

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 : Technique de Production Industrielle

Présenté par :

Benremache Mohamed

Thème

CONCEPTION ET REALISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE

DESTINE AUX PRODUITS AGRALIMENTAIRES

Devant le jury composé de :

| NOM et Prénom | Grade | Qualité |
|----------------------|--------------|----------------|
| Bouaouina Lalouani | MCB | Président |
| Benkherbache Souad | MCA | Encadreur |
| Belkhiri Khelaf | MCA | Examinateur |

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2022

Dédicaces

*Je dédie ce travail à tous ceux qui ont été crédités de m'avoir
amené à cette station .*

*Aux honorables parents et à tous mes frères et sœurs,
et je n'oublie pas mes amis qui n'ont pas été avares de me tendre la
main.*

*À celle qui m'a poussé d'un pas solide pour réaliser ce travail,
mon vertueuse Encadreur M^{me} Ben Kherbache souad*

Remerciements

*Premièrement, louange à Dieu, avec sa grâce duquel les bonnes actions sont
accomplies*

*Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour l'accomplissement
de ce travail*

*J'adresse également nos sincères remerciements à tous mes professeurs, dirigés
par l'honorable Mme Ben Kherbache Souad*

*Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté
d'évaluer et de juger ce travail*

*Je remercie également tous les collègues et amis qui n'ont pas hésité à tendre la
main*

Liste des figures

Liste des figures

| | | |
|-----------------------|---|----|
| Figure I. 1 : | Séchage traditionnel des produits agricoles en Algérie. | 2 |
| Figure I. 2 : | périodes du séchage | 8 |
| Figure I. 3 : | Illustration d'un séchoir solaire. | 11 |
| Figure I. 4 : | Principe de séchage à l'air libre. | 12 |
| Figure I. 5 : | Séchoir solaire "Lit TARA". | 13 |
| Figure I. 6 : | Séchoir solaire "Tente". | 14 |
| Figure I. 7 : | Séchoir solaire "pyramide". | 14 |
| Figure I. 8 : | Séchoir solaire "Cabinet". | 15 |
| Figure I. 9 : | Séchoir solaire "cheminée". | 16 |
| Figure I. 10 : | Séchoir solaire " tiroir". | 16 |
| Figure I. 11 : | Schéma représente types des séchoirs solaires. | 17 |
| Figure I. 12 : | Le principe d'un séchoir solaire direct. | 18 |
| Figure I. 13 : | Séchoir solaire coffre. | 19 |
| Figure I. 14 : | Le séchoir solaire intégral. | 20 |
| Figure I. 15 : | Le séchoir solaire intégral. | 20 |
| Figure I. 16 : | Le séchoir solaire coquillage à trois claies. | 21 |
| Figure I. 17 : | Séchoir solaire cabane. | 22 |
| Figure I. 18 : | Le principe d'un séchoir solaire indirect. | 23 |
| Figure I. 19 : | Séchoir solaire armoire | 24 |
| Figure I.20 : | Un séchoir tunnel. | 24 |
| Figure I. 21 : | Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM | 25 |
| Figure I. 22 : | Séchoir solaire hybride. | 26 |
| Figure I. 23 : | Séchoir solaire hybride à convection forcée. | 27 |
| Figure I. 24 : | Séchoir solaire hybride solaire-gaz. | 28 |
| Figure I. 25 : | Le principe d'un séchoir solaire mixte. | 28 |
| Figure I. 26 : | capteur solaire avec absorbeur à ailettes | 29 |
| Figure I. 27 : | Capteur solaire à air avec ailettes. | 30 |
| Figure I. 28 : | Vue schématique de l'installation expérimentale du séchoir solaire. | 31 |
| Figure I. 29 : | Séchoir multi-claies avec capteur à air incliné multi-passes avec un stockage Thermique intégré. | 32 |
| Figure I. 30 : | Conception simple d'un séchoir solaire de type armoire | 32 |
| Figure I.31 : | Schéma de la cheminée solaire. | 33 |

Liste des figures

| | | |
|-------------------------|---|----|
| Figure I. 32 | Schéma du séchoir solaire avec cheminée solaire | 34 |
| Figure II. 1 : | Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu | 35 |
| Figure II. 2 : | Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. | 37 |
| Figure II. 3 : | Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil | 38 |
| Figure II. 4 : | La sphère céleste | 38 |
| Figure II. 5 : | Les coordonnées géographiques | 39 |
| Figure II. 6 : | Coordonnées horaires | 40 |
| Figure II. 7 : | Coordonnées horizontales. | 41 |
| Figure II. 8 : | Représentation des vecteurs unitaires | 43 |
| Figure II. 9 : | Les composants du rayonnement solaire | 45 |
| Figure II. 10 : | Le radiomètre de Crookes | 46 |
| Figure II. 11 : | Le pyranomètre | 47 |
| Figure II. 12 : | Le pyrhéliomètre | 47 |
| Figure III. 1 : | Fonctionnement du système solaire photovoltaïque | 49 |
| Figure III. 2 : | Cellule photovoltaïque | 49 |
| Figure III. 3 : | une cellule monocristalline et polycristalline | 55 |
| Figure III. 4 : | les panneaux solaires intégrés au toit | 50 |
| Figure III. 5 : | Schéma de principe de la conversion photoélectrique | 51 |
| Figure III. 6 : | Structure de base d'une cellule photovoltaïque | 51 |
| Figure III. 7 : | Classification des principales technologies de cellules solaires PV | 53 |
| Figure III. 8 : | Fonctionnement de système solaire thermique | 54 |
| Figure III. 9 : | Capteur solaire intégré au toit | 55 |
| Figure III. 10 : | capteur solaire à tube sous vide. | 56 |
| Figure III. 11 : | Schéma de principe d'un capteur solaire thermique plan | 57 |
| Figure III. 12 : | Capteur solaire thermique à eau, vue en coupe. | 57 |
| Figure III. 13 : | Capteur solaire plan à air | 58 |
| Figure IV.1 : | Séchoir solaire | 61 |
| Figure IV.2 : | Base du capteur | 62 |
| Figure IV.3 : | Base du capteur avec les bords | 63 |
| Figure IV.4 : | fixation des ailettes | 63 |
| Figure IV.5 : | couverture de l'absorbeur avec l'Aluminium | 64 |
| Figure IV.6 : | peinture de l'absorbeur | 64 |
| Figure IV.7 : | Fixation est inclinaison du capteur | 64 |

Liste des figures

| | | |
|-----------------------|--|----|
| Figure IV.8 : | Pose du vitrage | 65 |
| Figure IV.9 : | Vue du capteur solaire C1(à ailettes droites intercalées) | 65 |
| Figure IV.10 : | Vue du capteur solaire C2(à ailettes intercalées en zigzag) | 66 |
| Figure IV.11 : | Fixation du cadre | 67 |
| Figure IV.12 : | Fixation des supports | 67 |
| Figure IV.13 : | Fixation du plafond, la porte et les pieds | 68 |
| Figure IV.14 : | Vue de la chambre de séchage complète | 68 |
| Figure IV.15 : | Vue d'ensemble du séchoir solaire | 69 |
| Figure IV.16 : | capteur c1 avec conditions d'entrée et sortie | 70 |
| Figure IV.17 : | préparation du produit pour le séchage | 70 |
| Figure IV.18 : | Anémomètre | 71 |
| Figure IV.19 : | Thermomètres utilisés | 72 |
| Figure IV.20 : | Hygromètre | 72 |
| Figure IV.21 : | Variation de la température dans le séchoir solaire M=526g, v=1m/s Te=31.6°C | 73 |
| Figure IV.22 : | Produit séché | 74 |
| Figure IV.23 : | Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage : Me=526g, v=1m/s Te=31.6°C | 74 |
| Figure IV.24 : | Variation de la température séchage :Me=368g, v=1.1m/s | 73 |
| Figure IV.25 : | Variation de l'humidité relative : Me=368g, v=1.1m/s Te=32.93°C | 73 |
| Figure IV.26 : | Variation de la température : Me=504g, v=1.1m/s Te=32.15°C | 76 |
| Figure IV.27 : | Variation de l'humidité relative : Me=504g, v=1.1m/s Te=32.15°C | 77 |
| Figure IV.28 : | Variation de la température : Me=529g, v=1.1m/s Te=31.24°C | 78 |
| Figure IV.29 : | Variation de l'humidité relative : Me=529g, v=1.1m/s Te=31.24°C | 78 |
| Figure IV.30 : | Variation de l'intensité solaire : v=1.1m/s Te=31.24°C | 78 |
| Figure IV.31 : | Variation de la température : Me=267g, v=1.9m/s Te=34.17°C | 79 |
| Figure IV.32 : | Variation de l'humidité relative : Me=529g, v=1.9m/s Te=34.18°C | 80 |
| Figure IV.33 : | Variation de l'intensité solaire : v=1.9m/s Te=34.17°C | 80 |

Sommaire

| | |
|--|-------------------|
| Dédicaces | |
| Remerciements | |
| Liste des figures | |
| Introduction Générale | 1 |
| Chapitre I | Le Séchage |
| I. 1 Historique du séchage | 2 |
| I. 2 Description | 2 |
| I. 3. But du séchage | 2 |
| I. 4 Les méthodes de séchage | 3 |
| I. 5 Différentes méthodes de séchage | 4 |
| I. 6 Caractéristiques de l'air de séchage | 3 |
| I. 6.1 Humidité | 3 |
| I. 6.2 Degré de saturation | 3 |
| I.6.3 Température | 4 |
| I. 7. Différents modes de séchage | 4 |
| I. 8. Le séchage solaire | 5 |
| I.8.1 Introduction | 5 |
| I.8. 2 Importance et intérêt de séchage | 6 |
| I. 8. 3 Séchage des produits agricoles | 6 |
| I.9 Cinétique de séchage | 7 |
| I.9.1 Les périodes du séchage | 7 |
| I.10 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage | 9 |
| I.10.1 Influence de la température de l'air | 9 |
| I.10.2 Influence de la vitesse de l'air | 9 |
| I.10.3 Influence de l'humidité de l'air | 9 |
| I.11 Modifications de la qualité du produit à séché | 10 |
| I.11.1 Modification biochimiques dues à la température | 10 |
| I.11.2 Pertes d'arômes | 10 |
| I.11.3 Modifications physiques et mécaniques | 10 |
| I. 12 Les séchoirs solaires | 11 |
| I.12.1 Description | 11 |
| I.13 Les différents types de séchoirs solaires | 11 |
| I.13.1 Séchoirs naturels | 12 |
| I.13.2 Le séchoir solaire "Lit TARA" | 12 |
| I.13.3 Le séchoir solaire "Tente" | 13 |

Sommaire

| | | |
|---|----------------------------|-----------|
| I.13.4 Le séchoir solaire "pyramide" | 14 | |
| I.13.5 Le séchoir solaire "Cabinet" | 15 | |
| I.13.6 Le séchoir solaire "cheminée" | 15 | |
| I.13.7 Le séchoir solaire " tiroir" | 16 | |
| I.14 Classification des types de séchoirs solaires | 17 | |
| I.14.1 Les séchoirs solaires directs | 17 | |
| I.14.2 Séchoirs solaires indirects | 22 | |
| I.14.3 Types de séchoirs indirects | 23 | |
| I.14.4 Les séchoirs mixtes | 28 | |
| I.15 Synthèse bibliographique | 29 | |
| I.16. Conclusion | 34 | |
| Chapitre II | Le Gisement solaire | 35 |
| II.1.Introduction | | 35 |
| II. 2. Le soleil | | 35 |
| II. 2.1. Constante solaire (C) | | 36 |
| II. 2. 2. Caractéristiques de la terre | | 36 |
| II. 2. 2. 1. L'atmosphère terrestre | | 36 |
| II. 2. 2. 2. Mouvement de la terre | | 37 |
| II.3 La sphère céleste | | 38 |
| II.3.1 Les coordonnées célestes | | 39 |
| II.3.2 Les coordonnées géographiques | | 39 |
| II.3.3 Les coordonnées horaires | | 39 |
| II.3.4. Les coordonnées horizontales | | 40 |
| II.4. Le temps solaire | | 41 |
| II.4.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) | | 41 |
| II.4.2 Le Temps Solaire Moyen(T.S.M) | | 41 |
| II.4.3 Le Temps Universel(T.U) | | 42 |
| II.4.4 Le Temps Légal (TL) | | 42 |
| II.4.5 Le Temps Civil | | 42 |
| II.6. Direction des rayons solaires par rapport à un plan | | 42 |
| II.7 Le rayonnement solaire | | 45 |
| II.7.1 Les composants de rayonnement solaire | | 45 |
| II.7.2 Le rayonnement direct sur un plan horizontal | | 45 |
| II.7.3 Le rayonnement diffus sur un plan horizontal | | 45 |
| II.7.4 Rayonnement solaire diffus sur un plan incliné | | 46 |
| II.7.5 Rayonnement global | | 46 |
| II.8. Présentation de différents instruments de mesure du rayonnement solaire | | 46 |

Sommaire

| | |
|--|------------------------------|
| II. 9 Conclusion | 47 |
| Chapitre III | Les panneaux solaires |
| III. 1 Introduction | 48 |
| III. 2. L'énergie solaire photovoltaïque | 48 |
| III. 2.1. Les panneaux solaires photovoltaïques | 48 |
| III. 2.2 Principe de la conversion photovoltaïque | 50 |
| III. 2.3. La cellule photovoltaïque | 51 |
| III. 2.4 .Les différentes technologies de La cellule photovoltaïque | 52 |
| III. 2. 4.1 Les cellules au silicium cristallin | 52 |
| III. 2.4.2 Les cellules à base de couches minces | 52 |
| III. 2.4.3. Les cellules à base de photovoltaïque organique | 52 |
| III. 2.4.4. Les cellules hybrides | 52 |
| III 2.5. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque | 53 |
| III. 3. La conversion thermique | 54 |
| III. 3.1 Les panneaux solaires thermiques | 54 |
| III. 3. 2. Différents types capteurs solaires | 56 |
| III. 3.2.1. Le capteur à tube sous vide | 56 |
| III. 3.2.2. Les capteurs solaires à concentrations | 56 |
| III. 3.2.3. Les capteurs solaires plans | 57 |
| III. 3.2.3.1- Le capteur solaire à eau | 57 |
| III. 3.2.3.2- Le capteur solaire à air | 58 |
| III. 3.3. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire | 59 |
| III. 3.3.1. Les paramètres externes | 59 |
| III. 3.3.2. Les paramètres internes | 59 |
| III.4. Conclusion | 69 |
| Chapitre IV : Partie Expérimentale | |
| Conception et Réalisation du séchoir solaire | |
| IV.1 Conception du séchoir solaire | 61 |
| IV.1.1 Introduction | 61 |
| IV.1.2 Description du séchoir solaire | 61 |
| IV.2 Réalisation du séchoir solaire | 62 |
| IV.2.1 Le capteur solaire | 62 |
| IV.2.2 Les étapes de fabrication d'un capteur solaire | 62 |
| IV.2.3 La chambre de séchage | 66 |
| IV.2.4 Les étapes de fabrication d'un capteur solaire | 66 |
| IV.3 Principe de fonctionnement du séchoir solaire | 69 |
| IV.3.1 Préparation des produits | 70 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| IV.3.2 Appareillage utilisé | 71 |
| IV.3.2.1 Mesure de la vitesse de l'air | 71 |
| IV.3.2.2 Mesure de la température | 71 |
| IV.3.2.3 Mesure de l'humidité | 72 |
| IV. 4 Exploitation des résultats | 72 |
| IV.5 Conclusion | 80 |
| Conclusion générale | 82 |
| Références | 83 |

Introduction Générale

Le séchage solaire, est un moyen de conservation des aliments, il a été considéré comme 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 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.

C'est un procédé de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage, il constitue un moyen rentable pour la déshydratation des produits agro-alimentaires à basses températures.

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 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 la conception et la réalisation d'un séchoir solaire à capteur thermique dont l'absorbeur est muni d'ailettes.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit:

Introduction générale

Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur le séchage et les différents types de séchoirs solaires ainsi qu'une synthèse bibliographique des travaux expérimentaux et numériques sur les séchoirs solaires.

Le deuxième chapitre, comporte des généralités sur le gisement solaire.

Dans le troisième chapitre nous avons exposé les différents panneaux solaires à savoir les panneaux photovoltaïques et les panneaux thermiques.

Dans le quatrième chapitre, qui est la partie expérimentale dans lequel nous exposons les différentes étapes pour la réalisation du séchoir solaire et les capteurs thermique à ailettes droites et à ailettes en zigzag ainsi que les résultats des différents essais de séchage.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Le Séchage

I. 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. [1]

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 18^{ème} 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 [2] Figure (I.1).



Figure I. 1 : Séchage traditionnel des produits agricoles en Algérie.

I.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 [3].

I.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 [4]

I. 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 [5].

I. 5. Différentes méthodes de séchage

a) **Séchage mécanique** : C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, compression et filtration) [6].

b) **Séchage chimique** : C'est un procédé basé sur l'utilisation des produits déshydratants par équilibre osmotique pour extraire l'eau (chlorure de calcium, ...) [7].

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.

I.6. Caractéristiques de l'air de séchage

I. 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. [8]

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 : [8]

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (\text{I.1})$$

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 le rapport suivant pris à la même température.

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{I.2})$$

P_v : Pression partielle de la vapeur dans le mélange.

P_s : Pression de saturation. [8]

I. 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 [9]:

$$\Psi = \frac{M_a}{M_{as}} \quad (I.3)$$

I. 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 une dégradation 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 [9].

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 [9].

I.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 [10] :

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[11].

2. Séchage par convection (ou par entraînement)

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 [12].

3. Séchage par rayonnement

Un rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit. Il permet un chauffage rapide des produits en couches minces (500 μ m). 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 [13].

4. 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.

5. 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 [11].

I.8 Le séchage solaire

I.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 alimentaires 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 [14]. 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 [15].

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 [16].

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.

I.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

certain produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet : [17]

- ✓ 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.

I.8.3 Séchage des produits agricoles

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

I.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 [18].

I.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 figure (I.2).

