



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de

La Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTERACADEMIQUE

Spécialité : Energie renouvelable

Présenté par :

Atallah bachir

Farhat salah eddine

Guraisha Haj lakhdar

Intitulé :

**Réalisation et mise en œuvre d'un
mécanisme de suiveur solaire pour
une efficacité maximale**

Soutenue le : 22/06/2025

Dr. Bousbia Salah seif eddine

Dr. Megdoud soufiane

Dr. Nacib djilani

Rapporteur

Président

Examineur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux,

Louange à Allah, Seigneur de l'univers, et que la paix et le salut soient sur le Prophète Muhammad — le sceau des prophètes — ainsi que sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au Jour du Jugement.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Dr. Bousbia Salah Seif eddine, enseignant à l'Université d'El Oued, pour ses conseils éclairés, ses orientations précieuses ainsi que pour la confiance et l'appui qu'il m'a généreusement accordés tout au long de ce travail.

Mes remerciements sincères s'adressent également à mes chers parents, à tous les membres de ma famille, à mes frères et à mes sœurs bien-aimés, pour leur soutien constant, leurs prières et leur patience.

Je n'oublie pas non plus d'adresser mes remerciements à mes amis, mes collègues ainsi qu'à l'ensemble de mes enseignants, pour leur accompagnement, leur encouragement et leur précieuse contribution à mon parcours académique.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières, leur patience et leurs innombrables sacrifices. Qu'Allah les protège et les récompense.

À mes frères et sœurs, pour leur soutien moral et leur présence constante à mes côtés.

À mes amis fidèles, qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de ce parcours.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce mémoire.

Résumé :

Ce mémoire porte sur la fabrication et la mise en œuvre d'un système de suivi solaire intégré à un séchoir solaire afin d'augmenter son efficacité. Il commence par une présentation générale des séchoirs solaires et de leurs types, ainsi que de l'importance de l'énergie solaire dans les régions à fort ensoleillement. Ensuite, les différents types de systèmes de suivi solaire sont détaillés, en mettant en évidence leurs avantages et leurs inconvénients. Un travail expérimental a été réalisé à l'Université d'El Oued en Algérie, où un système de suivi solaire a été fabriqué et intégré à un séchoir solaire. Les résultats ont montré une amélioration significative des performances du séchoir solaire et de l'efficacité du séchage, grâce à une exposition accrue au rayonnement solaire, que ce soit en termes de vitesse de déshydratation ou de maintien de la qualité du produit. Ce système représente donc une solution pratique, notamment pour les régions sahariennes.

Mots-clés : Séchoir solaire, système de suivi solaire mono-axe, énergie solaire.

ملخص:

تتناول هذه المذكرة تصنيع وتنفيذ نظام تتبع شمسي آلي مُدمج مع مجفف شمسي لزيادة كفاءته. تبدأ بعرض عام عن المجففات الشمسية وأنواعها، وأهمية الطاقة الشمسية في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع. ثم يُفصل في أنواع أنظمة التتبع الشمسي مبيناً مزاياها وعيوبها. كما قمنا بعمل تجريبي تم فيه تصنيع نظام تتبع شمسي مساعد لمجفف شمسي وتجربته بجامعة الوادي بالجزائر. حيث أظهرت النتائج تحسناً كبيراً في أداء المجفف الشمسي وفي كفاءة التجفيف، عن طريق زيادة التعرض للإشعاع الشمسي، من حيث سرعة إزالة الرطوبة أو الحفاظ على جودة المنتج، مما يجعل النظام حلاً عملياً، خاصة للمناطق الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي، نظام تتبع شمسي أحادي المحور، الطاقة الشمسية.

Abstract:

This thesis discusses the fabrication and implementation of an solar tracking system integrated with a solar dryer to improve its efficiency. It begins with a general overview of solar dryers and their types, as well as the importance of solar energy in regions with high solar radiation. The study then details the various types of solar tracking systems, highlighting their advantages and disadvantages. An experimental study was carried out at the University of El Oued in Algeria, where a solar tracking system was designed and tested in conjunction with a solar dryer. The results showed a significant improvement in the performance of the solar dryer and the drying efficiency, achieved through increased exposure to solar radiation whether in terms of faster moisture removal or better preservation of product quality. This makes the system a practical solution, especially for desert regions.

Keywords: Solar dryer, single-axis solar tracking system, solar energy.

Listes des figures

Figure I. 1 séchage solaire naturel de certains légumes et fruits	5
Figure I. 2 Anciennes méthodes de séchage au soleil.....	6
Figure I. 3 Séchage solaire.....	7
Figure I. 4 Présentation schématique d'un produit humide.	7
Figure I. 5 Principe de séchage à l'air libre.	9
Figure I. 6 Le principe d'un échoirsolaire direct.	9
Figure I. 7 Principe du séchoir solaire fonctionnant en mode direct à convection[8]. naturelle [9]......	10
Figure I. 8 Exemple de séchoir solaire de mode direct à convection forcée.	11
Figure I. 9 Schéma explicite d'un séchoir solaire indirect.....	13
Figure I.10 : Une description interne du soleil.	14
Figure I.11: Mouvement de la terre autour du soleil.	15
Figure I.12 : Mouvement apparent du soleil.	16
Figure I.13 : Rayonnement direct, diffus, global et albédo.	18
Figure II. 1 modèle d'un héliostat dans ses premières applications..	23
Figure II. 2 Champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France.	23
Figure II. 3 Types de suiveurs solaires	25
Figure II. 4 Suiveur solaire passif.....	26
Figure II. 5 Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale.....	27
Figure II. 6 Suiveur à deux axes ADES : modèle 5F-27 M.....	28
Figure III. 1 support métallique.	35
Figure III. 2 Vue du moteur utilisé dans le système.	35
Figure III. 3 Le système de transmission (chaîne et engrenages).	36
Figure III. 4 L'image illustre les boulons et les rondelles utilisés dans le système. [23]......	37
Figure III. 5 Soudage du support métallique	38
Figure III. 6 Installation de la chaîne et des engrenages avec le moteur.	38
Figure III.7 Fixation du moteur à la base.....	39
Figure III. 7 Test du mouvement du système.	40
Figure IV. 8 Séchage du concombre à l'ombre	36
Figure IV. 9 Séchage du concombre au soleil.	36
Figure IV. 10 L'image montre le séchage du concombre dans le séchoir solaire.	36
Figure IV. 11 Thermomètre digital	37
Figure IV. 12 Les images montrent la balance utilisée lors de l'expérience	38
Figure III. 13 Température ambiante en fonction du temps	39
Figure IV. 14 Rayonnement solaire en fonction du temps	40
Figure IV. 15 Sécher des tranches de concombre au soleil	41
Figure IV. 16 Sécher les tranches de concombre à l'ombre	41
Figure IV. 17 Séchage des tranches de concombre avec un séchoir solaire équipé de SS	42
Figure IV. 18 Comparaisons entre les poids des échantillons	42
Figure IV. 19 Images des produits après séchage.....	44

Listes des tableaux

Tableau I. 1 Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct	10
Tableau I. 2 Caractéristiques principales du soleil	14
Tableau IV. 1 Les étapes du séchage du concombre	36

Sommaire

<i>Remerciements</i>	I
<i>Dédicace</i>	II
Résumé.....	III
Listes des figures	IV
Listes des tableaux	V
Sommaire	VI
<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I : Généralité sur les séchoirs solaires , gisement solaire , rayonnement solaire.</i>	
I.1 Introduction	5
I.2 Séchage.....	5
I.2.1 Définition.....	5
I.2.2 Historique	6
I.2.3 But de séchage	6
I.2.4 Principe de séchage	7
I.2.5 Différents types de séchoirs solaires	8
I.2.5.1 Séchoirs naturels.....	8
I.2.5.2 Séchoirs directs.....	9
I.2.5.2.1 Séchoirs solaires passifs	10
I.2.5.2.2 Séchoirs solaires actifs.....	11
I.2.2.3 Séchage solaire indirect.....	11
I.2.2.3.1 Définition.....	11
I.2.2.3.2 Principe de fonctionnement	11
I.2.2.3.3 Paramètres influençant les performances d'un séchoir	12
I.2.2.3.4 Caractéristiques physiques du séchoir	12
I-3 Généralités sur le soleil	13
1.3.1. Le gisement solaire :	13
1.3.2. Définition le soleil :	13
1.3.3. Caractéristiques du soleil :	14
1.3.4 Système terre-soleil.....	15
1.4. Le rayonnement solaire :	16
1.4.1. Spectre solaire :	17

1.4.2 Constante solaire :	17
1.4.3 Composant du rayonnement solaire et constante solaire	17
1.4.3.1 Les composantes du rayonnement solaire	17
I.5 Conclusion	20

Chapitre II : Les systèmes de suiveurs solaires

II.1 Introduction	22
II.2 Les suiveurs solaires	22
II.3 Principes fondamentaux des suiveurs solaires	24
II.4 Les types de suiveurs solaires	24
II.4.1 Suiveurs solaire passif :	25
II.4.2 Suiveur solaire actif :	26
II.4.3 Suiveur solaire mono-axe	26
II.4.4 Suiveur solaire double axe :	27
II.5 Les Avantages et Les inconvénients des suiveurs solaires	28
II.5.1 Les avantages du système de suivi solaire à axe double :	28
II.5.2 Les inconvénients du système de suivi solaire à axe double :	29
II.6 Conclusion	29

Chapitre III : Etude expérimentale

III.1 Introduction	33
III.2 réalisation d'un système de suivi solaire pour un séchoir solaire	33
III.2.1 Introduction	33
III.2.2 Principe de fonctionnement du système de suivi solaire	33
III.2.3 Composants utilisés dans le système de suivi solaire automatique	34
III.2.3.1. Le support métallique (Support métallique)	34
III.2.3.2. Le moteur électrique	35
III.2.3.3. Le système de transmission (chaîne et engrenages)	36
III.2.3.4. Les unités de fixation et de liaison	36
III.2.4 Étapes de montage du suiveur solaire	37
III.2.4.1 Soudage du support métallique (base)	37
III.2.4.2 Installation de la chaîne et des deux engrenages	38
III.2.4.3 Fixation du moteur	39
III.2.4.4 Vérification finale et intégration fonctionnelle	39
III.2.4.5 Test de fonctionnement du système	39

Chapitre IV: Résultats et Discussion

IV.1 Introduction	34
IV.2 Résultats et Discussion	34
IV.2.1 Lieu et période des expériences	34
IV.2.1 Préparation de l'expérience	35
IV.2.3 Instruments de mesure et leur rôle dans l'évaluation du séchoir solaire avec suivi automatique	36
IV.2.3.1 Thermomètre digital	37
IV.2.3.2 Pyranomètre	37
IV.2.3.3 Balance électronique.....	37
IV.2.4 Résultats.....	39
IV.2.4 .1. Analyse des conditions climatiques durant le processus de séchage.....	39
IV.2.4.2. Interprétation comparative du séchage des tranches de concombre.....	41
IV.2.5.. Conclusion	414
Conclusion générale	45
Références	47



Introduction générale

Introduction générale :

Face aux défis mondiaux croissants, notre époque est marquée par une série de bouleversements environnementaux, énergétiques et économiques sans précédent. Le changement climatique, provoqué en grande partie par les émissions de gaz à effet de serre issues de la combustion des énergies fossiles, a entraîné des phénomènes météorologiques extrêmes, une élévation du niveau des mers, et des perturbations écologiques affectant l'ensemble des écosystèmes de la planète. Parallèlement, la raréfaction progressive des ressources énergétiques conventionnelles telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon suscite de sérieuses inquiétudes quant à la sécurité énergétique à long terme, surtout dans les pays en voie de développement fortement dépendants des importations. À cela s'ajoute l'augmentation constante du coût de l'énergie, qui impacte directement les ménages, l'industrie, l'agriculture, et menace la stabilité des économies nationales [1].

Dans ce contexte tendu, le recours aux énergies renouvelables n'est plus une simple alternative technologique, mais constitue désormais une stratégie incontournable pour relever les défis environnementaux et garantir un développement durable, équilibré et inclusif. Ces énergies, par leur disponibilité naturelle, leur faible impact écologique et leur capacité à être exploitées localement, offrent des solutions viables, résilientes et adaptées aux besoins actuels. Parmi ces sources, l'énergie solaire se distingue par sa disponibilité quasi-universelle, sa propreté environnementale, son fonctionnement silencieux, et son potentiel inépuisable, particulièrement dans les régions à fort ensoleillement comme le sud de la Méditerranée, le Sahel, ou le Sahara [2].

L'objectif de cette mémoire, qui vise à concevoir et à mettre en œuvre un mécanisme de suivi solaire mono axe, intégré à un séchoir solaire, afin d'en maximiser le rendement énergétique et la capacité de séchage, dans le but de fournir une solution pratique, efficace et économiquement accessible, adaptée aux besoins des communautés locales, notamment dans les régions à fort potentiel solaire.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux, interdépendants :

Le premier chapitre est consacré au cadre théorique général relatif aux séchoirs solaires, en abordant les concepts fondamentaux du séchage, les différents types de séchoirs, ainsi qu'une présentation générale du rayonnement solaire et de son potentiel, notamment dans les zones sahariennes et semi-arides.

