

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

Chenene Hamza

Thème

**AMELIORATION DU SECHAGE SOLAIRE PAR LA
CONVECTION FORCEE : CONCEPTION ET REALISATION**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Hebbiche Noureddine A	MAA	Président
Benkherbache Souad	MCA	Encadreur
Boukhari Amar	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2023 / 2024

N° d'ordre : GM/...../2024

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Dieu qui m'a guidé vers le bon chemin et qui m'a donné le courage et la force de continuer ce travail.

*J'exprime mes profonds remerciements à **Mme Benkherbache Souad**, j'ai le grand plaisir de travailler sous sa direction et profiter de ses enseignements et ses conseils judicieux et pertinents.*

J'adresse mes profondes gratitudeux aux enseignants et responsables du département énergétique.

Enfin, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Remerciements	
Liste des figures	I
Liste des Tableaux	iV
Introduction Générale	v
Chapitre I	1
Le Gisement Solaire	
I.1.Introduction	1
I.2.Le soleil	1
I.3.La constante solaire	1
I.4.Aspects géométriques du rayonnement solaire	1
I.5.Mouvements de la terre	2
I.6.La sphère céleste	2
I.7.Les coordonnées célestes	3
I.7.1.Les coordonnées géographiques	3
I.7.2.Les coordonnées horaires	4
I.7.3. Les coordonnées horizontales	5
I.8. Le temps solaire	6
I.8.1.Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)	6
I.8.2.Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)	7
I.8.3.Le Temps Universel (T.U)	7
I.8.4.Le Temps Légal (TL)	7
I.8.5. le Temps Civil	8
I.9. Aspects énergétiques du rayonnement solaire	8
I.10. Les différents types de rayonnement	8
I.11. Rayonnement solaire	9
I.11.1.Rayonnement direct.	10
I.11.2. Rayonnement diffus	10
I.11.3. Rayonnement global	11
I.11.4. Mesure du rayonnement solaire	11
I.12. Le gisement solaire en Algérie	12
I.13 Les capteurs solaires thermiques	14
I.13.1. Les capteurs non-vitrés	15
I.13.2 Les capteurs à tubes sous vides	15
I.14. Les composants d'un capteur plan	16
I.14.1 L'absorbeur	16
I.14.2. La couverture transparente (vitrage)	16
I.14.3 L'isolation thermique	18
I.14.4. Le cadre	18
I.15. Principes de fonctionnement d'un capteur plan solaire	18
I.16 Conclusion	19
Chapitre II	20
Le Séchage Solaire	

II. 1. Historique du séchage	20
II.2 Description :	21
II.3 But du séchage	21
II.4 Les méthodes de séchage	21
II.5. Différentes méthodes de séchage	22
II.6. Caractéristiques de l'air de séchage	22
II. 6. 2. Degré de saturation	22
II.6. 3 Température	23
II.7 Différents modes de séchage	23
II.8 Le séchage solaire	24
II.8.1 Introduction	24
II.8.2 Importance et intérêt de séchage	25
II.8.3 Séchage des produits agricoles	25
II.8.3.1 Le séchage convectif	25
II.9 Cinétique de séchage	26
II.9.1 Les périodes du séchage	26
II.10 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	28
II.10.1 Influence de la température de l'air	28
II.10.2 Influence de la vitesse de l'air	28
II.10.3 Influence de l'humidité de l'air	28
II.11 Les séchoirs solaires	30
II.11.1 Description	30
II.11.2 Les différents types de séchoirs solaires	30
II.11.2.1 Séchoirs naturels	30
II.11.2.2 Le séchoir solaire "Lit TARA "	31
II.11.2.3 Le séchoir solaire "Tente"	32
II.11.2.4 Le séchoir solaire "pyramide"	33
II.11.2.5 Le séchoir solaire "Cabinet"	33
II.11.2.5 Le séchoir solaire "cheminée"	34
II.12 Classification des types de séchoirs solaires	36
II.13 Les séchoirs solaires directs	36
II.13.1 Principe de fonctionnement	36
II.13.2 Avantages et inconvénients	37
II.13.3 Type des séchoirs directs	38
II.14 Séchoirs solaires indirects	41
II.14.1 Principe de fonctionnement	41
II.14.2 Avantages et inconvénients	42
II.14.3 Type du séchoir indirect	42
II.15 Les séchoirs mixtes	47
II.16 Conclusion	48

Chapitre III 49

Partie Expérimentale

Conception et Réalisation du séchoir solaire

III. Conception du séchoir solaire	49
III.1 Introduction	49
III.2 Description du séchoir solaire	49
III.3 Réalisation du séchoir solaire	50
III.3.1 La chambre de séchage	50
III.4 Appareillage utilisés	55

III.4.1 Mesure de la température	55
III.4.2 Mesure de l'humidité	56
III.5 Principe de fonctionnement du séchoir solaire	56
Chapitre IV	57
Résultats et discussions	
IV. 1 Exploitation des résultats	57
IV.1.1 Préparation des produits	57
IV. 2 Calcul du rendement du séchoir solaire	63
Conclusion Générale	65
Références	66

Liste des figures

Figure I.1	Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	2
Figure I.2	La sphère céleste	3
Figure I.3	Les coordonnées géographiques	4
Figure I.4	coordonnées horaires	4
Figure I.5	Coordonnées horizontales	5
Figure I.6	Classification des divers rayonnements électromagnétiques	8
Figure I.7	Les composants du rayonnement solaire	9
Figure I.8	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	12
Figure I.9	Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.	13
Figure I.10	Un pyranomètre Capteur moquette pour le chauffage des piscines	14
Figure I.11	Capteur sous vide	15
Figure I.12	Schéma d'un capteur solaire vitré.	16
Figure I.13	Echanges thermiques dans un capteur plan	17
Figure II.1	Séchage traditionnel des produits agricoles en Algérie	20
Figure II.2	Courbe de séchage	
Figure II.3	Illustration d'un séchoir solaire	
Figure II.4	Principe de séchage à l'air libre	
Figure II.5	Séchoir solaire "Lit TARA	
Figure II.6	Séchoir solaire "Tente".	33
Figure II.8	Séchoir solaire "Cabinet".	34
Figure II.9	Séchoir solaire "cheminée".	35
Figure II.10	Séchoir solaire " tiroir "[35
Figure II.11	Schéma représente types des séchoirs solaires.	36
Figure II.12	Le principe d'un séchoir solaire direct	37
Figure II.13	Séchoir solaire coffre	38

Figure II.14	Le séchoir solaire intégral	39
Figure II.15	Le séchoir solaire intégral	39
Figure II.16	Le séchoir solaire coquillage à trois claies	40
Figure II.17	Séchoir solaire cabane	41
Figure II.18	Le principe d'un séchoir solaire indirect	42
Figure II.19	Séchoir solaire armoire	43
Figure II.20	Un séchoir tunnel	43
Figure II.21	Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM	44
Figure II.22	Séchoir solaire hybride.	45
Figure II.23	Séchoir solaire hybride à convection forcée	46
Figure II.24	Séchoir solaire hybride solaire-gaz	47
Figure II.25	Le principe d'un séchoir solaire mixte	47
Figure III.1	Séchoir solaire	50
Figure III.2	Base du séchoir	50
Figure III.3	Entrée et sortie de l'air chaud	51
Figure III.4	Fixation des bords, la porte et des pieds	51
Figure III.5	Emplacement du ventilateur	52
Figure III.6	Collage du polystyrène sur les cotés	52
Figure III.7	p l a c e m e n t des supports du produit	53
Figure III.8	Pose du vitrage	53
Figure III.9	Aperçu de l'intérieur du séchoir solaire avec deux supports	54
Figure III.10	Surélever la chambre de séchage	54
Figure III.11	Vue du séchoir solaire complet	55
Figure III.12	Vue du séchage des produits	55
Figure III.13	Thermomètres utilisés	56
Figure III.14	Hygromètre	56
Figure IV.1	préparation du produit pour le séchage	57
Figure IV.2	Le produit séché	57

Figure IV.3	Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 20/05/2024	58
Figure IV.4	Variation de la température 20/05/2024	58
Figure IV.5	Variation de l'intensité solaire 20/05/2024	58
Figure IV.6	Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 21/05/2024	59
Figure IV.7	Variation de la température 21/05/2024	59
Figure IV.8	Variation de l'intensité solaire 21/05/2024	59
Figure IV.9	Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 22/05/2024	60
Figure IV.10	Variation de la température 22/05/2024	60
Figure IV.11	Variation de l'intensité solaire 22/05/2024	60
Figure IV.12	Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 23/05/2024	61
Figure IV.13	Variation de la température 23/05/2024	61
Figure IV.14	Variation de l'intensité solaire 23/05/2024	61
Figure IV.15	Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 24/05/2024	61
Figure IV.16	Variation de la température 24/05/2024	61
Figure IV.17	Variation de l'intensité solaire 24/05/2024	62
Figure IV.18	Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 26/05/2024	62
Figure IV.19	Variation de la température 26/05/2024	62
Figure IV.20	Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 27/05/2024	62
Figure IV.21	Variation de la température 27/05/2024	62

Liste des Tableaux

Tableau I.1	Valeur des coefficients de trouble atmosphérique.	10
Tableau I.2	Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude	10
Tableau I.3	Valeur de l'albédo du sol " ρ ".	11

Introduction Générale

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.

Le séchage solaire des récoltes, fruits et légumes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air au soleil. Il a été employé pour sécher des grains, des viandes et d'autres produits agricoles pour la consommation.

L'objectif principal du séchage des aliments est la réduction de leur teneur en eau pour prolonger leur conservation, réduire les besoins d'emballage et réduire le poids pour diminuer les coûts du transport.

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

Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires. D'un point de vue économique, l'utilisation des séchoirs solaires est la solution préférée car ils sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection forcée ou naturelle.

Un séchoir solaire est conçu pour alléger les inconvénients liés au séchage ouvert du soleil, et les qualités du produit sec (final) peuvent être améliorées.

Ainsi, beaucoup de travaux expérimentaux et numériques ont été effectués pour modéliser le phénomène de séchage solaire des produits agricoles et également les séchoirs solaires (directs, indirects) et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisés par la cinétique de séchage. Ces derniers représentent l'objectif de conception de notre travail.

Le but de ce mémoire, est l'amélioration du séchage solaire des produits agro-alimentaires par la convection forcée avec une conception et une réalisation d'un séchoir solaire destiné à cet effet.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur le gisement solaire

Le deuxième chapitre, comporte une étude théorique sur le séchage et une brève description sur les différents types de séchoir solaires.

Dans le troisième chapitre qui est la partie expérimentale nous exposons les différentes étapes pour la réalisation du séchoir solaire.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons quelques essais et résultats de séchage.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Le Gisement solaire

I. 1. Introduction :

La terre est animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe des pôles (NORD SUD). Le centre de la terre décrit une ellipse ayant le soleil comme foyer. Au lieu de faire l'étude de la terre autour du soleil et de son axe ; il est plus important pour notre étude de s'intéresser au mouvement apparent du soleil dans la sphère céleste. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

I. 2. Le soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.10^{27} tonnes [2]. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de

150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.10¹⁴ KW [3].

I. 3. La constante solaire :

La valeur du rayonnement solaire " I_c ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m⁻². En première approximation, on peut calculer la valeur de " I_c " en fonction du numéro du jour de l'année " n_j " par la relation suivante [4] :

$$I_c = I_0[1 + 0.033 \times \cos(0.984 \times n_j)]$$

I. 4. Aspects géométriques du rayonnement solaire :

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects

géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [5].

I. 5. Mouvements de la terre :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers.

Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [5,8].

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 10 6 km [8].

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison de l'ordre de $23^{\circ}27'$ [5].

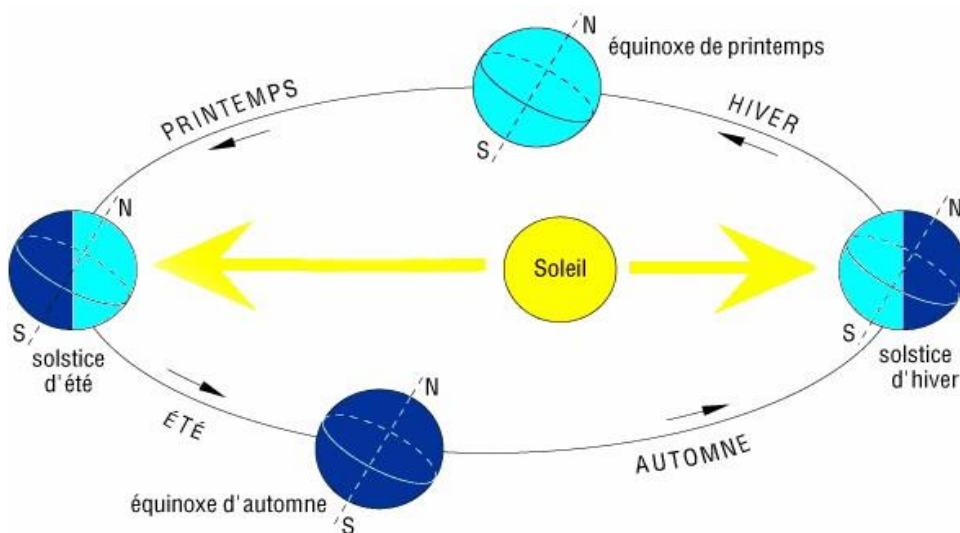


Figure I.1 : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil

I. 6. La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure (figure I.2).

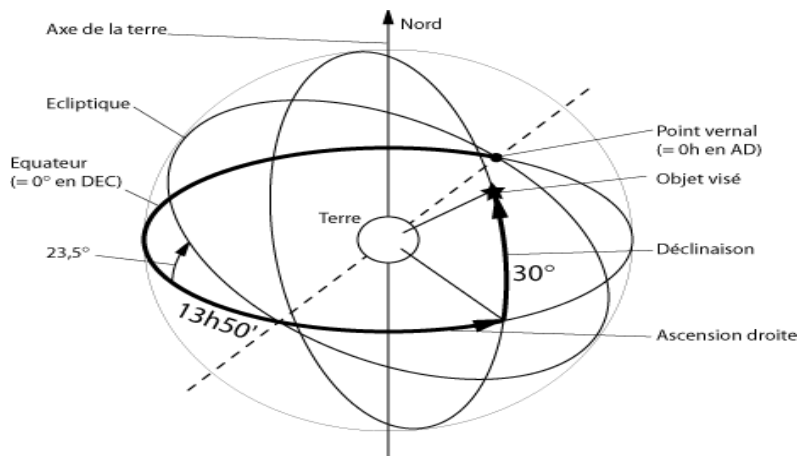


Figure I.2 : La sphère céleste

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

I. 7. Les coordonnées célestes :

I. 7.1. Les coordonnées géographiques [9]:

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.3).