I.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 figure (I.2), on distingue trois régions : [19]

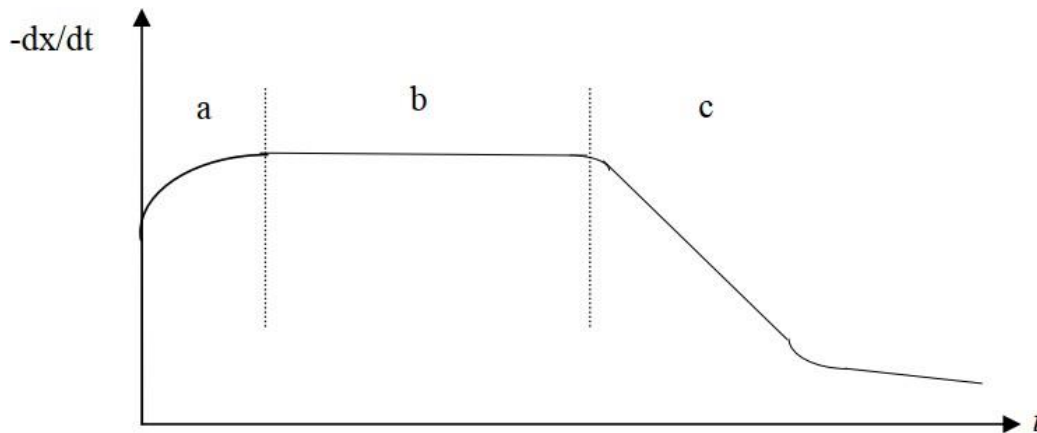


Figure I.2 périodes du séchage

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.

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

I.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.

I.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 [20].

I.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[20].

I.11 Modifications de la qualité du produit à séché

I.11.1 Modification biochimiques dues à la température

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables, sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes :

- Réactions de Maillard, c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle.
- Oxydations de matières grasses (rancissement)
- Destruction de vitamines
- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit.

Réactions enzymatiques : si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elles produisent leurs effets de brunissement des poly phénols, hydrolyse des lipides,...etc

I.11.2 Pertes d'arômes

Le séchage un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule. Mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation.

I.11.3 Modifications physiques et mécaniques

Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- Migration des solutés vers la surface : outre son effet sur l'aspect du produit, cette accumulation de sucres ou d'autres solutés en surface est préjudiciable à la valeur du produit lorsqu'il est consommé réhydraté.
- Fusion et migration de matières grasses.
- Modifications de forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permettent d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

I.12 Les séchoirs solaires

I.12.1 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 [14].



Figure I.3 Illustration d'un séchoir solaire [14]

I.13 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.

I.13.1 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 nécessite 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).

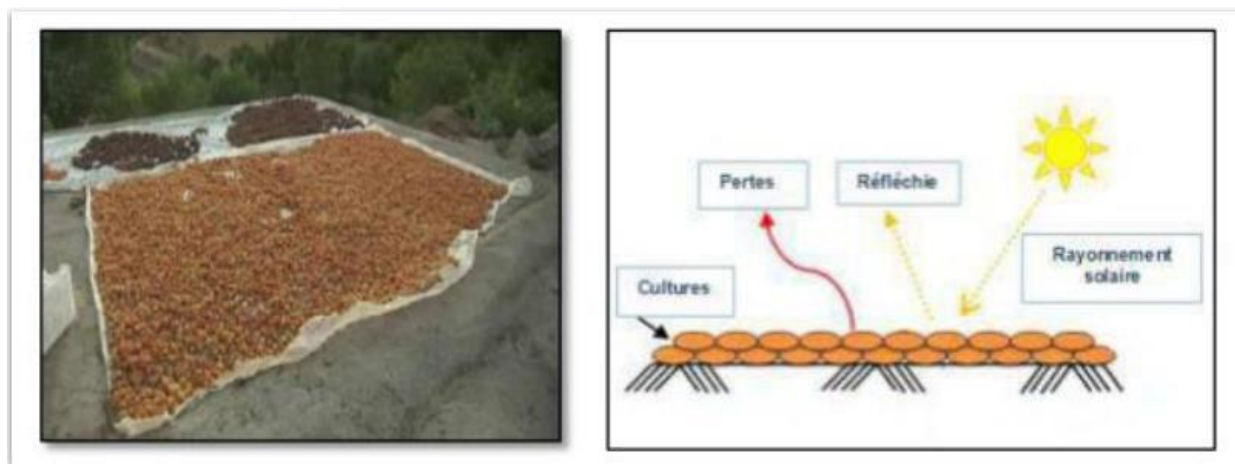


Figure I.4 Principe de séchage à l'air libre.

I.13.2 Le séchoir solaire "Lit TARA"

Ce séchoir de conception très simple ayant un cout très faible, d'une capacité de séchage importante, a été conçu et réalisé par les habitants du village Teguyè (arrondissement de Téra)figure (I.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 elle de 40 -50 cm de manière à supporter les claies ou plateaux.



Figure I.5 Séchoir solaire "Lit TARA".

I.13.3 Le séchoir solaire "Tente"

Le séchoir solaire fait comme une tente est de conception très simple comme le montre la figure (I.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 I.6 Séchoir solaire "Tente".

1.13.4 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 (I.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 I.7 Séchoir solaire "pyramide".

I.13.5 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 I.8) avec l'association film plastiqué et morceau moustiquaire, ce qui certes accélère la vitesse de séchage mais plus coûteux.



Figure I.8 Séchoir solaire "Cabinet".

I.13.6 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 (I.9).



Figure I.9 Séchoir solaire "cheminée".

I.13.7 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 [22], comme le montre la figure (I.10).



Figure I.10 Séchoir solaire "tiroir"[22]

I.14 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.

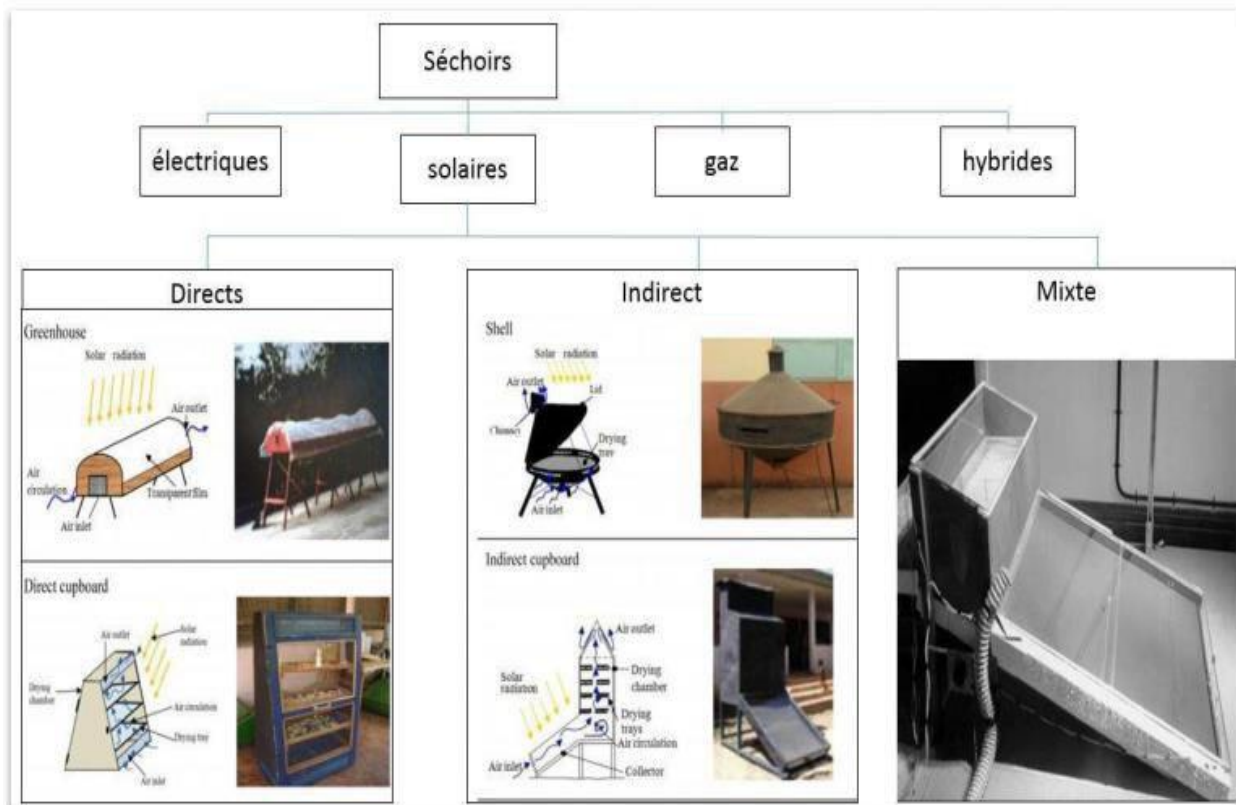


Figure I.11 Schéma représente types des séchoirs solaires.

I.14.1 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 (I.12) schématise le principe de fonctionnement d'un séchoir solaire direct..

I.14.1.1 Principe de fonctionnement

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

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent, sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles) 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].

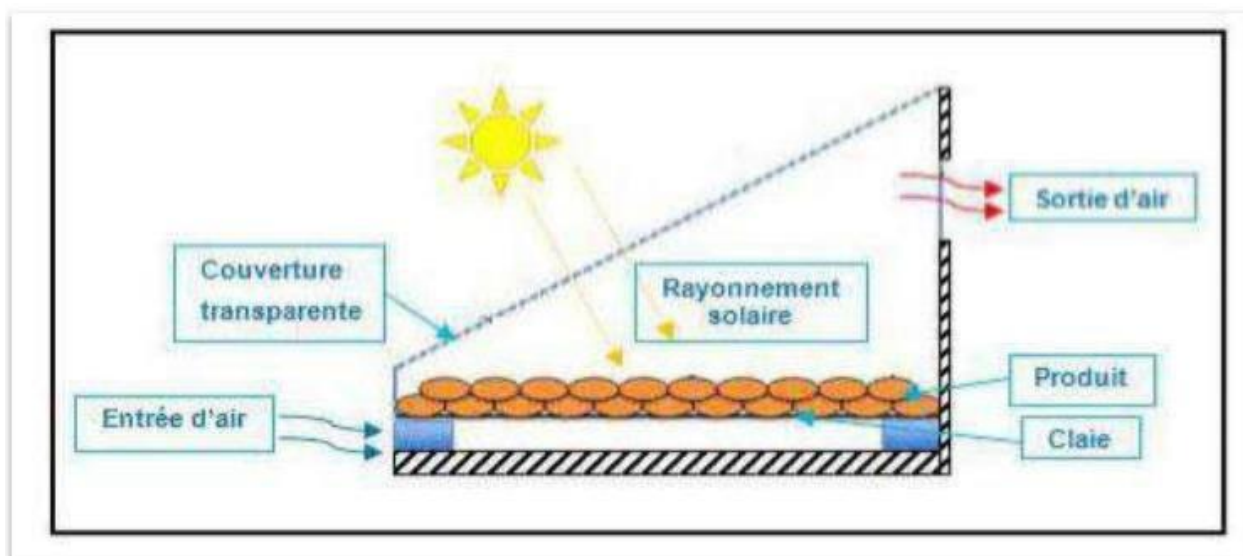


Figure I.12 Le principe d'un séchoir solaire direct [23]

I.14.1.2 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 qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

Inconvénients :

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

I.14.1.3 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 (I.13).



Figure I.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 [24].

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 empiète directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu. Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec [25]. Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande, figures (I.14) et (I.15).

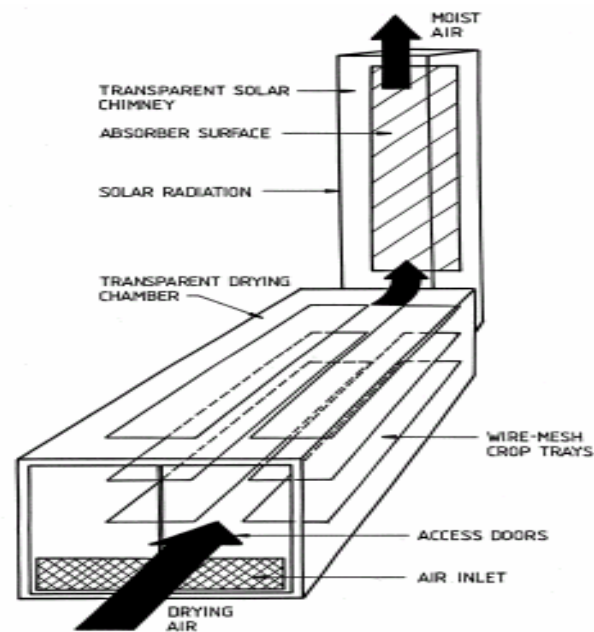


Figure I.14 Le séchoir solaire intégral.

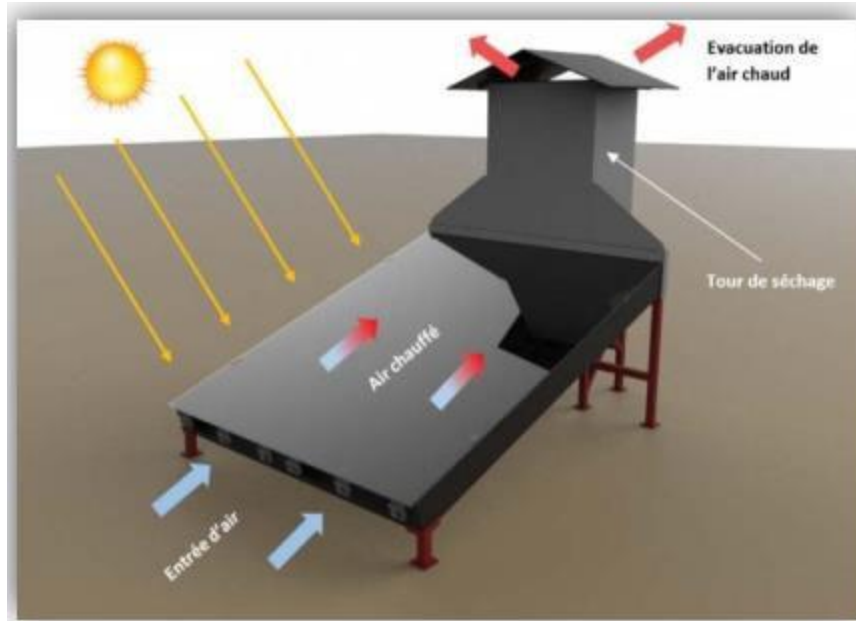


Figure I.15 Le séchoir solaire intégral.

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 I.16 Le séchoir solaire coquillage à trois claies[26]

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 [26].

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 [27].



Figure I.17 Séchoir solaire cabane[27]

I.14.2 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 [2].

I.14.2.1 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 I.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 [14].

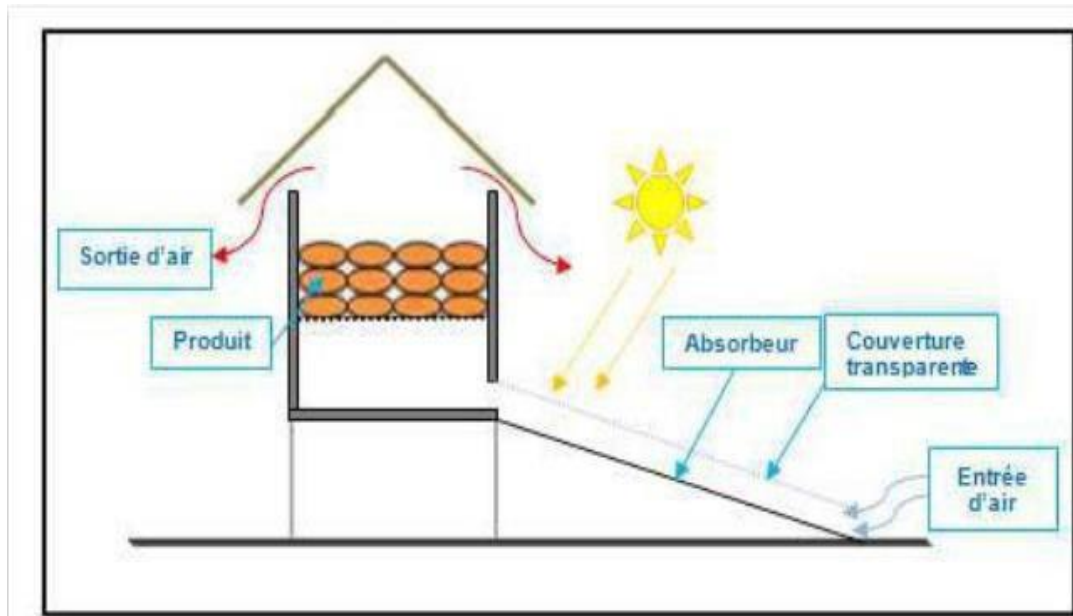


Figure I.18 Le principe d'un échoir solaire indirect.

I.14.2.2 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 de séchoirs localement, avec un coût réduit [28].
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles[28].

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.

I.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(I.19).



Figure I.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(I.20)



Figure I.20 Un séchoir tunnel [29]

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 [29].

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(I.21).



Figure I.21 Séchoir solaire indirect destiné au séchage des PAM [21]

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[29].

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 [4] : 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 (I.22) montre une bonne description du séchoir solaire hybride.

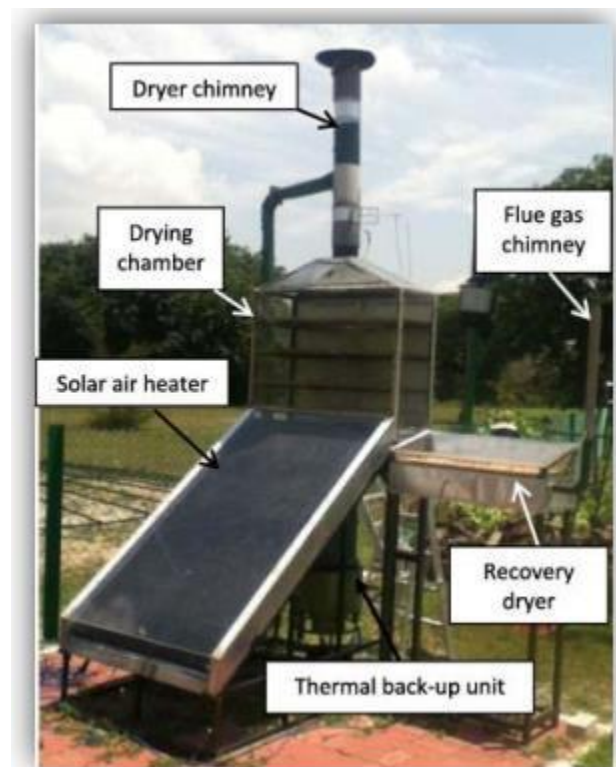


Figure I.22 Séchoir solaire hybride.