Le deuxième chapitre traite de manière approfondie des systèmes de suivi solaire, en exposant les principes techniques qui les régissent, leurs différents types (mono-axe, double axe, à commande active ou passive), ainsi que leurs avantages, leurs limites et leurs applications possibles, notamment dans les systèmes thermiques.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation pratique du système. Il détaille les étapes de fabrication, de choix des composants mécaniques et électriques, d'assemblage et de mise en service du suiveur solaire. Des expérimentations ont été menées pour évaluer les performances du dispositif, en mesurant notamment la température, l'intensité du rayonnement et la perte d'humidité des produits séchés (en l'occurrence des tranches de concombre). Ces essais ont permis d'analyser l'efficacité du système réalisé et d'évaluer l'apport réel du suivi solaire dans l'amélioration du processus de séchage.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats, les courbes et les discussions auxquelles nous sommes parvenus à travers les expériences que nous avons réalisées.

Chapitre I

*Généralité sur les séchoirs solaires
et gisement solaire et Le
rayonnement solaire.*

I.1 Introduction

Le séchage est une opération essentielle permettant d'éliminer une partie du solvant d'un produit, généralement de l'eau, afin d'obtenir un état solide plus stable. Ce processus repose sur des transferts de chaleur et de masse pour évaporer le solvant. On distingue plusieurs types de séchoirs, notamment les séchoirs naturels, directs et indirects, chacun présentant des avantages et des inconvénients. L'utilisation du séchage solaire est une alternative écologique et économique, particulièrement adaptée aux régions ensoleillées. Il contribue à la conservation des aliments en réduisant leur teneur en humidité, limitant ainsi les risques de moisissure. Le choix du type de séchoir dépend des besoins spécifiques du produit à traiter et des conditions climatiques.

I.2 Séchage

I.2.1 Définition

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle ; Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants. Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplé [1].



Figure I. 1 séchage solaire naturel de certains légumes et fruits [1]

I.2.2 Historique

Le séchage est une technique très ancienne qui a été utilisée pour diverses fins, notamment pour la conservation de produits agricoles et alimentaires tels que les céréales, les graines, les fourrages, la viande et le poisson séchés, le jambon, les figes, les noix, le tabac, etc. Il est également utilisé pour préparer des matériaux tels que les briques en terre cuite, la céramique, la poterie, le bois, etc. Avant la cuisson, cette méthode est utilisée pour préparer des matériaux tels que les briques en terre cuite, la céramique, la poterie, le bois, etc. Elle est également appliquée aux textiles (par exemple, pour le lavage, la teinture, etc.) et aux peaux. Pour les applications traditionnelles, le séchage "naturel" à l'air ambiant est encore largement utilisé. Le séchage "artificiel" avec l'apport d'énergie est une technique complémentaire qui permet une meilleure régularité face aux conditions climatiques difficiles ou pour la production de nouveaux produits tels que le lait en poudre, le café "instantané", les pâtes sèches à longue durée de conservation, etc. [2].



Figure I. 2 Anciennes méthodes de séchage au soleil [2]

I.2.3 But de séchage

L'objectif du processus de séchage est de diminuer la teneur en eau des produits jusqu'à une valeur qui empêche la prolifération de micro-organismes, ce qui permet leur stockage dans des conditions normales.

Les avancées de la science et de la technologie ont conduit à la mise en place de diverses méthodes et types de séchoirs [3, 4]. Dans le cas de la production de thé, café, fruits, haricots, riz, épices, caoutchouc, cacao et bois, l'utilisation de séchoirs solaires à air est considérée comme la méthode idéale pour le séchage des cultures.

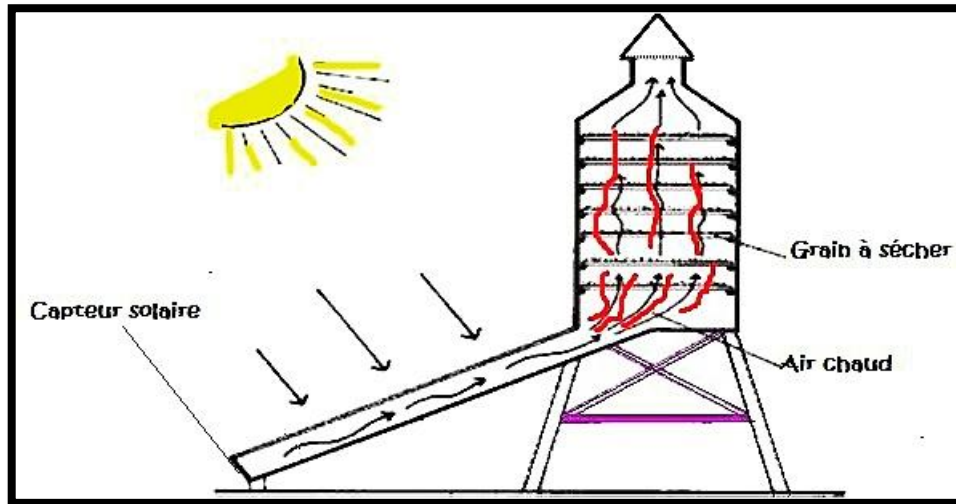


Figure I. 3 Séchage solaire [4]

I.2.4 Principe de séchage

Pour sécher le produit, il suffit de le ventiler avec de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité a lieu entre cet air et le produit humide. L'air chaud transfère une partie de sa chaleur au produit, et le produit génère à sa surface une pression d'eau supérieure à celle de l'air utilisé pour le séchage. Ce différentiel de pression provoque le transfert de matière de la surface solide vers l'air sec. Par conséquent, il existe deux facteurs importants pour contrôler le processus de séchage : 1. Le transfert de chaleur fournit la chaleur latente de vaporisation nécessaire 2. Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide l'extrait du produit. Le produit humide peut être représenté schématiquement. Un solide a un film d'eau qui adhère à sa surface extérieure par des forces de surface [5].

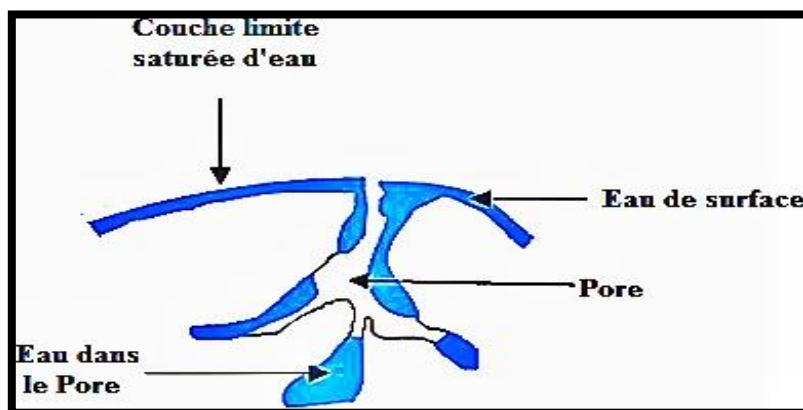


Figure I. 4 Présentation schématique d'un produit humide [5].

I.2.5 Différents types de séchoirs solaires

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects. Pour chacun de ces types de séchoir, l'écoulement de l'air asséchant peut se dérouler par convection forcée ou par convection naturelle. Dans le cas où l'écoulement d'air est par convection forcée, les séchoirs sont appelés séchoirs solaires actifs. Lorsque l'écoulement se fait par convection naturelle, ils sont appelés séchoirs solaires passifs [6].

I.2.5.1 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. (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 (Figure. I-1). [3] 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.

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).

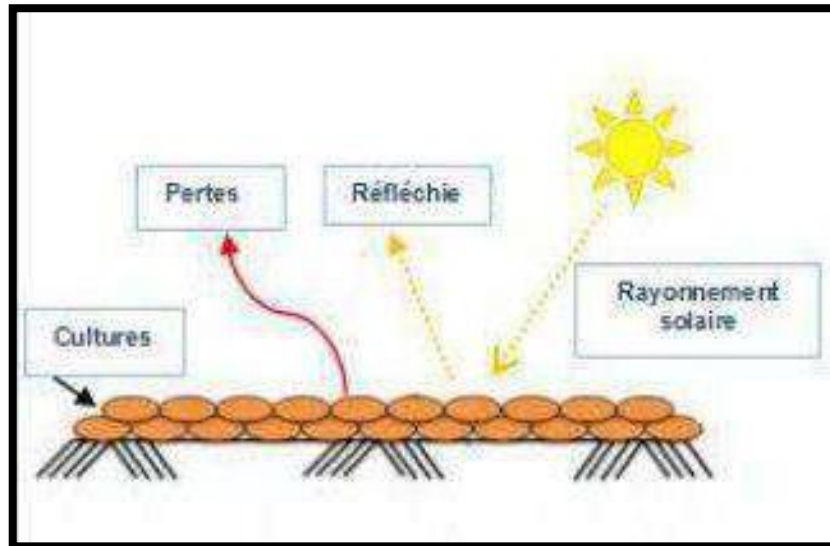


Figure I. 5 Principe de séchage à l'air libre [7].

I.2.5.2 Séchoirs directs

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. 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 rayonnements solaires incidents sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage [7].

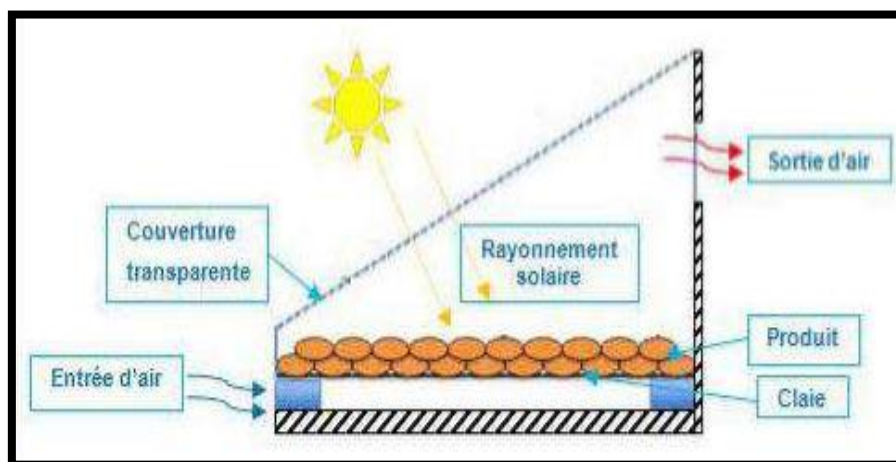


Figure I. 6 Le principe d'un échoir solaire direct. [7].

Tableau I. 1 Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct [7].

inconvénients	Avantages
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Température élevée en fin de séchage ➤ Oxydation des vitamines i et C par les rayons UV du soleil ➤ saunissement des légumes verts ➤ régulation de l'air, qui Faible ci limite la vitesse de séchage et augmente les risques de moisissure 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Meilleure protection contre les sières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel ➤ d'œuvre qualifiée-Pas besoin de main

I.2.5.2.1 Séchoirs solaires passifs

Ce type de séchoir est connu sous la dénomination de "boîte de séchage". La figure I-3 présente le principe de ce type de séchoir. Une fraction du flux solaire incident est réfléchié par la couverture transparente, le reste est transmis dans le séchoir. Une partie du flux solaire transmis à l'intérieur du séchoir est réfléchié par les produits à sécher, le reste est absorbé par ces produits et les matériaux dont sont composées les parois du séchoir. Il en résulte une augmentation de leur température, ce qui provoque une émission d'un flux de chaleur de grande longueur d'onde pour lequel la transmissibilité de la couverture est faible. C'est l'effet de serre. La couverture transparente sert également à réduire les pertes de chaleur par convection avec le milieu ambiant [8].

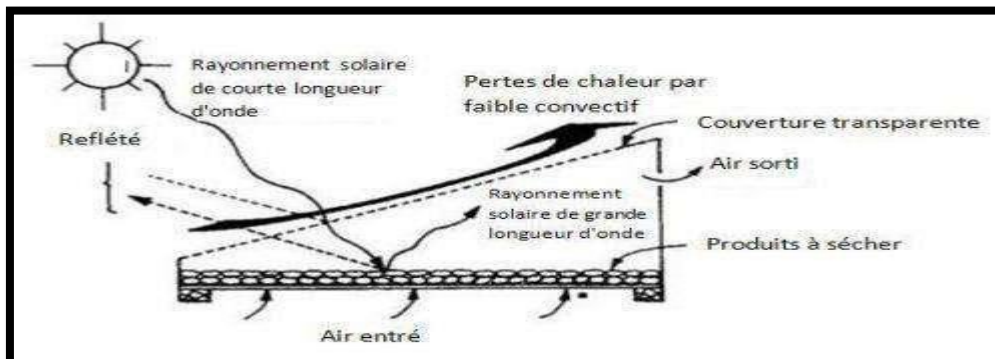


Figure I. 7 Principe du séchoir solaire fonctionnant en mode direct à convection [8]. Naturelle [9].