- La longitude (L) :

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

- La latitude (Φ) :

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

- L'altitude (Z) :

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

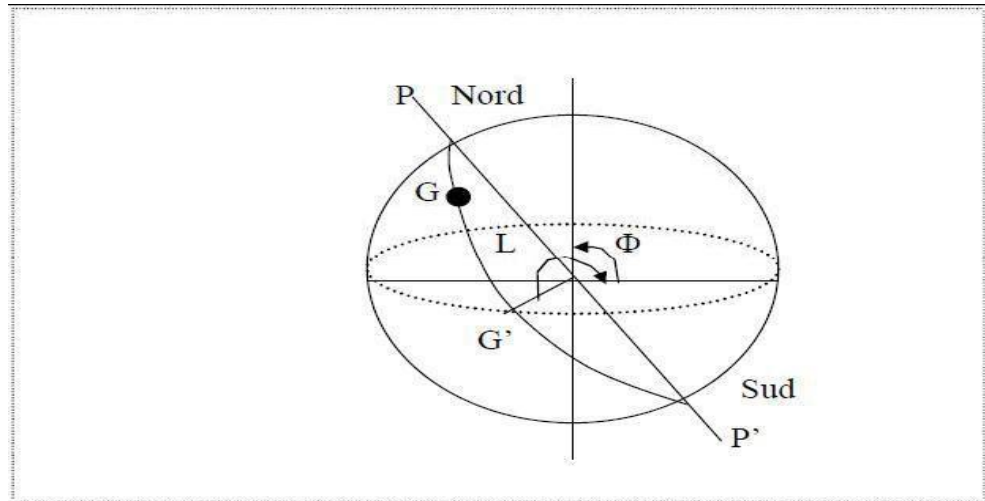


Figure I.3: Les coordonnées géographiques.

I. 7.2. Les coordonnées horaires

- La déclinaison (δ)

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [7] :

$$\delta = 23.45 \sin [(284+nj)/365].360[\text{Degré}] \quad (\text{I.1})$$

Où :

$n j$: Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

- L'angle horaire (ω)

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté

Positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° (figure I.4).

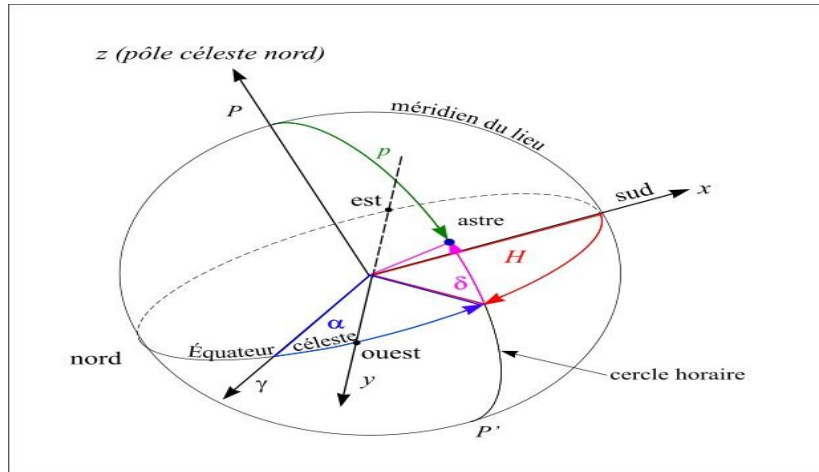


Figure I.4 : Les coordonnées horaires

I.7.3. Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

L'azimut solaire (a)

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

- La hauteur (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir, On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$ (figure I.5).

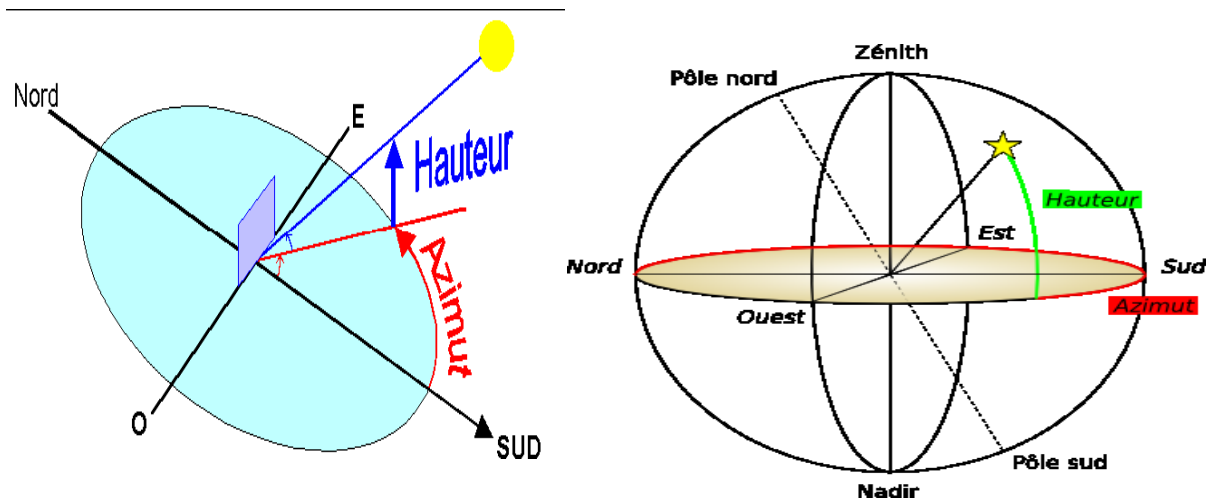


Figure I.5 : Coordonnées horizontales.

I.8. Les temps solaires

I. 8.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil w . Il est donné sous la forme suivante [9] :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (I.2)$$

ω : En degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

I. 8.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [33] :

$$Et = TSV - TSM \quad (I.3)$$

Avec :

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]} \quad (I.4)$$

$$\text{Ou: } N' = (nj - 81) \cdot 360/365 \quad (I.4)$$

Où : nj est le numéro du jour dans l'année.

I. 8.3. Le Temps Universel (T.U) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) [9]:

$$TU = TSM - (L/15) \quad (I.6)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

I. 8.4. Le Temps Légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [9] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.7)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I. 8.5. Le Temps Civil

Représente le temps qui a pour origine minuit [9].

I. 9. Aspects énergétiques du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altération et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes...).

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à dire isotrope). L'autre partie dite directe est anisotrope [5].

I. 10. Les différents types de rayonnement :

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.

Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite.

Les rayonnements électromagnétiques se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde.

La figure (I.6), donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde

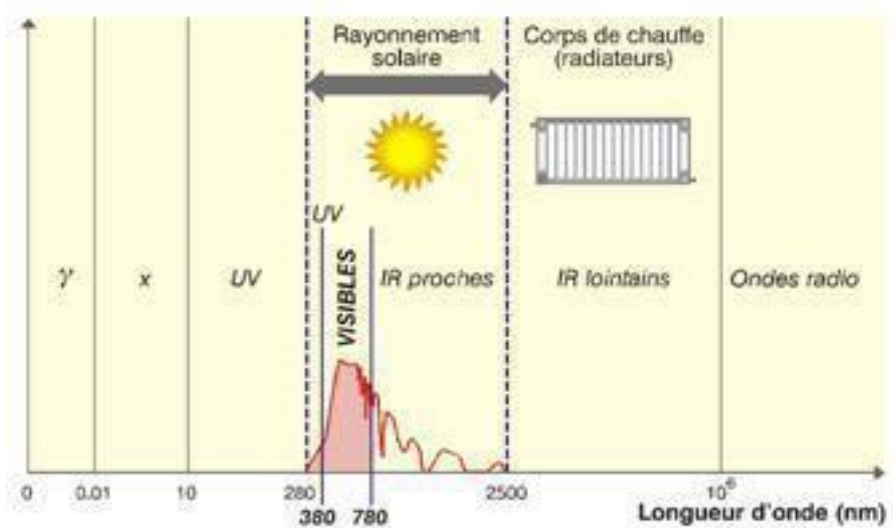


Figure I.6 : Classification des divers rayonnements électromagnétiques

I. 11. Rayonnement solaire :

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (Figure III.7). L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

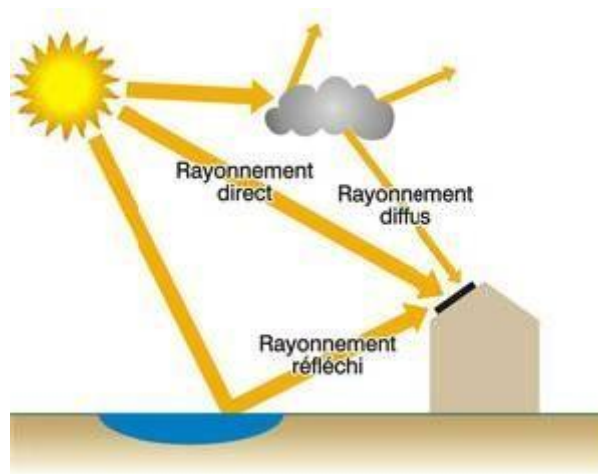


Figure I.7 : Les composants du rayonnement solaire

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

Le rayonnement global qui est la somme du rayonnement direct et diffus.

Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

I. 11.1. Rayonnement direct :

L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est [5,11] :

$$I_{dir} = I_c \times a \times \exp\left(\frac{b}{\sin(h)} \times \frac{P}{100}\right) \times \cos(i) \quad (I.8)$$

a et b : Coefficients traduisant les troubles atmosphérique (tableau I.1)

P: la pression atmosphérique en fonction de l'altitude (tableau I.2).

	Ciel pur	Condition normale	Zone industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Tableau I.1: Valeur des coefficients de trouble atmosphérique.

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

Tableau I.2: Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

I. 11.2. Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface de captation se caractérise par deux composantes du flux à savoir :

- Le flux diffus émis par la voûte céleste (φ_1), donné par la relation :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1+\cos(b)}{2} \quad (I.9)$$

- Le flux émis par le sol (θ_2), donné par l'expression :

$$\varphi_2 = \rho \times \frac{1-\cos(h)}{2} \times (I_c \times r_{dir} \times \sin(h) + \varphi_0) \quad (I.10)$$

Avec:

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times r_{dir}) \quad (I.11)$$

r_{dir} : Étant la transmissivité total de la couche atmosphérique pour le flux solaire incident direct est donnée par [35]:

$$r_{dir} = a \times \exp\left(\frac{h}{\sin(h)} \times \frac{p}{100}\right) \quad (I.13)$$

p : L'albédo du sol, les valeurs de ce coefficients sont données dans le tableau (I.3):

Nature de sol	Neige Fraiche	Neige Ancienne	Sol Rocheux	Sol cultivé	Forêt	Etendue D'eau
Valeur de P	0.8-0.9	0.5-0.7	0.15-0.25	0.07-0.14	0.06-0.20	0.05

Tableau I.3: Valeur de l'albédo du sol " p ".

Le flux diffus s'écrit par conséquent de la manière suivante :

$$I_{dif} = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (I.14)$$

I. 11.3. Rayonnement global :

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

$$I_{gl} = I_{dir} + I_{dif} \quad (I.15)$$

I. 11.4. Mesure du rayonnement solaire :

Pour mesurer le rayonnement solaire au niveau de sol on peut utiliser les instruments suivants :

A. Le radiomètre [13]

Le radiomètre est un appareil permettant de mettre en évidence l'énergie transportée par les radiations, il est constitué d'une ampoule de verre contenant de l'air à faible pression et un petit moulin à quatre pales ayant chacune une face noire et une face blanche. Il en résulte une dissymétrie dans l'absorption du rayonnement incident, qui provoque la mise en rotation du moulin.

B. Le pyranometre :[13]

Le pyromètre est un radiomètre pour la mesure du rayonnement dans un plan, le rayonnement incident étant issu de l'ensemble de l'hémisphère situé au-dessus de l'instrument.

C. Le pyréliomètre :[13]

Le pyréliomètre est un radiomètre muni d'un collimateur, pour la mesure du rayonnement solaire direct sous incidence normale.