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 arriva dans la chambre de séchage où le produit à sécher se trouve sur les rangées de claies superposées [29].



Figure I.23Séchoir solaire hybride à convection forcée[29]

➤ 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(I.24)

Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc être sécher quelles que soient les conditions climatiques [29].

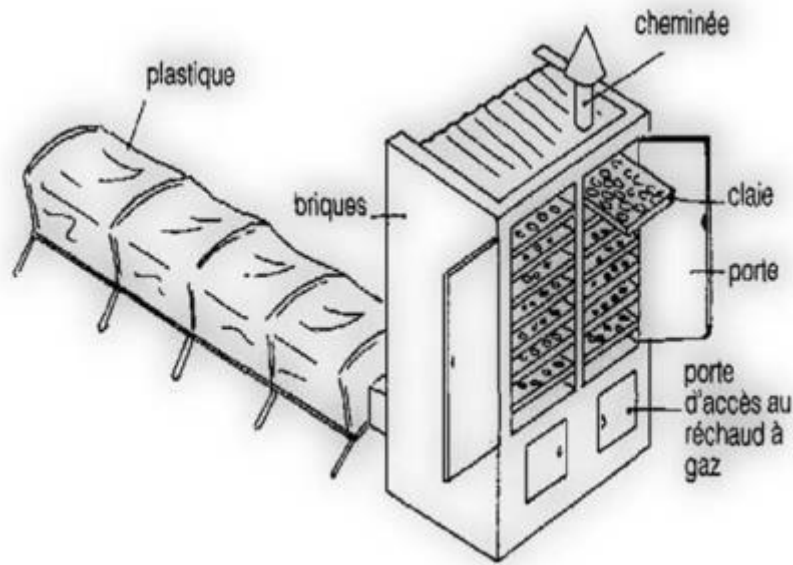


Figure I.24 Séchoir solaire hybride solaire-gaz [29]

I.14.4 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 I.25) a les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage et une cheminée), mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empieète directement sur le produit comme le séchoir intégral [29].

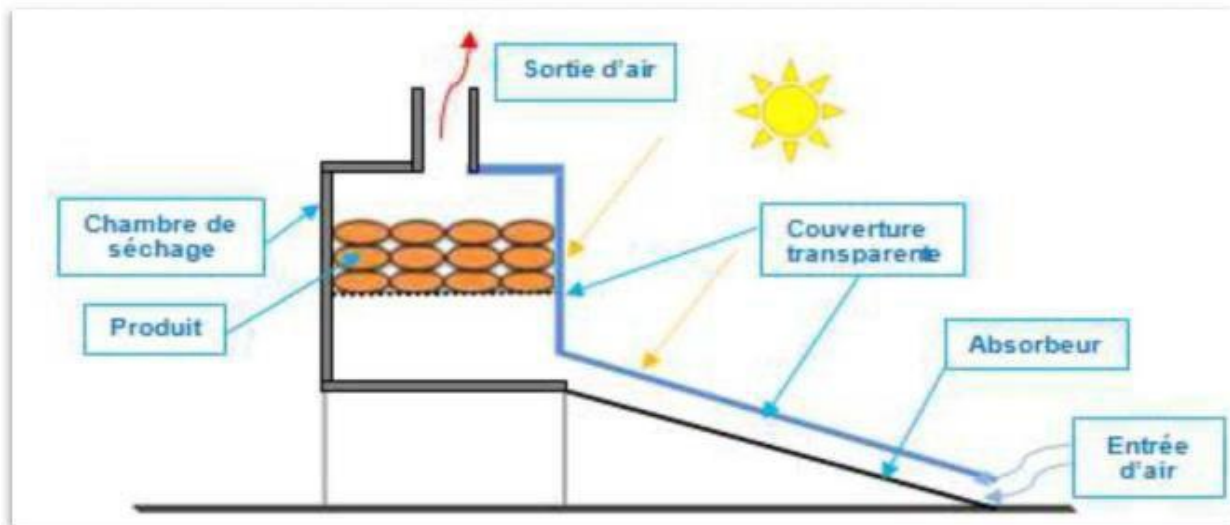


Figure I.25 Le principe d'un séchoir solaire mixte [29]

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.

I.15 Synthèse bibliographique

La conception des séchoirs solaires a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches

Bhattacharyya et al. [30] ont analysé théoriquement le transfert de chaleur dans un capteur solaire à air contenant des ailettes rectangulaires attachées (Figure. I.26). Le capteur est destiné au séchage de riz. Les effets du nombre et de la taille des ailettes ont été discutés. Ils ont conclu que la température du fluide à la sortie augmente avec l'augmentation du nombre des ailettes et diminue quand celui-ci dépasse 80 ailettes. Cette diminution est causée par la forte chaleur spécifique de l'aluminium, matière considérée pour les ailettes. En plus, la chute de pression augmente avec l'augmentation du nombre et de la hauteur des ailettes

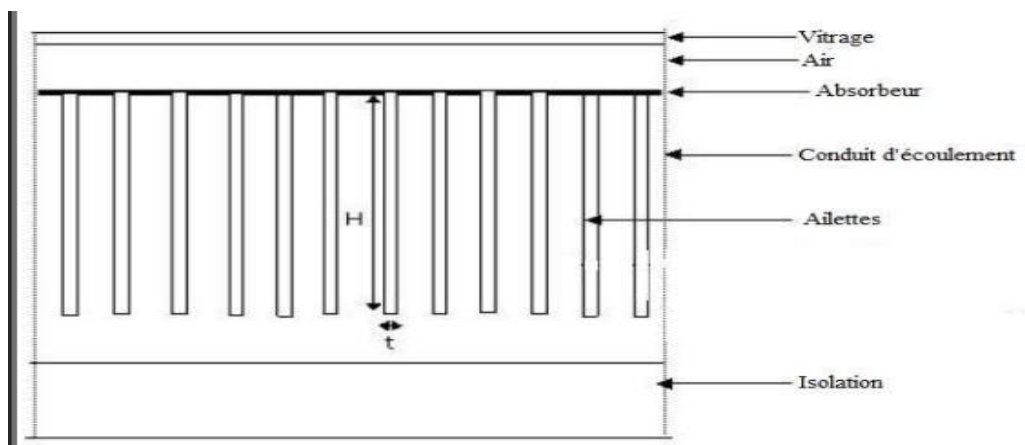


Figure I.26 capteur solaire avec absorbeur à ailettes

Vijay Khawale et al. [31] ont étudié le séchage du piment rouge par un séchoir solaire à double passe. L'expérience a montré que le débit d'air et l'intensité moyenne du rayonnement solaire étaient de 0,071 kg/s et 566 W/s, le séchoir à double passe de type indirect a réduit la teneur en humidité de 80 % à 9,1 %. Pour réduire cette teneur en humidité, il a fallu 24 heures de travail. En général, le piment rouge prend 58 heures dans le séchage en plein soleil. Le ramassage des collecteurs et l'efficacité du système de séchage étaient respectivement de 38 %, 47 % et 59,6 %. Ils ont observé que la capacité d'évaporation a également été améliorée.

Fevziet al. [32] ont présenté une étude expérimentale d'un séchoir solaire indirect à convection forcée. Le capteur solaire utilisé contient un absorbeur plat galvanisé muni d'ailettes fixes inclinées avec trois angles différents (30°, 45° et 60°), figure(I.27). Ils ont conclu que le débit massique de l'air est directement proportionnel à l'efficacité du capteur. Le séchoir solaire développé a réduit le temps de séchage à 7 h au lieu de 22 h pour un séchage à l'air libre.

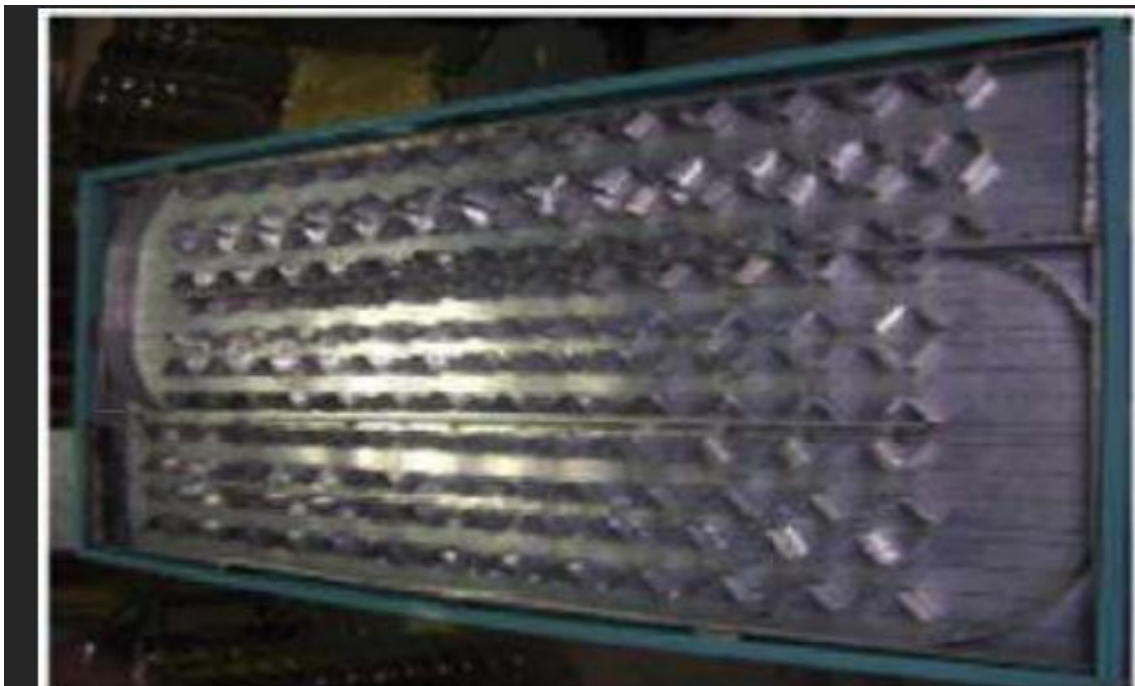


Figure I.27 Capteur solaire à air avec ailettes [32]

Abhayet al. [33] ont étudié expérimentalement un séchoir solaire indirect à convection naturelle pour le séchage des bananes. Le séchoir comporte un capteur solaire avec absorbeur en forme de zigzag, une

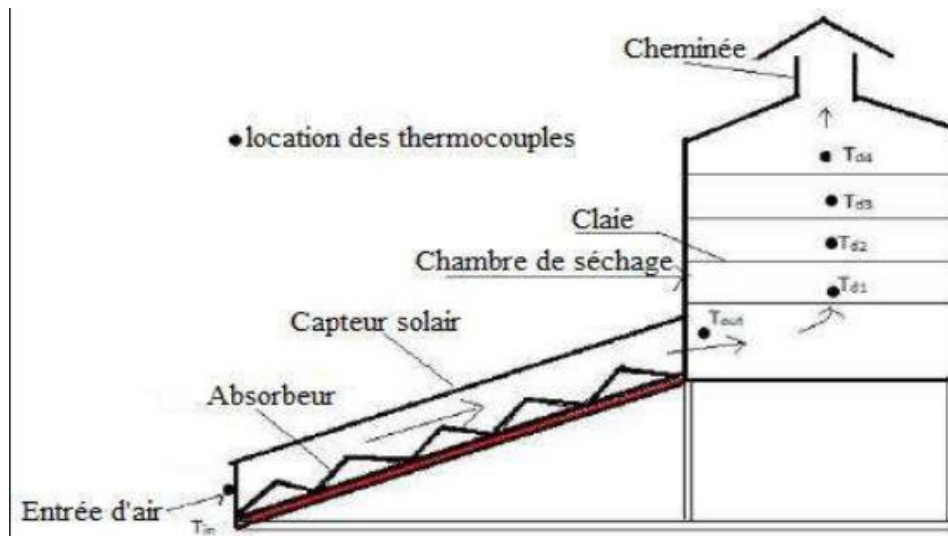


Figure I.28 Vue schématique de l'installation expérimentale du séchoir solaire [33]

chambre de séchage isolée et une cheminée pour l'échappement d'air, figure(I.28). Les auteurs ont constaté que ce type de séchage est plus rapide et plus efficace que le séchage à l'air libre. L'efficacité thermique moyenne du capteur était de 31,5 % et celle de la chambre de séchage 22,38 %.

Dejchanchaiwong et al. [34] pour un séchoir solaire à convection naturelle. Ils ont montré que l'efficacité du séchoir en mode mixte (15.4%) est plus élevée que celle du séchoir en mode indirecte (13.3 %).

Jain [35] a conçu et analysé un séchoir solaire indirect à convection naturelle pour le séchage du riz. La chambre de séchage qui contient plusieurs claies est attachée à un capteur solaire plan incliné multi-passes avec stockage thermique intégré comme le montre la figure (I.29). Il a présenté les effets de la variation de l'angle d'inclinaison, de la longueur et de la largeur du capteur ainsi que du débit massique sur la température du riz.

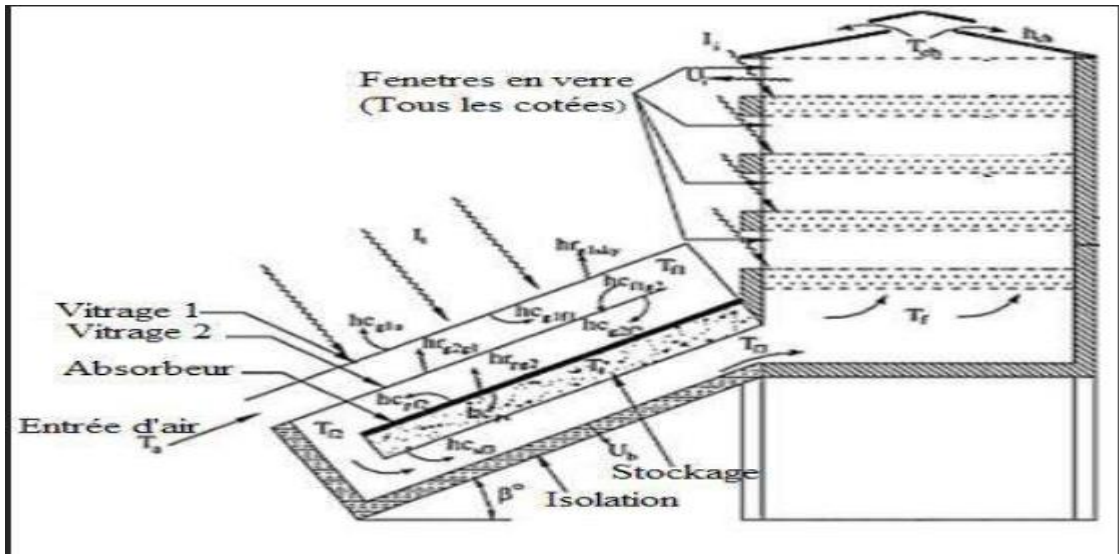


Figure I.29 Séchoir multi-claies avec capteur à air incliné multi-passes avec un stockage Thermique intégré [36]

Pangavhave et Sawhney [36] ont présenté un séchoir solaire plus simple, de type armoire. Il s'agit d'une petite boîte généralement fabriquée à partir d'un matériau en bois facilement disponible. Les panneaux avant, latéraux et arrière sont pourvus de trous pour la circulation de l'air. La base de la boîte est constituée de plateaux en bois grillagés, figure(I.30).

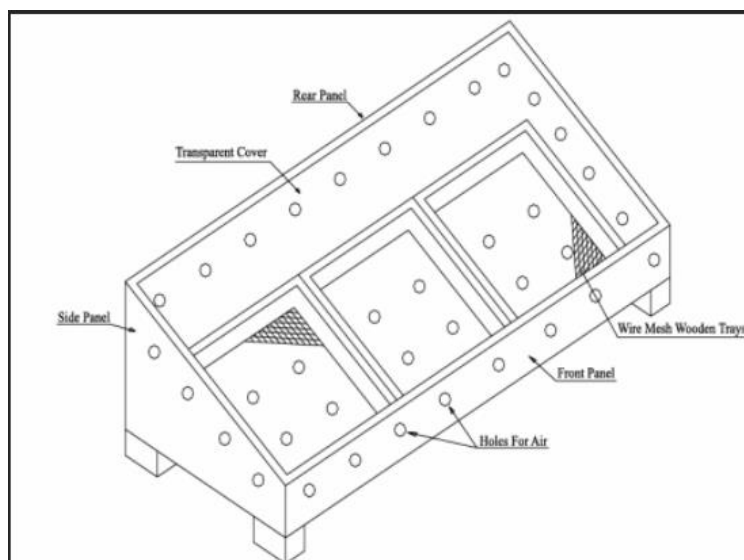


Figure I.30 Conception simple d'un séchoir solaire de type armoire [36]

André et al. [37] ont étudié expérimentalement une cheminée solaire utilisée pour le séchage de grains de café, de bananes et de tomates (Figure. I.31). Les résultats obtenus ont été comparés avec le séchage solaire naturel (à l'air libre) sous les mêmes conditions climatiques. Par rapport au séchage naturel, le séchoir solaire a permis de réduire le temps nécessaire pour le séchage des grains de café par 60 %, en atteignant une teneur finale en humidité de 13% (base sèche).

