

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
Ph/ENR/11/2021



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Energétique
et Energies Renouvelables

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Réalisé par :

ZAOUI Oussama

SARRAI Imane

Intitulé

Conception et fabrication d'un déshydrateur par
un système aérovoltaique hybride
(photovoltaïque-thermique)

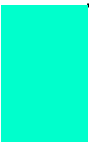
Soutenu le 26/ 06 /2021 devant le jury composé de :

Bouras Abd elkarim
Taloub Djedid
AZIZI Amina
Salmi Mohamed
Mahdi Khaled

Université Mohamed Boudiaf- M'sila
Université Mohamed Boudiaf- M'sila
Université d'Annaba
Université Mohamed Boudiaf- M'sila
Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Président
Rapporteur
Co-encadreur
Examineur
Examineur

Année universitaire : 2020/2021



Remerciement

Le plus grand merci s'adresse au dieu, le puissant de nos avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir notre cursus

Nous remercions énormément notre encadreur Monsieur TALOUB Djedid et notre Co-encadreur AZIZI Amina pour l'orientation et l'aider dans le coté théorique de notre mémoire.

Nous tenons également à exprimer notre remerciement au AZZOUZI HMIDET notre maitre de stage pour l'aider et le soutenir matériellement et moralement à chaque étape dans le côté pratique de notre mémoire

Aussi nous remercions quelques étudiants d'Annaba d'avoir été avec nous pendant la période de notre stage

Nos fort remerciement à Rachid HAMMADI de nous accueillir et aidé, et l'entreprise de KHALFALLAH El Amine d'avoir authentifié les documents de stage

Finalement je remercie l'université de Mohamed Boudiaf _M'sila et le département de physique.



Dédécace

SARRAI Imane

Je dédie ce travail à ma chère maman qui m'a soutenu tout au long de mon parcours universitaire

Salutations à mon grand-père, ma grand-mère, ma tante et mes oncles, comme je ne l'oublie pas, salutations à mon professeur, la raison du choix de la physique, M. Issa Fardjaoui

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé à terminer ce travail



Dédécace

ZAOUI Oussama

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,
leur soutien, leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs Dalila et Hadjer, et mes frères Yousef et Omran pour ,
oncle bouaaza ,leurs encouragement permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille et mes chers amis.

Merci d'être toujours là pour moi.

Résumé

Aujourd'hui, le monde tend vers l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable, y compris l'Algérie, elle est fortement appelée à être à jours grâce à son potentiel naturel dans ce domaine. Parmi ses énergies renouvelables, l'énergie solaire où l'Algérie à lui donné déjà depuis des années une grande importance.

Dans ce mémoire, une proposition de projet qui est un séchoir solaire hybride fonctionne avec un panneau solaire hybride, et ce panneau donne de la chaleur et de l'électricité en même temps, car on sait que le panneau photovoltaïque traditionnel produit trois fois plus de chaleur que l'électricité. La nouveauté de cette recherche consiste à récupérer cette énergie thermique en chauffant ou en séchant. Les séchoirs précédents fonctionnaient avec des capteurs thermiques grâce à l'effet de serre, qui ne donne que de la chaleur.

Donc, Il a été développé et on a utilisé un panneau solaire hybride (thermique et photoélectrique) qui donne de l'électricité aux ventilateurs pour faire circuler l'air et accélérer le séchage et donne également de la chaleur, qui est responsable du séchage. Le séchage se fait à l'air chaud, car il réduit et absorbe l'humidité dans les produits agricoles. On a également ajouté un capteur thermique pour soutenir le panneau solaire hybride au cas où on aurait besoin d'augmenter la température. On a également ajouté une batterie pour stocker l'énergie électrique et l'utiliser lorsque le soleil se couche pour faire fonctionner la lampe dans la chambre de séchage, ce qui donne de la chaleur à l'intérieur de la chambre de séchage. Ainsi, le séchage est continu et rapide, car le temps de séchage est très court par rapport aux séchoirs précédents tout en préservant la valeur nutritionnelle du produit et de bonne qualité.

Mots clés: Capteur plan, énergie solaire, le panneau solaire PV, le panneau solaire PV/TH, cinétiques de séchage convectif, ensoleillement global, séchage des produits agroalimentaires.

Abstract

Today, the world tends towards the exploitation of renewable energy resources, including Algeria, it has strongly called upon to be up to date thanks to its natural potential in this area. Among its renewable energies, solar energy, where Algeria has already given it great importance for years.