I. 12. Le gisement solaire en Algérie:

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [14].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.8 :

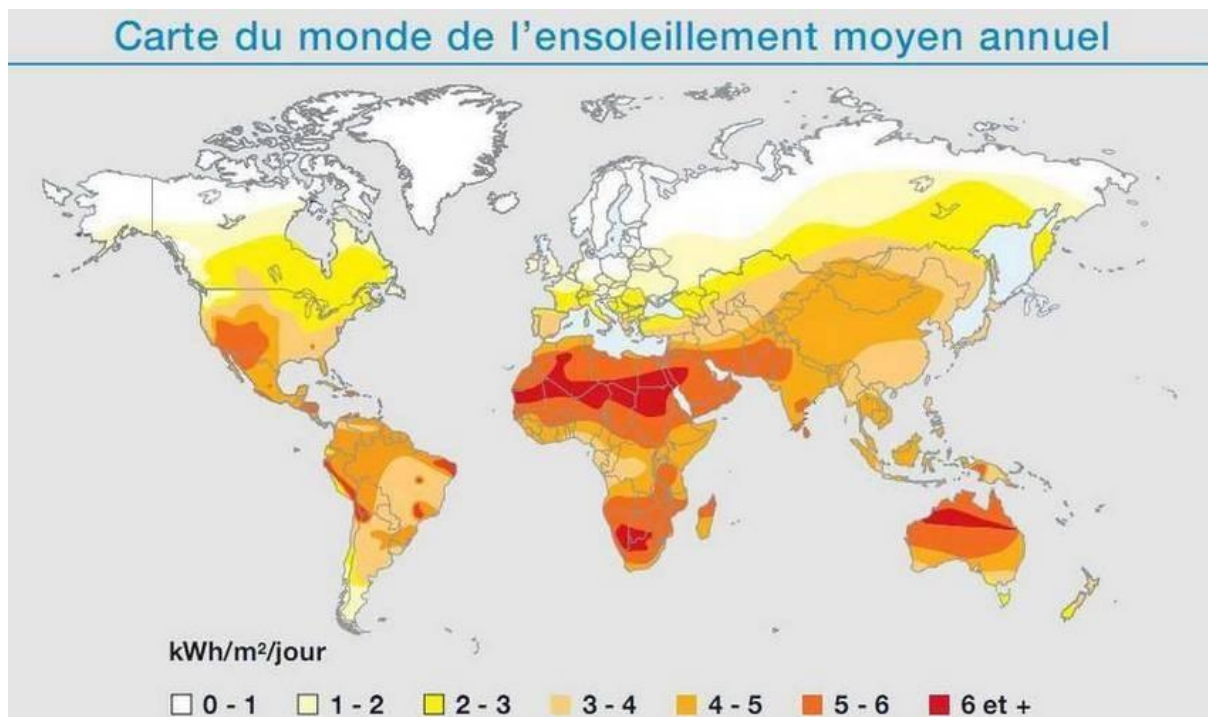


Figure I.8. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit

169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.4 selon l'ensoleillement reçu annuellement [15].

Régions	Région côtières	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.4. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

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

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel solaire de toute l'Algérie. (figure I.9).

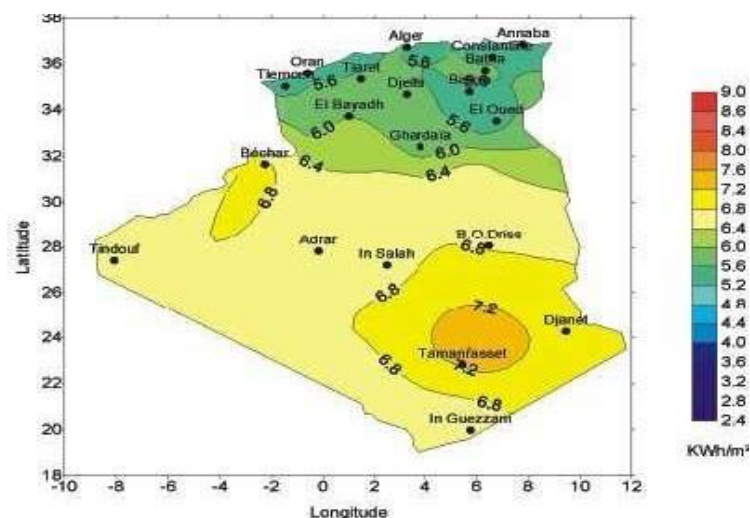


Figure I.9. Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

I. 13 Les capteurs solaires thermiques

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considérée, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre. Le type d'application peut aller du chauffage d'une piscine avec un capteur léger, à une centrale solaire thermodynamique produisant de l'électricité.

Le fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau, un mélange antigel, un fluide à changement de phase, une huile qui se ne dégrade pas à haute température. La majeure partie des applications est celle du chauffage de l'eau sanitaire et celui du chauffage des locaux, avec des fluides caloporteurs liquides.

Les capteurs à liquide se répartissent en trois familles [16]

I. 13.1. Les capteurs non-vitrés

Par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple réseau de tubes plastiques noirs, utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été, ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines.



Figure I.10 : Capteur moquette pour le chauffage des piscines

I. 13.2 Les capteurs à tubes sous vides

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

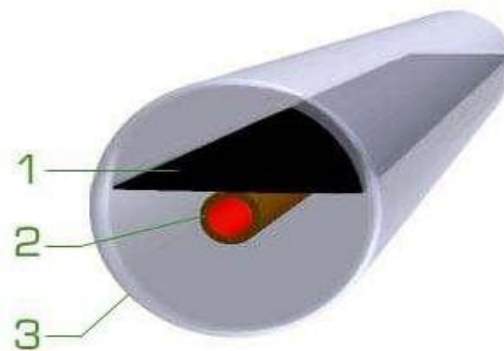


Figure I.11 : Capteur sous vide

1- Absorbeur

2- échangeur

3- tube transparent

I. 13.3 Les capteurs plans vitrés

L'application la plus courante du solaire thermique est le chauffe-eau solaire. On peut aussi recourir au solaire thermique pour le chauffage, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère). Les systèmes solaires sont également utilisés pour le chauffage des piscines, les chauffe-eaux des hôtels, des hôpitaux, le refroidissement de l'air ou de système remplaçant le chauffage (au lieu de l'air conditionné), le dessalement de l'eau de mer dans les endroits où l'eau potable est rare. La figure I.12 montre une structure d'un capteur solaire à vitre

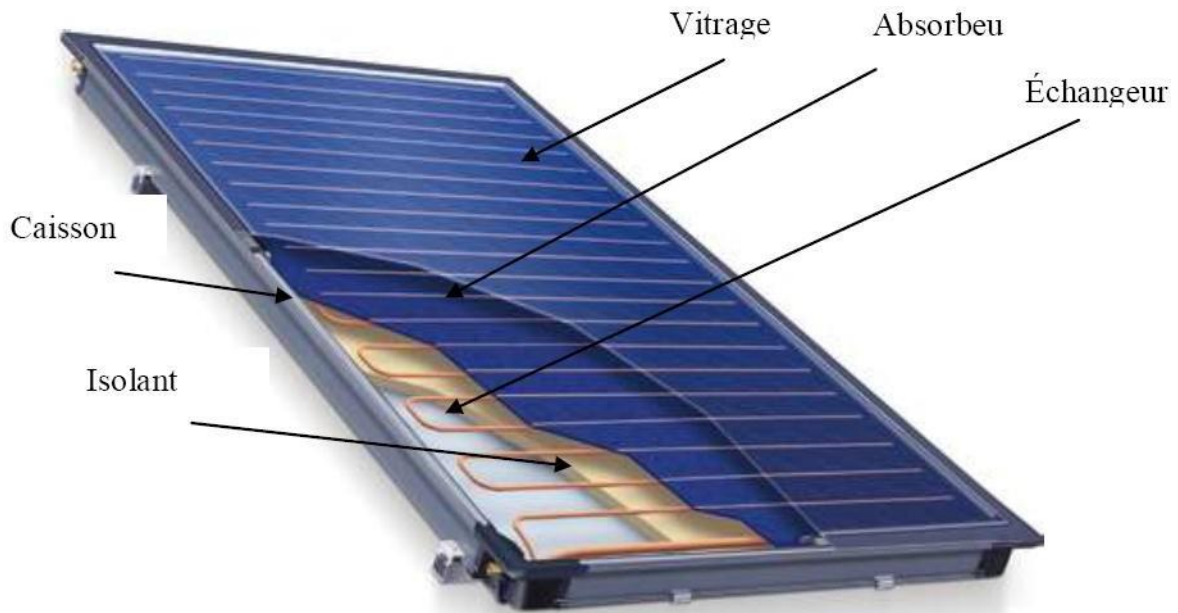


Figure I.12 : Schéma d'un capteur solaire vitré.

I. 14. Les composants d'un capteur plan

I. 14.1 L'absorbeur

Dans tout capteur, l'absorbeur joue le rôle principal. Le choix du matériau et le mode de construction ont une grande influence sur la performance du capteur. Les premiers absorbeurs étaient peints en noir afin de capter un maximum d'énergie rayonnée du soleil. Mais cette couleur a l'inconvénient d'avoir un rayonnement important, ce qui finit par échauffer la vitre et provoquer des pertes à travers celle-ci par une forte réémission.

C'est pourquoi on préfère utiliser des absorbeurs traités, ce qui donne un corps noir dont le rayonnement est beaucoup plus faible. On parle de surfaces sélectives. Un des éléments clés dans le développement de ces différentes technologies. D'autre part il doit absorber la plus grande partie du rayonnement solaire et transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec le minimum de perte. Il doit être le plus léger possible pour éviter l'inertie de mise en régime et construit avec un matériau bon conducteur et fiable dans le temps.

I. 14.2. La couverture transparente (vitrage)

Pour cette couverture on utilise principalement du verre sécurisé résistant aux chocs et contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques (brusque refroidissement en cas d'orage). Ce verre est de préférence pauvre en oxyde de fer et de ce fait il est très transparent

au rayonnement solaire. Dans le cas de capteurs intégrés dans la toiture on utilise aussi parfois des matières synthétiques.

Le verre présente une bonne résistance au vieillissement et une bonne résistance mécanique. Les couvertures en matière synthétique sont moins durables. Elles sont par contre plus légères, moins chères et plus facile à mettre en œuvre.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse la fraction réfléchie du rayonnement solaire incident, afin de diminuer l'éblouissement éventuel (figure I.13).

On distingue les capteurs avec un seul vitrage et revêtement sélectif de l'absorbeur, et ceux avec deux vitrages mais sans revêtement sélectif de l'absorbeur. Les capteurs plans à vide d'air partiel appartiennent à la première catégorie ; le vide partiel sert d'isolant : il réduit les pertes par convection à l'intérieur du capteur.

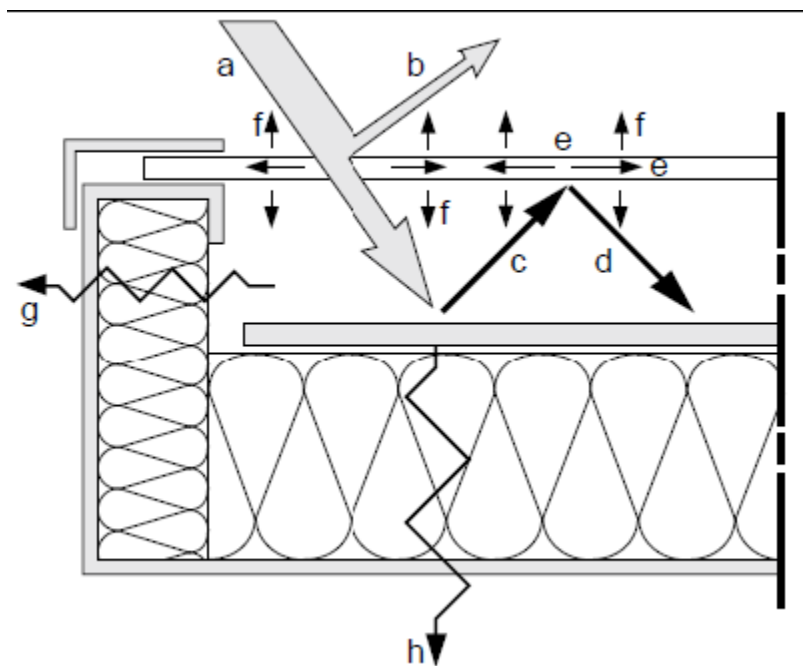


Figure I.13 : Echanges thermiques dans un capteur plan

- a. Rayonnement solaire incident
- b. Rayonnement solaire réfléchi par le vitrage
- c. Rayonnement thermique émis par l'absorbeur
- d. Rayonnement thermique réfléchi par le vitrage

- e. Rayonnement thermique absorbé par le vitrage
- f. Rayonnement thermique émis par le vitrage
- g. Pertes thermiques latérales
- h. Pertes thermiques inférieures

I. 14.3 L'isolation thermique

Les matières isolantes utilisées dans la construction des capteurs sont soit des laines minérales (laine de roche et laine de verre) soit des matières synthétiques. L'isolation doit être imputrescible et résister aux hautes températures à l'intérieur du capteur. [17]

Une isolation de ce type est inutile dans le cas des capteurs à tubes évacués puisque c'est le vide d'air dans les tubes qui crée l'effet isolant.

I. 14.4 Le cadre

Le cadre doit résister aux agressions des conditions extérieures, aux contraintes intérieures et aux chocs éventuels lors du transport et du montage. Il doit donc être solide, tout en étant le plus léger possible.

Le cadre du capteur est en aluminium ou en acier. Le cadre des capteurs intégrés en toiture est protégé des intempéries et peut ainsi être valablement réalisé en bois.

I. 15. Principes de fonctionnement d'un capteur plan solaire

Les capteurs solaires de type plan sont le plus couramment utilisés pour les petites et moyennes puissances. Ils se composent d'un absorbeur, élément essentiel dans la conversion d'énergie solaire, situé dans un coffrage isolé en face arrière et latérale. Il est souvent couvert d'un vitrage en face avant.

Cet absorbeur peut être constitué d'une couche sélective qui augmente la captation de l'énergie solaire tout en limitant les pertes par rayonnement.

Le vitrage quant à lui évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent et crée un effet de serre qui augmente le rendement du capteur. L'isolation à l'arrière du capteur diminue les pertes de chaleur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur.

I. 16 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description du gisement solaire pour connaître la position du soleil ainsi que la durée d'ensoleillement. Ensuite nous avons décrit quelques types de panneaux solaires thermiques.

