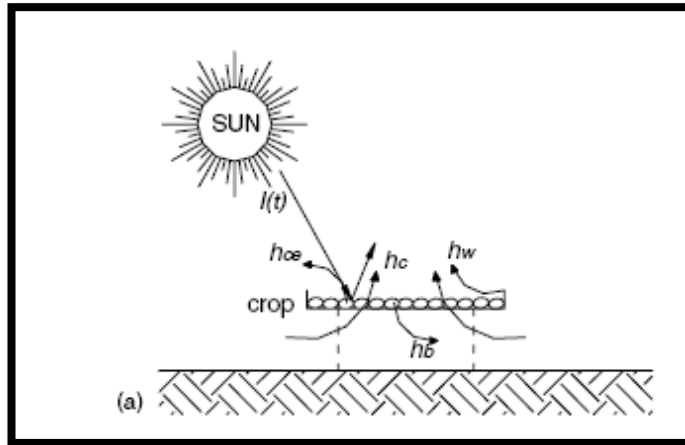
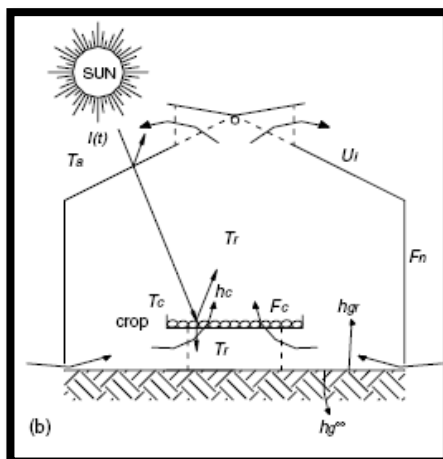


Figure (III.1):Schéma du séchage solaire en plein air

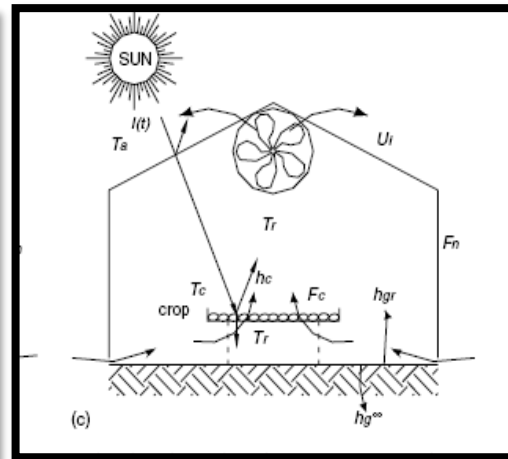
III.2.2.Séchoirs solaires directs :

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les 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 du au réchauffement (effet de cheminée), ou par action du vent sur les ouvertures, fait de la rusticité des modèles [4].



Figure(III.2): Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle.



Figure(III.3):Schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée.

Ce type de séchage présente: [4]

Avantages :

- ❖ Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- ❖ Par besoin de main d'œuvre qualifiée.
- ❖ Grandes possibilités de conception.

Inconvénients :

- ❖ Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et B, décoloration.
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

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

III.2.3.Séchoirs solaires indirectes :

Le séchoir solaire indirect se compose essentiellement de deux parties: en amont un isolateur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur où l'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de dessiccation contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur[2].

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 (figure III.4).

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 [4].

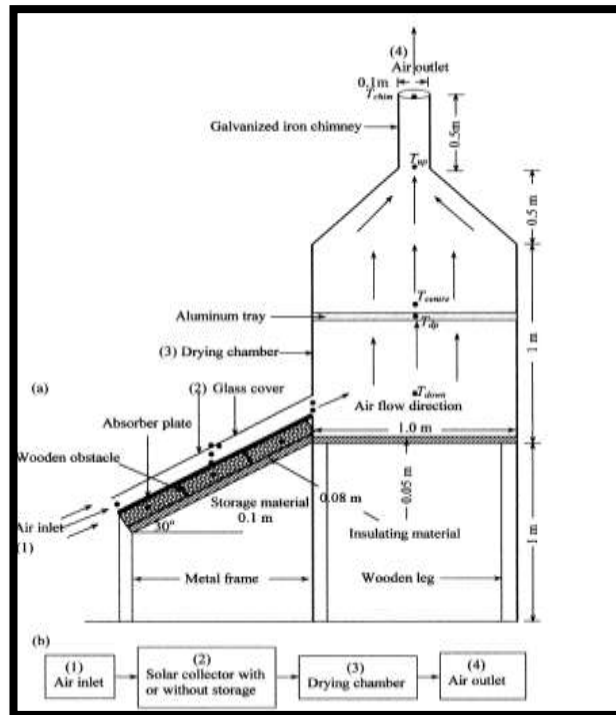


Figure (III.4): Schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle

Avantages :

- ❖ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il présente l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive.
- ❖ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

Inconvénients :

- ❖ Cout important.
- ❖ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.