I.2.5.2.2 Séchoirs solaires actifs

Dans ce type de séchoir, l'air asséchant circule dans le séchoir sous l'action d'un ventilateur. Ainsi, le contrôle du débit d'air contribue à la réduction de la surchauffe du produit et à une diminution de la durée de séchage [8].

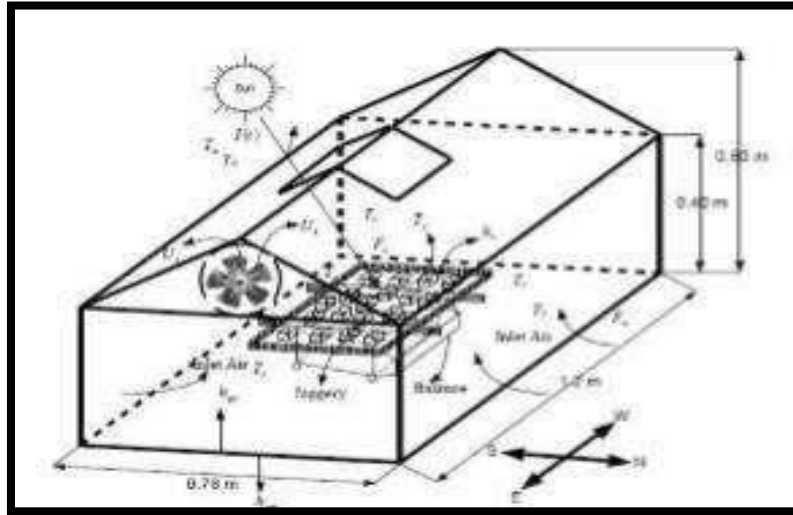


Figure I. 8 Exemple de séchoir solaire de mode direct à convection forcée [8].

I.2.2.3 Séchage solaire indirect

I.2.2.3.1 Définition

Séchage solaire indirect Le séchage solaire indirect ou le séchage solaire par convection est la nouvelle technique de séchage des produits. C'est une méthode très efficace que le type direct de séchage solaire. Dans cette méthode, l'air atmosphérique est chauffé dans un collecteur à plaque plate ou un capteur solaire de type concentré. Le processus de chauffage est soit passif, soit actif. Cet air chaud circule ensuite dans la cabine où sont stockés les produits. Par conséquent, l'humidité du produit peut être perdue par convection et diffusion. Cette méthode de séchage est utilisée pour éviter une exposition directe au rayonnement solaire. Cette méthode réduit principalement les inconvénients du séchage solaire direct [9].

I.2.2.3.2 Principe de fonctionnement

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

I.2.2.3.3 Paramètres influençant les performances d'un séchoir

Les paramètres influençant considérablement les performances d'un séchoir sont :

- Les caractéristiques de l'air sécheur (température de l'air sécheur, taux d'humidité et d'écoulement de l'air).
- Les variables dimensionnelles (épaisseur, longueur, hauteur ou diamètre du séchoir, configuration du séchoir).

I.2.2.3.4 Caractéristiques physiques du séchoir

Ca concerne le type, le poids, les dimensions et le matériau du séchoir. Même si le bois et le métal sont les matériaux souvent utilisés, le ciment et le mortier sont aussi utilisés

Le collecteur est souvent construit avec de l'aluminium, le fer ou l'acier galvanisé et peint avec de la peinture noir mat (non réfléchissante).

I.2.2.3.5 Avantages du séchoir indirect

Le séchoir solaire indirect présente les avantages suivants :

- 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.
- Son fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles

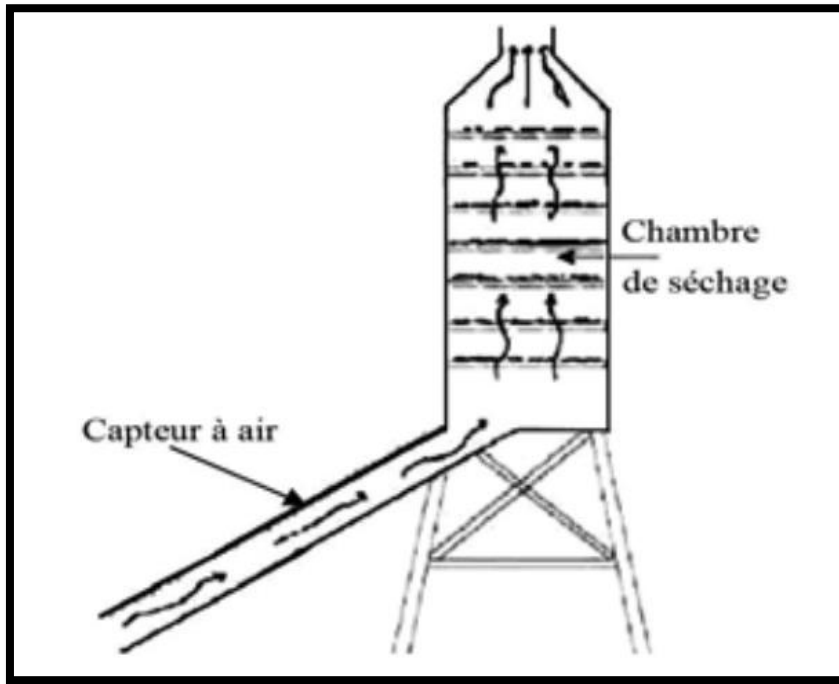


Figure I. 9 Schéma explicite d'un séchoir solaire indirect [9].

I-3 Généralités sur le soleil

1.3.1. Le gisement solaire :

Le gisement solaire représente sous forme de rayonnement. L'énergie solaire est le Moteur de toutes les grandes sources d'énergie naturel. Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en le soleil et l'énergie solaire [9].

1.3.2. Définition 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 [10].

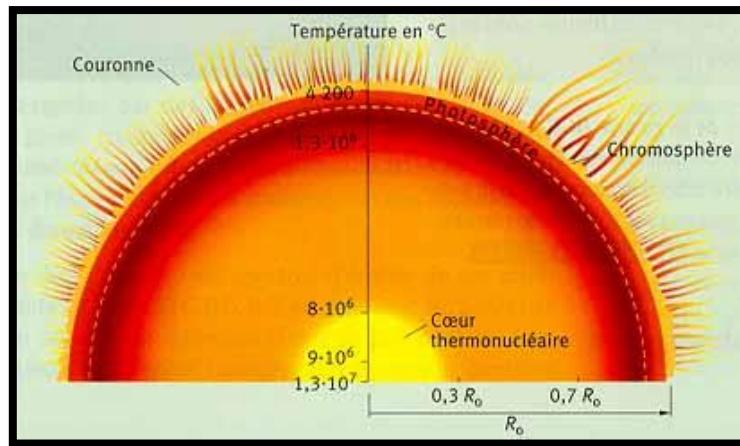


Figure I.10 : Une description interne du soleil [10].

1.3.3. Caractéristiques du soleil :

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [10].

Tableau I. 2 Caractéristiques principales du soleil [10].

Caractéristiques	Valeurs
Diamètre (km)	$13,92 \cdot 10^5$
Masse (kg)	$2 \cdot 10^{30}$
Surface (km ²)	$6,09 \cdot 10^{12}$
Volume (km ³)	$1,41 \cdot 10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Température au centre (MK)	16
Température à la surface (K)	5900

1.3.4 Système terre-soleil

1.3.4.1 Mouvements de la terre autour du soleil

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. 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 équinoxe de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes, le jour et la nuit sont égaux. 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 $23^{\circ}27'$ [11].

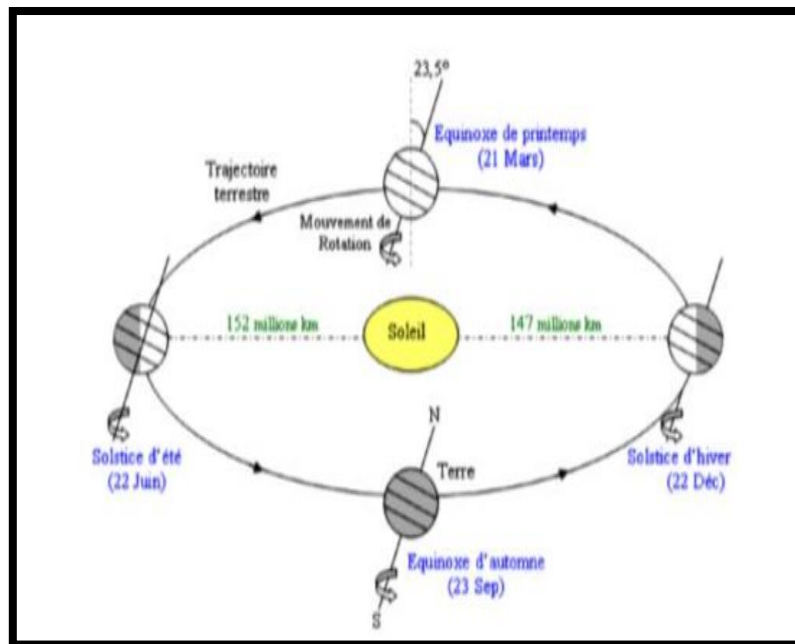


Figure I.11: Mouvement de la terre autour du soleil [11].

1.3.4.2 Mouvement apparent du soleil

Le mouvement qui paraît faire le Soleil en une journée vu par un observateur situé sur Terre est appelé "Le mouvement apparent du Soleil". En dehors des régions polaires, de l'Équateur et des tropiques :

- Le matin ; le Soleil est à l'Est, bas sur l'horizon, c'est le « lever du Soleil »

- À midi ; le Soleil est positionné au Sud ou au Nord, et il est au plus haut de son trajet apparent ;
- Le soir ; le Soleil apparaît à l'Ouest, bas sur l'horizon, c'est le « coucher du Soleil »

Le mouvement apparent du Soleil observé par un homme fixe en un point de latitude L au Nord de l'Équateur est schématisé.

L'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu à midi solaire est égal à $(L-d)$. La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure ¹ à 12 entre le 21 mars et le 21 septembre [11].

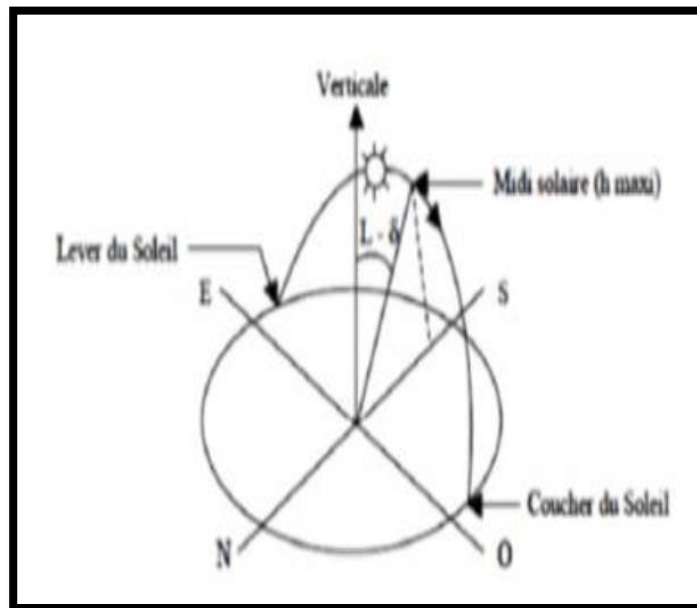


Figure I.12 : Mouvement apparent du soleil [11].

1.4. Le rayonnement solaire :

La connaissance du rayonnement solaire dans tous ses aspects est nécessaire dans toute application de l'énergie solaire. Ce rayonnement est perturbé à la traversée de l'atmosphère (absorption, réflexion, réfraction), chose qu'on doit prendre en considération, ainsi que la répartition spectrale en fonction de la longueur d'onde car les récepteurs d'énergie sont généralement sélectifs et fonctionnent dans

une bande de fréquence appropriée. Pour cela on a vu utile de définir ci-dessous quelques notions essentielles pour le rayonnement solaire [11].

1.4.1. Spectre solaire :

Le rayonnement solaire est constitué par un flux de particule appelé photons émise par le soleil et se déplaçant à la vitesse de $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Ces photons composants le rayonnement électromagnétique sont porteur d'une énergie d'après la loi de Louis de Broglie $E = hv = \frac{c}{\lambda}$ ou h est la constante de Planck, v est la fréquence, c 'est la vitesse de la lumière, λ longueur d'onde.

Le spectre du rayonnement solaire c'est sa décomposition en longueur d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est composée de toute sorte de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde qui s'étend en hors atmosphère pratiquement de $0.1\mu\text{m}$ à $0.4\mu\text{m}$, répartie comme suit [11].