Chapitre II

Le Séchage Solaire

II. 1. Historique du séchage

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

La première installation de séchage était une surface pavée en pierre utilisée pour le séchage des récoltes, les vents naturels ou des vitesses modérées ont été combinés avec le rayonnement solaire pour accélérer le séchage. L'industrie du séchage conventionnel a commencé vers le 18ème siècle et à la même époque a commencé l'industrie de la conservation pour certains types d'aliments aussi.

Malgré tout, le séchage par exposition au soleil (traditionnel) a continué à être utilisé jusqu'à aujourd'hui .



Figure II.1 Séchage traditionnel des produits agricoles en Algérie.

II.2 Description :

Le séchage est une technique de préservation des produits alimentaires, qui intervient dans un grand nombre de procédés de fabrication. Sécher un produit consiste à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau du produit (Chaleur latente de vaporisation), puis à évacuer la vapeur formée. Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécaniques ou physico- chimiques initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation. Il existe plusieurs procédés de séchage : les procédés mécaniques (presse, décantation ou centrifugation), les procédés physico- chimiques (adsorption, absorption, réfrigération et séchage par évaporation). Ce dernier consiste à transférer le liquide à éliminer dans la phase gazeuse qui le baigne. Le changement de phase exige un apport de chaleur assez considérable. Il peut être direct (chauffage par échangeur, par effet joule, par radiations infrarouges ou par courants de haute fréquence) ou bien c'est la phase gazeuse elle-même qui assure l'apport de chaleur nécessaire (air chaud). Le séchage par évaporation est un processus très complexe qui fait intervenir un double transfert ; dont le premier est un transfert de chaleur destiné à réduire la teneur en eau dans le produit et le second s'agit d'un transfert de masse qui implique un déplacement du fluide de l'intérieur du produit vers sa surface. Ces deux transferts exigent un apport de chaleur considérable, d'où l'intérêt d'utiliser une source de chaleur renouvelable. C'est le cas des séchoirs solaires .

II.3 But du séchage

Le séchage des aliments à pour objectifs principaux:

- préservation des aliments contre les différentes réactions de détérioration par abaissement de l'activité de l'eau
- faciliter le transport et l'entreposage des aliments par diminution du poids et du volume des aliments
- avoir les commodités d'emploi les plus recherchées

II.4 Les méthodes de séchage

Cette opération est assurée par plusieurs méthodes par l'exposition au soleil, le stockage dans un endroit sec, également par l'utilisation de l'air chauffé sous l'action du rayonnement solaire comme une source de chaleur, dont le procédé est effectué dans une chambre bien isolé thermiquement pour assurer la continuité de l'opération de séchage.

II.5. Différentes méthodes de séchage

- a) **Séchage mécanique** : C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, compression et filtration) .
- b) **Séchage chimique** : C'est un procédé basé sur l'utilisation des produits déshydratants par équilibre osmotique pour extraire l'eau (chlorure de calcium, ...) .
- c) **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.

II.6. Caractéristiques de l'air de séchage

II. 6. 1. Humidité

L'humidité de l'air de séchage a une influence directe sur la cinétique de séchage. Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, qui doit être éliminé au cours du séchage pour la stabilisation des aliments et la réduction de l'activité microbologique.[18]

- a) 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 :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e}$$

- b) Humidité relative

Les principaux facteurs qui influencent la qualité d'un produit sec sont le temps de séchage, la température et l'humidité relative de l'air de séchage. Après le passage d'elle sur le produit reste comprise entre 60-80 % pour éviter le croûtage d'un côté et le développement microbien de l'autre. L'humidité relative ou degré hygrométrique est

$$H_r = \frac{P_v}{P_s}$$

P_v : Pression partielle de la vapeur dans le mélange.

P_s : Pression de saturation.

II. 6. 2. Degré de saturation

Soit H_a la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et H_{as} la valeur

de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport :

$$\Psi = \frac{M_a}{M_{as}}$$

II.6. 3 Température

Le temps de séchage est largement réduit par l'élévation de la température de l'air du séchage, mais il existe une température maximale pour chaque produit qui ne pas être dépassée sinon elle provoque unedégradation importante de la qualité attribuée aux aliments tel que : *La couleur, les nutriments, la flaveur, la texture.*

- a) Température sèche : Elle est définie comme étant la température réelle de l'air humide, observée à l'aide d'un capteur, une sonde de température ou par un thermomètre non affecté par l'humidité d'air. Il s'agit de la température d'un gaz au sens courant .
- b) Température humide du gaz : La température humide (ou température de bulbe humide) c'est la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air .

II.7 Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur :

1. Séchage par conduction

Le produit à sécher est mis en contact direct avec une paroi solide chaude où l'échange de chaleur se fait par contact entre la surface de la paroi chaude et le produit. Ce mode de séchage est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie.

2. Séchage par convection (ou par entrainement)

On envoie sur le produit à sécher un flux d'air chaud. Il s'établit spontanément entre ce produit et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

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

Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels **et** est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire .

3. Séchage par rayonnement

Un rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit. Il permet un chauffage rapide des produits

en couches minces (500µm). La génération du rayonnement se fait soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Ce mode est très appliqué dans l'industrie des peintures et des pellicules photographiques .

1. Séchage par micro-ondes

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge.

2. La lyophilisation

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur.

II.8 Le séchage solaire

II.8.1 Introduction

Dans les pays en développement, le séchage au soleil est une méthode populaire efficace et économique utilisée pour le séchage et la conservation des produits agricoles, alimentaires et de nombreux autres produits. Le séchage des produits agricoles par l'énergie solaire est une application rentable. Par contre le séchage industriel consomme des grandes quantités de combustibles traditionnels pour fournir de l'air chaud. Le séchage se fait de plusieurs manières. La machine à sécher existe sous différentes formes en fonction du mode de transfert de chaleur, le prix, la forme d'énergie consommée et le mode de circulation du fluide .

Afin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur et de l'énergie.

Globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ 15 % de l'énergie industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser les procédés, dans une démarche économique mais aussi écologique.

Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique : certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres. Lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre". Lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure. Il suffit pour la vaporiser d'environ 2250 kJ/kg. Lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée". L'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie. Au cours du séchage c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée : aussi la quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente au cours du séchage .

L'utilisation de rayonnement solaire pour le séchage est l'une des applications les plus anciennes de l'énergie solaire. Il a été utilisé depuis l'aube de l'humanité principalement pour la conservation des aliments, mais aussi pour le séchage d'autres matériaux utiles comme les tissus, les matériaux de construction, etc.

II.8.2 Importance et intérêt de séchage

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau, on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures et bactéries) responsables du pourrissement. C'est aussi une étape nécessaire dans la congélation de certains produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet :

- ✓ D'améliorer la conservation des produits
- ✓ De faciliter leur transport
- ✓ De réduire les risques de pertes de produits après récolte
- ✓ D'élargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année.

II.8.3 Séchage des produits agricoles

Il existe plusieurs méthodes pour la déshydratation des produits agricoles. Toutefois le séchage par convection, appelé aussi par entrainement, demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée.

II.8.3.1 Le séchage convectif

Si on place un corps humide dans une enceinte où règne un flux gazeux chaud et sec, des différences de température et de pression partielle d'eau seront constatées entre le corps et le gaz aboutissant ainsi aux phénomènes suivants :

" Un transfert de chaleur du gaz vers le corps humide sous l'effet de l'existence d'un gradient de température, " Un transfert de matière (eau) s'effectuant du corps vers le gaz sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Le séchage est dit isenthalpique si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par le flux de gaz chaud.

Dans la plupart des cas, le gaz utilisé est l'air dont les propriétés thermo-physiques lui permettent d'être à la fois un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée.

L'enceinte où est placée le corps humide à sécher et le flux de gaz est appelée séchoir.

La vitesse avec laquelle des quantités d'eau de produit sont évaporées est appelée vitesse de séchage. Cette dernière est intimement liée au mode d'apport de l'énergie thermique nécessaire à la vaporisation de l'eau. Dans le séchage par entraînement, la convection est le mode de transfert prépondérant. D'autres modes de transfert thermique peuvent cependant s'y ajouter. La conduction par les claies supportant le produit et le rayonnement par les parois du séchoir représentent les autres modes d'apport de cette chaleur latente de vaporisation.

II.9 Cinétique de séchage

Plusieurs théories et modèles ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage et appréhender les lois physiques qui contrôlent les transferts. La complexité des mécanismes mis en jeu et le caractère variable des produits (nature, forme, propriétés physiques) empêchent de trouver un modèle unique susceptible de représenter toutes les situations. Il n'est pas étonnant dans ces conditions que les courbes caractéristiques de la cinétique de séchage présentent plusieurs étapes qui, individuellement et au cours d'une même opération, sont contrôlées par différents phénomènes de transfert. Le suivi de la teneur en eau " w " du produit exprimée en fonction du temps permet d'obtenir la vitesse de séchage (dw/dt) en fonction du temps ou de la teneur en eau, et d'établir les courbes classiques de séchage. Habituellement on considère l'existence d'une succession d'étapes au cours de l'opération de séchage. Après une période de mise en régime dite période d'initialisation (période ab) on observe souvent une période de séchage à vitesse constante (période bc) puis une ou deux périodes à allure décroissante.

II.9.1 Les périodes du séchage

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle courbe de vitesse de séchage.

Sur cette courbe, on distingue trois régions :

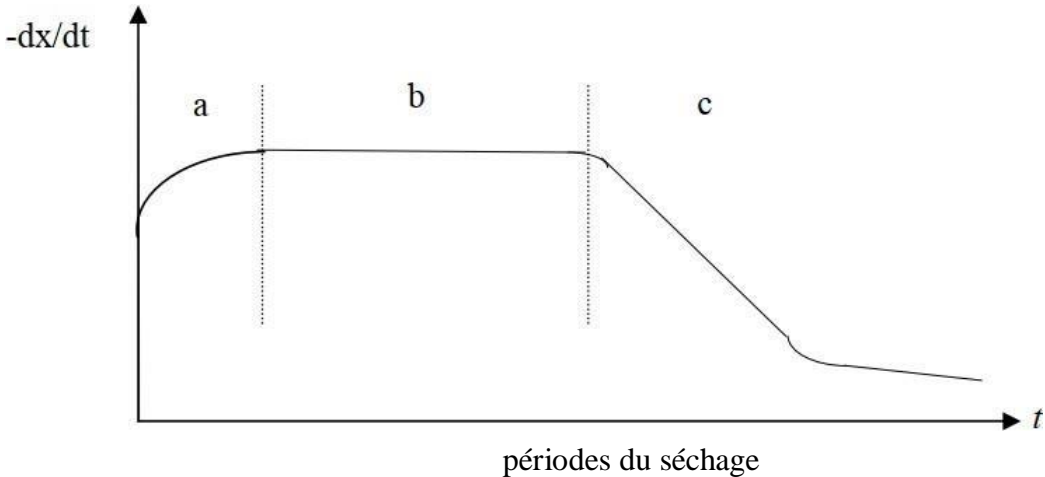


Figure II.2 Courbe de séchage

1. Période de mise en température

Quand un produit d'une température de surface T_s et d'une pression partielle de vapeur d'eau P_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur, si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante.

2. Période à allure constante

Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface; L'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; L'activité de l'eau (A_w) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit.

3. Période de ralentissement

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage, le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

➤ Disparition de l'eau libre en surface de produit

Ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que

la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

➤ **L'épaisseur du produit**

Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.

➤ **La diffusivité de l'eau dans le produit**

Elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

➤ **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes**

Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

➤ **Le croutage**

Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

II.10 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

II.10.1 Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit augmentent avec la température.

II.10.2 Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible.

II.10.3 Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.

II.11 Les séchoirs solaires

II.11.1 Description

Un séchoir solaire est une construction qui capte les rayons solaires pour sécher les aliments disposés à l'intérieur. Il nous permet comme un déshydrateur de sécher tous les fruits, légumes, herbes, poissons et viandes. Il est souvent construit en bois avec une plaque de verre qui sert à reproduire un effet de serre à l'intérieur du séchoir comme le montre la figure(I.3).

Le séchoir solaire a un potentiel important dans le secteur agricole, où il est utilisé pour le séchage des légumes, des fruits et des plantes médicinales. Ainsi minimiser la dépendance sur le séchage au soleil et le séchage industriel, d'où économiser d'énormes quantités de fossiles [20].



Figure II.3 Illustration d'un séchoir solaire

II.11.2 Les différents types de séchoirs solaires

Il existe une grande variété de séchoirs et différentes façons de les classer. On peut considérer par exemple le principe sur lequel repose le séchage (ébullition ou entraînement) ou d'après la texture du produit.

II.11.2.1 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 disposé même au sol, figure(I.4). (Le principe de séchage à l'air libre est simple, le

rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement.

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 [21].

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).

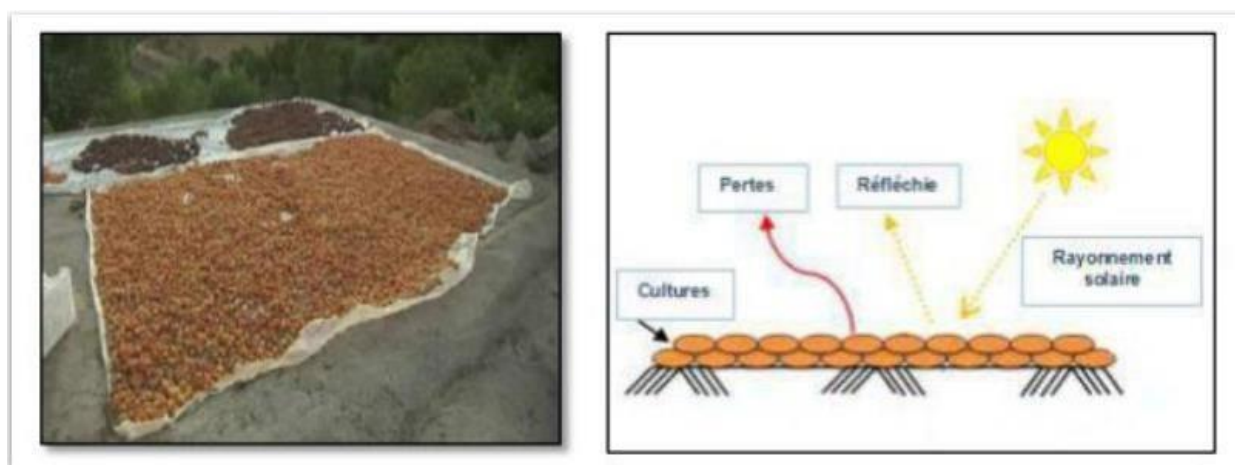


Figure II.4 Principe de séchage à l'air libre.