In this memoire, a project proposal, which is a hybrid solar dryer works with a hybrid solar panel, and this panel, gives heat and electricity at the same time, because it has known that the traditional photovoltaic panel produces three times more energy heat than electricity. The novelty of this research consists in recovering this thermal energy by heating or drying. The previous dryers worked with thermal sensors thanks to the greenhouse effect, which only gives heat. Therefore, it was developed and used a hybrid solar panel (thermal and photoelectric) which, gives electricity to the fans to circulate the air and speed up the drying and gives off heat, which is responsible for the drying. The drying is done with hot air as it reduces and absorbs moisture in agricultural products. A thermal sensor has also been added to support the hybrid solar panel in case the temperature needs to be increased. A battery has also been added to store electrical energy and use it when the sun goes down to operate the lamp in the drying chamber, which gives heat inside the drying chamber. Thus, the drying is continuous and fast, because the drying time is very short compared to previous dryers while preserving the nutritional value of the product and of good quality.

Key words: Flat panel collector, solar energy, the solar panel PV, the solar panel PV/TH, convective drying kinetics, global radiation, drying of agri-food products.

ملخص

تتجه دول العالم اليوم بخطى متسارعة نحو استغلال منابع الطاقات المتجددة، والتي من بينها الجزائر التي يسقط عليها كنف شمسي طبيعي معتبر جدا . من بين الطاقات المتجددة نجد الطاقة الشمسية التي أولتها الدولة الجزائرية أهمية كبرى، وكان بحثنا هو اقتراح مشروع عبارة عن مجفف شمسي هجين يعمل باللوحة الشمسية الهجين وهذا اللوح الذي يعطينا حرارة وكهرباء في آن واحد حيث نعلم أن اللوح الكهروضوئي التقليدي ينتج حرارة أكثر بثلاث مرات من الكهرباء والجديد هو استعادة هذه الطاقة الحرارية في تسخين أو التجفيف , ونحن استعملناها في المجفف الشمسي كما نعلم أن المجففات السابقة كانت تعمل بالمجمعات الحرارية عن طريق ظاهرة الاحتباس الحراري التي يقوم بها المجمع، والذي يعطينا حرارة فقط، فتم تطويره واستعملنا اللوح الشمسي الهجين (الحراري والكهروضوئي) الذي يعطينا كهرباء التي نستعملها في تشغيل المراوح لتدوير الهواء وتسريع التجفيف ويعطينا الحرارة أيضا والتي هي مسؤولة عن التجفيف ويكون التجفيف بالهواء الساخن حيث يقوم بخفض وامتصاص نسبة الرطوبة الموجودة في المواد واستعملنا أيضا المجمع الحراري لندعم به اللوح الشمسي الهجين في حال احتجنا إلى رفع درجة الحرارة , وقمنا أيضا بإضافة بطارية لتخزين الطاقة الكهربائية واستعمالها عند غياب الشمس لتشغيل المصباح الموجود في الغرفة الذي بدوره يعطينا حرارة داخل غرفة التجفيف وهكذا يكون التجفيف مستمر وسريع حيث تكون مدة التجفيف قصيرة جدا مقارنة بالمجففات السابقة مع الحفاظ على القيمة الغذائية للمنتج وذو نوعية جيدة

الكلمات المفتاحية: المجمع المسطح، الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية الكهروضوئية، الألواح الشمسية الكهروضوئية الهجين، حركات التجفيف بالحمل الحراري، أشعة الشمس العالمية، تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية.

Table des Matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Table des Matières.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Nomenclature.....	x
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 Généralité sur l'énergie renouvelable et recherche bibliographique sur Panneau solaire PV/T a air.....	6
1.1. Introduction.....	6
1.2. Energies renouvelable.....	7
1.2.1 Energie éolienne.....	7
1.2.1 .1.Principe du fonctionnement	8
1.2.2. Energie hydraulique.....	9
1.2.2.1. Fonctionnement d'une centrale hydraulique.....	9
1.2.3. Energie de la Biomasse.....	10
1.2.3.1. Principe de Fonctionnement de la Biomasse.....	10
1.2.4. Energie de la Géothermie.....	11
1.2.4.1. Principe de fonctionnement	11
1.2.5. Energie solaire.....	12
1.2.5.1. Solaire	12
1.2.5.2. Potentiel solaire en Algérie	13
1.2.5.3. Composition du rayonnement solaire.....	13
1.2.5.4. Effet photovoltaïque.....	16
1.2.5.5. Description des systèmes photovoltaïques.....	17
1.2.5.5.1. Cellule solaire.....	17
1.2.5.5.2. Technologies des cellules solaires.....	17
1.2.5.6. Module photovoltaïque.....	19
1.2.5.6.1. Caractéristiques d'un module.....	19
1.2.5.7. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	20
1.2.5.8. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	21
1.2.5.8.1. Courant de court-circuit (I_{cc}).....	21
1.2.5.8.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	21
1.2.5.8.3. Rendement énergétique.....	22
1.2.5.8.4. Facteur de forme.....	22
1.2.5.9. Angle d'inclinaison du panneau solaire (photovoltaïque)	22
1.2.5.10 .Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque.....	23
1.2.5.11. Solaire à concentration thermodynamique.....	24
1.2.5.12. Solaire thermique.....	25
1.3. Recherche bibliographique sur panneau solaire a air.....	26
Conclusion.....	27
Références.....	28