Principe de fonctionnement :

Dans le séchoir solaire indirect, le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, et se chauffe, sa température augmente. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage, cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [4].

Différents types :

Armoire indirecte : Le collecteur solaire est séparé de la chambre de séchage.

Bac : Séchoir indirect avec courant d'air forcé.

III.2.4. Les séchoirs solaires tunnels:

- Dans un séchoir tunnel, il y a sur la longueur du séchoir, une succession d'états de température et d'humidité.
- Ils sont tous à ventilation mécanique, soit à l'aide d'un simple ventilateur, placé en dehors du séchoir, soit par des ventilateurs multiples placés à l'intérieur de celui-ci (figure III.5).
- Il existe des séchoirs tunnels, non seulement pour les industries du bois mais aussi pour le séchage de peinture, de vernis, et le séchage avant cuisson des produits céramiques (tuiles, briques, poteries culinaires, assiettes, etc..)[1].

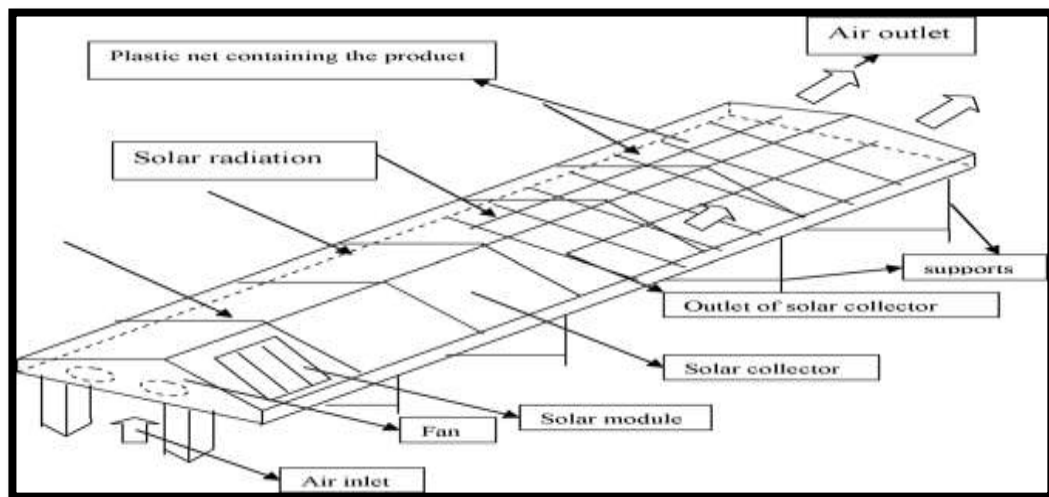


Figure (III.5): Schéma d'un séchoir solaire tunnel

III.3. les capteurs solaires :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable (chaleur), le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau ou air).

III.3.1.Types de capteur solaire :

III.3.1.1.Capteurs plans non vitrés :

Ces capteurs sont constitués d'une surface réceptrice qui absorbe le rayonnement solaire direct et diffus (appelé absorbeur) pour le transmettre au fluide caloporteur qui circule dans un réseau de tubes et directement en contact avec la surface absorbante.