II.11.2.2 Le séchoir solaire "Lit TARA"

Ce séchoir de conception très simple ayant un coût très faible, d'une capacité de séchage importante, a été conçu et réalisé par les habitants du village Tegùye (arrondissement de Téra) figure (II.5).

Il a pour base de construction un lit traditionnel de type TARA muni à ses 2 extrémités sur la largeur d'un cadre en bois d'environ 2 m de haut comportant 3-4 barres transversales espacées entre elles de 40 -50 cm de manière à supporter les claies ou plateaux.



Figure II.5 Séchoir solaire "Lit TARA".

II.11.2.3 Le séchoir solaire "Tente"

Le séchoir solaire fait comme une tente est de conception très simple comme le montre la figure (II.6), il ne coûte pas cher et il est facile à utiliser. L'utilisateur s'il en a les moyens, peut couvrir :

- Les côtés : Avec des morceaux de moustiquaires (circulation de l'air)
- Les faces : Avec du plastique transparent (pour ramasser la chaleur solaire), ou une en plastique transparent et une en plastique noir.

Les dimensions du séchoir seront fonction des utilisations envisagées.



Figure II.6 Séchoir solaire "Tente".

II.11.2.4 Le séchoir solaire "pyramide"

Ce séchoir pyramide, à un seul plateau, a une capacité de 5 à 14 Kg. Il correspond aux conditions atmosphériques du pays (température élevée, grande vitesse du vent) de plus il permet des manipulations simples ainsi qu'une bonne protection contre la poussière et les insectes figure (II.7). Comme le séchoir tente, il peut être en fonction des moyens de l'utilisateur, recouvert d'une moustiquaire ou subir les améliorations citées précédemment.



Figure II.7 Séchoir solaire "pyramide".

II.11.2.5 Le séchoir solaire "Cabinet"

De conception simple, il peut avoir tout son cadre construit avec des perches de bois trouvé en brousse. Il peut être entièrement recouvert avec du tissu moustiquaire ou comme on le voit sur la (figure II.8) avec l'association film plastiqué et morceau moustiquaire, ce qui certes accélère la vitesse de séchage mais plus coûteux.



Figure II.8 Séchoir solaire "Cabinet".

II.11.2.5 Le séchoir solaire "cheminée"

Ce séchoir solaire est composé d'un petit collecteur en bois recouvert au-dessous par un plastique transparent et à son entrée une moustiquaire est fixée. Pour accélérer la vitesse de séchage sur les cadres de la tour un plastique transparent est disposé de manière à ramasser la lumière solaire, figure (II.9).



Figure II.9 Séchoir solaire "cheminée".

II.11.2.6 Le séchoir solaire " tiroir "

Ce séchoir à collecteur intégré à une fenêtre d'entrée d'air sur l'avant en bas (protégée par une moustiquaire) et une autre de sortie d'air derrière en haut (protégée par un morceau de moustiquaire). Les plateaux aérés permettent une circulation d'air aussi par le dessous. Le tout est un cadre (recouvert d'un film plastique transparent) monté sur charnières de manière à accéder facilement aux plateaux, comme le montre la figure (II.10).



Figure II.10 Séchoir solaire " tiroir "

II.12 Classification des types de séchoirs solaires

Selon la forme d'énergie consommée, il y a des séchoirs électriques, des séchoirs à gaz et des séchoirs hybrides. Plusieurs gammes de séchoirs solaires existent : les séchoirs directs, indirects et mixtes. La figure (I.11) montre les différents types de séchoirs solaires.

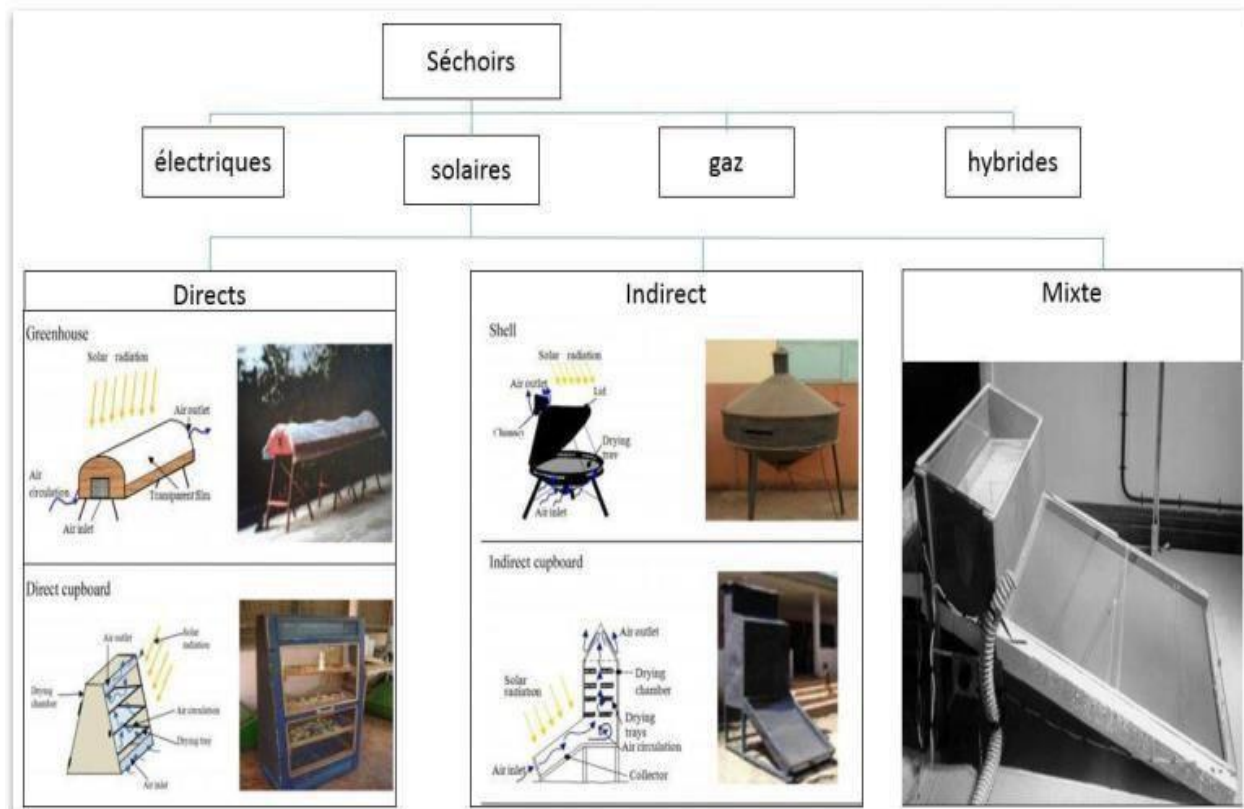


Figure II.11 Schéma représente types des séchoirs solaires.

II.13 Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception du séchoir coffre à plateau adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités, la figure (II.12) schématise le principe de fonctionnement d'un séchoir solaire direct..

II.13.1 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.

1.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent, sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles) La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud . La chaleur est générée par absorption des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage [23].

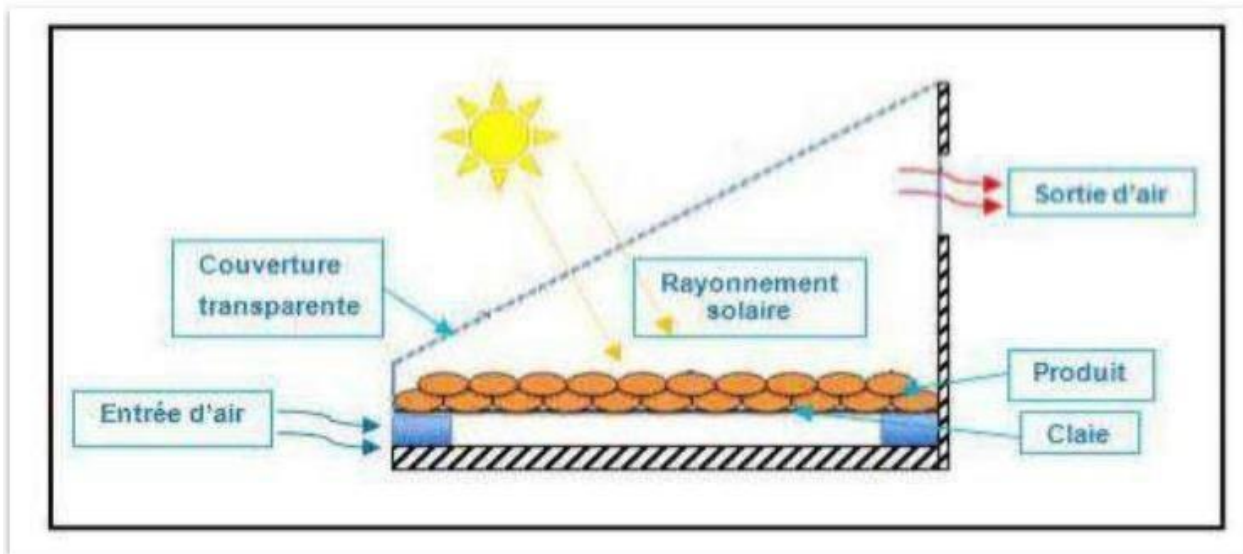


Figure II.12 Le principe d'un séchoir solaire direct

II.13.2 Avantages et inconvénients.

Avantages :

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas 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 C, flétrissement, décoloration
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

1.

- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments

II.13.3 Type des séchoirs directs

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.

Un séchoir a généralement la forme d'une boîte rectangulaire, contenant des claies de séchage comme le montre la figure (II.13).



Figure II.13 Séchoir solaire coffre.

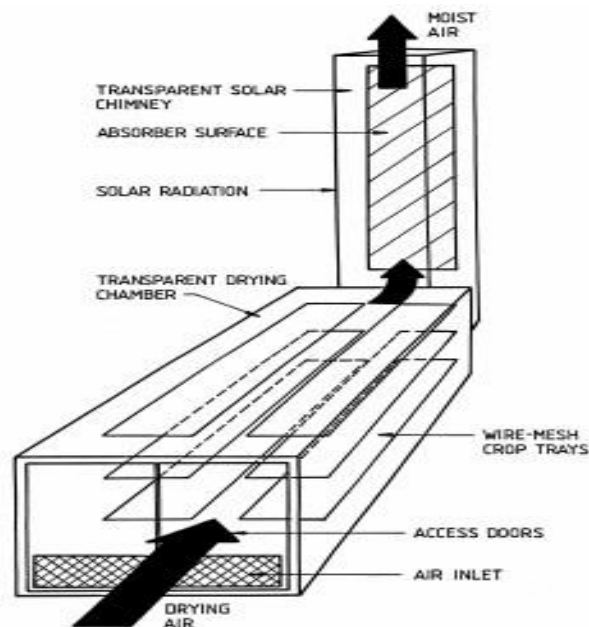
L'air pénètre par les orifices percés dans le fond du caisson et s'échappe par des trous situés dans la partie haute de chaque côté. Le fond de la boîte ainsi que les parois sont peintes en noir pour mieux capter le rayonnement solaire. Une feuille de plastique ou une plaque de verre sert de toit. Une porte dans le panneau arrière permet de réguler la température .

2. Le séchoir intégral à convection naturelle :

C'est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empêche 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 [25]. Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de

1.

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



grande, figures (II.14)et(II.15).

FigureII.14 Le séchoir solaire intégral.

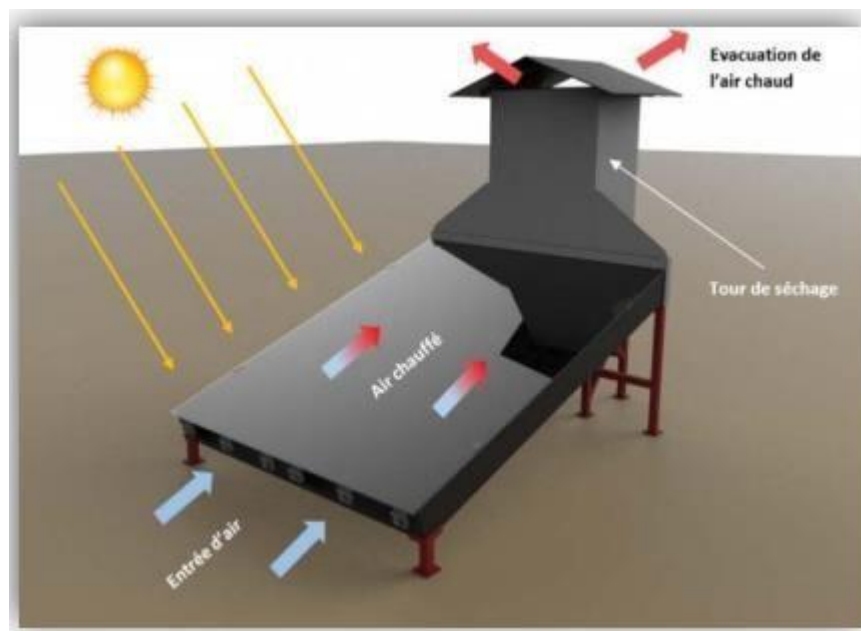


Figure II.15 Le séchoir solaire intégral.