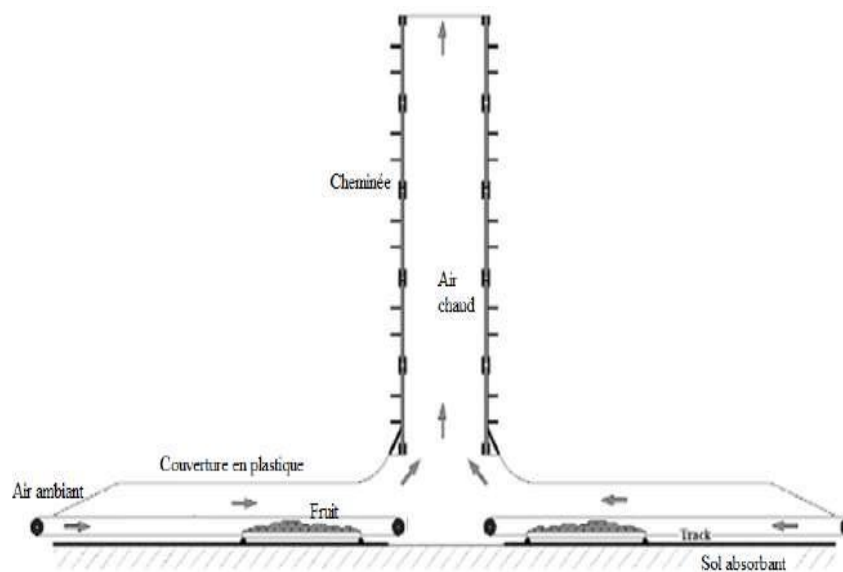


Figure I.31 Schéma de la cheminée solaire [37]

Afriyie et al. [38] ont étudié expérimentalement les performances d'un séchoir solaire direct contenant une chambre de séchage couplée à une cheminée solaire (Figure. I. 32). Ils ont présenté l'effet de l'inclinaison du toit de la chambre de séchage et la dimension de l'entrée d'air sur les performances du séchoir solaire. Ils ont observé qu'une inclinaison appropriée de l'angle du toit de la chambre couplé à une cheminée solaire peut augmenter le débit d'air dans un séchoir direct.

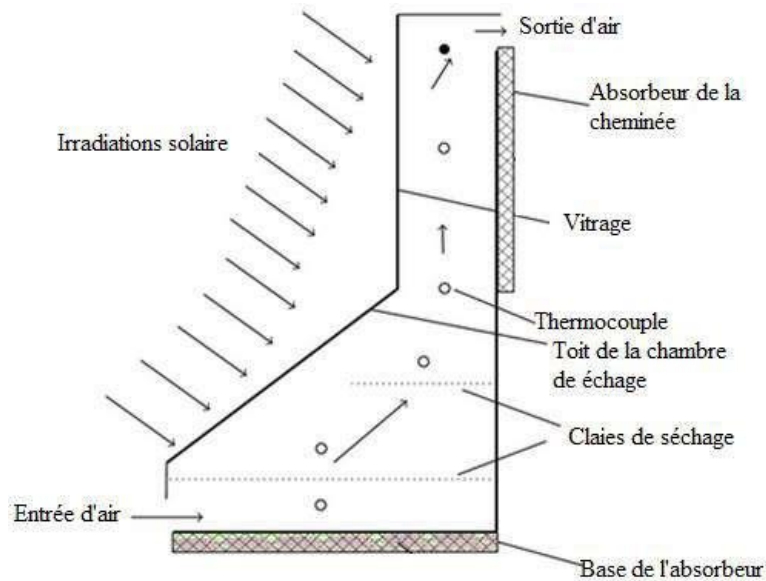


Figure I. 32 Schéma du séchoir solaire avec cheminée solaire [38]

I.16 Conclusion

Pour bien maîtriser une opération de séchage, il faut pouvoir maîtriser les trois paramètres fondamentaux : température, humidité et vitesse de l'air asséchant. Il faut prendre l'opération de séchage en vitesse, c'est-à-dire pouvoir sécher rapidement pour éviter le pourrissement du produit, mais pas trop vite, une croûte risque alors de se former en surface empêchant l'eau de sortir, ni à trop haute température le produit se dénature et noirci.

Chapitre II

Le Gisement Solaire

II.1 Introduction

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. 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 [14].

II. 2. Le soleil

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [2].

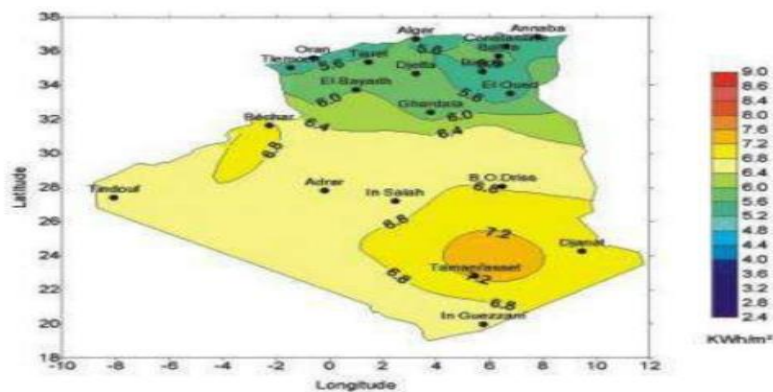


Figure II.1 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu

II. 2.1 Constante solaire (C)

On appelle la constante solaire noté C, la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre Ou : C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil a la limite de l'atmosphère Terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire. Cette valeur déterminée à partir des mesures réalisées à l'aide de ballon, de fusées ou des satellites. La valeur moyenne annuelle est $I_0=1353 \text{ W/m}^2$ [3] qui ont proposés la valeur de 1367 W/m^2 . Cette valeur est en fonction de la distance Terre - Soleil, qui varie quelque peu au cours de l'année.

La variation de la constante solaire en fonction du numéro du jour (nj) de l'année suit la relation suivante [8] :

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

II. 2. 2 Caractéristiques de la terre

II. 2. 2. 1 L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.
- Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :
CO₂ (0,03%)
- Vapeur d'eau: en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O₃ située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la figure II.2 la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon longueur d'onde [16].

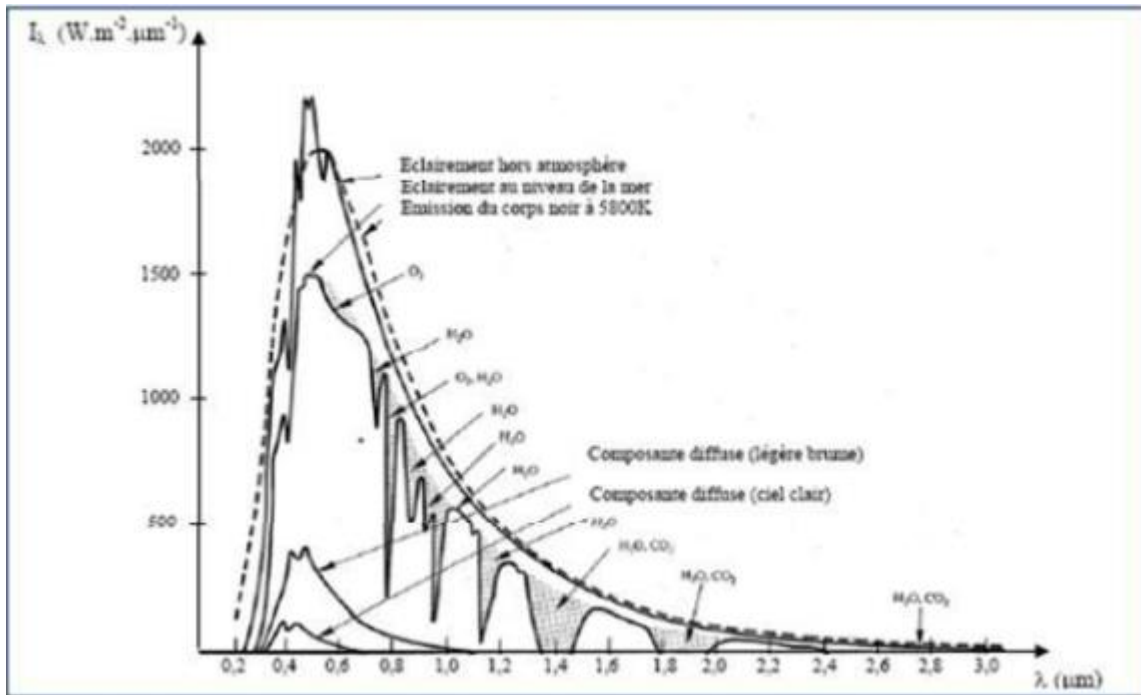


Figure II.2 Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) émettent vers la terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes [3] :

- Vers $14,7 \mu\text{m}$ pour le CO_2 .
- Entre 5 et $7 \mu\text{m}$ et entre 14 et $20 \mu\text{m}$ pour la vapeur d'eau.
- Vers $9,6 \mu\text{m}$ pour O_3

II. 2. 2. 2. Mouvement de la terre

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [14]. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour où la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux [14].

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23^\circ 27'$ [14].

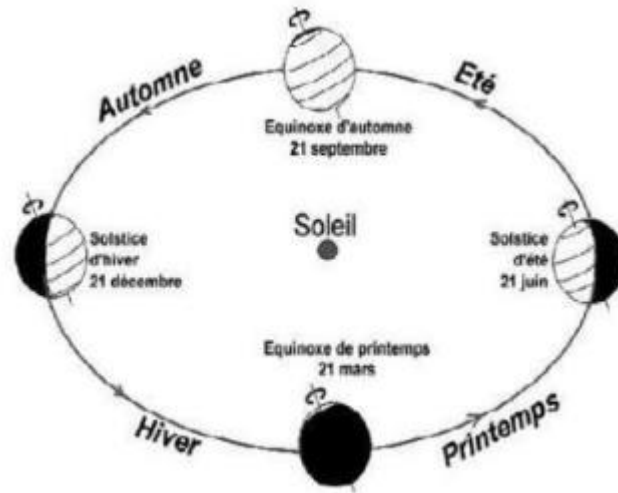


Figure II.3 : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil

II.3 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 ne 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 II.3).La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes

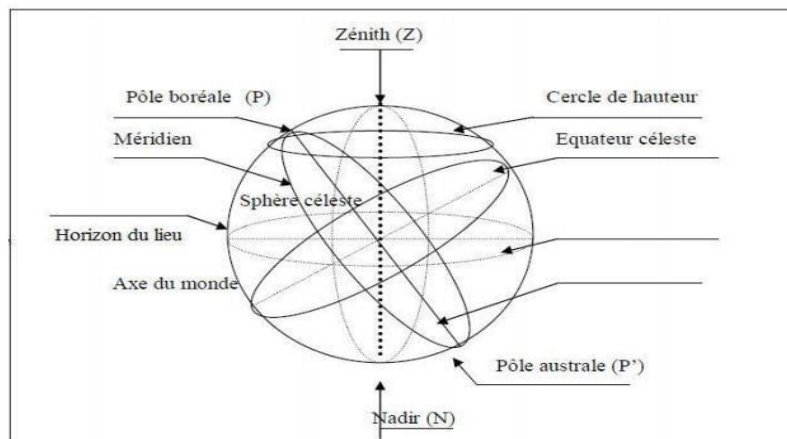


Figure II.4: La sphère céleste

II.3.1 Les coordonnées célestes

II.3.2 Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure II.4).

- La longitude (λ):

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 (I):

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.

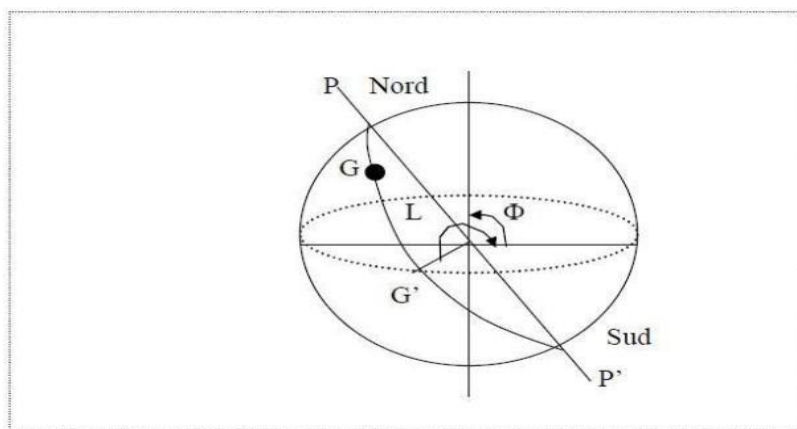


Figure II.5 : Les coordonnées géographiques

II.3.3 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 [26].

$$\delta = 23.45 \sin [(284+nj)/365].360[\text{Degré}] \quad (\text{II.2})$$

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 II.5).

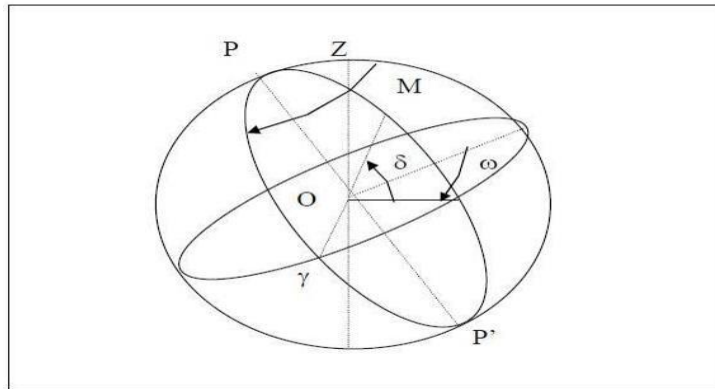


Figure II.6 : Coordonnées horaires

II .3.4 Les coordonnées horizontales

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

L'azimut solaire (α)

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, (figure II.6).

On note ici que l'**azimut solaire** est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'**azimut géographique**, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation.

La hauteur du soleil (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 quelque fois **distance zénithale** le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$ (figure II.6).

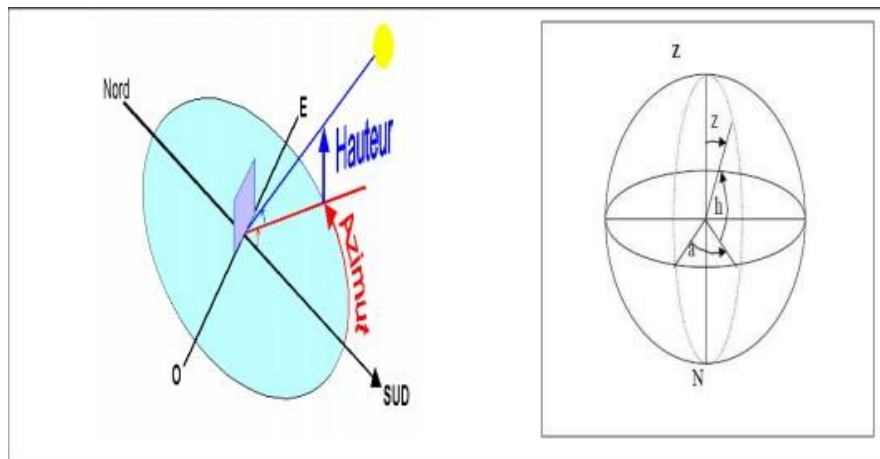


Figure II.7 Coordonnées horizontales.

L'équation de passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires est [6] :

$$\sin(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

$$\cos(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\Phi) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)$$

$$\sin(h) = \cos(\Phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)$$

II .4 Le temps solaire

II .4.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω .

Il est donné sous la forme suivante [14] :

$$\text{TSV} = 12 + \omega/15 \tag{II.3}$$

ω : En degré.

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

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

II.4.2 Le Temps Solaire Moyen(T.S.M)

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [14]:

$$\text{Et} = \text{TSV} - \text{TSM} \tag{II.4}$$

Avec :

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

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

$$\text{Où : } N' = (n_j - 81) \times 360 / 365$$

Où : n_j est le numéro du jour dans l'année

II.4.3 Le Temps Universel (T.U)

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore **GMT** (Greenwich Mean Time) [14]

$$TU = TSM - (L/15) \quad (\text{II.5})$$

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.

II.4.4 Le Temps Légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [8] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{II.6})$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré. $\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

II.4.5 Le Temps Civil

Représente le temps qui a pour origine minuit [14].

II.5 Direction des rayons solaires par rapport à un plan

On considère un plan quelconque situé dans un lieu de latitude caractérisé par deux angles : α :

L l'angle entre le méridien local et la normale au plan (figure II.7).

$\alpha = 0$; le plan est orienté vers le Sud.

$\alpha = \pi$; le plan est orienté vers le Nord.

$\alpha = -\pi/2$; le plan est orienté vers

l'Est.

$\alpha = \pi/2$; le plan est orienté vers l'Ouest.

γ = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré. $\gamma =$

0 ; le plan est horizontal.

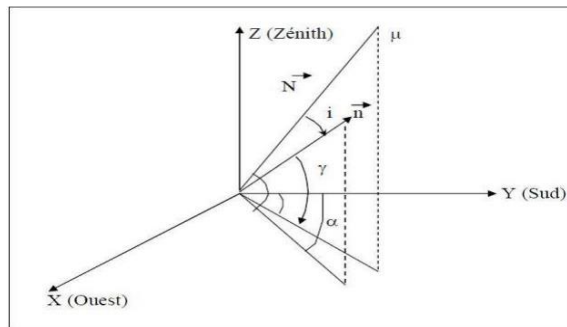
$\gamma = \pi / 2$; le plan est vertical.

Soit :

N : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires. n :

le vecteur unitaire porté par la normale à la surface.

i : l'angle d'incidence (n, N) .(figure II.7).