Zone spectrale de $0.1 \mu\text{m}$ à $0.38 \mu\text{m}$ rayonnement ultra-violet

" De $0.38 \mu\text{m}$ à $0.78 \mu\text{m}$ " visible

" De $0.78 \mu\text{m}$ a $0.4 \mu\text{m}$ " infra-rouge.

1.4.2 Constante solaire :

La constante solaire représente le flux du rayonnement solaire reçu par une surface unitaire disposée perpendiculairement aux rayons solaires. Supposons que toute l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre (absence de l'atmosphère) on aura alors:

1.4.3 Composant du rayonnement solaire et constant solaire

1.4.3.1 Les composantes du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la partie réfléchié par le sol du rayonnement solaire global comme représentés.

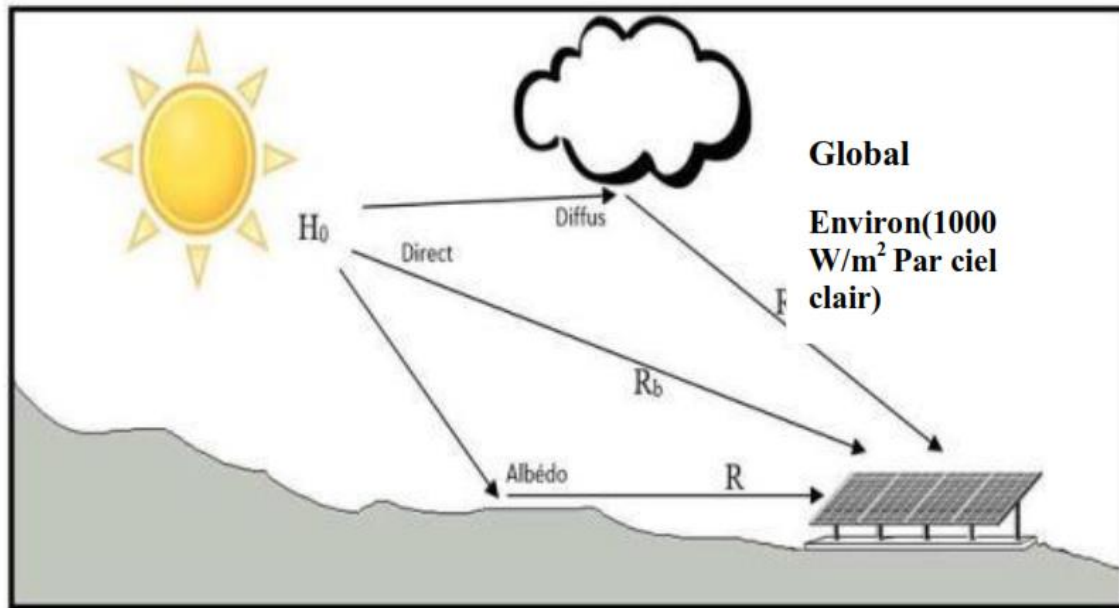


Figure I.13 : Rayonnement direct, diffus, global et albédo [12].

- **Rayonnement direct (D)**

Le rayonnement direct est une partie du rayonnement reçue directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux, cette composante directe du rayonnement peut être collectée par des systèmes optiques à concentration [12].

- **Rayonnement diffus (S)**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil et qui rencontre les obstacles tels que les nuages et la poussière, dans l'atmosphère. Ces obstacles ont pour effet de rediriger les rayons du soleil parallèles en une multitude de faisceaux dans toutes les directions [12].

- **Rayonnement réfléchi (Albédo)**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (sable, neige ...) il se caractérise par un coefficient propre de la nature du sol albédo, ainsi le rayonnement qui arrive au sol possède au moins deux composantes : une composante diffuse et la composante directe [12].

- **Le rayonnement global (G)**

C'est le résultat de la superposition des trois compositions directes, diffuse et réfléchi. Et qui est le rayonnement pris en compte pour la détermination du rendement des cellules solaires [8].

$$G=S+D \quad (I.1)$$

Avec : G : rayonnement global S : Rayonnement diffus D : rayonnement direct

1-4-4- Constante solaire

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [11].

La variation de la constante solaire suit la relation suivante [12]:

$$C=I_0 [1+ 0,033.\cos (0,984j)] \quad (I.2)$$

C : la constante solaire.

$I_0= 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue n : le numéro du jour de l'année.

I.5 Conclusion

Ainsi, ce premier chapitre a permis d'introduire les concepts fondamentaux relatifs aux séchoirs solaires, en mettant en évidence leur importance dans les systèmes de séchage écologiques et économes en énergie. Nous avons également exploré les caractéristiques du gisement solaire et les paramètres influençant le rayonnement solaire, qui constituent des facteurs clés pour la conception et l'efficacité des dispositifs de séchage utilisant l'énergie solaire.

Cette base théorique est essentielle pour aborder, dans les chapitres suivants, la modélisation, la conception et l'optimisation de séchoirs solaires performants, adaptés aux conditions climatiques locales et répondant aux exigences technico-économiques des applications visées.

Chapitre II

*Les systèmes des suiveurs
solaires*

II.1 Introduction

Les suiveurs solaires sont des dispositifs utilisés dans le domaine de l'énergie solaire afin d'optimiser l'exposition des panneaux photovoltaïques à la lumière du soleil. L'idée principale de ces systèmes est de suivre le mouvement du soleil tout au long de la journée, maximisant ainsi la capture d'énergie solaire. Cette technologie permet d'augmenter l'efficacité des installations solaires, notamment dans les régions où l'ensoleillement est variable.

Les suiveurs solaires sont divisés en plusieurs catégories selon leur principe de fonctionnement et leur capacité à s'ajuster au mouvement du soleil. Cette section présente une vue d'ensemble des différents types de suiveurs solaires, les principes qui les régissent ainsi que les avantages et les inconvénients associés à leur utilisation.

II.2 Les suiveurs solaires

Les premières utilisations des systèmes de suivi solaire remontent au milieu du XVIII^e siècle, reposant sur le principe de l'héliostat, un dispositif permettant la rotation d'un miroir pour suivre la trajectoire du soleil à l'aide d'un mécanisme d'horlogerie. La plus ancienne mention documentée de ce système figure dans les publications du physicien néerlandais Willem Jacobs Gravesande en 1742. Aujourd'hui, le principe de suivi solaire est largement exploité dans les centrales solaires thermiques à concentration, notamment dans les champs d'héliostats, où un ensemble de miroirs plans oriente les rayons du soleil vers un point focal tout au long de la journée. Un exemple emblématique est la centrale solaire Thémis en France, mise en service en 1983 [13].

Parallèlement, dans le domaine du photovoltaïque, les trackers solaires ont été développés comme des dispositifs mobiles capables de maintenir l'orientation optimale des modules photovoltaïques face au soleil. Cette technologie permet de compenser les variations continues de la puissance et de la direction des rayons solaires dues à la rotation terrestre et aux conditions atmosphériques. Contrairement aux systèmes fixes, les trackers assurent un angle d'incidence constant, ce qui permet de stabiliser l'intensité lumineuse reçue et, par conséquent, d'augmenter significativement la production d'énergie. En effet, ils permettent d'exploiter plus efficacement les heures d'ensoleillement et de tirer parti de la lumière diffuse,

entraînant un gain énergétique estimé entre 25 % et 50 %, ainsi qu'un meilleur rendement économique et un amortissement plus rapide des coûts d'investissement [14].

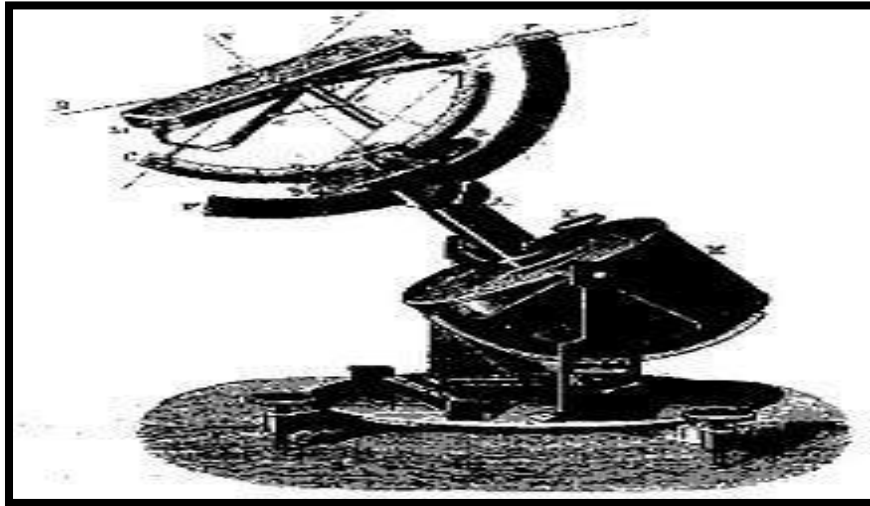


Figure II. 1 modèle d'un héliostat dans ses premières applications. [14].



Figure II. 2 Champ d'héliostat -centrale solaire Thémis France [14].

II.3 Principes fondamentaux des suiveurs solaires

Un suiveur solaire est un dispositif utilisé pour orienter les panneaux photovoltaïques de manière à ce qu'ils restent perpendiculaires aux rayons du soleil tout au long de la journée. Cette orientation dynamique permet d'optimiser la captation de l'énergie solaire, en particulier durant les périodes où l'exposition est généralement faible, comme le matin et en fin d'après-midi, lorsque les panneaux fixes sont moins bien orientés [15].

Bien que le coût initial d'un système de suivi solaire varie selon le type et la taille du dispositif utilisé, un système bien conçu peut permettre de réduire le nombre de panneaux nécessaires pour atteindre un certain niveau de production. Cela se traduit, à long terme, par une réduction des coûts globaux d'installation [14].

En résumé, le suiveur solaire améliore les performances des systèmes photovoltaïques en adaptant, en temps réel, l'orientation des panneaux à la position du soleil. Cette approche permet d'augmenter l'efficacité énergétique sans qu'il soit nécessaire d'agrandir la taille de l'installation [13].

II.4 Les types des suiveurs solaires

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires: les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe [16].

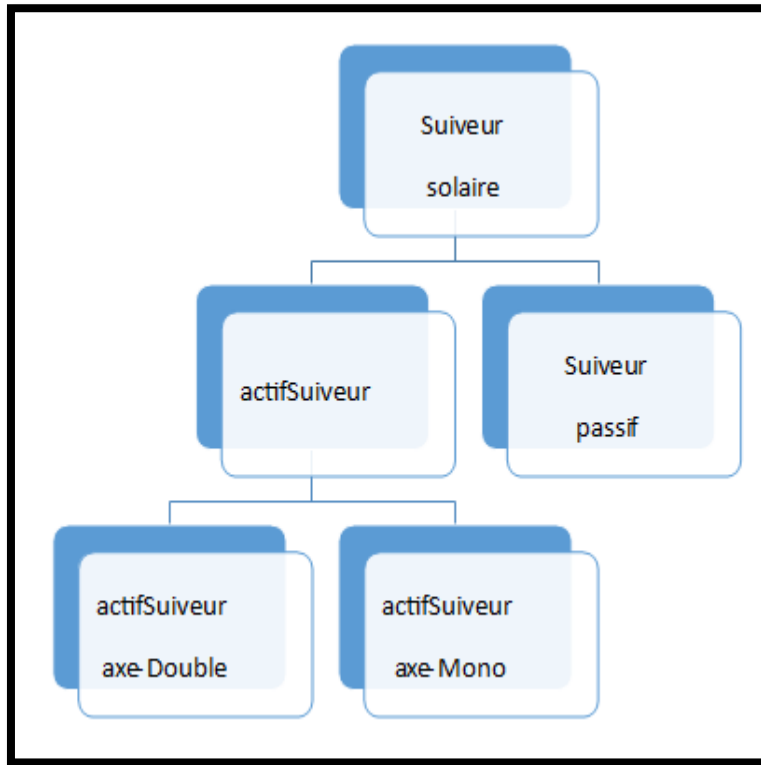


Figure II. 3 Types de suiveurs solaires [16].

II.4 .1 Suiveurs solaire passif :

En effet, lorsque l'intensité du rayonnement solaire augmente sur l'un des côtés du panneau, la température de cette zone s'élève, provoquant la vaporisation d'un fluide contenu dans un tube en cuivre. Le gaz ainsi formé occupe un volume plus important, déplaçant la phase liquide vers la zone moins exposée. Ce transfert de masse induit un déséquilibre mécanique qui entraîne la rotation du capteur en direction de la source lumineuse. Ce mécanisme, caractéristique des suiveurs solaires passifs, permet le repositionnement du panneau sans consommation d'énergie externe [17].