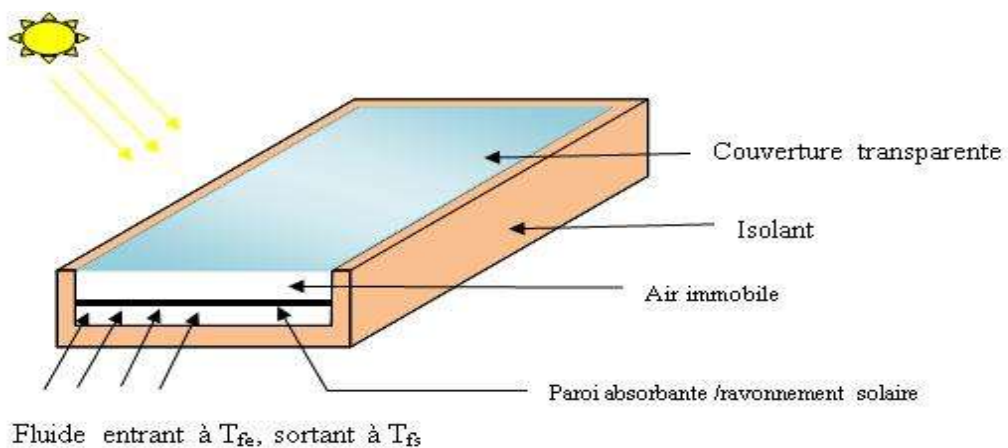


Figure(III.6): Capteur plan non vitrés

III.3.1.2. Capteurs plans vitrés :

III.3.1.2.1. Capteurs plans vitrés à air :

Les capteurs plans vitrés sont les plus répandus du fait de leur meilleures performances dues à une meilleur isolation mai aussi des avancées technique réalisées sur la qualité de l'absorbeur qui est une surface absorbante. Le vitrage à limiter les pertes thermiques convectives. La vitre permet de créer un effet de serre dans le capteur grâce à la propriété du verre pratiquement opaque dans l'infrarouge réduisant ainsi l'échange avec le milieu extérieur. On trouve également une couche isolante sur la face arrière pour éviter les pertes par conduction. Leur application c'est le chauffage d'air pour le séchage.



Figure(III.7): Schéma d'un capteur plan à air

III.3.1.2.2. Capteur plans vitrés à eau :

Même définition que le capteur plans vitré à air mais leurs applications les plus répandues sont la production d'eau chaude sanitaire

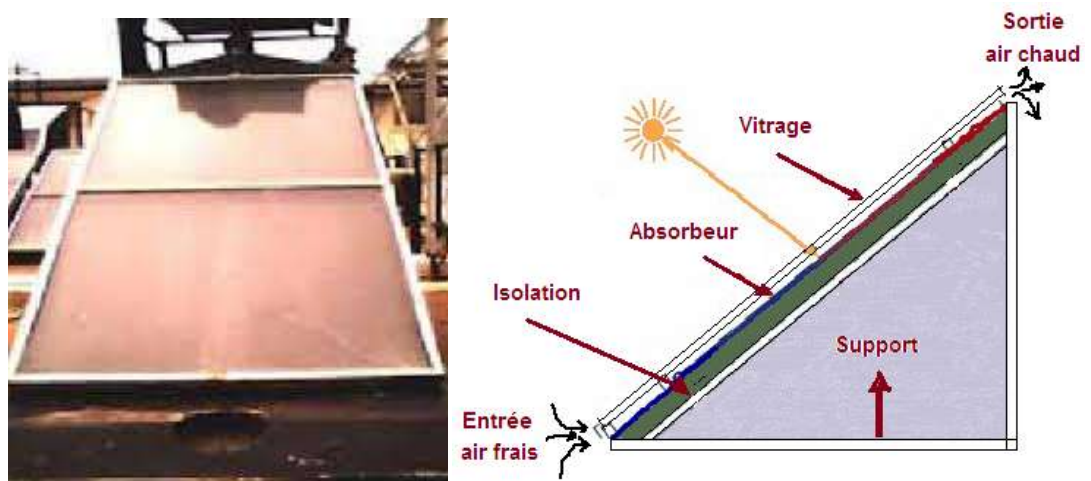


Figure(III.8): Capteur solaire pour le chauffage d'eau.

III.3.2.Présentation du capteur solaire plan à air :

Le capteur solaire plan à air est type de capteur solaire thermique le plus répandu. Il utilise l'effet de serre pour capter l'énergie thermique du soleil.

Les capteurs solaires plans à air sont généralement composés d'un châssis sous forme de coffre, d'un isolant en fond, d'un absorbeur de couleur noire dans lequel circule le fluide caloporteur et d'une vitre.



Figure(III.9):Configuration et schéma de principe d'un capteur solaire plan à air

III.3.3.Composants du capteur solaire plan:

Chaque ensemble capteur est constitué :

- D'une couverture transparente.
- D'un absorbeur avec circuit échangeur et revêtement de surface.
- D'une isolation thermique sur les côtés et à l'arrière de l'absorbeur.
- D'une carde et d'un coffre.