Chapitre 2 Transfert de chaleur.....	31
2.1. Introduction.....	32
2.2. Définitions	32
2.2.1. Température.....	32
2.2.2. Champ de température	32
2.2.3. Gradient de température	32
2.2.4. Quantité de chaleur	33
2.2.5. Flux de chaleur	33
2.3. Formulation d'un problème de transfert de chaleur	33
2.3.1. Bilan d'énergie	33
2.4. Modes de transfert de chaleur	34
2.4.1. Conduction.....	34
2.4.2. Convection	36
2.4.2.1. Différents types de convection	37
2.4.2.1.1. Convection naturelle.....	37
2.4.2.1.2. Convection forcée.....	38
2.4.2.1.3. Convection mixte.....	38
2.4.3. Rayonnement.....	38
2.5. Expression des nombres sans dimensions.....	39
2.6. Flux de chaleur lié à un débit massique.....	40
2.7. Stockage d'énergie.....	40
2.8. Génération d'énergie.....	41
 Chapitre 3 Système Hybride PV/TH -Réalisation du prototype d'un panneau solaire a air-.....	 44
3.1. Introduction.....	44
3.2. Système solaire hybride PV/T	45
3.3. Principe du capteur PV/T	45
3.4. Types de systèmes PV/T	45
3.4.1. Panneaux solaires hybrides PV/T à eau	45
3.4.1.1. Principe de fonctionnement.....	45
3.4.2. Panneaux solaires hybrides PV/T à air	46
3.4.2.1. Principe de fonctionnement	46
3.5. Avantages et inconvénients de l'aérovoltaïque.....	47
3.5.1. Avantages de l'aérovoltaïque	47
3.5.2. Inconvénients de l'aérovoltaïque.....	48
3.6. Utilisation des panneaux hybride	48
3.7. Tableau récapitulatif.....	49
3.8. Description et fonctionnement du dispositif expérimental.....	49
3.8.1. Réaliser et caractérisation d'un capteur hybride PV/T.....	49
3.8.2. Description du système PV/T.....	50
3.8.3. Dimensions du capteur solaire hybride PV/T(Aérovoltaïque).....	50
3.8.4. Panneau photovoltaïque.....	50
3.8.5. Méthode de fabrication.....	51
3.9. Résultats et Discussions.....	54
3.10. Conclusion.....	57
Références	58

Chapitre 4 Conception, réalisation et expérimental d'un déshydrateur hybride.....	59
4.1. Introduction.....	60
4.2. Déshydratation.....	60
4.2.1. Classification des séchoirs solaires.....	60
4.2.1.1. Séchoirs solaires passifs.....	60
4.2.1.2. Séchoirs solaires actifs.....	61
4.2.2. Modes de fonctionnement.....	61
4.3. Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire.....	62
4.4. Conditions nécessaires pour obtenir la valeur nutritionnelle la plus élevée du produit séché.....	62
4. 5. Stockage des aliments séchés.....	63
4. 6. Domaines d'utilisation du séchage.....	63
4.7. Matériel et méthode de mesure.....	64
4.7.1. Description du système déshydrateur et leurs composants.....	64
4.7.2. Méthode de fabrication.....	65
4.7.3. Fonctionnement du système.....	67
4.8. Résultats et Discussions.....	67
4.8.1. Séchage se la tomate.....	67
4.8.1.1. Mode opératoire.....	67
4.8.1.2. Préparation du produit.....	68
4.8.1.3. Produit séché.....	68
4.8.2. Séchage de la fraise.....	71
4.8.2.1. Mode opératoire.....	71
4.8.2.2. Préparation du produit.....	72
4.8.2.3. Produit séché.....	72
4.8.3. Séchage de la feuille de laurier.....	73
4.8.3.1. Mode opératoire.....	73
4.8.3.2. Préparation du produit.....	74
4.8.3.3. Produit séché.....	74
4.9. Conclusions.....	75
Référence.....	75
Conclusion générale	76
Résumé.....	