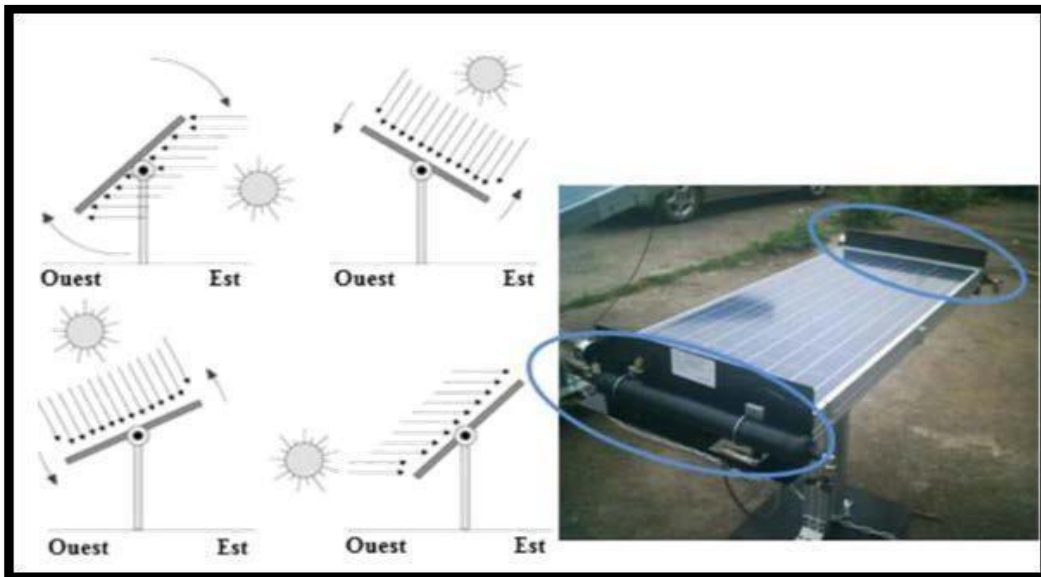


Figure II. 4 Suiveur solaire passif. [17].

II.4.2 Suiveur solaire actif :

Les suiveurs solaires actifs reposent sur un système de détection de la lumière permettant un ajustement dynamique de leur orientation afin de maximiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur la surface des capteurs. On distingue principalement deux types dans cette catégorie : les suiveurs mono-axe et les suiveurs bi-axes. Ces derniers se distinguent par une meilleure précision de suivi par rapport aux systèmes passifs et ont l'avantage de fonctionner de manière autonome, sans nécessiter d'ajustements manuels [21].

II.4.3 Suiveur solaire mono-axe

Le suiveur solaire à un axe, comme son nom l'indique, effectue un mouvement de rotation autour d'un seul axe, généralement orienté selon l'azimut, c'est-à-dire d'Est en Ouest au cours de la journée. L'inclinaison du panneau reste fixe et est déterminée en fonction de la latitude du site d'installation, de manière à maximiser la captation du rayonnement solaire tout au long de l'année. Ainsi, seul l'azimut varie au fil de la journée tandis que l'angle d'inclinaison demeure constant. Ce type de système de suivi est le plus répandu en raison de sa simplicité de conception et de sa large efficacité

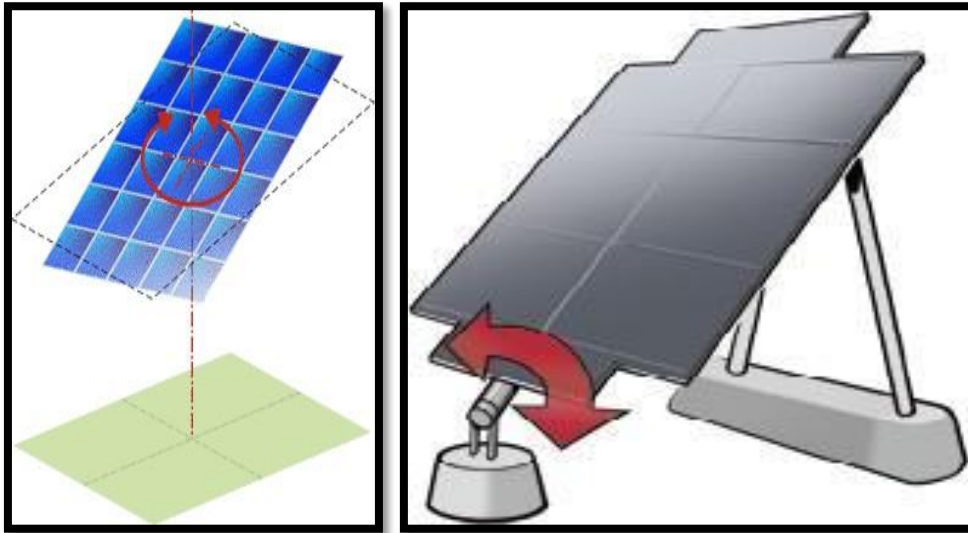


Figure II. 5 Panneaux solaires avec système de poursuite mono-axiale [21].

II.4.4 Suiveur solaire double axe :

Les suiveurs solaires à deux axes permettent une rotation autour de deux axes perpendiculaires, généralement désignés comme l'axe principal et l'axe secondaire. Ce système de suivi ajuste l'orientation du panneau solaire à la fois verticalement et horizontalement, afin de suivre précisément la trajectoire du soleil tout au long de la journée [22].

Grâce à cette double mobilité, ces dispositifs assurent une exposition optimale aux rayons solaires, ce qui peut augmenter la production d'énergie jusqu'à 40 % par rapport aux systèmes fixes. On distingue principalement deux configurations : les suiveurs à basculement selon l'altitude, et ceux à orientation altitude-azimut [22].

Ce type de suivi est souvent utilisé dans les installations solaires à concentration, où il permet de diriger les rayons lumineux vers un récepteur fixe avec une grande précision. Le système repose sur des pivots verticaux et horizontaux, généralement contrôlés par des dispositifs automatisés, similaires à ceux utilisés dans les télescopes solaires [22].

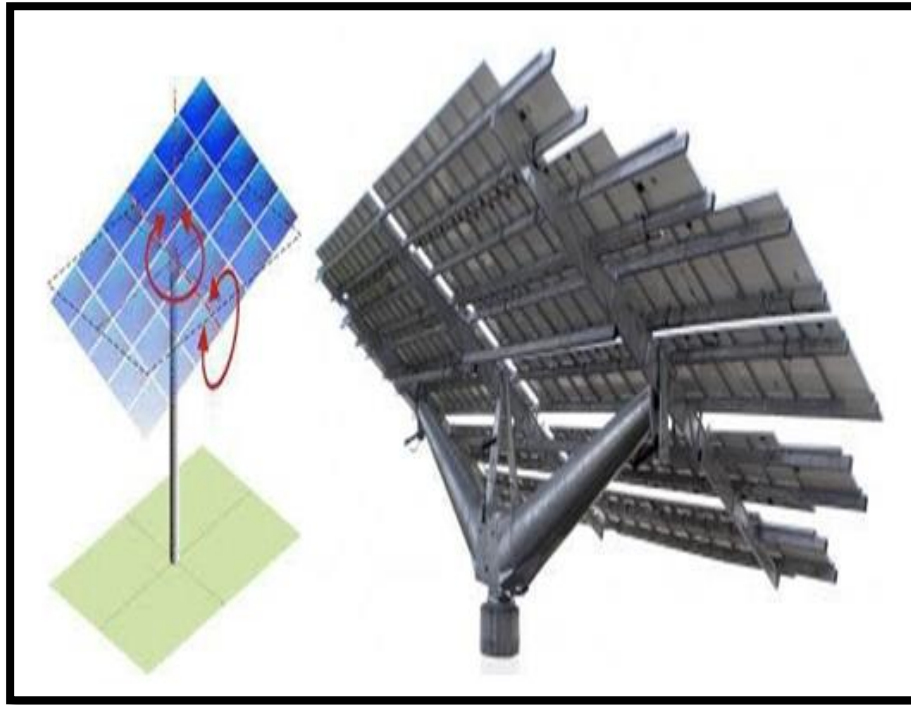


Figure II. 6 Suiveur à deux axes ADES : modèle 5F-27M [22].

II.5 Les Avantages et Les inconvénients des suiveurs solaires

II.5.1 Les avantages du système de suivi solaire à axe double :

- Suivi optimal du soleil : Les trackers à double axe permettent un suivi du soleil dans deux directions (verticale et horizontale), maximisant ainsi l'exposition solaire tout au long de la journée.
- Augmentation significative de la production d'énergie : Ces systèmes peuvent générer jusqu'à 45 à 50 % d'énergie en plus chaque année par rapport aux panneaux fixes.
- Adaptation aux terrains complexes : Ce système est particulièrement adapté aux zones présentant un relief accidenté, des terrains irréguliers ou des obstacles naturels, offrant ainsi une plus grande flexibilité d'installation.
- Efficacité par temps nuageux : Contrairement aux trackers à axe unique, les trackers à double axe continuent à fonctionner efficacement même par temps couvert, grâce à leur capacité à suivre le soleil avec plus de précision.
- Optimisation de l'espace : Ces systèmes nécessitent moins d'espace pour l'installation et permettent d'utiliser les zones restantes à d'autres fins, telles que le stationnement ou le jardinage.

- Retour sur investissement plus rapide : Bien qu'ils soient plus coûteux à l'achat, les trackers à double axe offrent un retour sur investissement plus rapide grâce à leur capacité accrue de production énergétique.

II.5.2 Les inconvénients du système de suivi solaire à axe double :

- Complexité technique accrue : La technologie de suivi à double axe est plus complexe et nécessite des composants sophistiqués, ce qui peut entraîner des pannes techniques plus fréquentes ou plus difficiles à résoudre.
- Durée de vie réduite : En raison de la complexité des mécanismes et des mouvements continus des axes, les trackers à double axe ont généralement une durée de vie plus courte que ceux à axe unique.
- Coût élevé : L'installation d'un système à double axe représente un investissement initial plus important, ce qui peut constituer un obstacle pour certaines entreprises ou projets à budget limité.
- Maintenance fréquente : En raison de la complexité de ces systèmes, la maintenance est plus régulière et plus coûteuse, ce qui peut augmenter les charges à long terme.

II.6 Conclusion

En résumé, les systèmes de poursuite solaire représentent une avancée significative dans l'optimisation de la production d'énergie photovoltaïque. En permettant aux panneaux de suivre la trajectoire du soleil, ces systèmes peuvent augmenter le rendement énergétique jusqu'à 40 % par rapport aux installations fixes.

Les suiveurs à un axe offrent un bon compromis entre efficacité et coût, tandis que les suiveurs à deux axes maximisent la captation de l'énergie solaire, en particulier dans les zones où l'ensoleillement varie fortement.

Cependant, ces technologies présentent également certains inconvénients, notamment des coûts d'installation plus élevés et des besoins accrus en maintenance. Ainsi, le choix du type de suiveur dépend des contraintes spécifiques du projet, telles que le budget, la localisation géographique et les objectifs de production.

Cette analyse met en lumière l'importance de prendre en compte à la fois les avantages et les limitations de chaque système, afin d'assurer une intégration optimale dans les projets d'énergie renouvelable.

Dans le chapitre suivant, nous explorerons la conception et la réalisation pratique d'un suiveur solaire à deux axes.

Chapitre III

Etude Expérimentale

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous réalisons une étude expérimentale menée dans des conditions réelles sur le terrain, dans l'espace expérimental du département de mécanique de la Faculté de Technologie de l'Université de Ouargla, en Algérie. Lors de cette expérience, nous avons fabriqué un suiveur solaire à un axe afin de l'intégrer à un séchage solaire déjà existant. L'installation et la fabrication ont été réalisées en utilisant les outils et les ressources disponibles localement.

III.2 réalisation d'un système de suivi solaire pour un séchoir solaire

III.2.1 Introduction

Dans cette section introductive du troisième chapitre, l'objectif principal du projet appliqué est présenté : la conception et la réalisation d'un système de suivi solaire automatique destiné à un séchoir solaire. Cette partie met en évidence l'importance de ce type de système dans l'amélioration de l'efficacité du séchage à l'aide de l'énergie solaire, et offre un aperçu général des étapes abordées dans le chapitre, depuis le principe de fonctionnement jusqu'au montage et aux tests.

III.2.2 Principe de fonctionnement du système de suivi solaire

Le principe de fonctionnement du système de suivi solaire repose sur l'orientation automatique des panneaux solaires en direction du trajet du soleil tout au long de la journée, dans le but de maximiser l'exploitation du rayonnement solaire et d'augmenter le rendement du système. Cette orientation est assurée par un petit moteur électrique, couplé à un mécanisme de transmission mécanique permettant la rotation de la structure de support des panneaux autour de son axe.

Le moteur est fixé sur une base métallique (le support) assurant stabilité et solidité durant le fonctionnement. Une fois le système activé, le moteur fait pivoter les panneaux progressivement d'est en ouest selon la position du soleil, soit à l'aide d'un programme horaire prédéfini, soit sur la base de signaux électroniques émis par une unité de commande.