FigureII.8 : Représentation des vecteurs unitaires

$$\vec{N} = \|\vec{n}\| \times \|\vec{N}\| \times \cos(i) = \cos(i) \tag{II.7}$$

→→

$$N \times n = \sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + \cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\alpha) \cos(\gamma) + \sin(h)$$

$$\times \sin(\gamma) = \cos(i). \tag{II.8}$$

Par conséquent :

$$\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a - \alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma) \tag{II.9}$$

Exprimons $\cos(i)$ en coordonnées horaires, il en résulte:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\Phi) \sin(\delta) \times \sin(\gamma) \tag{II.10}$$

Dans les cas particuliers où les surfaces sont horizontales ou verticales avec différentes orientations, l'expression devient :

- **Surface horizontales:** $\gamma = \pi / 2$

$$\cos(i) = (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\Phi) \sin(\delta)) \tag{II.11}$$

- **Surface verticales:** $\gamma = 0$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\alpha) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \sin(\delta)) \cos(\alpha) \\ & + \cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

-Surface verticale orientées vers le Sud : $\alpha = 0$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \sin(\delta) \cos(\gamma) + \cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \\ & \sin(\Phi) \sin(\delta) \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

- Surfaces verticales orientées vers le Nord: $\alpha = \pi$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \sin(\delta)) \cos(\alpha) \cos(\gamma) + \cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) \\ & + \sin(\Phi) \sin(\delta) \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

- Surface verticale orientées vers l'Est: $\alpha = -\pi/2$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & -\cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\alpha) \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) \\ & + \cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\Phi) \sin(\delta) \sin(\gamma)). \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Ouest: $\alpha = +\pi/2$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\alpha) \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) \\ & + \sin(\Phi) \sin(\delta) \sin(\gamma)) \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

-Surface orientée vers le sud et incline d'un angle β par rapport à l'horizontale

$$\cos(i) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\Phi - \beta) + \sin(\delta) \sin(\Phi - \beta) \quad (\text{II.17})$$

II.7 Le rayonnement solaire

L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude de l'orientation de la surface considérée.

II.7.1 Les composants de rayonnement solaire

La Figure(II.7), montre la décomposition du rayonnement solaire .



Figure II.9:Les composants du rayonnement solaire

II.7.2 Le rayonnement direct sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal peut être déterminé par:

$$S = F \times \sin(h)$$

F est le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires et peut être évalué par :

$$F = I_0 \cdot \text{Exp} \left(\frac{TL}{0.9 + 9.4 \sin(h)} \right) \text{ [w/m}^2 \text{]}$$

Avec $I_0 = 1370 \text{ w/m}^2$ et TL le facteur de trouble de Linke défini comme suit :

$$TL = 2.4 + 14.6B + 0.4(1+2B) \ln(PV)$$

Où B est le coefficient de trouble atmosphérique Pv : C'est la pression partielle de vapeur d'eau.

$$Pv = \frac{2.165}{T}$$

T : est la température de l'air en °C

$$TL = 2.4 + 14.6B + 0.4(1+2B) \ln(PV)$$

II.7.3 Le rayonnement diffus sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal peut être déterminé par :

$$D = 54.8 \sqrt{\sin(h)} (T - 0.5 - \sqrt{\sin(h)})$$

Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est possible de l'estimer par la formule suivante :

Où F est le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires. CI étant le coefficient d'orientation :

$$CI = (\sin(\beta)\cos(h) + \cos(\beta)\sin(h))$$

II.7.4 Rayonnement solaire diffus sur un plan incliné

Le rayonnement solaire diffus D arrive sur le plan récepteur incliné après avoir été diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

$$I_{dif} = 125 \times \sin(h)^{0.4} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + 211.86 \sin(h)^{1.22} \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$$

II.7.5 Rayonnement global

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

$$I_{gl} = I_{dir} + I_{dif}$$

II.8. Présentation de différents instruments de mesure du rayonnement solaire

Parmi les appareils permettant la mesure du rayonnement solaire on a :

- **Le radiomètre** est un instrument de mesure du rayonnement.
- **Le radiomètre de Crookes:** 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. Voir William Crookes.



Figure II.10 Le radiomètre de Crookes

- **Le pyranomètre:** 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.



Figure II.11 Le pyranomètre

- **Le pyréliomètre:** est un radiomètre muni d'un collimateur, pour la mesure du rayonnement solaire direct sous incidence normale.
- **L'héliographe:** est un instrument enregistrant la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est d'une intensité suffisante pour produire des ombres distinctes.



➤ **Figure II.12** Le pyréliomètre

II. 9 Conclusion :

Dans ce chapitre , nous avons présenté une description d'un soleil , les différentes types rayonnement solaire , les différents types de coordonnées (horaire ,horizontale , géographiques) qui sont basés sur des ongles , et les notion de temps (TSV , TSM ,TU, TL) ainsi quelques appareillage utilisés.

Chapitre III

Les panneaux solaires

III. 1 Introduction

L'énergie solaire est parmi les plus anciennes sources d'énergie que l'humanité ait connue. Cette énergie est fournie pour 30 %, soit l'équivalent de 102 W/m², à la terre par les rayonnements solaires. Le reste de ses rayonnements est utilisé principalement pour assurer les mouvements de l'eau et de l'air ; et enfin pour assurer l'équilibre thermique du sol .

Le Soleil est ainsi la source d'énergie la plus puissante sur la planète. L'énergie reçue par ce dernier en une heure est égale à celle dont la Terre a besoin pendant environ un an. L'énergie solaire peut être convertie en électricité, soit directement par effet photovoltaïque, soit indirectement après conversion en chaleur puis en énergie mécanique dans les centrales thermiques solaires. Les capteurs solaires sont des dispositifs dont le principe de fonctionnement est basé sur la transformation de l'énergie solaire en chaleur par les panneaux solaires thermique, et d'évaluer les coefficients des échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur en électricité par les panneaux photovoltaïques. Dans cette partie une généralité sur les panneaux photovoltaïque et une étude théorique de capteur solaire plan en détaillant ses différents composants, son fonctionnement.

III. 2 L'énergie solaire photovoltaïque :

III. 2.1. Les panneaux solaires photovoltaïques

Le deuxième type de panneaux solaires est les panneaux solaires photovoltaïques. Le mot photovoltaïque est composé du terme photo, qui signifie lumière et de voltaïque dont l'origine est le nom de l'inventeur de la pile électrique Volta. Autre explication est le synonyme de photopile. Une photopile est constituée généralement de deux couches – positive et négative. Leur contact permet une pénétration des électrons d'une couche à l'autre et dès qu'un rayon de soleil arrive sur le panneau, un apport d'énergie se crée.

Le courant produit à la sortie d'une cellule photovoltaïque est de type continu.

Dans le cas d'une installation domestique, un onduleur doit donc transformer celui-ci en courant alternatif, figure (III.1)[39].

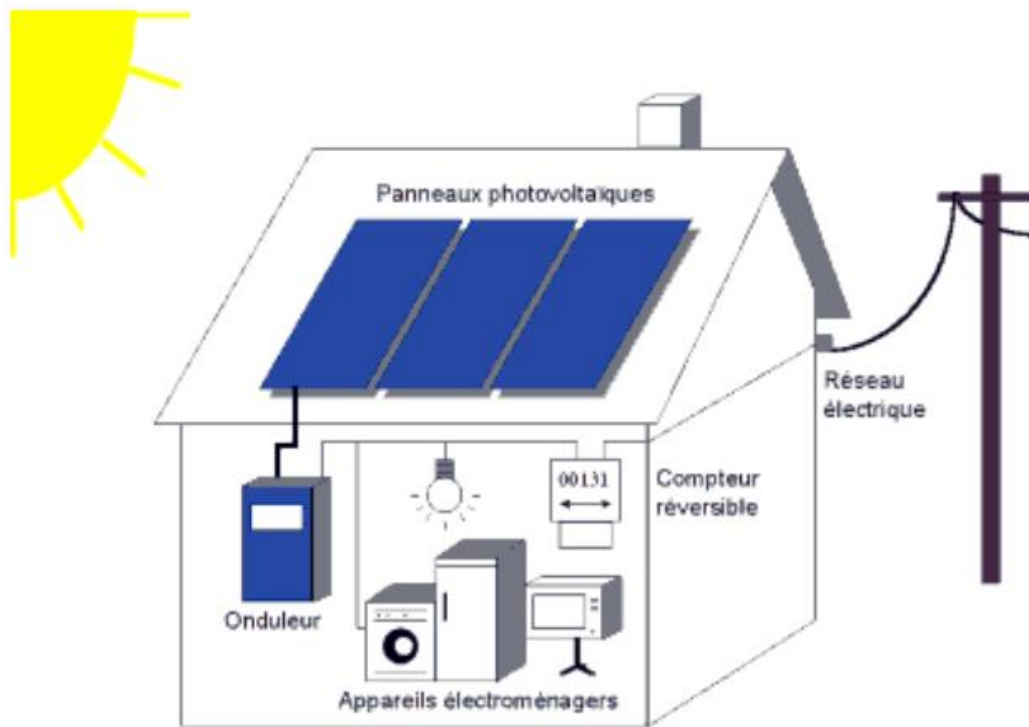


Figure III.1 Fonctionnement du système solaire photovoltaïque[39]

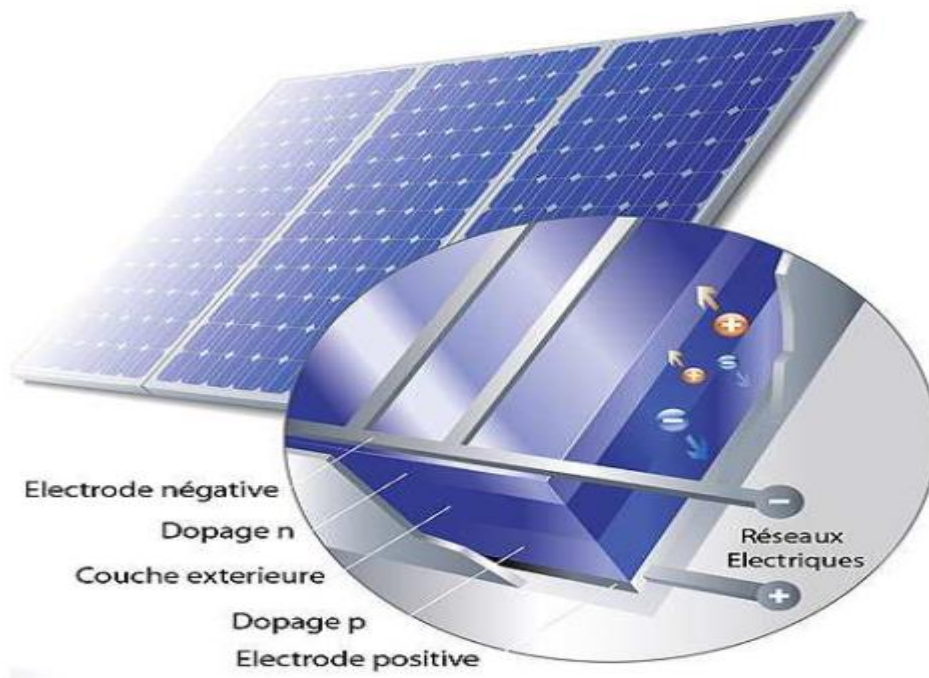


Figure III.2: Cellule photovoltaïque[39]

Le composant principal d'une cellule photovoltaïque est le silicium. Le silicium, est l'élément principal constitutif des roches et de certains types de sables, c'est un élément abondant juste après l'oxygène. Pour fabriquer des cellules photovoltaïques, qui constituent le panneau, il faut préparer du polysilicium qui est plus pur à 99,9999% que le naturel. Les figures (III.2 et III.3), montrent la structure des cellules photovoltaïques.



Figure III.3: cellule monocristalline et polycristalline



Figure III.4 Les panneaux solaires intégrés au toit

III. 2.2 Principe de la conversion photovoltaïque

Une cellule solaire est un composant électronique qui convertie la lumière du soleil en électricité par l'effet photovoltaïque, figure (III.5).

- Le principe de la conversion photovoltaïque peut être décrit par les mécanismes suivants :
 - ❖ absorption des photons incidents et création de paires électron-trou si l'énergie du photon incident est supérieure au gap du matériau.
 - ❖ Diffusion des porteurs de charges minoritaires jusqu'à la zone de charge d'espace. Transfert des charges électriques dans la zone où elles vont être majoritaires grâce au champ électrique présent au niveau de la zone de charge d'espace de la jonction PN et collecte. Au cours de la diffusion des charges vers la zone de charge d'espace les charges électriques peuvent se recombiner et être perdues.
 - ❖ Dissipation de puissance dans la charge et dans les résistances parasites.

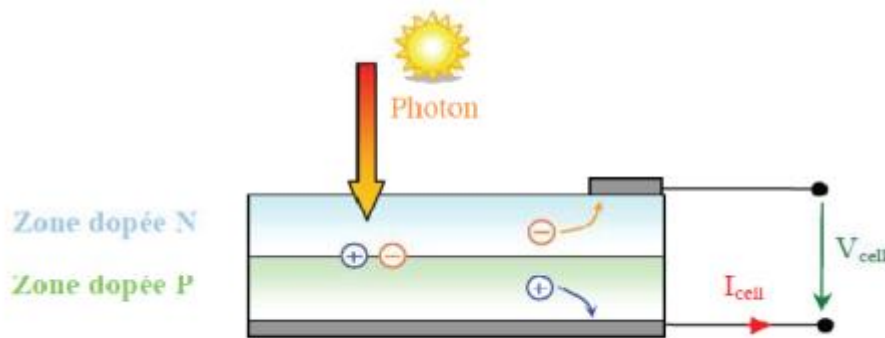


Figure III.5 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

III. 2.3 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque (ou photopile) est un composant électronique à base de matériau semi-conducteur. Lorsque les particules de lumière, appelées photons, frappent ce matériau, il se crée un champ électrique qui produit deux types de charges : positives et négatives. Elles sont séparées et collectées sur les faces avant et arrière de la cellule Photovoltaïque qui se comporte alors comme un générateur de courant continu [39].

La figure(III.6) illustre le phénomène

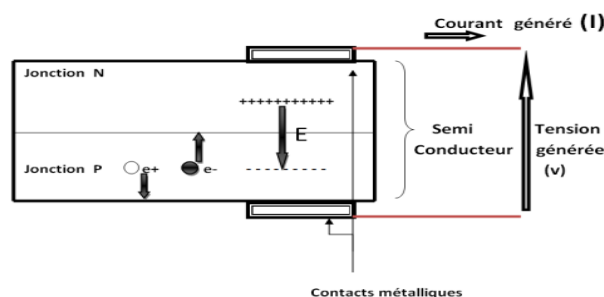


Figure III.6 : Structure de base d'une cellule photovoltaïque [39].

III. 2.4 .Les différentes technologies de La cellule photovoltaïque

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires :

III. 2. 4.1 Les cellules au silicium cristallin :

Dans lesquelles le principe actif est du silicium dopé en grande quantité. Malgré son ancienneté, cette technologie reste la plus appréciée pour sa puissance et ses performances (le rendement unitaire varie de 12 à 20 % pendant environ 30 ans). Mais son gros inconvénient reste qu'il offre faible rendement sur un faible éclaircissement et un coût élevé.

- Les cellules les plus populaires et les plus utilisées sont les monocristallins et les poly cristallins.

III. 2.4.2 Les cellules à base de couches minces :

Dans le processus de dépôt d'un matériau semi-conducteur mince sur différents substrats et donnant un aspect uniforme, résultant en des unités avec un rendement légèrement inférieur (de 7 à 13%). Il a un coût moindre en raison de son manque de rentabilité, mais il donne un bon rendement sur un faible éclaircissement par-rapport les anciennes cellules.

III. 2.4.3. Les cellules à base de photovoltaïque organique :

Segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

2.4.4. Les cellules hybrides :

Ces cellules combinent des technologies de différents types pour obtenir des rendements améliorés.

La Figure (III.7), montre la classification des principales technologies de cellules solaires PV.

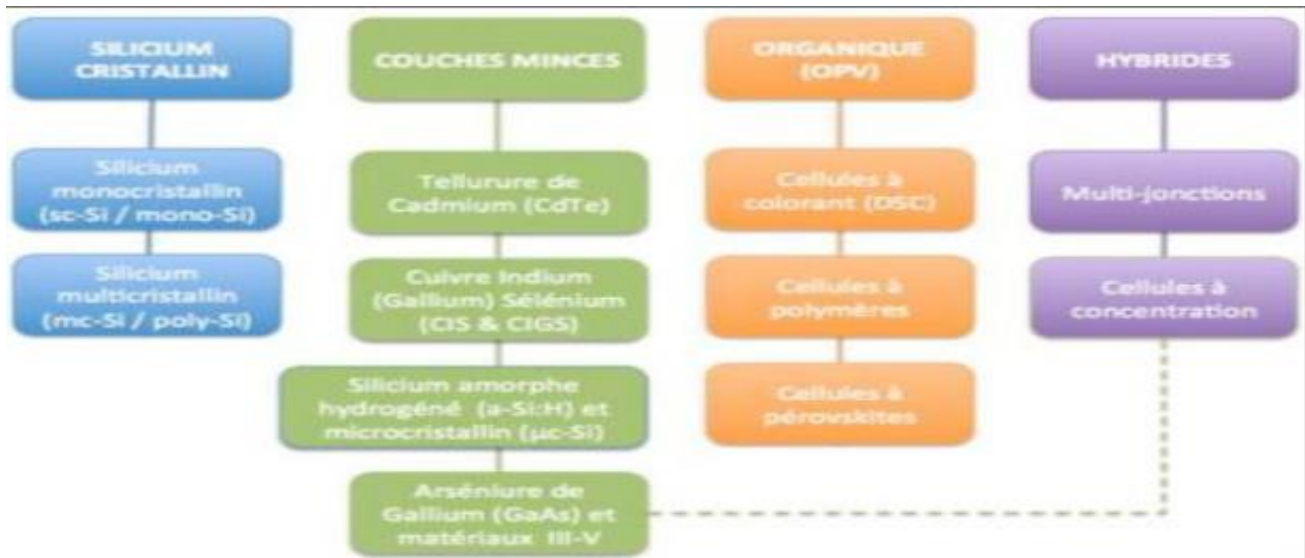


Figure III.7 : Classification des principales technologies de cellules solaires PV

III 2.5 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont [39]:

- La résistance série R_s .
- La résistance shunt R_{sh} .
- Le courant de saturation I_{sat} .
- Le flux d'éclairement ϕ .
- La température T .