Liste des figures

Fig. 1.1. Eolienne	8
Fig. 1.2. Centrale hydraulique	9
Fig. 1.3. Installation de l'énergie de la biomasse	11
Fig. 1.4. Schéma d'une installation géothermique	12
Fig. 1.5. Distance entre le soleil et la terre.....	13
Fig. 1.6. La carte d'éclairement solaire de l'Algérie.....	13
Fig. 1.7. Absorption de certains types de rayons ultraviolets par la couche d'ozone.....	14
Fig. 1.8. Composantes solaires.....	15
Fig. 1.9. Digrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	16
Fig. 1.10. Conversion de la lumière en énergie électrique.....	17
Fig. 1.11. Représentation schématique d'une cellule solaire.....	17
Fig. 1.12. Cellule au silicium monocristallin.....	18
Fig. 1.13. Cellule au silicium poly-cristallin.....	18
Fig. 1.14. Cellule au silicium amorphe (couche mince).....	19
Fig. 1.15. Schéma équivalent électrique de la cellule PV.....	20
Fig. 1.16. Angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver.....	23
Fig. 1.17. Deux exemples de modules à concentration thermodynamique.....	25
Fig. 1.18. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....	25
Fig. 2.1. Isotherme et gradient thermique.....	33
Fig. 2.2. Schéma Système(S) et de son bilan énergétique.....	34
Fig. 2.3. Schéma explicatif de la loi de Fourier.....	35
Fig. 2.4. Schéma du transfert de chaleur conductif.....	35
Fig. 2.5. Schéma détaillé de transfert de chaleur par convection.....	36
Fig. 2.6. Schéma de la convection forcée.....	38
Fig. 2.7. Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	40
Fig. 3.1. Panneau solaire hybride PV/T à eau.....	46
Fig. 3.2. Panneau solaire hybride PV/T à air.....	47
Fig. 3.3. Coupure et préparation de bois utilisé suivant les dimensions du panneau.....	51
Fig. 3.4. Formation d'une boîte en bois rectangulaire.....	51
Fig. 3.5. Formation des trous dans la partie inférieure et supérieure de boîte rectangulaire...	52
Fig. 3.6. Fixation de polystyrène et l'aluminium.....	52
Fig. 3.7. Boîte en bois prêt.....	53
Fig. 3.8. Banc d'essai du capteur solaire PV/TH hybride à air.....	53
Fig. 3.9. Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV et PV/TH à vide	55
Fig. 3.10. Variation de l'intensité en fonction de temps pour les deux panneaux PV à vide et PV/TH en charge.....	55
Fig.3.11. Variation de la tension en fonction de temps pour les deux panneaux à vide.....	55
Fig.3.12. Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV/TH à vide et en charge.....	56
Fig.3.13. Variation de la tension en fonction de temps pour PV/TH à vide et en charge.....	56
Fig.3.14. Variation de la température de la surface de l'absorbeur de PV/TH en fonction de Temps à vide et en charge	56
Fig.3.15. Variation de la température à la surface de l'absorbeur de PV/TH en charge selon Le temps et l'ensoleillement.(mesures du 27/03/2021).....	57
Fig.4.1. Différents types de séchoirs solaires.....	61
Fig.4.2. Schéma du système de déshydrateur.....	65
Fig.4.3. Schéma du système de déshydrateur à l'intérieur d'une cuissière.....	65
Fig.4.4. Élément thermique et panneau solaire avant et après fabrication.....	66
Fig.4.5. Fabrication de cuissière.....	66

Fig. 4.6. Déshydrateur.....	67
Fig. 4.7. Préparation et séchage de produit(tomate).(zone de M'sila)	68
Fig. 4.8. Variation de la température de PV/TH et température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2021(tomate).(zone de M'sila)....	69
Fig. 4.9. Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2021(tomate).(zone de M'sila).....	69
Fig.4.10. Variation de l'humidité dans PV/TH selon ensoleillement et le temps le 24/02/2021 (tomate).(zone de M'sila).....	70
Fig.4.11. Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 29/03/2021(tomate).(zone d'annaba).....	71
Fig.4.12. Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 29/03/2021(tomate).(zone d'annaba).....	71
Fig.4.13. Préparation et séchage de produit(Fraise).....	72
Fig.4.14. Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 30/03/2021(fraise).(zone d'annaba).....	73
Fig.4.15. Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 30/03/2021(Fraise).(zone d'annaba).....	73
Fig.4.16. Préparation de séchage de produit (feuille de laurier)	74

 Liste des tableaux

Tableau 2.1	Conductivité thermique de certains matériaux.....	36
Tableau 3.1	Différence entre les types de panneaux solaires	49
Tableau 3.2	Dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude expérimentale.....	50
Tableau 3.3	Caractéristiques du module solaire «Solo Line 100».....	50

Nomenclature

ΔE	L'énergie d'un photon [joule]
ν	Fréquence [HZ]
λ	Longueur d'onde[m]
h	Constante de Planck [$6,63 \cdot 10^{-34}$ J/s ⁻¹]
c	Célérité de la lumière dans vide [$3 \cdot 10^8$ m/s]
I_{sat}	Courant de saturation [A ²]
T	Température effective des cellules en Kelvin [K]
e	La charge de l'électron [$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C]
n	Le facteur d'idéalité de la jonction [$1 < n < 3$]
I_{pv}	le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur [A]
V_{pv}	est la tension aux bornes de cette même cellule [V]
I_{ph}	photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de température [A]
R_{shu}	la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction
R_{ser}	la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions
I_{cc}	Courant de court-circuit [A]
V_{co}	Tension de circuit-ouvert [V]
η	Rendement énergétique
P_{inc}	La puissance solaire incidente [W]
P_{max}	La puissance électrique maximale fournie par la cellule [W]
FF	facteur de forme
$\emptyset$	Flux de chaleur [W]
S	La surface [m ²]
ϕ_{st}	Flux de chaleur stocké [W]
ϕ_g	Flux de chaleur généré [W]
ϕ_e	Flux de chaleur entrant [W]
ϕ_s	Flux de chaleur sortant [W]
λ	Conductivité thermique du milieu [W m ⁻¹ K ⁻¹]
x	Variable d'espace dans la direction du flux [m]
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection [W m ⁻² K ⁻¹]
T_p	Température de surface du solide [K]