Ce type de système ne nécessite aucune intervention manuelle pendant le fonctionnement quotidien. Il repose sur l'automatisation du moteur pour ajuster en continu l'angle optimal d'inclinaison des panneaux. Ainsi, il permet un temps

d'exposition au soleil plus long par rapport aux systèmes fixes, ce qui améliore la productivité du séchoir solaire ou de tout autre système exploitant l'énergie solaire.

Bien que plus simple à installer que les systèmes de suivi avancés, ce dispositif constitue une solution pratique et économique, particulièrement adaptée aux applications rurales ou aux petits projets qui bénéficient d'un mécanisme de suivi solaire simple mais efficace.

III.2.3 Composants utilisés dans le système de suivi solaire automatique

Le système de suivi solaire automatique est composé de plusieurs éléments principaux, fonctionnant de manière intégrée afin de garantir une orientation précise des panneaux solaires vers le soleil pendant toute la durée du jour, ce qui améliore le rendement énergétique global. Voici une description détaillée des composants essentiels :

III.2.3.1. Le support métallique

Le support métallique constitue l'ossature principale du système de suivi. Il assure le support mécanique des panneaux solaires, du moteur et du système de transmission.

- **Matériaux et conception** : Généralement fabriqué en acier inoxydable ou en fer galvanisé, reconnu pour sa résistance aux conditions climatiques (rouille, humidité).
- **Fonction** : Il garantit la stabilité de l'ensemble du système, surtout pendant le mouvement de suivi et face aux contraintes du vent ou des vibrations.
- **Caractéristiques requises** : Le support doit être suffisamment robuste pour supporter le poids des panneaux et du moteur, tout en assurant une rigidité suffisante pour un mouvement précis sans déviation.



Figure III. 1 support métallique.

III.2.3.2. Le moteur électrique

Le moteur électrique est le cœur du système, utilisé pour entraîner le mouvement des panneaux autour de l'axe de suivi en réponse aux commandes de l'unité de contrôle.

- **Type de moteur** : Souvent, on utilise un moteur à courant continu (DC) ou un moteur pas-à-pas (Stepper Motor), en raison de leur précision et de leur facilité d'intégration.
- **Fonction** : Il transforme l'énergie électrique en mouvement mécanique, permettant une rotation progressive des panneaux d'est en ouest.
- **Critères de choix** : Le moteur doit posséder une puissance suffisante tout en consommant peu d'énergie, avec un couple adéquat pour surmonter la résistance due au vent et aux frottements

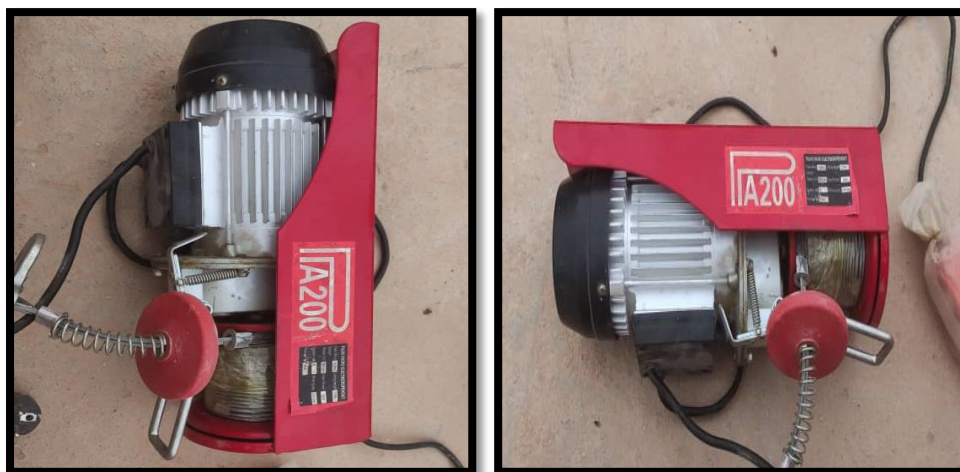


Figure III. 2 Vue du moteur utilisé dans le système.

III.2.3.3. Le système de transmission (chaîne et engrenages)

Ce système agit comme un intermédiaire mécanique, transmettant le mouvement du moteur à la structure supportant les panneaux.

- **Constitution** : Il comprend des engrenages interconnectés et une chaîne métallique.
 - Réduire la vitesse du moteur pour permettre un déplacement lent et régulier des panneaux.
 - Réduire la charge directe sur le moteur, prolongeant ainsi sa durée de vie.
 - Assurer une stabilité et empêcher les glissements des panneaux pendant le mouvement.
- **Avantages** : Entretien facile, remplacement simple, fonctionnement fiable dans diverses conditions.



Figure III. 3 Le système de transmission (chaîne et engrenages).

III.2.3.4. Les unités de fixation et de liaison

Éléments complémentaires essentiels assurant la cohésion et la stabilité structurelle du système.

- **Types** : Boulons, écrous, rondelles, bras métalliques de fixation.

- **Rôle** : Réduire les vibrations indésirables, garantir un assemblage durable et sécurisé.
- **Exigences** : Fabriqués en acier galvanisé ou en inox pour résister à la corrosion et aux contraintes extérieures.



Figure III. 4 L'image illustre les boulons et les rondelles utilisés dans le système.

III.2.4 Étapes de montage du suiveur solaire

L'assemblage du système se fait selon plusieurs étapes successives, assurant un montage correct de l'ensemble des composants et un fonctionnement optimal :

III.2.4.1 Soudage du support métallique (base)

- Découpe et préparation des éléments métalliques selon les dimensions du plan de conception.
- Soudure manuelle ou automatique pour former une structure stable et résistante aux charges mécaniques et climatiques.
- Vérification de la qualité des soudures et de l'absence de déformations.



Figure III. 5 Soudage du support métallique

III.2.4.2 Installation de la chaîne et des deux engrenages

- Fixation des deux engrenages aux points désignés sur l'axe métallique et l'axe du moteur.
- Montage de la chaîne métallique entre les deux engrenages pour assurer la transmission du mouvement.
- Tension correcte de la chaîne pour éviter les glissements.
- Vérification de l'alignement et absence d'obstacles mécaniques.



Figure III. 6 Installation de la chaîne et des engrenages avec le moteur.

III.2.4.3 Fixation du moteur

- Montage du moteur sur une base dédiée ou directement sur la structure métallique, assurant sa stabilité.
- Liaison de l'axe moteur à l'un des engrenages, avec dispositifs anti-vibrations si possible.
- Connexion du moteur aux câbles de contrôle et à l'unité de commande.

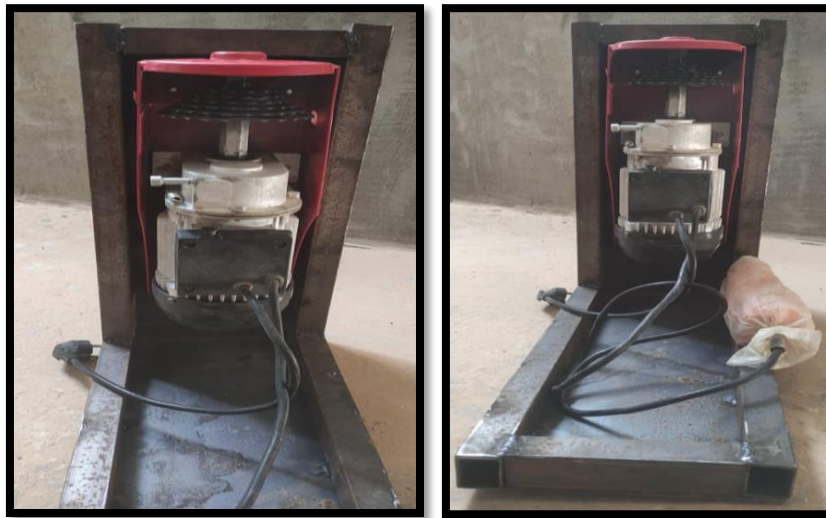


Figure III.7 Fixation du moteur à la base

III.2.4.4 Vérification finale et intégration fonctionnelle

- Inspection générale de tous les composants mécaniques et électriques.
- Test des soudures, de la fixation du moteur, de la tension de la chaîne, et de la rotation de l'axe.
- Simulation manuelle du mouvement pour détecter toute anomalie (frottements, blocages).
- Réglages nécessaires pour garantir un fonctionnement fluide.

III.2.4.5 Test de fonctionnement du système

- Activation de l'unité électronique de commande.
- Test complet du déplacement des panneaux d'est en ouest.

- Observation de la réponse du moteur et du système mécanique.
- Enregistrement des données : vitesse de déplacement, précision du suivi, stabilité du système.
- Ajustements logiciels ou mécaniques éventuels pour une performance optimale.



Figure III. 7 Test du mouvement du système.

III.3.Conclusion

La mise en place d'un système de suivi solaire pour un séchoir solaire représente une avancée significative dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des installations agricoles. Grâce à ce dispositif, l'orientation des panneaux solaires est optimisée en fonction du mouvement du soleil, garantissant ainsi une captation maximale de l'énergie. En dépit des défis liés à la construction et à l'intégration de ces systèmes, l'usage d'un suivi solaire automatique permet de réduire les pertes d'énergie et de garantir une meilleure performance des séchoirs solaires. La réalisation d'un tel système demande une attention particulière aux choix des composants et au respect des étapes de montage pour assurer la fiabilité et la longévité du dispositif.

Chapitre IV
Résultats et Discussion

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats, les courbes et les discussions auxquelles nous sommes parvenus à travers les expériences que nous avons réalisées.

IV.2 Résultats et Discussion

IV.2.1 Lieu et période des expériences

Dans le cadre de la validation pratique de l'efficacité du système de suivi solaire automatique conçu pour améliorer la performance du séchoir solaire, une série d'expériences de terrain a été réalisée en République Algérienne Démocratique et Populaire, plus précisément dans la wilaya d'El Oued, l'une des régions du sud caractérisées par des conditions climatiques idéales pour ce type d'application énergétique, grâce à un ensoleillement élevé tout au long de l'année.

L'expérience a été menée à l'Université Martyr Hamma Lakhdar - El Oued, un établissement universitaire disposant des moyens techniques et logistiques nécessaires pour réaliser ce type de projet de recherche, ainsi que d'espaces extérieurs ouverts permettant une exposition complète et directe aux rayons solaires, sans obstacle naturel ou artificiel.

Le système expérimental a été installé dans une cour extérieure du campus universitaire, où le support métallique et le suiveur solaire ont été fixés, puis reliés au séchoir, sous la supervision directe de l'équipe du projet. Les expériences ont eu lieu au mois de mai 2024, période de transition entre le printemps et l'été, connue à El Oued pour son ciel clair, la rareté des nuages et des températures diurnes modérées à élevées, offrant ainsi des conditions climatiques favorables à l'évaluation d'un système à énergie solaire.

L'expérience s'est déroulée sur 600 minutes (environ 10 heures) lors d'une journée ensoleillée, afin d'assurer un ensoleillement suffisant pour évaluer les différents systèmes de séchage. La plage horaire d'observation s'étendait de 08h00 à 17h00, correspondant aux pics d'ensoleillement journalier.

Le choix d'El Oued comme site d'expérimentation est un facteur déterminant de la réussite de l'étude, la région enregistrant les niveaux d'ensoleillement les plus

élevés en Algérie, ce qui en fait un environnement idéal pour simuler des conditions réelles d'utilisation du système dans les secteurs agricoles ou domestiques, notamment dans les zones arides.




IV.2.1 Préparation de l'expérience

Cette expérience a été conçue pour évaluer la performance d'un système de suivi solaire automatique destiné à améliorer l'efficacité du séchage en orientant le séchoir vers le soleil durant toute la période d'expérimentation. L'expérience s'est déroulée à El Oued - Algérie, au sein des laboratoires de la Faculté de Technologie de l'Université Hamma Lakhdar.

Le concombre a été choisi comme produit principal à sécher en raison de sa forte teneur en eau et de son besoin en chaleur modérée à élever pour un séchage efficace. Les échantillons ont été préparés en tranchant les concombres en rondelles de 5 mm d'épaisseur, avec des fruits de taille homogène pour assurer un séchage uniforme. Chaque échantillon a été pesé avec une balance électronique de précision.

Des images ont été prises pour chaque phase de séchage des produits testés (concombre) :

Tableau IV. 1 Les étapes du séchage du concombre

N°	Etapas	Images
1	Séchage du concombre à l'ombre	 <p data-bbox="836 741 1353 808"><i>Figure IV. 8 Séchage du concombre à l'ombre</i></p>
2	Séchage du concombre au soleil.	 <p data-bbox="836 1234 1353 1301"><i>Figure IV. 9 Séchage du concombre au soleil.</i></p>
3	Séchage du concombre dans le séchoir solaire.	 <p data-bbox="826 1877 1385 1944"><i>Figure IV. 10 L'image montre le séchage du concombre dans le séchoir solaire.</i></p>

IV.2.3 Instruments de mesure et leur rôle dans l'évaluation du séchoir solaire avec suivi automatique

Les outils de mesure précis sont essentiels pour la réussite de l'expérimentation. Plusieurs appareils scientifiques ont été utilisés pour suivre les conditions climatiques et analyser l'efficacité du séchage des deux produits : le concombre (riche en eau) et la tisane (feuilles aromatiques fines).