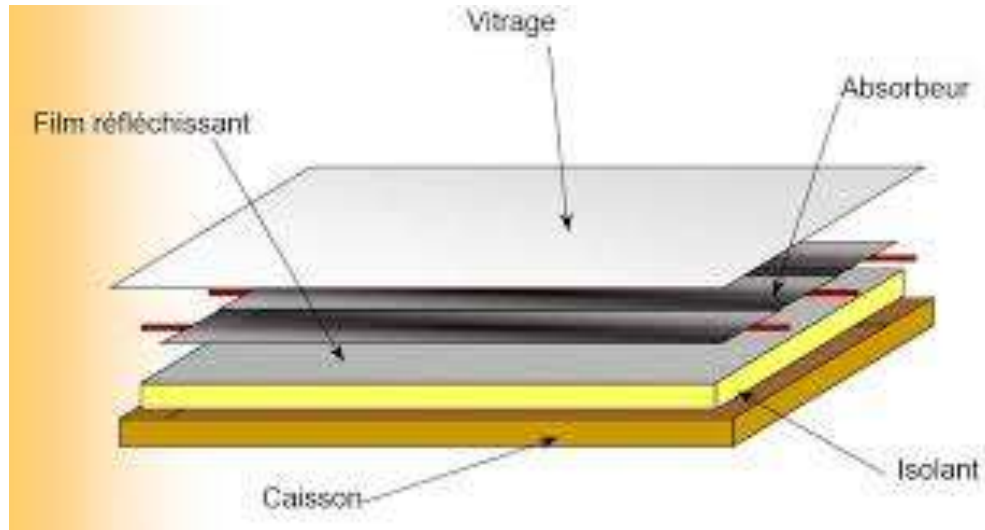


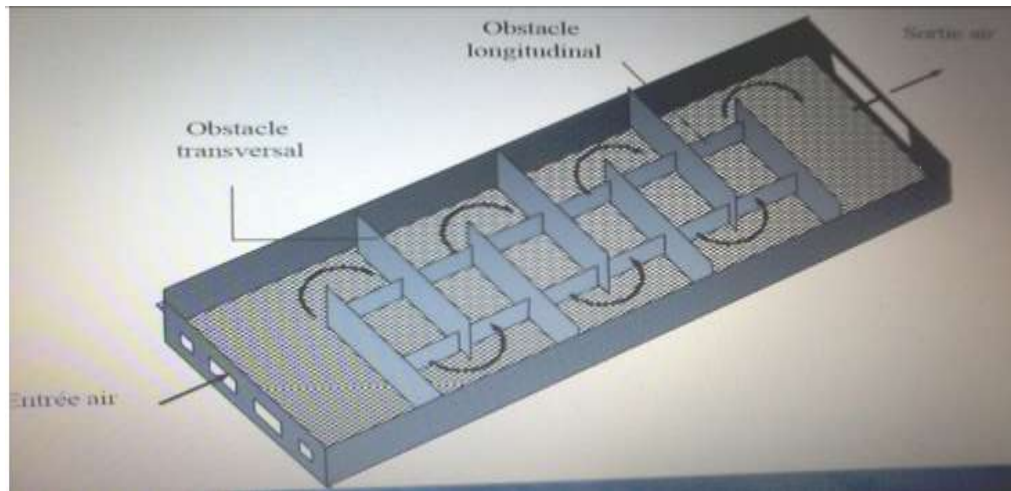
Figure (III.10): Composants d'un capteur solaire plan.

III.3.4. Amélioration des capteurs solaires plans à air:

(Présentation de quelques travaux sur l'amélioration des capteurs solaires)

III.3.4.1.A. Ahmed-Zaid et al :

Dans le cas des obstacles fixés sur l'isolant, le choix des formes géométriques d'obstacles utilisés doit satisfaire certains critères. En effet, la forme et la disposition des obstacles affectent l'écoulement d'air pendant sa trajectoire. Les obstacles assurent une bonne irrigation de l'absorbeur, créent la turbulence et réduisent les zones inactives dans le collecteur [5].