T_{∞}	Température du fluide loin de la surface du solide [K]
Re	Nombre de Reynolds
Pr	Nombre de Prandtl
Nu	Nombre de Nusselt
σ	Constante de Stefan [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$]
ε_p	Facteur d'émission de la surface
$\dot{m}$	Débit massique [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
C	Chaleur spécifique [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
ρ	Masse volumique [kg m^{-3}]
V	Volume [m^3]
$\dot{q}$	Densité volumique d'énergie générée [W m^{-3}]

Introduction générale

Comme l'Algérie possède un énorme potentiel aux énergies solaire. Depuis des années, notre pays s'est engagé à exploiter cette énergie renouvelable en voulant aller loin dans ce domaine, suivant la tendance mondiale dans l'exploitation des énergies renouvelables. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles [1]. En se basant sur la recherche scientifique à travers les universités algérienne et la coopération avec les compétences internationales.

L'augmentation des prix et la pénurie de carburants conduits à des études et recherches profondes sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source énergétique alternative, particulièrement dans les pays en voie de développement .

Les chercheurs dans ce domaine ont mis l'accent sur les avantages des énergies renouvelables tel que sa propriétés, son coup raisonnable sur une longue durée d'exploitation et surtout qu'elle est inépuisable.

Le séchage solaire est donc une activité de conservation 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. D'un point de vue économique, cette activité induit une réduction des coûts et une augmentation de la valeur de vente du produit sec. Concernant les caractéristiques du produit agro-alimentaire, le séchage donne une meilleure stabilité dimensionnelle et une protection naturelle contre l'attaque d'insectes et des champignons.

Le séchage solaire a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes et viandes est l'un des processus des grandes consommations

d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des dépenses et pertes après les récoltes. [2]

L'augmentation de la production de la pomme de terre et quelque produit agricoles comme : tomates, dattes, piments, grains... dans l'Algérie est réalisée en un temps très court, les capacités de stockage par les chambres froides n'ont pas suivi le même Rythme. Donc la question qui posée quelle est les techniques et les procédés qui donne des solutions de cette problème ? [3]

Le séchage solaire des récoltes, fruits, légumes et viandes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air (exposition direct ou soleil). Il a été employé pour sécher des grains, fruits, viandes, poissons et d'autres produits alimentaires destinés à la consommation. Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle (exposition direct ou soleil) sans l'aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maints problèmes, parmi ces derniers, le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, l'incertitude du temps, le coût de la main d'œuvre élevé, la nécessité de zones vastes, l'infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires. [2-3]

Plusieurs études ont été réalisées sur le séchage solaire qui s'est intéressés à la conception des capteurs et séchoirs.

Benkhelfellah et al. [4], leur travail est consacré à une étude comparative entre le séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir direct et indirect. Ils ont étudié le bilan énergétique des modèles expérimentaux des séchoirs solaires de type direct et indirect, afin d'en déterminer la cinétique de séchage de produits agroalimentaires, compte tenu les conditions ambiantes du site donné. Semmar et al. [5] ont porté sur l'étude et la conception d'un capteur solaire à air destiné à la production d'air chaud. Ils ont adoptés une approche théorique qui consiste à simuler son comportement thermique par un programme informatique utilisant un modèle mathématique. La partie expérimentale consiste à la réalisation du modèle considéré, enfin une interprétation des résultats obtenus est donnée pour valider le modèle utilisé.

Aoues et al. [6], ils ont fait des tests expérimentaux sur un capteur solaire plan, l'installation expérimentale complète comprend la mesure du rayonnement solaire global, la vitesse du vent, le débit d'air et les températures ambiante, de l'air à l'entrée et à la