Pour un flux ϕ égale à $1\text{KW}/\text{m}^2$, ces paramètres peuvent être considérés comme indépendants, excepté le courant de saturation I_{sat} qui dépend directement de la température T de la cellule.

a. Influence de la résistance série :

D'une valeur généralement très faible, la résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert. Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit. La valeur de la résistance série est fonction de la résistivité du matériau semi-conducteur, des résistances de contact des électrodes et de la résistance de la grille collectrice [36].

b. Influence de la résistance shunt :

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photocourant, outre le courant de la diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée. La résistance shunt est en général très élevée. Si elle diminue on remarque une légère

pente au voisinage du point de courant de court-circuit sur la caractéristique de la cellule photovoltaïque.

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la cellule : en effet, une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous un faible éclaircissement.

III. 3. La conversion thermique

III. 3.1 Les panneaux solaires thermiques

Un panneau solaire thermique est un capteur solaire qui a pour but de transmettre la chaleur émise par le soleil à un circuit d'eau secondaire. Il s'agit d'un capteur qui absorbe l'énergie solaire, pour la restituer sous forme de chaleur.

Il est composé d'un coffre rigide et vitré à l'intérieur duquel est placée une plaque et des tubes métalliques noirs (absorbeur). Ces absorbeurs reçoivent les rayons du soleil et chauffent un liquide (antigel ou eau) ou l'air qu'ils contiennent. En cas d'air renfermé et circulant dans les tubes, l'air chauffé est ensuite ventilé dans le logement pour chauffer les pièces. Les absorbeurs comprenant un liquide pouvant être utilisé pour le chauffage mais aussi pour alimenter une habitation en eau chaude sanitaire, figure(III.8).

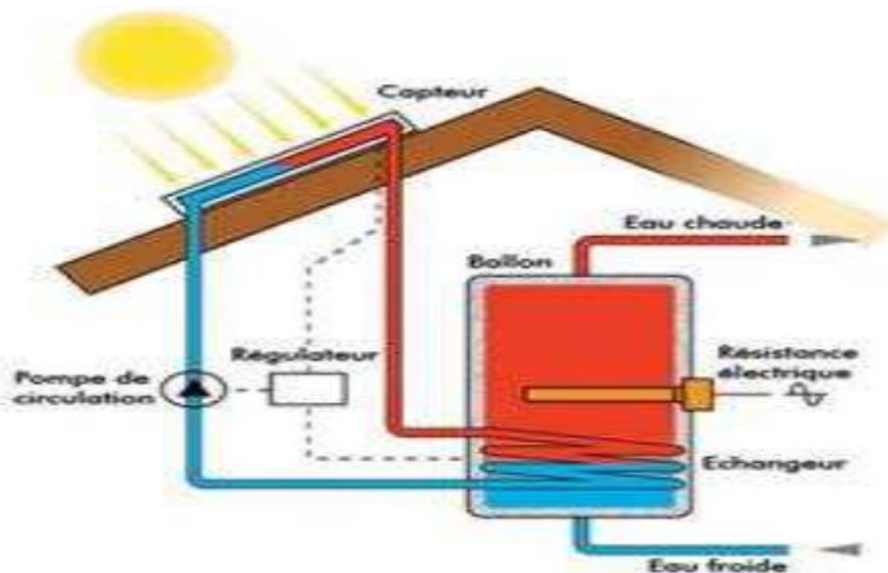


Figure III.8: Fonctionnement de système solaire thermique



Figure III. 9 : Capteur solaire intégré au toit

Généralement les capteurs sont plats et installés sur le toit (éventuellement entièrement intégrés dans le toit, figure(III.9)) ou posé sur le sol (mais il faut garder l'inclinaison entre 10% et 30% pour bien capter les rayons solaires).

Les panneaux fonctionnent en été comme en hiver car ils ne dépendent pas de la température extérieure mais seulement du rayonnement solaire. L'installation est simple et peut être amortie rapidement.

Les capteurs thermiques sont utilisés plus longtemps et ils sont donc plus étendus que les panneaux photovoltaïques. La raison est simple. Les panneaux solaires thermiques ont été favorisés pour leur apport potentiel et multiple et l'aisance d'installation. Dès les années 80 il était prévu de s'en servir dans:

1. l'agriculture
2. les complexes sportifs
3. les maisons de repos
4. les stations balnéaires

Le panneau solaire thermique est donc destiné pour chauffer l'eau sanitaire et l'eau dans les piscines mais aussi pour chauffer les industries et les maisons. De plus la technologie de fabrication

des panneaux solaires thermiques est moins compliquée que celle des panneaux photovoltaïques. Elle a donc été plus vite perfectionnée depuis la première production et la mise sur le marché [40].

III. 3. 2. Différents types capteurs solaires

III. 3.2.1. le capteur à tube sous vide

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevée (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif. Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur, figure (III.10).

L'autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration [40] .

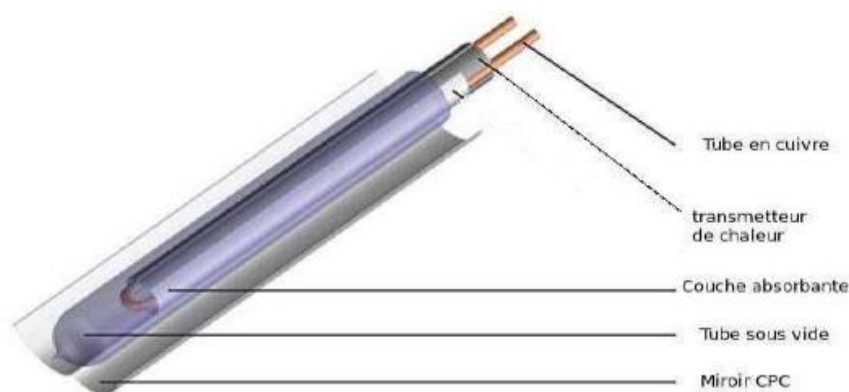


Figure III.10 capteur solaire à tube sous vide[40]

III. 3.2.2. Les capteurs solaires à concentrations :

Les capteurs à concentration fonctionnent avec un système de poursuite du soleil. Il ya trois types de ce capteur :

- Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques :

Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques concentrent la lumière sur un absorbeur linéaire, avec un système de poursuite du soleil selon une seule direction.

- Les capteurs à concentration du type dishes :

Les capteurs à concentration du type « dishes » concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, avec un système de poursuite du soleil selon deux directions.

- Les centrales à tour :

Les installations de ce type concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, à l'aide de miroirs (appelé "héliostats") qui suivent le soleil selon deux directions, sur une chaudière située au sommet d'une tour.

III. 3.2.3 Les capteurs solaires plans

Les capteurs solaires thermiques permettent la production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Ils sont composés d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant, d'un système de refroidissement à l'aide d'un fluide caloporteur (air ou liquide), d'un isolant thermique latéralement et en sous-face, le plus souvent d'une couverture transparente (en face avant et exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre, et éventuellement d'un coffrage étanche à l'eau et d'un système de support mécanique de l'ensemble [41]. L'énergie solaire récupérée par le capteur solaire et transformée en énergie thermique est cédée au fluide caloporteur (air ou eau) Figure (III.11).

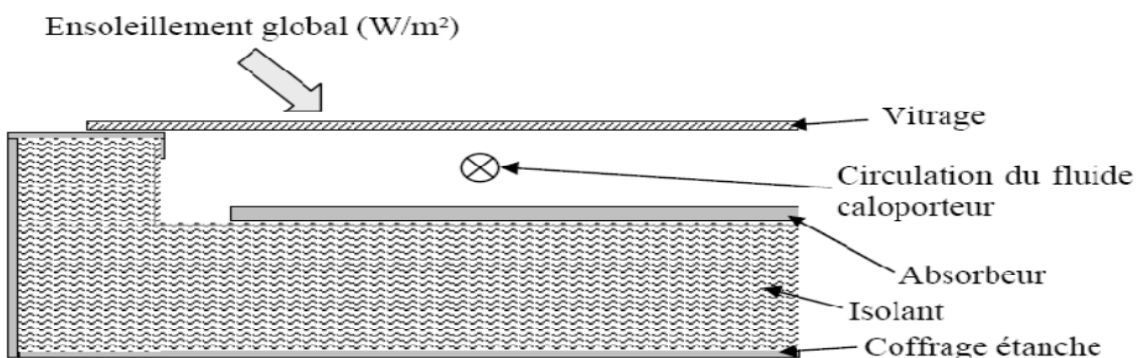


Figure III.11 Schéma de principe d'un capteur solaire thermique plan

III. 3.2.3.1 Le capteur solaire à eau :

Le capteur solaire thermique à eau est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbant, et d'un isolant. La figure (III.12) représente le principe de fonctionnement d'un tel capteur [41].

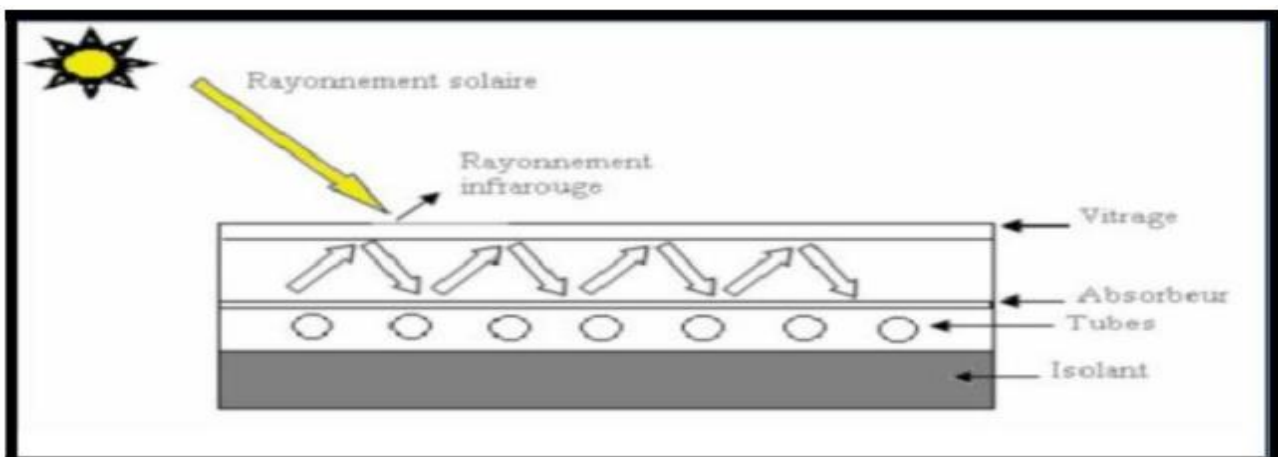


Figure III.12 Capteur solaire thermique à eau, vue en coupe[41]

Le principe est le suivant : le rayonnement solaire, dont le spectre se situe essentiellement dans les longueurs d'onde du visible (courtes longueurs d'onde), passe à travers la couverture Transparente (constituée ici d'un vitrage), et arrive à l'absorbeur, celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection à l'eau qui circule dans les conduits, et réémet du rayonnement thermique vers l'extérieur (grande longueur d'onde).

L'isolant permet de réduire les Pertes thermiques du capteur.

On peut distinguer deux types de systèmes :

- Les systèmes à basse pression de circulation très simple, à eau chaude sans pression.
- Les systèmes à haute pression, à eau chaude à haute pression utilisant une pompe.

III. 3.2.3.2 Le capteur solaire à air :

Contrairement au capteur à eau où le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en générale formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur, figure (III.13).

De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeurs plus faible que celui de l'eau[42]

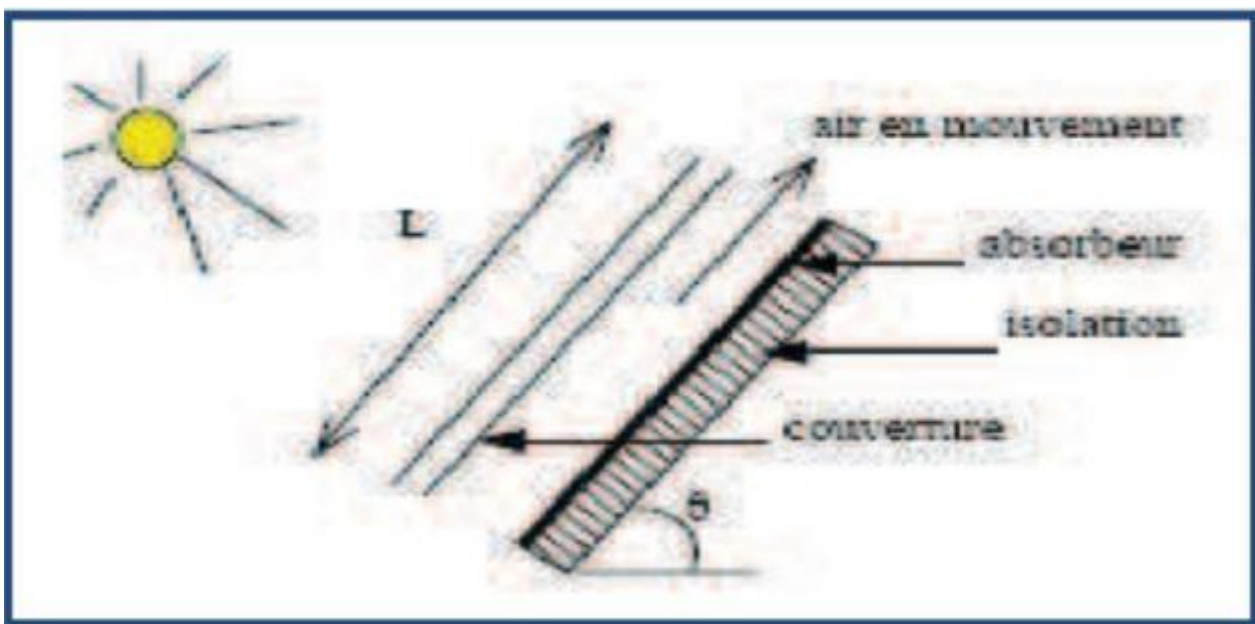


Figure III.13: Capteur solaire plan à air

III. 3.3. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la forme, des dimensions, de la disposition du capteur et des conditions environnantes. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

III. 3.3.1. Les paramètres externes :

Les principaux paramètres externes qui peuvent intervenir directement sur les performances d'un capteur plan sont :

- Paramètre d'ensoleillement : le rayonnement solaire, position du soleil, durée d'insolation, ...etc.
- Température ambiante.
- Vitesse du vent.

III. 3.3.2. Les paramètres internes :

a-Paramètres géométriques

- Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur.
- La surface du capteur.
- Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur.

b-Paramètres de fonctionnement

- La température d'entrée du fluide caloporteur.
- Le débit massique du fluide caloporteur.
- Les températures des différents éléments du capteur.

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir une température de sortie du fluide élevée (puissance utile élevée). En d'autres termes ; un meilleur rendement du capteur.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de la conversion solaire, à savoir la conversion photovoltaïques et la conversion thermique avec les différents panneaux solaires nécessaires à cet effet. Nous avons constaté que les capteurs solaires plans vitres conviennent mieux à des applications à température modérée (comprises entre 30 et 70 °C) tels que le chauffage de l'eau sanitaire, des piscines d'intérieur et le chauffage des bâtiments. De même, se distinguent les capteurs solaires plans sans vitrage convenant à des applications à basse température (inférieure à 30 °C), telles que le chauffage des piscines d'extérieur et d'intérieur. De plus, se rencontrent les

capteurs solaires sous vide (ou caloducs) qui sont parmi les types de capteurs solaires les plus efficaces mais aussi les plus coûteux. Ces capteurs solaires conviennent mieux à des applications à hautes températures pour lesquelles la température demandée atteint 50 à 95)°C (couplage au froid solaire). Ils sont particulièrement employés pour le chauffage de l'eau des résidences, des bâtiments commerciaux, ainsi que celui des piscines d'intérieur.

Chapitre IV

Partie Expérimentale

Conception et Réalisation du séchoir solaire

IV. Conception du séchoir solaire

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les étapes suivies pour la réalisation d'un séchoir solaire indirect en convection naturelle. 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.

IV.2 Description du séchoir solaire

Le séchoir solaire est à base de bois constitué essentiellement de deux parties:

Un capteur solaire plan à air et une chambre de séchage. Ces deux parties sont reliées entre elles de façon que la sortie du capteur soit branchée directement avec l'entrée de la chambre de séchage, pour assurer que l'air chaud sortant du capteur entre directement dans la chambre de séchage. Figure (IV.1).



Figure IV.1 Séchoir solaire

IV.2 Réalisation du séchoir solaire

IV.2.1 Le capteur solaire

Notre capteur est à simple circulation et à simple vitrage.

Il est constitué d'un box en bois recouvert d'un vitrage transparent au rayonnement solaires et d'un absorbeur noir.

Nous avons construit deux capteurs plan qui diffèrent par la forme de l'absorbeur.

Le 1^{er} capteur C1 est constitué d'un absorbeur à ailettes droites et intercalées.

Le 2^{ème} capteur C2 est aussi constitué d'un absorbeur à ailettes intercalées en zigzag.

La forme et la disposition des ailettes affectent l'écoulement de l'air pendant sa trajectoire, pour le permettre de rester le plus longtemps possible dans la cavité entre le vitrage et l'absorbeur et ainsi s'échauffer le plus.

IV.2.2 Les étapes de fabrication d'un capteur solaire

- La base du capteur est une feuille de bois contre plaque d'épaisseur 6mm et de dimensions $(90 \times 60) \text{cm}^2$



Figure IV.2 Base du capteur

- On place le cadre en bois de 10 cm de haut et d'épaisseur 2cm sur les bords de la plaque



Figure IV.3 Base du capteur avec les bords

- Intercaler les ailettes en bois sur toute la surface de la planche, de dimensions $(10 \times 3) \text{ cm}^2$ pour assurer le passage de l'air,



Figure IV.4 fixation des ailettes

- Envelopper tout le box en bois avec l'Aluminium pour garder la chaleur à l'intérieur

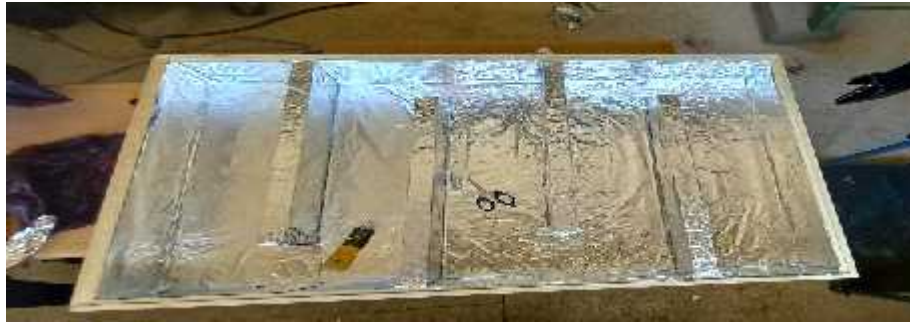


Figure IV.5 couverture de l'absorbeur avec l'Aluminium

- Peindre toute la cavité de l'absorbeur avec une peinture noir matte afin d'augmenter l'absorption du rayonnement solaire et favoriser le phénomène de l'effet de serre.