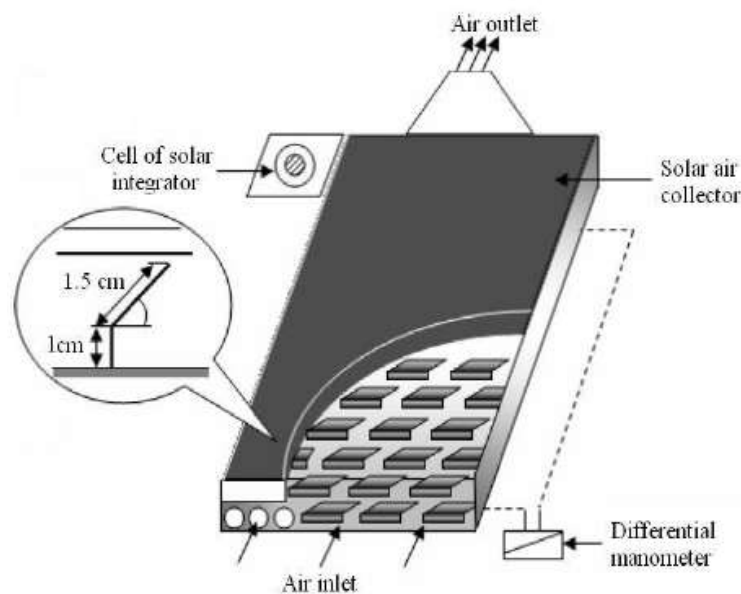


Figure(III.11) : Capteur muni d'obstacles.

III.3.4.2 K. Aoues et al :

La veine d'air dynamique d'une hauteur de 25 mm est comprise entre la plaque absorbante (corps noir) et une plaque inférieure en acier galvanisé placée sur l'isolant.

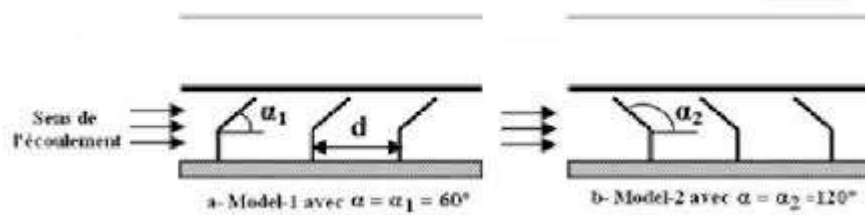
L'isolation arrière est assurée grâce à une feuille de polystyrène de 40 mm d'épaisseur et puis elle est assurée également par le boîtier en bois de 5 mm d'épaisseur.



Figure(III.12) : Schéma du dispositif expérimental

En outre, la veine d'air dynamique est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement sur la plaque inférieure placée au-dessus

de l'isolant. Ces obstacles ont deux formes différentes (model-1 et model-2) où la différence entre les deux réside dans la partie inclinée d'angle α respectivement égale à 60° et 120° .

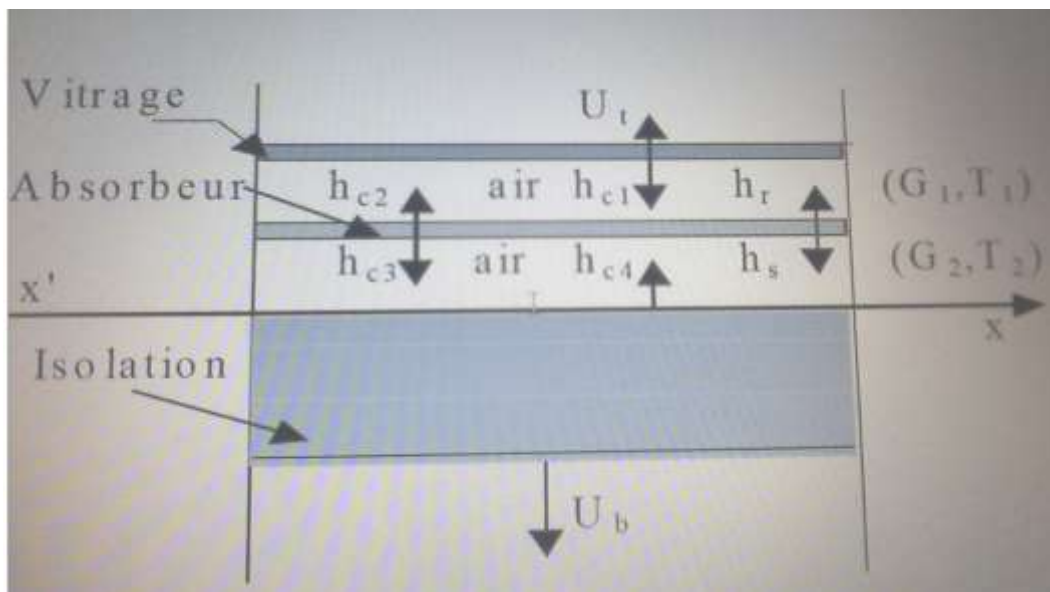


Figure(III.13) : Schéma descriptif des chicanes

Ainsi, ces obstacles ont été mis en place et espacés d'une distance (d) suivant deux configurations, A et B, respectivement à $d = 10$ et $d = 5$ cm. Les deux configurations, A et B, se différencient donc par le nombre de rangées (de chicanes), respectivement égale à 152 et 256 chicanes. [5]