sortie. Pour optimiser les performances thermiques, le capteur a été garni dans sa veine d'air dynamique de rugosités artificielles de différentes formes et différents arrangements, après une étude comparative, ils ont arrivé à choisir la bonne configuration parmi les quatre étudiées, qui permet d'obtenir le meilleur rendement du capteur. Benkhelfellah et al. [7], ont présentés un travail sur la conception et la réalisation d'un séchoir indirect. Leur objectif la conception et la réalisation d'un séchoir solaire indirect à vocation agricole destiné au séchage des fruits et légumes. Le séchoir est constitué d'une boîte parallélépipédique, elle est alimentée en air chaud par un capteur solaire plan à air. La partie expérimentale consistera à étudier les caractéristiques de l'air de séchage lorsqu'il arrive dans la boîte de séchage, c'est-à-dire, sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit ainsi que leurs évolutions au cours d'une journée caractéristique. La connaissance de l'évolution de tous ces paramètres et leur interdépendance, permet de sélectionner les types de produits susceptibles d'être séchés par ce séchoir. Khalil et al. [8] ont étudié expérimentalement un séchoir solaire indirect à convection forcée. Leur étude basée sur l'efficacité thermique, qui se compose de trois parties : collecteur solaire, chambre de séchage et un ventilateur. Ce type de séchoir est destiné à sécher certains produits tels que le raisin, abricot, et haricots. Des expériences ont été faites en fonction de trois débits différents respectivement 0.076, 0.063 et 0.046 m³/s. Le procédé expérimental indique que la température de l'air à la sortie du capteur, est le facteur le plus important et montre que lorsque le débit augmente la température diminue. Shanmugama and Natarajanb [9], ont développé un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée, fabriqué et exécuté dans des conditions climatiques chaudes et humides en Inde, pour étudier l'efficacité thermique et l'humidité enlevée pendant le séchage de 75 kg de poids. Ce système est couplé par un capteur solaire orienté vers le sud pour maximiser le rayonnement solaire incident. La conclusion de ces résultats montre que le séchage dans un séchoir de type intégré se continue dans les heures non ensoleillées, en plus, la qualité du produit est améliorée pour un débit d'air variant entre 0,01, 0,02 et 0,03 kg/s par rapport au produit qui sèche en continuité, ainsi que l'efficacité thermique qui atteint 63 % , et le taux d'extraction d'humidité qui varie de 0,55 à 0,85 kg/kWh.

A partir de cette étude bibliographique concernant quelques travaux qu'on a pu rencontrer dans la littérature, on conclut que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental.

Notre recherche était une réalisation de projet qui est un séchoir solaire hybride qui fonctionne avec un panneau solaire hybride, et ce panneau donne de la chaleur et de l'électricité en même temps. La nouvelle de cette recherche consiste à récupérer cette énergie thermique en chauffant ou en séchant. Les séchoirs précédents fonctionnaient avec des capteurs thermiques grâce à l'effet de serre, qui ne donne que de la chaleur. Le séchage se fait à l'air chaud, car il réduit et absorbe l'humidité dans les produits agricoles. On a également ajouté un capteur thermique pour soutenir le panneau solaire hybride au cas où on aurait besoin d'augmenter la température.

L'étude expérimental basé sur l'influence de quelques paramètres physiques sur la cinétique de séchage (le temps de séchage), en ayant pour objectif d'établir des courbes caractéristiques du séchage à partir des résultats expérimentaux réalisés dans le site expérimental à Annaba et proximité du pôle universitaire de Mohamed Boudiaf de M'sila.

L'objectif de notre travail consiste à l'étude de l'influence des quelques paramètres expérimentalement sur la cinétique du séchage de quelques produits agro-alimentaires en utilisant un déshydrateur solaire indirect à convection forcée.

La présente mémoire se répartit en quatre chapitres. Le premier chapitre consiste à généralité sur l'énergie renouvelable, et une synthèse bibliographique sur les principales thématiques abordées par les chercheurs sur panneau solaire PV/T a air.

Le deuxième est consacré à la formulation mathématique de quelques paramètres de transfert thermique. Ensuite, une description sur tous les modes de transfert de chaleur.

Une recherche sur les systèmes des panneaux solaires hybrides, ensuite, une réalisation du prototype d'un panneau solaire à air fait l'objet du troisième chapitre avec des tests font dans la zone d'Annaba sur un panneau solaire simple à vide et le panneau solaire hybride PV/TH réalisé.

Le chapitre quatre présente une Conception, réalisation et expérimental d'un déshydrateur hybride, avec des essais sur le séchage de quelques produits agro-alimentaires, et discussions de ces résultats.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale sur les résultats obtenus au cours de cette étude et par l'énoncé des perspectives à venir.

References

- [1] A. Farhat, S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel et A. Belghith. 'Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse'. *International Journal of Thermal Science*, 43, 53-58. (2004).
- [2] M. A. Busunia, A. b. c T. 'Characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering*, 47, 295-301. (2001).
- [3] A. A. Mesai, B. Temacini. 'Etude expérimentale du séchage solaire des produits agroalimentaires de la région d'el-oued. Mémoire Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued. (2018).
- [4] R. Benkhelfellah,. S. El mokretar, et al. Séchoirs solaires. Etude comparative de la cinématique de séchages des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct indirect. 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc. (2005).
- [5] D. Semmar,. S. Betrouni, et al. "Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air." *Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique* : 33 - 38. (1998).
- [6] K. Aoues,. N. Moummi, et al. "Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air : Etude expérimentale dans la région de Biskra." *Revue des Energies Renouvelables*. Vol. 12 N°2 : 237 – 248. (2009).
- [7] A. Boulemtafes, and D. Semmar. "Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect." *Rev. Energ. Ren.*: 97-700. (1999).
- [8] E. J. Khalil,. Al-Juamily., et al.. "Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq." *ScienceDirect* 209: 163-170. (2007).
- [9] V. Shanmugama, and E. Natarajanb. "Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer." *Renewable Energy*. vol. 31: 1239-1251. (2006).