1.

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 et les groupes de femmes.



Figure II.16 Le séchoir solaire coquillage à trois claies

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, figure(I.16). L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques .

4. 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 tente sur des claies surélevées du sol, figure(I.17). La toile en plastique permet de capter l'énergie solaire .

1.



Figure II.17 Séchoir solaire cabane

II.14 Séchoirs solaires indirects

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires .

II.14.1 Principe de fonctionnement

Le séchoir solaire indirect se compose de deux parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée (figure II.18). 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 .

1.

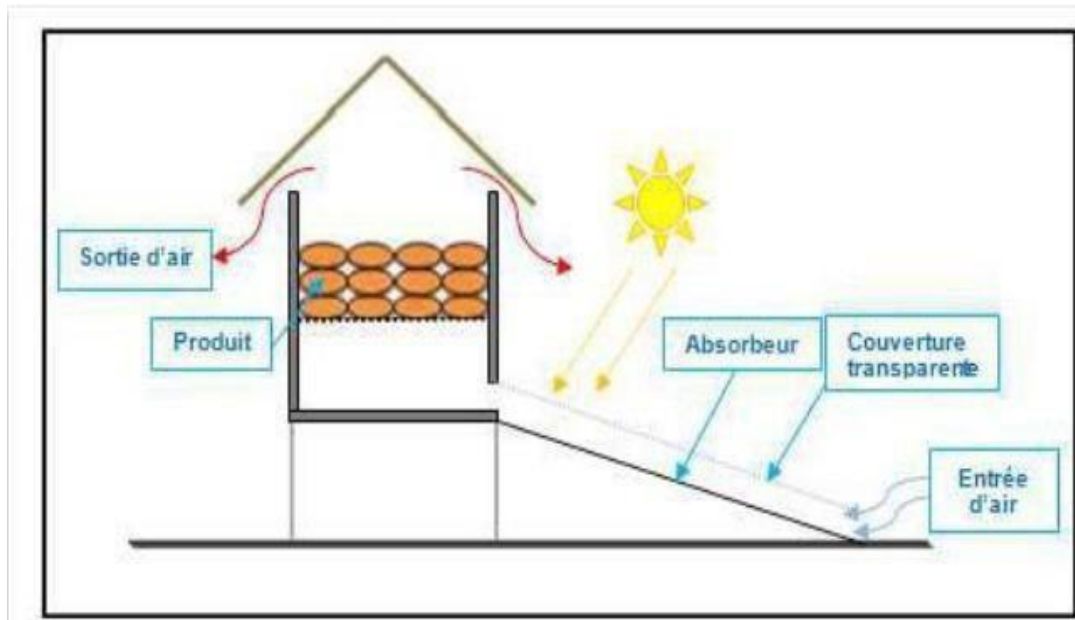


Figure II.18 Le principe d'un échoir solaire indirect.

II.14.2 Avantages et inconvénients

Avantages

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

Inconvénient

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

II.14.3 Type du séchoir indirect

1. Le séchoir armoire

Dans ce type de séchoir, 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, comme le montre la figure(II.19).

1.



Figure II.19 Séchoir solaire armoire

2. Les séchoir-tunnel

Ce sont des séchoirs industriels destinés au séchage des grandes récoltes et dans les processus de conservation de certains aliments, figure(II.20)



Figure II.20 Un séchoir tunnel

Ils se composent d'un champ de capteurs solaires et d'un circuit aéraulique, le tout constituant le générateur d'air chaud. Le produit à sécher est disposé dans des chariots montés sur des rails, qui traversent un tunnel de quelques mètres de façon continue .

1.

3. Les séchoirs solaires destinés aux plantes aromatiques et médicinales

Le séchage des plantes aromatiques et médicinales (PAM) est une étape essentielle dans l'industrie agro-alimentaire et pharmaceutique, car tout en facilitant les prochaines étapes de transformation, elle permet aux plantes de garder toutes leurs qualités et permet de les conserver plus longtemps, figure(II.21).



Figure II.21 Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM

À cet effet, un premier séchoir solaire indirect destiné au séchage des plantes aromatiques et médicinales a été réalisé et testé pour le séchage de quelques plantes aromatiques.

1.

4. Séchoirs hybrides

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, gaz, ...etc.), l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir : Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.

Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation. La figure (II.22) montre une bonne description du séchoir solaire hybride.



Figure II.22 Séchoir solaire hybride.

1.

1. Types des séchoirs hybrides

➤ Séchoir hybride à convection forcée

Ce type de séchoir est constitué d'un toit (Figure I.23) qui joue le rôle de capteur, un ventilateur assure une circulation importante de l'air permettant de sécher très rapidement les produits. 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 le produit à sécher se trouve sur les rangées de claies superposées .



Figure II.23 Séchoir solaire hybride à convection forcée

➤ Séchoir hybride solaire-gaz

Il est constitué d'un collecteur solaire pour réchauffer l'air, la circulation de l'air se fait par convection naturelle du collecteur solaire à l'armoire, figure(II.24)

Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée.

Les produits peuvent donc être séchés quelles que soient les conditions climatiques .

1.

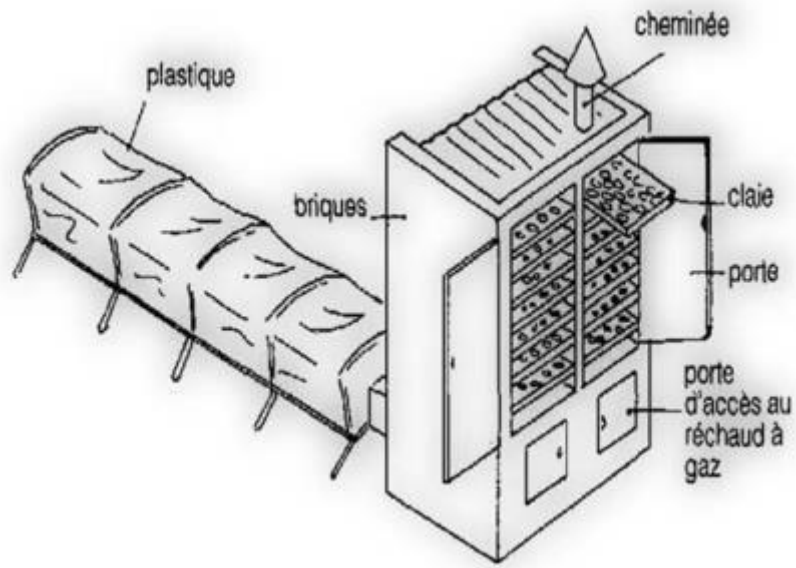


Figure II.24 Séchoir solaire hybride solaire-gaz

II.15 Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage. Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure II.25) a les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage et une cheminé), mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empète directement sur le produit comme le séchoir intégral .

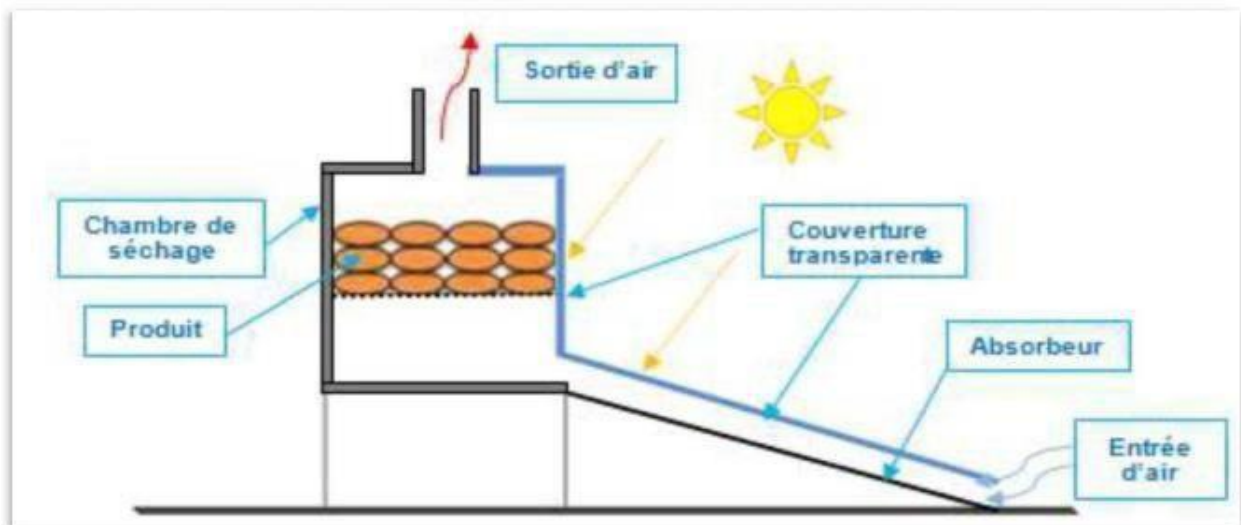


Figure II.25 Le principe d'un séchoir solaire mixte

Avantages du séchage solaire

- Le taux de séchage augmente avec la température plus élevée et le mouvement de l'air dans la chambre.
- La nourriture est enfermée dans le séchoir et donc protégée de la poussière, des insectes, des oiseaux et des animaux.
- Une température plus élevée empêche l'infestation d'insectes et la vitesse de séchage plus rapide réduit le risque d'altération par les micro-organismes.
- Les séchoirs sont étanches, par conséquent, la nourriture n'a pas besoin d'être déplacée pendant la saison des pluies.
- Un séchoir peut être construit à partir de matériaux disponibles localement à un coût relativement faible.

II.16 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de nous pencher sur le séchage solaire qui est l'une des applications les plus renouvelables, il dépend de plusieurs façons ou de multiples techniques et outils pour y parvenir dans de bonnes conditions. Ainsi que l'effet des paramètres sur le séchage.

Pour comprendre mieux le principe de fonctionnement de ces paramètres, une partie est réservée aux différents types de séchoirs existants, aux avantages et aux inconvénients ainsi que leur classification.

Chapitre III

Partie Expérimentale

Conception et Réalisation du séchoir solaire

III. Conception du séchoir solaire

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les étapes suivies pour la réalisation d'un séchoir solaire indirect en convection forcée. Les travaux sont réalisés au sein du hall technologique de la faculté de technologie.

Les objectifs à atteindre lors de la conception du séchoir solaire :

- Obtenir un produit séché de qualité,
- Un séchoir de faible coût,
- Une production maximale dans un minimum de temps.

III.2 Description du séchoir solaire

Le séchage solaire consiste à accumuler l'énergie du soleil à l'intérieur d'un dispositif de collecte de la chaleur, puis à créer un flux d'air chaud par convection naturelle ou forcée.

Le séchoir solaire est direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Il est à base de bois constitué essentiellement :

- D'une plaque absorbante fixée à la base de la chambre de séchage
- D'un vitrage fixé sur la partie haute du séchoir
- D'un ventilateur placé à l'entrée de l'air pour accélérer le processus de transport de l'air chaud dans la chambre de séchage.
- Des étagères pour placer les produits à sécher.



Figure III.1 Séchoir solaire

III.3 Réalisation du séchoir solaire

III.3.1 La chambre de séchage

La chambre de séchage est simple, elle est constituée d'un vitrage et d'une plaque absorbante. Nous avons placé du verre absorbant solaire sur la face supérieur extérieur pour garantir que les rayons thermiques déposent dans la base noire (plaque absorbante) et collectent une chaleur importante à l'intérieur de la chambre de séchage.

- **Les étapes de réalisation séchoir solaire**
- La base du séchoir solaire est un morceau de fer teint en noir d'une superficie de $(40 \times 60) \text{cm}^2$



Figure III.2 Base du séchoir

- On place le cadre en morceau de 10 cm de haut et d'épaisseur 1cm sur les bords de la plaque.
- Créer une entrée d'air dimensionnée $(10/3)$ cm à la base du capteur qui sert d'entrée et une sortie d'air chaud,



Figure III.3 Entrée et sortie de l'air chaud



Figure III.4 Fixation des bords, la porte et des pieds

- Peinture de la base en noir
- Nous avons installé un ventilateur à l'entrée
- Placement du ventilateur à l'entrée



Figure III.5 Emplacement du ventilateur

- Installation de polystyrène sur tous les côtés de la chambre de séchage pour maintenir une température élevée.



Figure III.6 Collage du polystyrène sur les cotés

- Installation de supports de produits à l'intérieur de la chambre de séchage



Figure III.7 placement des supports du produit

- Pose de la feuille de vitrage d'épaisseur 2mm sur la partie supérieure du séchoir



Figure III.8 Pose du vitrage



Figure III.9 Aperçu de l'intérieur du séchoir solaire avec deux supports

- Ajout des bords en fer pour maintenir l'appareil à 15 cm

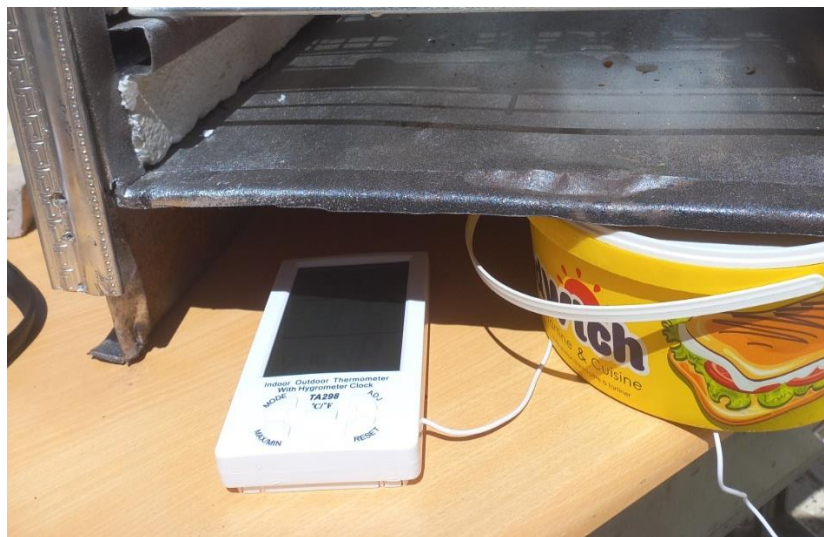


Figure III.10 Surélever la chambre de séchage



Figure III.11 Vue du séchoir solaire complet



Figure III.12 Vue du séchage des produits

III.4 Appareillage utilisés

III.4.1 Mesure de la température

La mesure de la température s'effectue à l'aide de thermocouples placés dans des différents endroits :

- Sur le vitrage en haut de la chambre de séchage
- A l'intérieur de la chambre de séchage
- A l'extérieur de la chambre de séchage



Figure III.13 Thermomètres utilisés

III.4.2 Mesure de l'humidité

L'humidité en % est mesurée dans la chambre de séchage à chaque instant à l'aide d'un hygromètre ce dernier mesure le taux d'humidité de l'eau dans la chambre de séchage ainsi que la température.