III.3.4.3. A. Zerrouki et al :

Considérons un capteur solaire à air à deux passes (voir Figure III.14). On suppose que ce capteur est dans un état tel que les conditions de Bliss sont respectées. [5]



Figure(III.14) : Schéma d'un élément du capteur

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressés au séchage solaire, et plus particulièrement à l'étude de la cinétique du séchage et de certains aspects des séchoirs solaires tels que la performance et l'amélioration.

Pour la surface de captation, l'augmentation de ce facteur permet d'augmenter la puissance solaire captée. Ceci conduit à l'élévation de la température de l'air au sein du capteur permettant d'avoir un temps de séchage court. Ainsi, la température de l'air asséchant, son débit, la masse du produit, et le rayonnement solaire sont des facteurs importants pour faire augmenter le rendement du séchoir.

L'augmentation de la température de l'air asséchant, qui est le paramètre le plus influent, conduit à l'augmentation de taux d'humidité au sein du séchoir et par conséquent, la réduction de la durée de séchage. Ainsi, l'augmentation du diamètre du produit ou de la masse conduit à l'augmentation du temps de séchage d'une part et à l'abaissement de la température de l'air d'autre part.

Après comparaison entre les différents types de séchoirs solaires, nous avons trouvé que le meilleur type est le séchoir solaire indirect.

Perspectives :

- Pour améliorer l'efficacité du capteur solaire réalisé on propose de ajouter des chicane pour augmenter la surface de contact et le transfert de chaleur dans le capteur.
- Ainsi on propose une modification sur le niveau de supporte de capteur (orientation de l'angle de capteur).
- Pour le séchage d'un produit agricole on propose une analyse (biochimique) avant et après le séchage pour voir si la qualité et les propriétés organo-leptiques du produit ont été sauvegardées ou pas après l'opération de séchage

Références Bibliographiques

Référence :

[1]Boussalia Amar

Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles Locaux. . Mémoire de magister. Université Mentouri - constantine(2010).

[2] Slimane BOUGHALI

Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques. Mémoires de doctorat , Université de Haj Lakhdar Batna (2010).

[3] Arnold Hanslmeier

The Sun and Space Weather

Institute for Geophysics, Astrophysics and Meteorology, University of Graz , Austria.

[4] BEN LAHBIB ALAEDDINE - SAOULI NADIR

Contribution à l'amélioration du rendement thermique des capteurs solaires plans à air dans la région sud Algérien (Ouargla) . Mémoire de master, KasdiMerbah- Ouargla(2016).

[5] Bahadj Ahmed

Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre. Mémoire de master, KasdiMerbah- Ouargla(2014).

[6] S.Chouicha,

Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact Sur la qualité. Mémoire de magister. Université KasdiMerbah- Ouargla(2010).

[7] H. Ben cheikch, M. OuldSidimed et Y.Draoui,

Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif. Mémoire de l'ingénieur d'état. Université KasdiMerbah –Ouargla. (juin 2011).

[8] D. SCHNELL

Technique du séchage.

[9] J.J.Bimbonet

Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires.

[10] Therese Encrenaz, Jean-Pierre Bibring, Michel Blanc, Maria-Antonietta Barucci, Françoise Roques et Philippe Zarka . CNRS. Editions, 15 rue Ualebranche, 75005 Paris.

Le système solaire

[11] CHAFOU Noura, KHABBAR Omnia

Etude expérimentale de séchage Solaire de tomate dans un séchoir Indirect à convection naturelle. Mémoire de master, Université KasdiMerbah- Ouargla(2016).

[12] LOUAZENE Abderrahmane BOUHNİK Abdallah

Etude numérique

[13] Boumediane Touati

Etude théorique expérimentale de séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*), . Mémoires de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaide-Tlemcen(2008).

[14] Mohamed MOGHARBI, Daoud HALASSA

Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air. Mémoire de master, Université KasdiMerbah- Ouargla(2011).

Annexes

Séchoir solaire direct



Séchoir solaire indirect