Chapitre

1

Généralité sur l'énergie renouvelable et recherche bibliographique sur panneau solaire PV/T a air

1.1. Introduction

Dans le monde, la production d'énergie électrique vient principalement des énergies fossiles et combustibles d'origine nucléaire. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel elle conduit à un dégagement massif de gaz polluants et de gaz à effet de serre. La production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂.

L'énergie d'origine nucléaire, qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années, ce qui nuit à l'homme et à l'environnement (la faune et la flore)

Bien que notre pays soit excédentaire en production électrique aujourd'hui, l'avenir n'est donc pas prometteur sur les ressources en énergies fossiles dont les réserves ne cessent de diminuer et dont les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. La préparation de l'avenir dans les domaines de production énergétique doit se prévoir dès aujourd'hui pour pouvoir faire face progressivement aux changements énergétiques inévitables. Chaque innovation et chaque avancée en matière de recherche n'aura de retombées que dans une dizaine d'années au mieux, le temps d'effectuer les tests nécessaires

et d'envisager la mise en production sans risque pour l'utilisateur autant pour sa santé que pour les installations électriques [1].

Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole, limitées (moins de cent ans au rythme actuel de consommation) [2].

Pour remédier à tous ces problèmes, nous recourons aux énergies renouvelables : Énergie solaire, énergie éolienne, énergie géothermique,...

1.2. Énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

Les énergies renouvelables proviennent de deux grandes sources naturelles : le Soleil (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) et la Terre (qui dégage de la chaleur). Surnommées "énergies propres" ou "énergies vertes", leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables. Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux systèmes de production existants [3].

Les sources des énergies renouvelables

- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique (hydroélectricité)
- La biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz)
- La géothermie.
- L'énergie solaire

1.2.1. Énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement de ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [4].

1.2.1.1. Principe du fonctionnement

La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Ainsi, le multiplicateur a pour rôle d'accélérer le mouvement lent des pales [3].

- 1) La rotation des pales : sous l'effet du vent, L'hélice se mette en marche.
- 2) La production d'électricité : l'hélice entraîne un axe dans la nacelle, relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.
- 3) L'adaptation de la tension : un transformateur situé à l'intérieur du mât élevé la tension du courant électrique produit par l'alternateur [K].

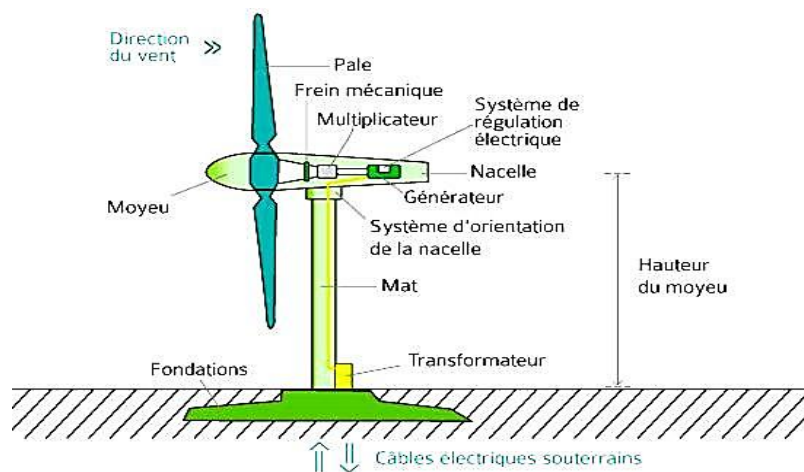


Fig. 1.1 Eolienne [3]

Les avantages

- Il y a toujours du vent dans un même endroit, donc jour et nuit.
- Tout le mécanisme est dans l'éolienne donc pas de grandes usines.
- Une énergie renouvelable donc non-polluante.

Les inconvénients

- Un impact visuel.
- Le prix coûteux.
- La migration des oiseaux.

1.2.2. Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins [3].

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique.

La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité [5].

1.2.2.1. Fonctionnement d'une centrale hydraulique

La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'antiquité.

Ces installations sont appelées des centrales hydrauliques ou hydroélectriques. Ce sont ces constructions gigantesques qui enjambent certains fleuves ou rivières ou encore ces impressionnants barrages que l'on voit aux confins des lacs, mais également des petites centrales sur des petits cours d'eau [3].