Figure III.14 Hygromètre

III.5 Principe de fonctionnement du séchoir solaire

L'air frais à la vitesse et la température de l'environnement entre par le fond de la chambre de séchage, le ventilateur augmente la vitesse de l'air chaud entrant et circule dans la chambre entre le vitrage et la base de l'absorbeur, figure (III.11). Par effet de serre le rayonnement solaire étant piégé dans la base noir pour y rester le plus longtemps possible l'air sortant du capteur est chaud par effet de serre et monte par convection forcée pour sécher le produit dans les casiers .

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV. 1 Exploitation des résultats

Les essais de séchage ont été fait dans la ville de M'sila de coordonnées (latitude :35,31° et de longitude 4.23° pendant plusieurs journée ensoleillées.

IV.1.1 Préparation des produits

Nous avons utilisé comme produit à sécher la tomate et Pêche, ensuite placée dans la claie.



Figure IV.1 préparation du produit pour le séchage



Figure IV.2 Le produit séché

Les essais de séchage ont été fait pendant quelques jours du 20Mai2024 jusqu'au 26Mai 2024.

Pour lesquelles nous avons fait sécher la tomate, nous avons enregistré la température à l'extérieur et celle à l'intérieur de la chambre de séchage, ainsi que la température du vitrage et l'humidité relative dans la chambre de séchage pendant des heures de la journée.

La journée **20/05/2024** Le 1er produit à sécher (tomate et oignons) le poids du produit n'est pas pris en compte.

Les résultats obtenus sont exprimés par les courbes de température intérieur et extérieur de la chambre de séchage ainsi que la température du vitrage et le taux de l'humidité dans la chambre de séchage pendant des heures d'ensoleillement de la journée.

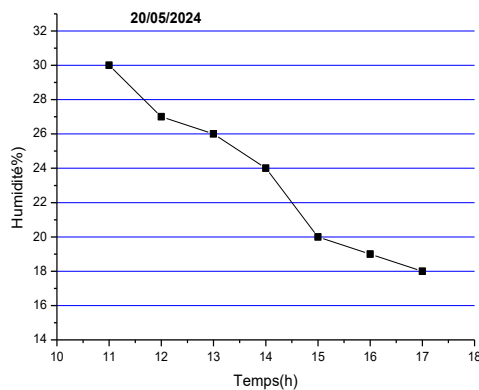


Figure IV. 3 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 20/05/2024

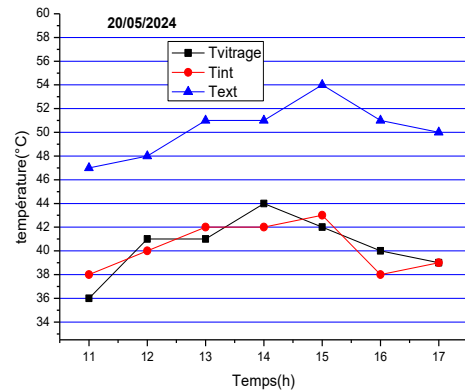


Figure IV. 4 Variation de la température 20/05/2024

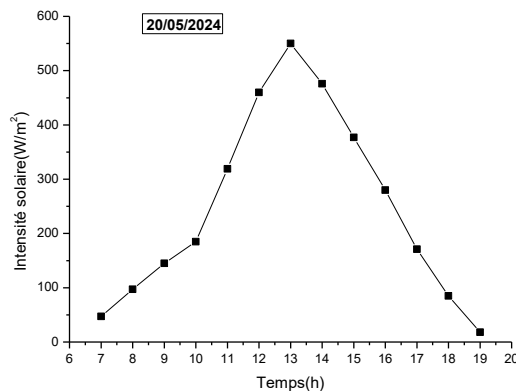


Figure IV. 5 Variation de l'intensité solaire 20/05/2024

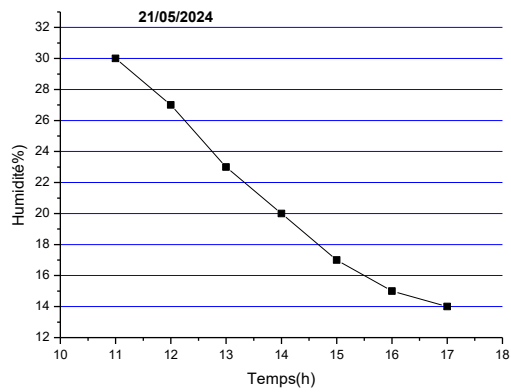


Figure IV. 6 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 21/05/2024

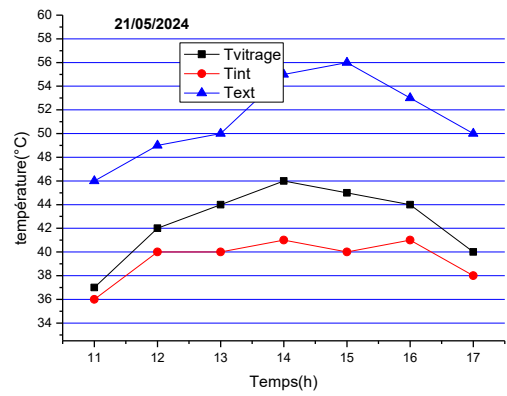


Figure IV. 7 Variation de la température 21/05/2024

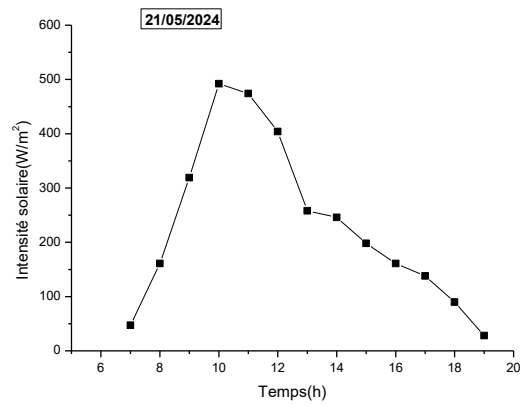


Figure IV. 8 Variation de l'intensité solaire 21/05/2024

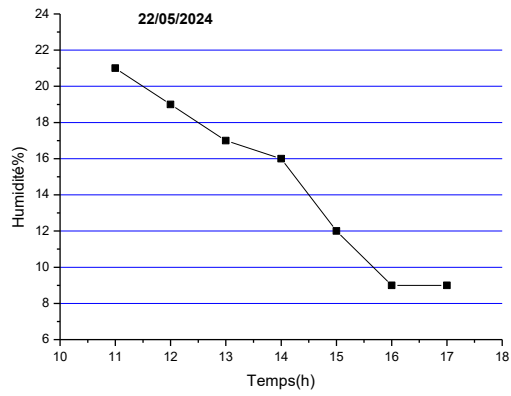


Figure IV. 9 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 22/05/2024

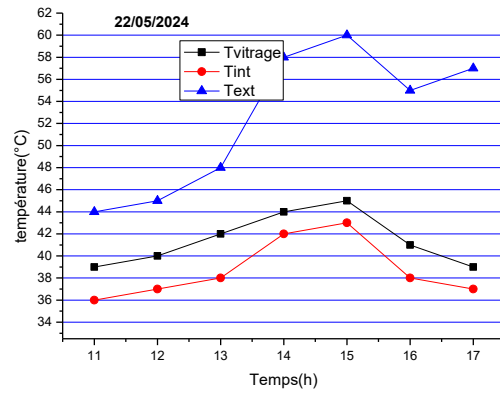


Figure IV. 10 Variation de la température 22/05/2024

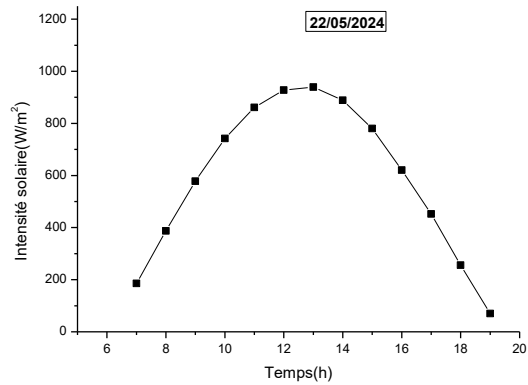


Figure IV.11 Variation de l'intensité solaire 22/05/2024

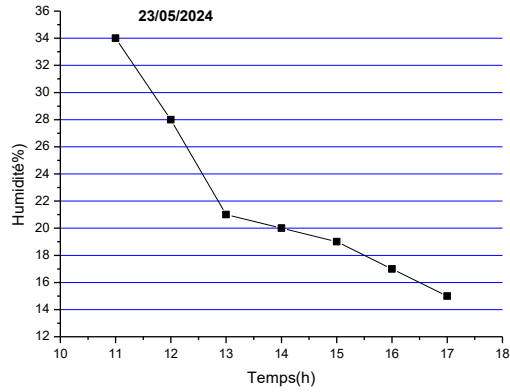


Figure IV. 12 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 23/05/2024

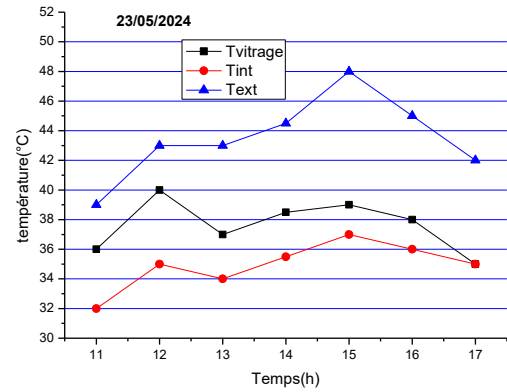


Figure IV. 13 Variation de la température 23/05/2024

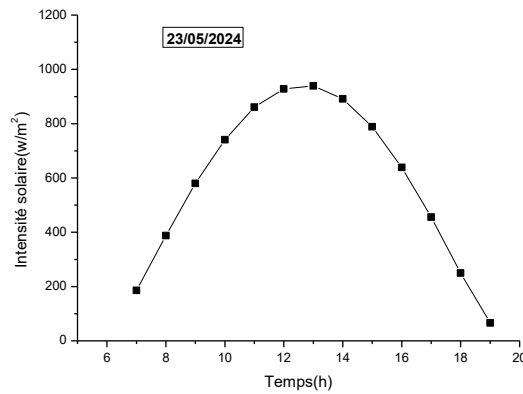


Figure IV.14 Variation de l'intensité solaire 23/05/2024

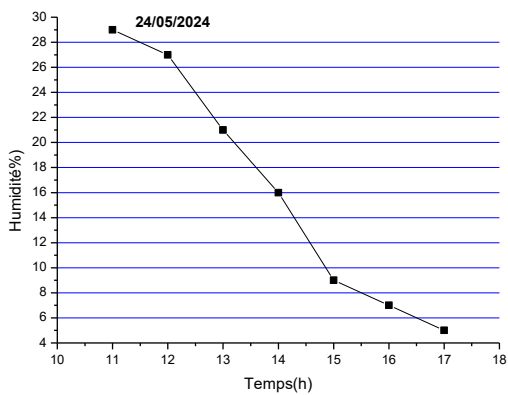


Figure IV. 15 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 24/05/2024

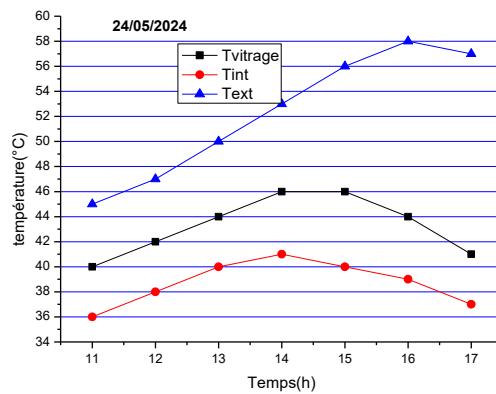


Figure IV. 16 Variation de la température 24/05/2024

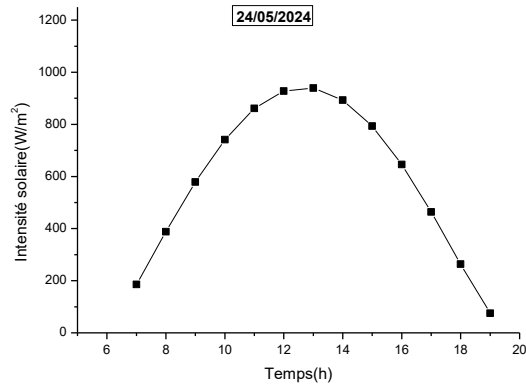


Figure IV.17 Variation de l'intensité solaire 24/05/2024

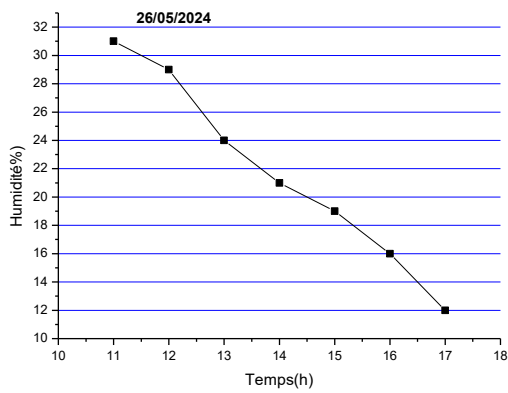


Figure IV. 18 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 26/05/2024

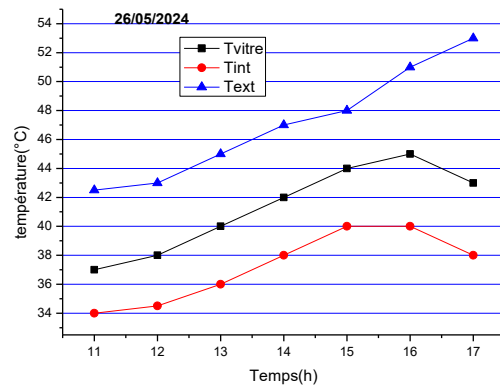


Figure IV. 19 Variation de la température 26/05/2024

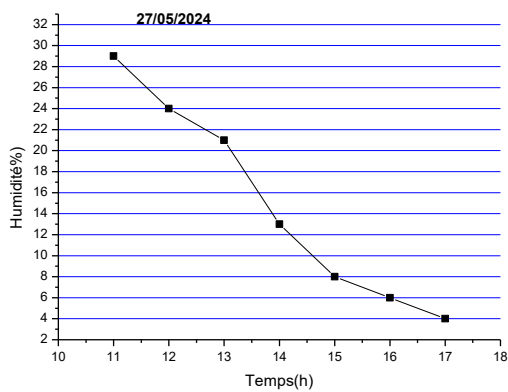


Figure IV. 20 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage 27/05/2024