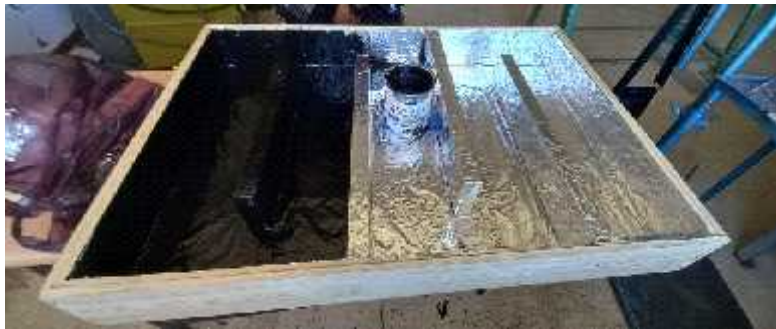


Figure IV.6 peinture de l'absorbeur

- Fixation des pieds en bois pour que le capteur soit inclinée à 35°



Figure IV.7 Fixation est inclinaison du capteur

- pose de la feuille de vitrage d'épaisseur 3mm sur la partie supérieur du capteur



Figure IV.8 Pose du vitrage



Figure IV.9 Vue du capteur solaire C1(à ailettes droites intercalées)

Les mêmes étapes ont été appliquées pour la réalisation du capteur solaire C2 à ailettes intercalées en zigzag.(Figure IV.11).



Figure IV.10 Vue du capteur solaire C2(à ailettes intercalées en zigzag)

IV.2.3 La chambre de séchage

La chambre de séchage est en forme d'armoire en bois de dimensions (70x60x60)cm et contenant 4 pieds de hauteur 70cm, contenant des claies.

IV.2.4 Les étapes de fabrication d'un capteur solaire

- Fixation du cadre constitué de trois feuilles de bois de dimensions (70x60x60)cm



Figure IV.11 Fixation du cadre

- Fixations des supports en Aluminium pour former les étagères (les claies)



Figure IV.12 Fixation des supports

- Fixation de la porte ainsi que le plafond et les pieds de la chambre de séchage



Figure IV.13 Fixation du plafond, la porte et les pieds

- Peinture de la chambre de séchage et emplacement du tuyau liant la sortie du capteur avec l'entrée de la chambre de séchage



Figure IV.14 Vue de la chambre de séchage complète

- Assemblage du capteur solaire et la chambre de séchage

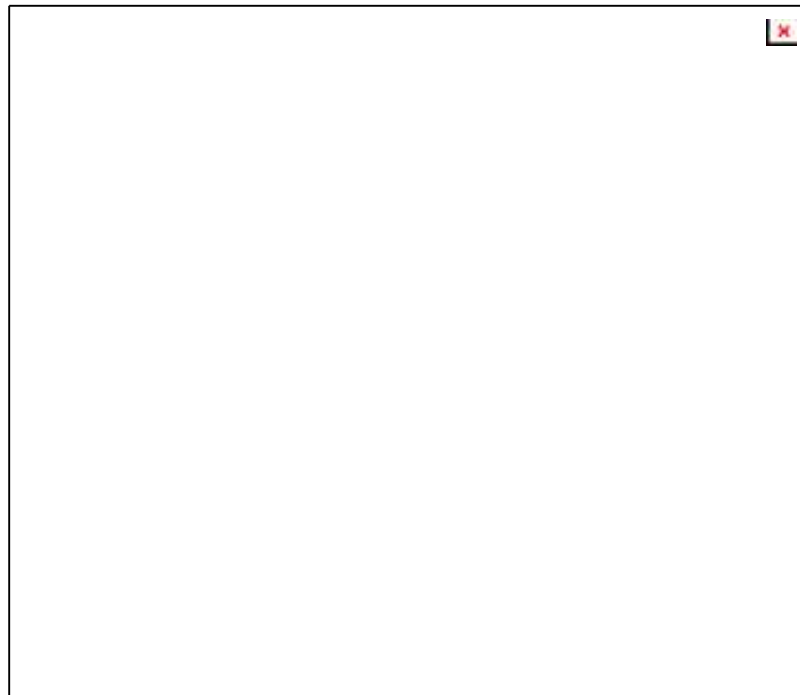


Figure IV.15 Vue d'ensemble du séchoir solaire

IV.3 Principe de fonctionnement du séchoir solaire

L'air frais à la vitesse et la température de l'environnement entre par le bas du capteur et circule dans la cavité entre le vitrage et l'absorbeur par convection naturelle entre les ailettes de l'absorbeur où il est chauffé à l'entrée de la chambre de séchage, figure (IV.16).

Ensuite, l'air est chauffé au niveau de l'absorbeur par effet de serre puisque le rayonnement solaire est piégé dans l'absorbeur et bloqué par les ailettes pour y rester le plus de temps possible et sortir enfin chauffé vers la chambre de séchage. Dans la chambre de séchage l'air sortant du capteur est chaud par effet de serre remonte par convection naturelle vers le haut de la chambre de séchage pour sécher le produit dans les claies.

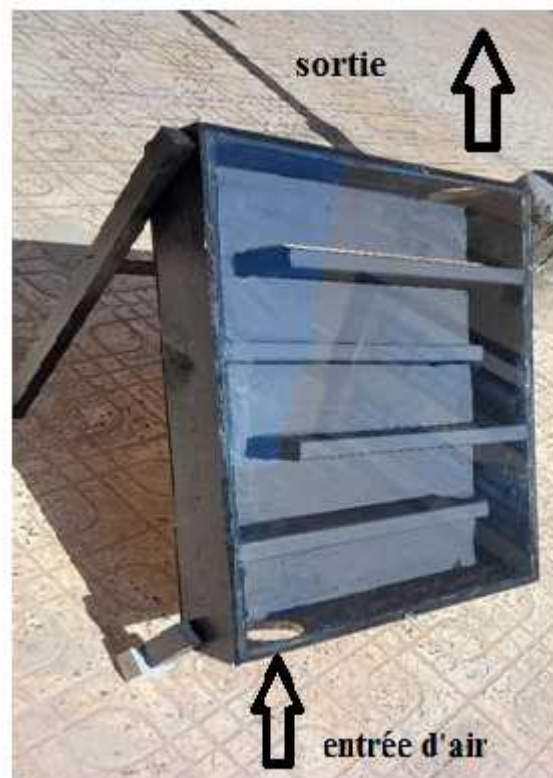


Figure IV.16 capteur c1 avec conditions d'entrée et sortie

IV.3.1 Préparation des produits

Nous avons utilisé comme produit pour sécher la pomme de terre, cette dernière est lavée et coupée en rondelles d'épaisseur variant de 2mm à 5mm, ensuite placée dans la claie.



Figure IV.17 préparation du produit pour le séchage

IV.3.2 Appareillage utilisé

IV.3.2.1 Mesure de la vitesse de l'air

La mesure de la vitesse de l'air se fait à l'aide d'un anémomètre qui est placé à l'entrée du capteur.



Figure IV.18 Anémomètre

IV.3.2.2 Mesure de la température

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

- A l'entrée du capteur
- Sur le vitrage
- Au niveau de l'absorbeur
- A la sortie du capteur (entrée de la chambre de séchage)
- En haut dans la chambre de séchage



Figure IV.19 Thermomètres utilisés

IV.3.2.3 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 IV.20 Hygromètre

IV. 4 Exploitation des résultats

Les essais de séchage ont été fait dans la ville de M'sila de coordonnées (latitude : $35,31^\circ$ et de longitude 4.23°) pendant plusieurs journée ensoleillées, en utilisant à chaque fois un capteur solaire.

Pour la journée du **11/06/2023**. Le 1er produit à sécher (la pomme de terre) dont les conditions initiales sont:

-) Le capteur solaire C2
-) La masse initiale du produit $M_e = 526 \text{ g}$

-) La vitesse à l'entrée $v=1\text{m/s}$
-) La température à l'entrée $T= 33.41^\circ\text{C}$

Le temps de séchage est de 9h30 jusqu'à 18h.

La masse après séchage est $M_s = 117\text{g}$

Le 11/06/2023

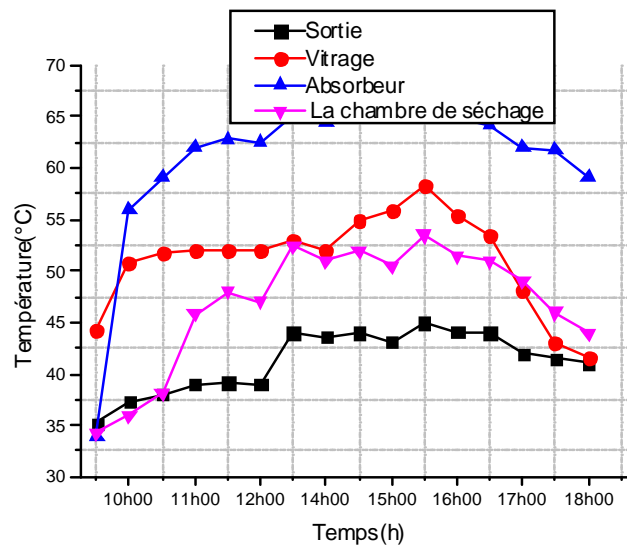


Figure IV.21 Variation de la température dans le séchoir solaire
 $M=526\text{g}$, $v=1\text{m/s}$ $T_e=31.6^\circ\text{C}$

La figure (IV.21), montre la variation de la température dans le séchoir solaire c'est à dire dans le capteur solaire et dans la chambre de séchage.

Nous constatons d'après cette figure que la température augmente progressivement dès le début de la journée pour atteindre un maximum ensuite diminue vers la fin de la journée. La température de l'absorbeur est la plus élevée ensuite le vitrage, la chambre de séchage puis à la sortie elle diminue. Le maximum de température est atteint 66.6°C vers 15h30 au niveau de l'absorbeur, 53.5°C dans la chambre de séchage et 45°C à la sortie du capteur.

Alors que vers 15h le maximum de température atteint 55.5°C au niveau du vitrage.

Nous constatons que la taille du produit a changé et il ya perte totale de la teneur en eau. Le produit est séché à 100%. Figure (IV.22).



Figure IV.22 Produit séché

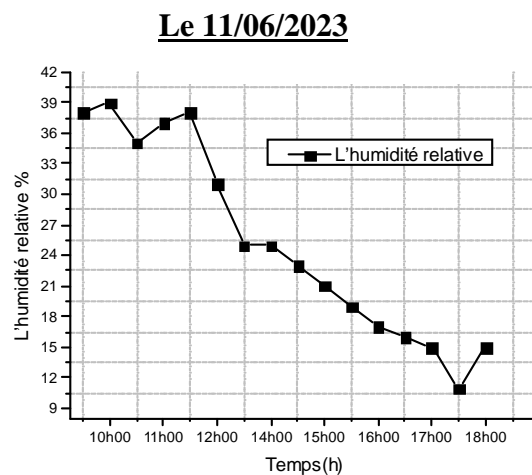


Figure IV.23 Variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage : $M_e=526g$, $v=1m/s$ $T_e=31.6^\circ C$

La figure (IV.23), montre la variation de l'humidité relative dans la chambre de séchage, nous constatons une chute de l'humidité en fonction du temps, cela montre la diminution de teneur de l'eau du produit quand la température augmente ce qui favorise son séchage. Le minimum d'humidité est d'environ 11 à 15% atteint vers 17h et 17h30.

Pour la journée **12/06/2023** Le 1er produit à sécher (la pomme de terre) dont les conditions initiales sont:

-) Le capteur solaire C1
-) La masse initiale du produit $M_e = 368g$
-) La vitesse à l'entrée $v=1.1m/s$
-) La température à l'entrée $T= 32.93^\circ C$

Le temps de séchage est de 9h30 jusqu'à 16h30.

La masse après séchage est $M_s = 80g$, nous constatons un changement dans la texture du produit et changement de la taille de la couleur.

D'après la figure IV.24, nous constatons que la température de l'absorbeur est la plus élevée et atteint le maximum vers 14h qui est de $64^\circ C$, ensuite on a une baisse de température vers 16h. Ensuite, on a la température du vitrage qui est aussi élevée et présente un maximum vers 15h de même la température dans la chambre de séchage qui est plus élevée que celle de la sortie. On voit que les courbes ont la même tendance.

La figure (IV.25), présente la variation de l'humidité relative au cours de la journée, cette figure montre que l'humidité est une courbe décroissante en fonction du temps.

Le 12/06/2023

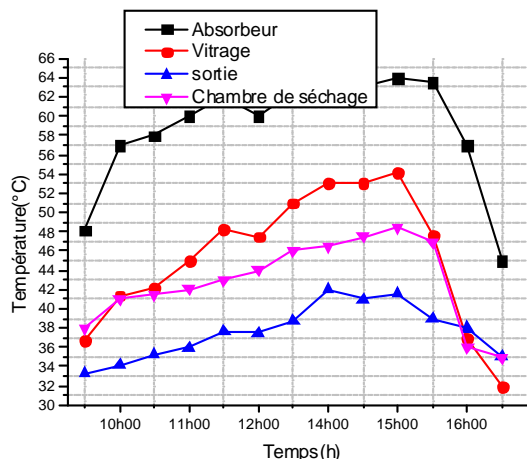


Figure IV.24 Variation de la température séchage : $M_e=368g$, $v=1.1m/s$
 $T_e=32.93^\circ C$

Le 12/06/2023

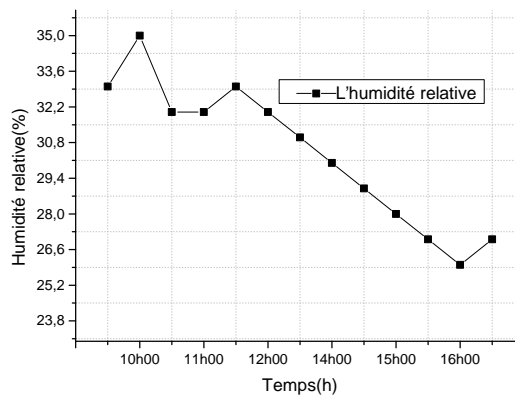


Figure IV.25 Variation de l'humidité relative :
 $M_e=368g$, $v=1.1m/s$ $T_e=32.93^\circ C$

Pour la journée **13/06/2023** Le 1er produit à sécher (la pomme de terre) dont les conditions initiales sont:

-) Le capteur solaire C2
-) La masse initiale du produit $m_e = 504g$
-) La vitesse à l'entrée $v=1.1m/s$
-) La température à l'entrée $T_e= 32.15^\circ C$

Le temps de séchage est de 10h jusqu'à 18h.

La masse après séchage est $m_s = 116g$

La figure (IV.26), montre la variation de la température dans les différents éléments du séchoir. La température la plus élevée est au niveau de l'absorbeur et le vitrage, le maximum est atteint vers 15h. La température dans la chambre de séchage atteint une valeur la plus élevée vers 14h qui est de $50^\circ C$.

La figure (IV.27), montre la variation du taux d'humidité dans la chambre de séchage contenant le produit séché, et qui montre une décroissance de l'humidité au cours de la journée. La plus petite valeur atteinte est de 24%.

Le 13/06/2023

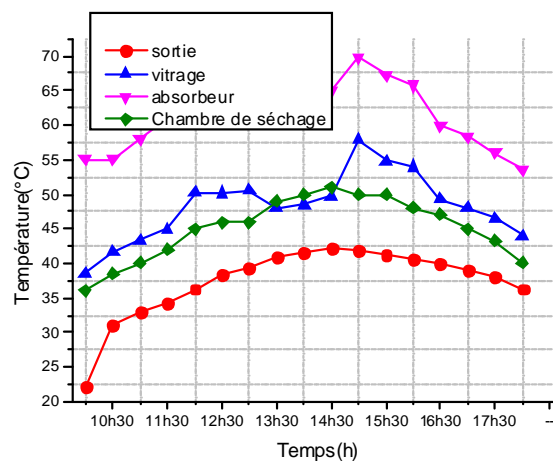


Figure IV.26 Variation de la température :
 $M_e=504g$, $v=1.1m/s$ $T_e=32.15^\circ C$

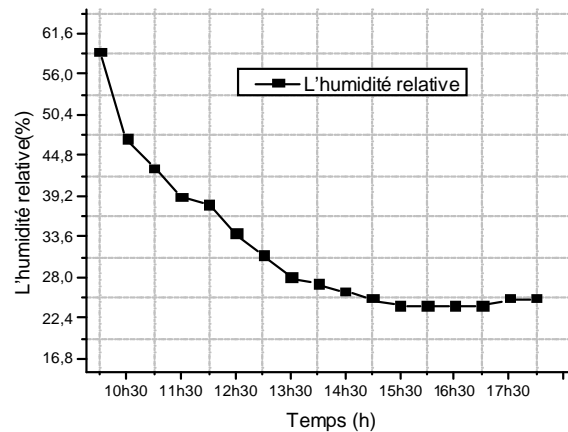
Le 13/06/2023

Figure IV.27 Variation de l'humidité relative :
 $Me=504g$, $v=1.1m/s$ $Te=32.15^{\circ}C$

Pour la journée **15/06/2023** Le 1er produit à sécher (la pomme de terre) dont les conditions initiales sont:

-) Le capteur solaire C2
-) La masse initiale du produit $Me = 529g$
-) La vitesse à l'entrée $v=1.1m/s$
-) La température à l'entrée $Te= 31.24^{\circ}C$

Le temps de séchage est de 9h30 jusqu'à 18h.