IV.2.3.1 Thermomètre digital

Un thermomètre précis a été placé à l'intérieur du séchoir pour suivre les variations thermiques réelles pendant les 600 minutes de test. Les données ont montré que le séchoir avec suivi solaire atteint une température plus élevée et stable, favorisant une meilleure évaporation de l'humidité.



Figure IV. 11 Thermomètre digital

IV.2.3.2 Pyranomètre

Cet appareil a mesuré l'intensité du rayonnement solaire atteignant le séchoir. Le pic d'irradiation enregistré était d'environ 870 W/m² à midi. Le suiveur solaire a permis d'optimiser l'orientation du capteur thermique et d'améliorer l'efficacité du séchage.

IV.2.3.3 Balance électronique

Une balance de précision a été utilisée pour suivre la perte de poids des échantillons. Le concombre a perdu plus de 85 % de son poids initial dans le séchoir à

suivi, tandis que la tisane a conservé sa couleur et son arôme grâce à une chaleur bien répartie.



Figure IV. 12 Les images montrent la balance utilisée lors de l'expérience

IV.2.4 Résultats

IV.2.4 .1. Analyse des conditions climatiques durant le processus de séchage

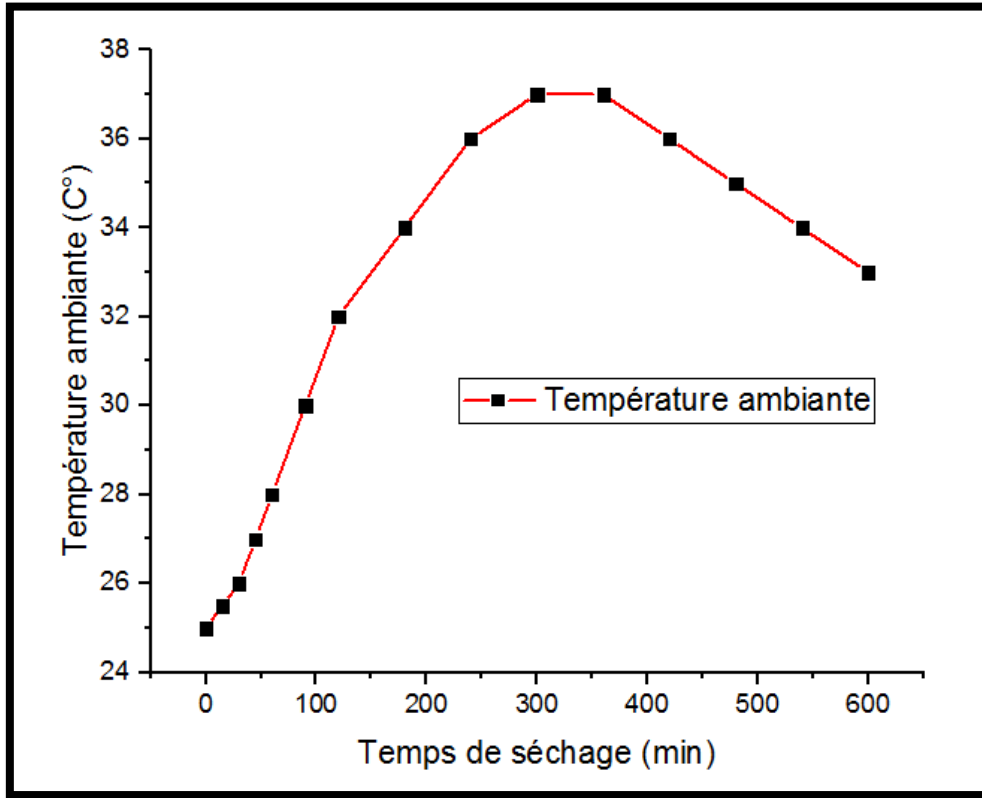


Figure III. 13 Température ambiante en fonction du temps

Cette courbe dans fig1 représente l'évolution de la température ambiante (en °C) durant une période de séchage de 600 minutes. La température initiale était d'environ 25 °C, puis elle a progressivement augmenté pour atteindre un maximum avoisinant les 37 °C entre les minutes 300 et 350. Cette tendance reflète le profil thermique typique d'une journée, caractérisé par une montée progressive de la température depuis le matin jusqu'au point culminant en milieu de journée ou en début d'après-midi, suivie d'une décroissance graduelle en fin de journée. Ce comportement traduit la dynamique naturelle de réchauffement et de refroidissement de l'atmosphère, sous l'effet du rayonnement solaire et des échanges thermiques avec l'environnement. Il s'agit d'un paramètre crucial pour l'analyse des performances des systèmes de séchage solaire, dans lesquels la température ambiante joue un rôle déterminant sur l'efficacité du transfert thermique et le taux d'évaporation de l'humidité contenue dans le matériau à sécher

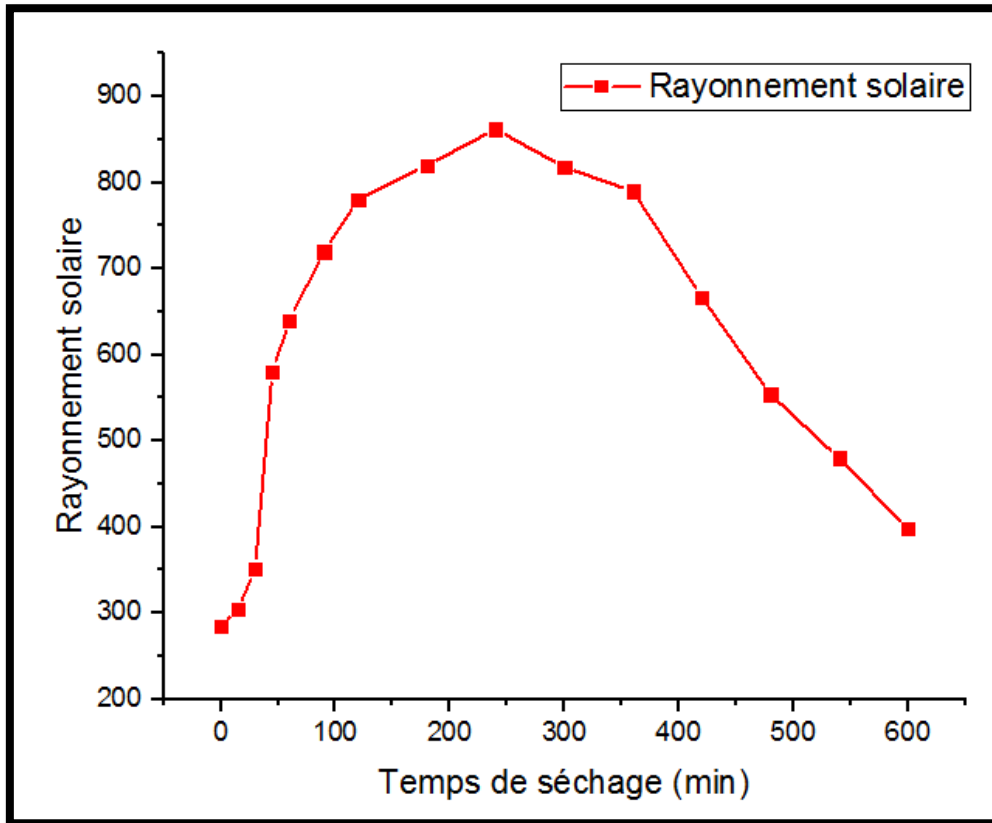


Figure IV. 14 Rayonnement solaire en fonction du temps

Le graphique fig. 2 présente la variation journalière de l'irradiation solaire au cours d'une période de séchage de 600 minutes. On observe que l'irradiation débute à une valeur faible durant les premières heures de la journée, puis augmente progressivement pour atteindre un maximum d'environ 860 à 870 W/m² vers les 250 minutes, correspondant généralement au moment du zénith solaire. Par la suite, l'irradiation diminue progressivement jusqu'à la fin de la période considérée, traduisant le cycle naturel de l'ensoleillement, depuis le lever du soleil, en passant par le point culminant, jusqu'à son coucher