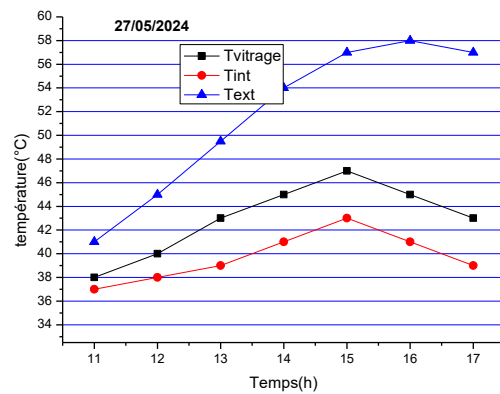


Figure IV. 21 Variation de la température 27/05/2024

Les figures (IV-3-6-9-12-15-18-20) représentent la variation du taux d'humidité pendant le temps dans la chambre de séchage pendant les journées citées ci-dessus, d'après ces figures ne constatons que l'humidité est plus élevée pendant le début du séchage puisque le produit est frais ensuite, l'humidité diminue jusqu'à la fin de la journée puisque la température augmente et le produit commence à perdre son eau en séchant. Toutes les courbes ont la même allure et le taux d'humidité minimale atteint jusqu'à 4% pour une journée ensoleillée.

Les figures (IV-4-7-10-13-16-18-19-21), représentent la variation journalière de la température à l'intérieur de la chambre du séchage à l'extérieur et celle du vitrage pendant les journées citées ci-dessus. D'après ces figures nous constatons que la température la plus élevée est celle de l'extérieur (climat de la journée) ensuite celle du vitrage et enfin la température à l'intérieur du séchoir puisque ce dernier contient le produit à sécher. Nous constatons pendant ces journées la température atteint plus de 50°C vers 16h ensuite diminue vers la fin de la journée.

Les figures (IV-5-8-11-14-17), représentent la variation de l'intensité solaire pendant les journées citées, nous constatons d'après ces figures que l'intensité solaire augmente pendant la journée et atteint le maximum vers 12h ensuite diminue vers la fin de la journée elle est influencée par la température journalière ainsi que les masques solaires.

IV. 2 Calcul du rendement du séchoir solaire

Pour voir l'efficacité thermique ou rendement thermique du séchoir solaire η qui exprimé par le rapport de l'énergie nécessaire pour évaporer une quantité d'eau Q_{eau} par l'énergie solaire incidente Q_{inc} telque :

$$\eta = \frac{Q_{eau}}{Q_{inc}}$$

$$Q_{inc} = I \cdot A \cdot t$$

Avec I : L'irradiance moyenne sur la période de séchage (W/m^2)

A : la surface du vitrage (m^2)

t : le temps de séchage (s)

La masse d'eau à évaporer est donnée par la relation suivante :

$$M_{eau} = M_{init} \times \frac{H_{ini} - H_f}{100}$$

Avec M_{eau} la masse d'eau évaporée

H_{init} L'humidité initiale (%)

H_f L'humidité finale (%)

$$Q_{eau} = M_{eau} \cdot L_v,$$

L_v : La chaleur latente c'est la quantité de chaleur fournie pour transformer 1 kg d'eau liquide en vapeur, est de $2\,257\text{ kJ kg}^{-1}$.

Pour une masse de tomate $M_{\text{init}}=1.2\text{Kg}$, $M_f=66\text{g}$, $H_{\text{ini}}=31\%$, $H_{\text{fin}}=4\%$, l'aire du vitrage $A=0.5\times 0.5=0.25\text{m}^2$ pour une durée de séchage $t=8\text{h}$ et une irradiation $I=786.13\text{W/m}^2$. On obtient :

$Q_{\text{inc}}=4245,156\text{KJ}$ l'énergie incidente

$Q_{\text{eau}}=731,286\text{KJ}$ l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau

Le rendement $\eta = \frac{731.286}{4245.156} = 0.13$ donc $\eta = 13\%$

Le rendement du séchoir solaire pour une durée de 8h et une intensité de rayonnement de $I=786.14\text{W/m}^2$ qui est une valeur moyenne pendant cette journée. Nous pouvons dire que le rendement thermique du séchoir solaire dépend du rayonnement solaire incident ainsi que la masse du produit à sécher et du taux d'humidité et bien sûr de la durée du séchage du produits , tout ces facteur influent sur l'efficacité énergétique du séchoir solaire

Conclusion Générale

Le séchage solaire, est un moyen de conservation des aliments, il est considéré comme 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 réduction des pertes après la récolte. Le séchage des aliments améliore leur durée de vie et minimise les pertes durant le stockage, et diminue leur coût de transport.

Ainsi, dans ce mémoire, nous étudions l'amélioration du séchage solaire par convection forcée avec conception et réalisation d'un séchoir solaire destiné pour le séchage des produits agroalimentaires.

Nous avons présenté les différentes étapes de construction du séchoir solaire qui est constitué d'une chambre de séchage cette dernière est doté d'un vitrage dans la partie haute et d'une plaque absorbante dans la partie basse et des claies où sont placés les produits à séchés.

Les essais de séchage sont réalisés pendant des journées ensoleillées pendant plusieurs heures pour des produits tels que la tomate, les oignons et le piment.

Les résultats obtenus ont montré que le processus de séchage dépend non seulement de la taille du produit à sécher mais aussi des facteurs externes comme la température ambiante c'est-à-dire du climat ces facteurs contrôlent le temps de séchage du produit en diminuant son taux d'humidité.

Nous avons trouvé que le taux d'humidité du produit diminue au fur et à mesure que la température augmente et le produit est complètement séché lorsque le taux d'humidité atteint une valeur minimale. Le rendement thermique du séchoir solaire dépend du rayonnement solaire incident ainsi que la masse du produit à sécher et du taux d'humidité et bien sûr de la durée du séchage du produits, tous ces facteurs influent sur l'efficacité énergétique du séchoir solaire

Références

- [1]: U, Eiker. Solar technologies for buildings, John Wiley sans Sons, England. (2001).
- [2] : J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [3] : Y. Jannot. Thermique solaire, Mars 2011.
- [4] Conversion du courant continu en courant alternatif
- [5] www.enersol.be
- [6] www.energia.unblog.fr
- [7] Autor: Bc. Monika Kokrdová
- [8] L. Achoui, S.Hamidi « développement d'un système photovoltaïque onduleur-MAS, application au pompage photovoltaïque » PFE.ENP.juin 2004.
- [9] K.Touafek « étude d'un capteur solaire hybride Photovoltaïque thermique »Magister.ENP.octobre 2005.
- [10] Réduction d'impôt de prix hors taxe du coût des équipements (sauf la main d'œuvre)
- [11] : http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Capteur_solaire_plan.
- [12] Bakker m., zondag h. A., elswijk m. J., et al. Performance and costsof a roof-sized PV/Thermal array combined with a ground coupled heat pump. Solar Energy, vol. 78, n° 2,pp. 331-339,2005.
- [13] : S.Youcef-Ali, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2001.
- [14] N. BADIDJA et Z. BENMIR, « Influence de la température de séchage sur la qualité de la pomme de terre ». Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah d'Ouargla (2016).
- [15]D. R. Pangavhave; R. L. Sawhney (2002): Review of research and development work on solar dryers for grape drying, Energy conservation and management 43 (2002) 45-61
- [16] : D.Njomo, Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre, Rev .Gén.Therm(Elsevier).Vol.37,(973-980),1998.

- [17] : A.Bouguima , K.Abbou , Etude et realization d'un capteur solaire plan à eau , Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master , 2014-2015 , p 5-6 .
- [18] : A, Guedira; A, Benallou. Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement naturel au Maroc, Revue des Energies Renouvelables, journées de thermique, p 79-84. (2001).
- [19] Boulemtafes. A 2011. le séchage solaire des produits agricoles. Bulletin des énergies renouvelables, à publication du centre de développement des énergies renouvelables, CDER N° 21. https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_021_07.pdf
- [20] M.GOUDJAL Yacine INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE _ alger these en vue de l'obtention du diplôme de magister en sciens agronomiques «séchage solaire du raisin , variété sultanine » 2004 _ 2005
- [21] H. Houhou, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaire ». Mémoire de Magister en génie mécanique, Université Mohamed Khider – Biskra (Décembre 2012).
- [22] S. Chouicha, « Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact Sur la qualité ». Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (2010).
- [23] A. Bahadj, « Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre ». Mémoire de master, Kasdi Merbah de Ouargla (2014).
- [24] André charreau et Roland cavaillé Techniques de l'ingénieur – génie des procédés Séchage Appareillage et choix d'un procédé, j 2484-2 ; 2484-16.
- [25] Bhattacharyya, T., R. Anandalakshmi, and K. Srinivasan, Heat Transfer Analysis on Finned Plate Air Heating Solar Collector for its Application in Paddy Drying. Energy Procedia, 2017. 109: p. 353-360.
- [26] V.R. Khawale, R.P. Khawale, Performance Evaluation of a double pass Indirect Solar Drier for drying of Red Chili 3 (2016) 514–518
- [27] Gulcimen, F., H. Karakaya, and A. Durmus, Drying of sweet basil with solar air collectors. Renewable Energy, 2016. 93: p. 77-86.
- [28] Lingayat, A., V. Chandramohan, and V. Raju, Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying. Energy Procedia, 2017. 109: p. 409416.

[29] Jain, D., Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined

[30] : S.Youcef-Ali, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2001.

Résumé :

Dans ce travail nous avons fait la conception et la réalisation d'un séchoir solaire dont le but d'améliorer le processus de séchage des produits agro-alimentaire par la convection forcée. Nous avons présenté les différentes étapes de construction du séchoir solaire qui est constitué d'une chambre de séchage cette dernière est doté d'un vitrage dans la partie haute et d'une plaque absorbante dans la partie basse et des claies ou sont placés les produits à séchés.

Les essais de séchage sont réalisés pendant des journées ensoleillées pendant plusieurs heures pour des produits tels que la tomate, les oignons et le piment.

Les résultats obtenus ont montré que le processus de séchage dépend non seulement de la taille du produit à sécher mais aussi des facteurs externes comme la température ambiante c'est-à-dire du climat ces facteurs contrôlent le temps de séchage du produit en diminuant son taux d'humidité. Le rendement thermique du séchoir solaire dépend du rayonnement solaire incident ainsi que la masse du produit à sécher et du taux d'humidité et bien sûr de la durée du séchage du produits, tous ces facteur influent sur l'efficacité énergétique du séchoir solaire.

Mots-clés : séchage solaire, convection forcée, taux d'humidité, gisement solaire

المخلص :

في هذا العمل قمنا بتصميم وبناء مجفف شمسي يهدف إلى تحسين عملية تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية عن طريق الحمل الحراري القسري. وقد عرضنا المراحل المختلفة في بناء المجفف الشمسي الذي يتكون من حجرة تجفيف مزودة بزجاج في الجزء العلوي وشفيحة ماصة في الجزء السفلي، ورفوف توضع فيها المنتجات المراد تجفيفها. أجريت اختبارات التجفيف في الأيام المشمسة لعدة ساعات لمنتجات مثل الطماطم والبصل والفلفل الحار.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن عملية التجفيف لا تعتمد فقط على حجم المنتج المراد تجفيفه ولكن أيضًا على العوامل الخارجية مثل درجة الحرارة المحيطة، أي المناخ. تتحكم هذه العوامل في وقت تجفيف المنتج عن طريق تقليل محتواه من الرطوبة. وتعتمد الكفاءة الحرارية للمجفف الشمسي على الإشعاع الشمسي الساقط، وكتلة المنتج المراد تجفيفه، ومحتوى الرطوبة، وبالطبع وقت تجفيف المنتج. وتؤثر جميع هذه العوامل على كفاءة الطاقة في المجفف الشمسي.

الكلمات المفتاحية: التجفيف بالطاقة الشمسية، الحمل الحراري القسري، محتوى الرطوبة، الرواسب الشمسية