La masse après séchage est $Ms = 108g$, on a séchage 100%

La figure (IV.28), montre la variation de la température dans les éléments du séchoir solaire et qui montre que les courbes ont la même tendance, c'est-à-dire la température augmente dès le début de la journée pour atteindre un maximum vers 15h. La température la plus élevée est celle de l'absorbeur ensuite le vitrage puis la chambre de séchage et enfin à la sortie.

La figure (IV.29), montre la variation du taux d'humidité relatif dans la chambre de séchage, qui diminue au cours de la journée. Quand la température augmente l'humidité diminue. La figure (IV.30), montre la variation de l'intensité solaire par unité de surface (W/m^2). le maximum est atteint vers 13h.

Le 15/06/2023

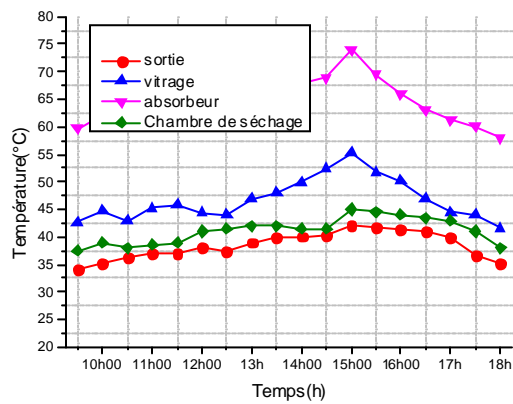


Figure IV.28 Variation de la température :
 $Me=529g$, $v=1.1m/s$ $Te=31.24^{\circ}C$

Le 15/06/2023

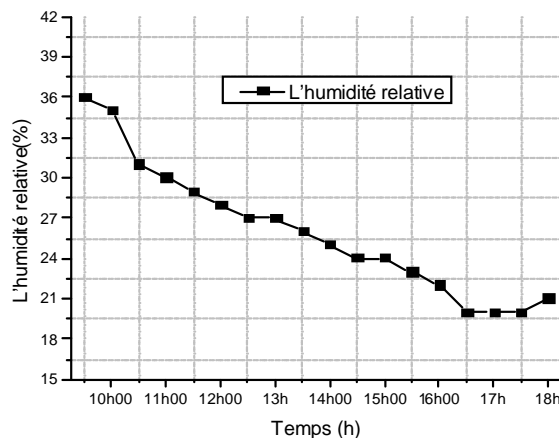


Figure IV.29 Variation de l'humidité relative :
 $Me=529g$, $v=1.1m/s$ $Te=31.24^{\circ}C$

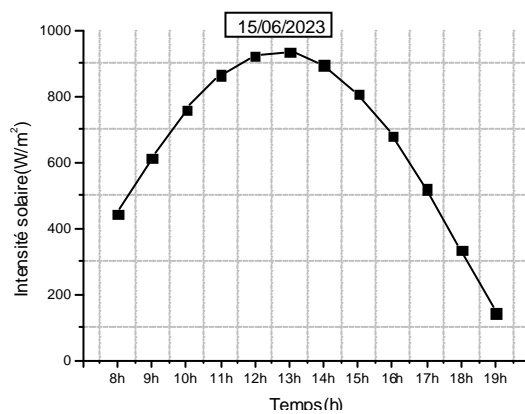


Figure IV.30 Variation de l'intensité solaire
 $v=1.1m/s$ $Te=31.24^{\circ}C$

Pour la journée **18/06/2023** Le 1er produit à sécher (la pomme de terre) dont les conditions initiales sont:

-) Le capteur solaire C1
-) La masse initiale du produit $M_e = 267\text{g}$
-) La vitesse à l'entrée $v=1.1\text{m/s}$
-) La température à l'entrée $T_e= 34,17^\circ\text{C}$

Le temps de séchage est de 9h jusqu'à 17h.

La masse après séchage est $M_s = 111\text{g}$, on a séchage 100%

La figure (IV.31), montre la variation de la température dans les éléments du séchoir solaire et qui montre que les courbes ont la même tendance, c'est-à-dire la température augmente dès le début de la journée pour atteindre un maximum vers 15h30. La température la plus élevée est celle de l'absorbeur ensuite le vitrage puis la chambre de séchage et enfin à la sortie.

La figure (IV.32), montre la variation du taux d'humidité relatif dans la chambre de séchage, qui diminue au cours de la journée. Quand la température augmente l'humidité diminue pour atteindre un taux de 16% vers la fin de l'essai 17h.

La figure (IV.33), montre la variation de l'intensité du rayonnement solaire pendant cette journée qui montre que l'intensité solaire est maximale vers 14h avec une chute à 12h ceci est due à la présence de quelques masques solaires (nuage).

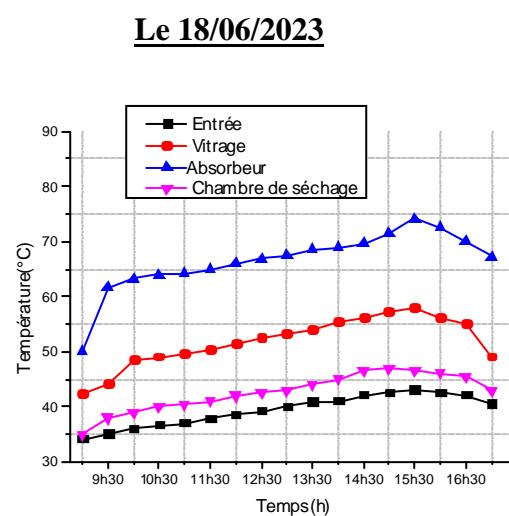


Figure IV.31 Variation de la température :
 $M_e=267\text{g}$, $v=1.9\text{m/s}$ $T_e=34.17^\circ\text{C}$

Le 15/06/2023

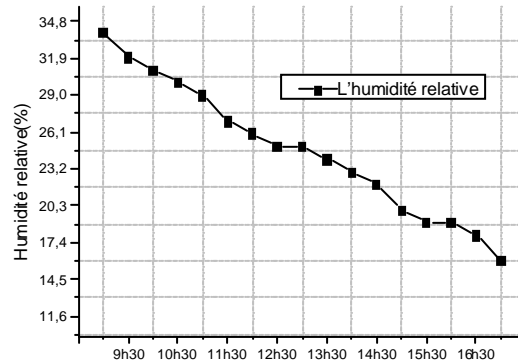


Figure IV.32 Variation de l'humidité relative
 $Me=529g, v=1.9m/s, Te=34.18^{\circ}C$

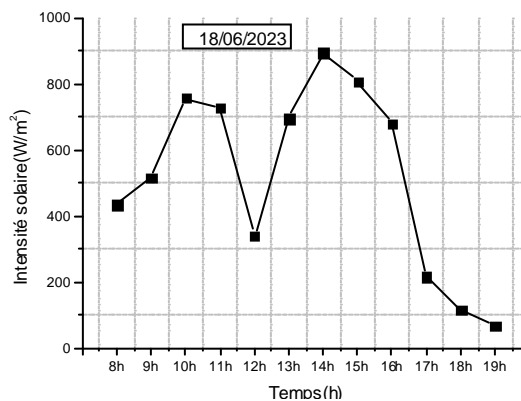


Figure IV.33 Variation de l'intensité solaire
 $v=1.9m/s, Te=34.17^{\circ}C$

IV.4 Conclusion

Nous pouvons conclure de ces résultats, que le séchoir solaire indirect que nous avons réalisé avec des panneaux solaires thermiques à ailettes longitudinales droites et en zigzag fonctionne bien, puisque le phénomène de l'effet de serre est bien réalisé avec l'échauffement de l'absorbeur, sous l'effet de la convection naturelle dans la chambre de séchage, nous avons obtenus des produits séchés de 90à 100%. Dans les essais que nous avons trouvés la

température la plus élevée est au niveau de l'absorbeur ensuite le vitrage et puis la chambre de séchage et la température la plus basse est celle de la sortie du capteur.

Nous pouvons conclure que l'humidité est une fonction décroissante du temps.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons fait la conception et la réalisation d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle. Le séchoir solaire est constitué de deux parties la première partie est capteur solaire thermique avec absorbeur à (à ailettes intercalées droites et en zigzag) dont lequel se manifeste l'effet de serre au niveau de l'absorbeur. La seconde partie est la chambre de séchage dans laquelle se manifeste le phénomène de la convection naturelle de l'air pour sécher les produits dans les claies.

Le séchoir solaire est réalisé par des moyens plus simples et moins coûteux et facilement utilisables, utilisé pour le séchage des produits agroalimentaires. Nous avons réalisé deux capteurs solaires de même dimensions mais qui diffèrent dans la forme de l'absorbeur, le premier est constitué d'ailettes longitudinales droites et intercalées fixées dans la base de ce dernier. Le second est constitué d'ailettes longitudinales intercalées et en forme de zigzag.

Le but des ailettes est de permettre à l'air de rester le plus de temps dans l'absorbeur pour sortir plus chauffé.

Les essais de séchage est réalisé pendant les journées du 11 Juin 2023 jusqu'au 18 Juin 2023, pendant lesquelles nous avons obtenus un séchage des produits (pomme de terre) de 90 à 100%.

Nous avons exposé toutes les étapes suivies dans la réalisation du séchoir solaire, avec le choix des matériaux et des dimensions.

Les résultats trouvés sont exprimé et profils de température dans les éléments du capteur et du séchoir. Ces profils ont montrés que la température de l'absorbeur est plus élevée puis celle du vitrage. Dans la chambre se séchage, la température augmente et l'humidité diminue au cours du séchage.

Nous pouvons dire que ce séchoir indirect a convection naturelle est fiable et peut être utilisé pour sécher des produits agroalimentaires tels que: la pomme de terre, les tomates, l'oignon ...etc) mais la durée de séchage varie selon la teneur en eau que contient le produit et la température de l'environnement (conditions climatique de l'endroit dans lequel se font les essais). Puisque nous avons eu plusieurs problèmes de climat dans la ville de M'sila les jours passés (journées nuageuses et des pluies).

Références

- [1] M. Dagueneat Les séchoirs solaires : théorie et pratique, (1985)
- [2] F. Vachet, Séchage dans l'industrie chimique, Technique de l'ingénieur, J 2483, (119),(1993).
- [3] 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.
- [4] M.Goudjal Yacine Institut national agronomique _ Alger thèse en vue de l'obtention du diplôme de magister en sciences agronomiques «séchage solaire du raisin, variété sultanine » 2004 _ 2005
- [5] 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).
- [6] S. Chouicha, « Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact Sur la qualité ». Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (2010).
- [7] A. Bahadj, « Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre ». Mémoire de master, Kasdi Merbah de Ouargla (2014).
- [8] R. Benammar, K. Gouri, « Séchage Solaire des Produits Agricoles ». Mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (2018).
- [9] J. Castaing-Lavignottes, « Air humide : propriétés thermodynamiques, opérations unitaires et technologie associées à son emploi ». Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, (2003).
- [10] Mujumdar, A.S. and A.S. Menon, Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. Handbook of industrial drying, 1995. 1: p. 1-39.
- [11] K. Souheyla, « Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie ». Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie (2018). Français.
- [12] Mujumdar, A.S., Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement.Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec., 2000.
- [13] N. Chalal, « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect ». Mémoire du diplôme de magister en génie climatique, Université Mentouri de Constantine (2008).
- [14] https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_021_07.pdf
- [15] Ahmat Tom. Contribution au séchage solaire des produits carnés : modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux. L'école nationale supérieure d'arts et métiers le 10 juillet 2015.
- [16] Angélique L. (2002). Séchage. Université de Liège – Haute Ecole Charlemagne Contribution à l'amélioration des matériaux de stockage thermique
- [17] Bimbenet, J., J. (1984). Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire. Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition pp34 Cité par H. Madjoudj.
- [18] Charreau, A. and R. Cavaille (1991). "Séchage théorie et pratique Technique de l'Ingénieur, génie des procédés,." 2480-1; 2480-23
- [19] Touati, B. (2001). Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Thèse de Magistère Centre Universitaire, Bechar, Algerie..

Références

- [20] Nadeau, J. and R. Puiggali (1995) "(Séchage des processus physiques aux procédés industriels", Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France.
- [21] M. Daguenet Les séchoirs solaires : théorie et pratique, (1985)
- [22] Bonazzi et Dumoulin: "Quality Changes in Food Materials as Influenced by Drying Processes." (2011)
- [23] André charreau et Roland cavailé Techniques de l'ingénieur – génie des procédés Séchage Appareillage et choix d'un procédé, j 2484-2 ; 2484-16.
- [24] Sharma, A., C.R. Chen, and N. Vu Lan, *Solar-energy drying systems: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(6): p. 1185-1210.
- [25] Houhou Hatem: Étude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires, université Biskra, (2007)
- [26] Esper, A. and W. Mühlbauer, *Solar drying-an effective means of food preservation*. Renewable Energy, 1998. **15**(1-4): p. 95-100.
- [27] M. Goudjal Yacine, « Séchage solaire du raisin, variété Sultanine ». Diplôme de magister en sciences agronomiques, Sciences alimentaires. Institut National Agronomique-Alger (2004/2005).
- [28] D. Mennouche, « Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire ». Mémoire de magister de Génie des Procédés, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (21/06/2006).
- [29] B. Touati, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe vertes (*Mentha viridis*) ». Mémoire de Doctorat, Université de Telemcen (2008).
- [30] 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.
- [31] V.R. Khawale, R.P. Khawale, Performance Evaluation of a double pass Indirect Solar Drier for drying of Red Chili 3 (2016) 514–518
- [32] Gulcimen, F., H. Karakaya, and A. Durmus, Drying of sweet basil with solar air collectors. Renewable Energy, 2016. 93: p. 77-86.
- [33] 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.
- [34] Dejchanchaiwong, R., et al., *Mathematical modeling and performance investigation of mixed-mode and indirect solar dryers for natural rubber sheet drying*. Energy for Sustainable Development, 2016. **34**: p. 44-53
- [35] Jain, D., Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined Multi-pass solar air heater with in-built thermal storage. Journal of food engineering, 2005. 71(1): p. 44-54.
- [36] 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
- [37] Ferreira, A.G., et al., *Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying*. Solar Energy, 2008. **82**(3): p. 198-205.
- [38] Afriyie, J.K. and A. Bart-Plange, *Performance Investigation of a Chimney-Dependent Solar Crop Dryer for Different Inlet Areas with a Fixed Outlet Area*. ISRN Renewable Energy, 2012. **2012**: p. 9.
- [39] 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.
- [40] : A.Bouguima , K.Abbou , Etude et réalisation d'un capteur solaire plan à eau , Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master , 2014-2015 , p 5-6 .
- [41] : 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).

Références

- [42] : A, Labeled; N, Moumami; K, Aoués; M, Zellouf; A, Moum²A& mi. Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561. (2009).
- [43]: U, Eiker. Solar technologies for buildings, John Wiley sans Sons, England. (2001).
- [44] : J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [45] : Y. Jannot. Thermique solaire, Mars 2011.
- [46] L. Achoui, S.Hamidi « développement d'un système photovoltaïque onduleur-MAS, application au pompage photovoltaïque » PFE.ENP.juin 2004.
- [47] K.Touafek « étude d'un capteur solaire hybride Photovoltaïque thermique» Magister. ENP Octobre 2005.
- [48] http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Capteur_solaire_plan.
- [49] 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.
- [50]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.
- [51] 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).

:

التجفيف هو أحد الأساليب الرئيسية للحفاظ على المنتجات الزراعية والغذائية من أجل ضمان مدة صلاحية طويلة وتسهيل النقل وضمان توفر المنتج في حالة حدوث نقص في هذا المنتج الطازج في السوق الوطني في هذا العمل قمنا بإنشاء مجفف شمسي غير مباشر يعمل بالحمل الطبيعي وقمنا من خلاله بإجراء عدة تجارب في أيام مختلفة على أنواع مختلفة من المنتجات الغذائية ()

يمكن إنتاج هذا النوع من المجففات بمقاييس مختلفة ويستخدم بشكل خاص للمنتجات الحساسة جدا للإشعاع الشمسي

مناسب بشكل خاص لتجفيف المنتجات الغذائية، وله ميزة الحفاظ على خصائص الطعام بشكل أفضل

في نهاية هذه الدراسة توصلنا إلى أن درجة حرارة هواء التجفيف تمثل أهم عامل مؤثر على حركية التجفيف

الكلمات المفتاحية: التجفيف ، الشمسي غير المباشر ،

Résumé :

Le séchage est l'une des principales méthodes de conservation des produits agroalimentaires afin d'assurer une longue durée de conservation, de faciliter le transport et d'assurer la disponibilité du produit en cas de pénurie de ce produit frais sur le marché national.

Dans ce travail, nous avons créé un séchoir solaire indirect qui fonctionne par convection naturelle, à travers lequel nous avons mené plusieurs expériences à différents jours sur différents types de produits alimentaires (pommes de terre, tomates, oignons)

Ce type de séchoir peut être réalisé en différentes tailles et est notamment utilisé pour les produits très sensibles au rayonnement solaire.

Il est particulièrement adapté pour le séchage des produits alimentaires, il a l'avantage de mieux préserver les propriétés des aliments

Au terme de cette étude, nous avons conclu que la température de l'air de séchage est le facteur le plus important affectant la cinétique de séchage.

Mots-clés : séchage, séchoirs solaire indirect, convection naturelle

Abstract:

Drying is one of the main methods for preserving food&beverage and food products in order to ensure a long shelf life, facilitate transportation, and ensure product availability in the event of a shortage of this fresh product in the national market.

In this work, we created an indirect solar dryer that works with natural convection, through which we conducted several experiments on different days on different types of food products (potatoes, tomatoes, onions)

This type of dryer can be produced in different sizes and is used in particular for products that are very sensitive to solar radiation.

It is especially suitable for drying food products, it has the advantage of preserving the properties of food better

At the end of this study, we concluded that the drying air temperature is the most important factor affecting the drying kinetics.

Keywords: drying, indirect sun dryer, natural convection