IV.2.4.2. Interprétation comparative du séchage des tranches de concombre

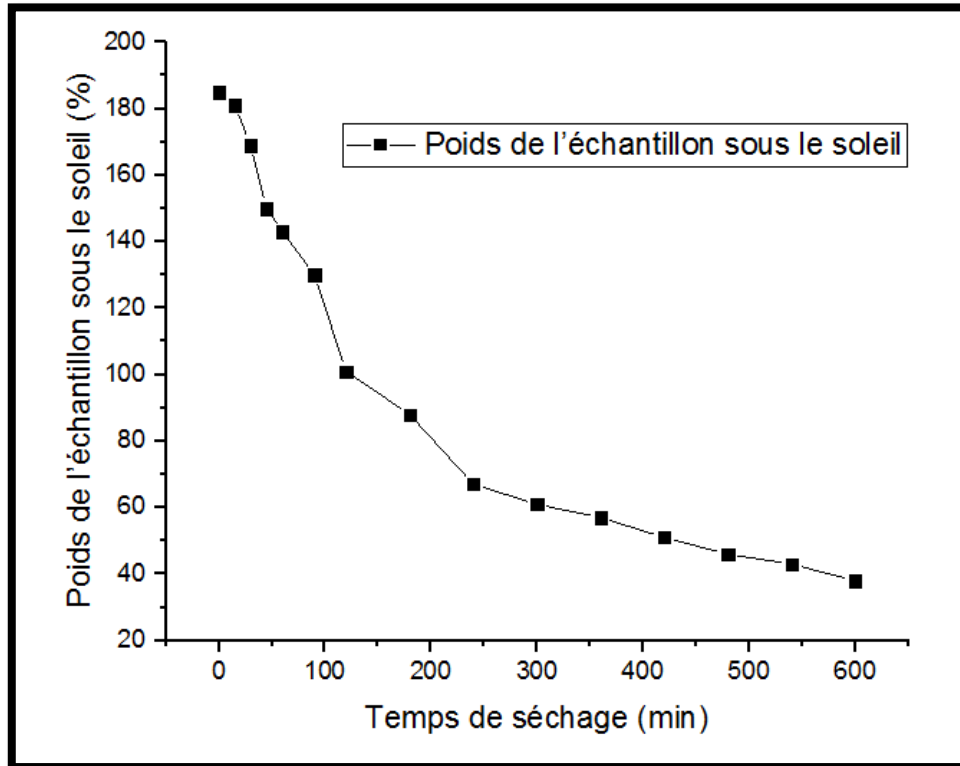


Figure IV. 15 Sécher des tranches de concombre au soleil

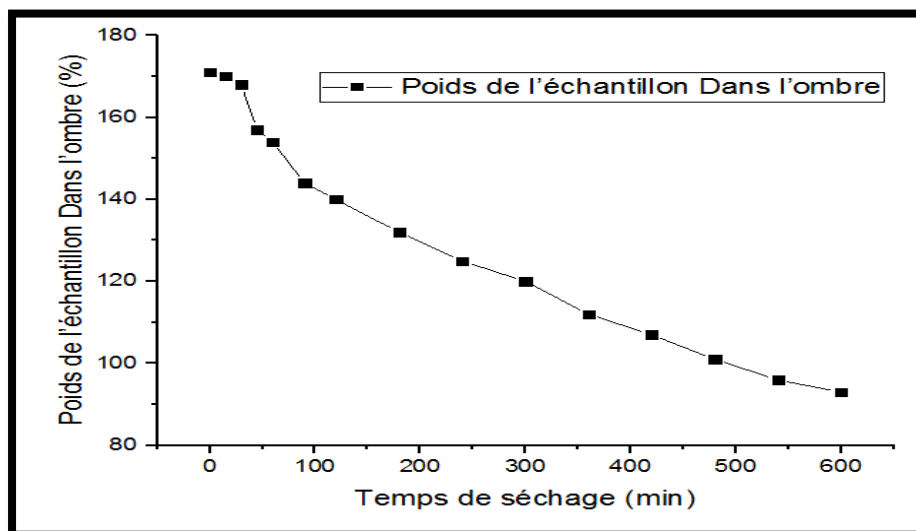


Figure IV. 16 Sécher les tranches de concombre à l'ombre

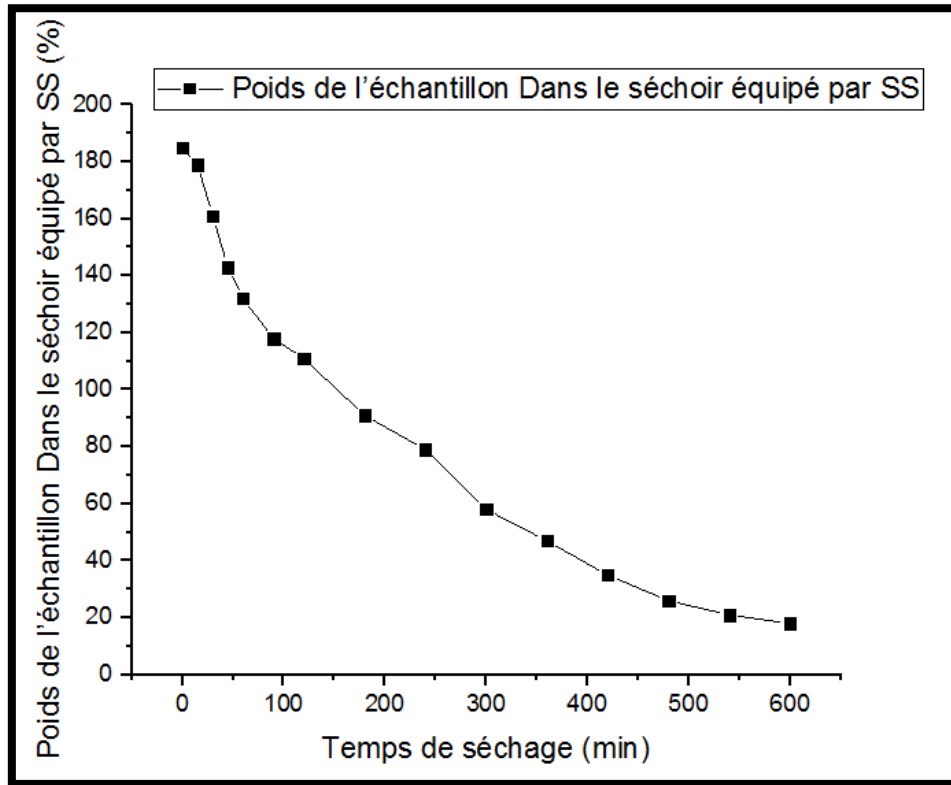


Figure IV. 17 Séchage des tranches de concombre avec un séchoir solaire équipé de SS

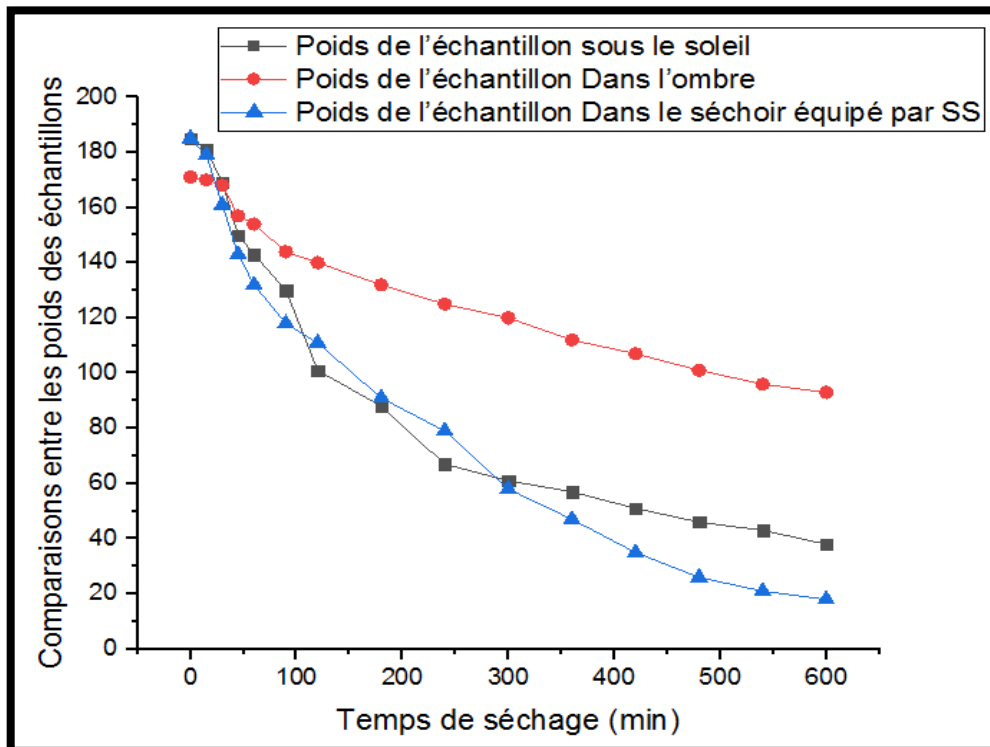


Figure IV. 18 Comparaisons entre les poids des échantillons

La seconde phase de l'analyse s'intéresse à la comparaison de trois méthodes de séchage des tranches de concombre : à l'ombre, sous le soleil, et dans un séchoir solaire équipé (SS). L'objectif est d'évaluer l'efficacité de chaque méthode en observant l'évolution du poids de l'échantillon en fonction du temps de séchage.

Le séchage à l'ombre (ligne rouge) affiche un taux de déshydratation lent : le poids passe de 170 unités à environ 90 unités sur toute la durée. Cette méthode, bien que douce, est limitée par l'absence de source de chaleur directe, ce qui réduit considérablement le transfert thermique nécessaire à l'évaporation.

Le séchage sous le soleil (ligne noire) permet une évaporation plus rapide, avec une diminution du poids de 180 unités à environ 35 unités. Le rayonnement solaire direct améliore le processus, mais peut entraîner une perte de qualité du produit (oxydation, détérioration visuelle) à cause de l'exposition aux UV et aux variations climatiques incontrôlées.

Enfin, le séchage dans le séchoir solaire équipé (ligne bleue) présente la meilleure performance : le poids chute de 185 unités à environ 20 unités, avec une vitesse de séchage nettement supérieure. Ce résultat est attribué à une meilleure concentration de l'énergie solaire, une circulation d'air optimisée, et un contrôle thermique accru dans la chambre de séchage. Ce type de séchage assure non seulement une évaporation rapide, mais aussi une meilleure conservation du produit, en réduisant l'humidité résiduelle à des niveaux très faibles.

IV.2.5 Images des produits après séchage

Des photos des échantillons après séchage ont été prises à des fins d'évaluation visuelle, permettant de comparer les propriétés physiques (couleur, forme, réduction de taille) selon la méthode de séchage utilisée.

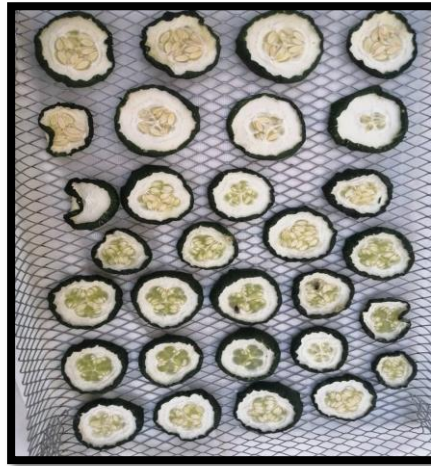


Figure IV. 19 Images des produits après séchage

IV.3.Conclusion

La mise en place d'un système de suivi solaire pour un séchoir solaire représente une avancée significative dans l'amélioration de par farmente thermique des installations agricoles. Grâce à ce dispositif, l'orientation des panneaux solaires est optimisée en fonction du mouvement du soleil, garantissant ainsi une captation maximale de l'énergie. En dépit des défis liés à la construction et à l'intégration de ces systèmes, l'usage d'un suivi solaire automatique permet de réduire les pertes d'énergie et de garantir une meilleure performance des séchoirs solaires. La réalisation d'un tel système demande une attention particulière aux choix des composants et au respect des étapes de montage pour assurer la fiabilité et la longévité du dispositif.



Conclusion générale

Conclusion générale :

En conclusion de ce mémoire, l'étude souligne l'importance du développement des systèmes de suivi solaire comme moyen efficace d'améliorer l'exploitation de l'énergie solaire dans les applications pratiques, notamment dans les dispositifs de séchage solaire. À travers la réalisation et la mise en œuvre pratique d'un système de suivi solaire, une augmentation significative de l'efficacité du processus de séchage a été réalisée par rapport aux méthodes traditionnelles fixes ou au séchage direct au soleil.

Les résultats expérimentaux obtenus dans des conditions climatiques favorables dans la wilaya d'El Oued ont démontré la capacité du système à maintenir une température plus élevée et plus stable à l'intérieur du séchoir, ce qui a accéléré la perte d'humidité des fruits et amélioré la qualité des produits séchés en termes de goût, de couleur et de texture.

Le système a également permis un contrôle précis du suivi de la position du soleil, améliorant ainsi l'exploitation du rayonnement solaire et augmentant la stabilité thermique dans le séchoir. Les essais ont révélé une réduction notable du temps nécessaire pour atteindre les niveaux d'humidité souhaités, faisant de ce système une solution pratique et économique, particulièrement adaptée aux zones désertiques et arides comme la wilaya d'El Oued.

Sur le plan économique, le système est peu coûteux et facile à appliquer, ouvrant de larges perspectives d'utilisation pour les agriculteurs et les petites industries alimentaires. De plus, cette étude fournit une base solide pour le développement futur de modèles plus sophistiqués, pouvant intégrer des technologies de contrôle intelligentes ou des systèmes de stockage d'énergie afin d'optimiser l'exploitation des énergies renouvelables.

Ces résultats confirment l'importance de s'orienter vers des solutions durables basées sur l'énergie solaire pour développer la production agricole et industrielle, réduire les pertes, soutenir le développement dans les régions à ressources naturelles limitées, et favoriser la durabilité dans l'utilisation des énergies renouvelables tout en stimulant des applications pratiques plus diversifiées et efficaces à l'avenir.



Références

Références

1. Benseddik, A. (2011). *Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée* [Mémoire de magistère]. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen.
2. Benseddik, A. (s.d.). *Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée* [Mémoire de magistère]. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen.
3. Rakotondramiarana, H., Morau, D., Adelard, L., & Gatina, J.-C. (2005). Modélisation du séchage solaire : application au séchage en couche mince des boues solides des stations d'épuration. *12ème Journées Internationales de Thermique (JITH)*, vol. (pagination non précisée).
4. Amadou, H. (2007). *Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines* [Thèse ou mémoire non précisé]. Université de Strasbourg 1.
5. Khaldi, S. (2018). *Étude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie* [Thèse de doctorat]. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.
6. Orawan, A. (2017, 7 décembre). *Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase* [Thèse ou mémoire]. Université de Perpignan via Domitia.
7. Khaldi, S. (2018). *Étude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie* [Autre travail universitaire]. Université Bourgogne Franche-Comté.
8. Aumporn. (2017). [Référence incomplète – précisez le titre et le type de document si possible].
9. Singh, J. (2015). [Référence incomplète – précisez le titre et le type de document si possible]. Department of Mechanical Engineering, BBDNITM, Lucknow, India.
10. Essalih, A. M. (2018). *Modélisation des isothermes de désorption du produit agroalimentaire* [Mémoire]. Université Ahmed Draïa, Adrar.

11. Bedda, K., & Bakka, R. (2023). *Conception d'une centrale photovoltaïque pour alimenter un site connecté au réseau électrique* [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla].
12. Azadeh, A., Maghsoudi, A., & Sohrabkhani, S. (2010). An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation. *Energy Conversion and Management*.
13. Bouziane, R., & Dokkar, A. (2016). *Conception et réalisation d'un suiveur solaire bi-axial à base de capteurs de lumière* [Projet de fin d'études]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
14. TPE énergie solaire. (2021). *Avantages et inconvénients du photovoltaïque*. <http://tpe-energie-solaire.e-monsite.com/pages/science-et-technique/1-energiephotovoltaique/avantages-et-inconvenients-du-photovoltaique.html>
15. Greenslade, T. B., Jr., & Jamin, J.-C. (1885-1906). *Cours de physique de l'École polytechnique. Tome 3 - Fasc. 2*. Gauthier-Villars et fils.
16. Kaddouri, A. (2015). *Conception et réalisation d'un suiveur solaire à deux axes* [Projet de fin d'études]. Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Fès, Maroc.
17. Cheema, S. S. (2012). *Simulation studies on dual axis solar photovoltaic panel tracking system* [Thesis or Project]. Thapar University Patiala.
18. Benhmdhamdi, Z. (2013-2014). *Étude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire* [Mémoire de fin d'études de master]. Université Sidi Mohammed Ben Abdallah.
19. Aboltins, A., et al. (2009). Investigations of air solar collector efficiency. In *Proceedings of the 8th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development* (Vol. 1).
20. Aravindh, M. A. (2015). Solar drying—a sustainable way of food processing. In *Energy Sustainability through Green Energy*. Springer.
21. Mounir, B. (2019). *Études expérimentales du séchage solaire par convection naturelle* [Travail universitaire ou publication technique].
22. Aymen, R. (2018). *Étude d'un séchoir solaire à convection forcée pour le séchage de la pomme de terre à Biskra* [Travail universitaire ou publication technique].