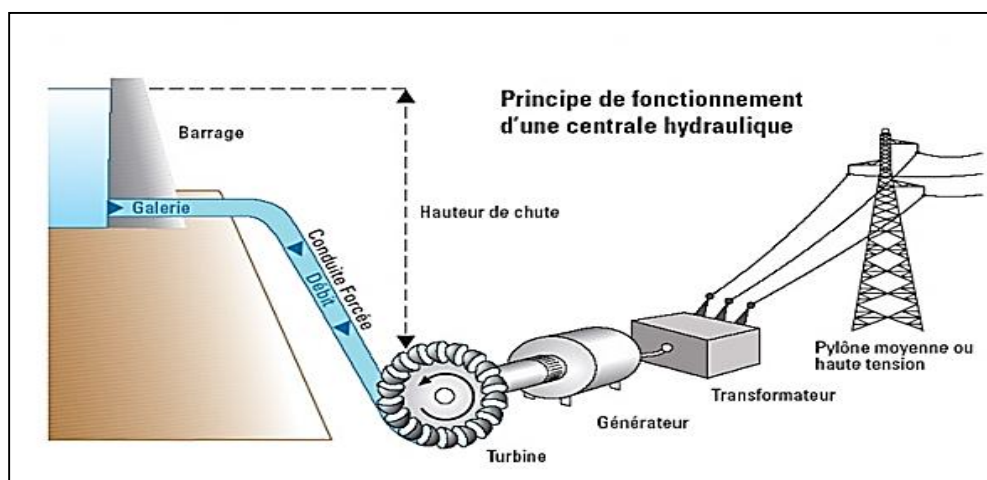


Fig. 1.2 Centrale hydraulique [3]

Les avantages

- La lumière ne coûte rien.
- Peut de soutien et dure longtemps.
- Une énergie naturelle non-polluante.

Les inconvénients

- Grands barrages coûteux
- Une perturbation de l'équilibre écologique

1.2.3. Energie de la Biomasse

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...). En 2010, la biomasse représentait 7,5% des énergies produites. On devrait atteindre une part de 10% d'ici 2020 [5].

1.2.3.1. Principe de Fonctionnement de la Biomasse

Le principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse est très simple, il est même en réalité similaire à celui d'une chaudière voir à celui d'une chaudière à cogénération dans certain cas. Globalement, la chaleur produite par la combustion va chauffer un réservoir d'eau qui va alors produire de la vapeur un peu à la manière d'une cocotte minute.

Cette vapeur d'eau va alors être dégagée à haute pression, ce qui va permettre de faire tourner une turbine relié à un alternateur.

C'est cet alternateur l'élément clé de la centrale à biomasse, celui qui va permettre de produire l'électricité.

Ce qui est intéressant dans les centrales à biomasse, c'est surtout celles qui permettent de produire de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin [3].

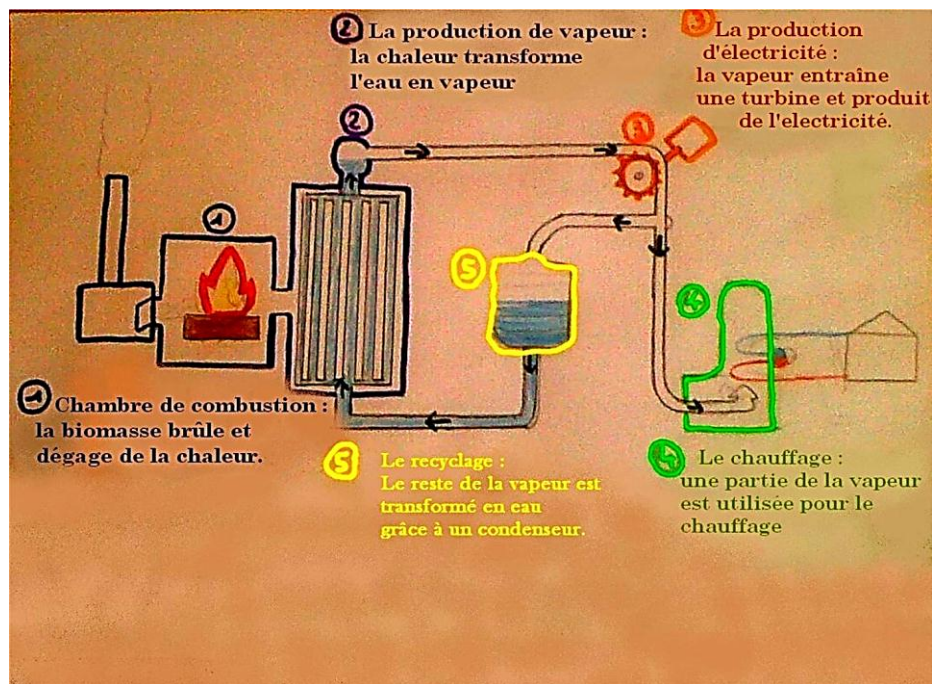


Fig. 1.3 Installation de l'énergie de la biomasse [3]

1.2.4. Energie de la Géothermie

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie
- La géothermie de basse énergie.
- La géothermie de très basse énergie

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...) [6].

1.2.4.1 Principe de fonctionnement

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...) [3].

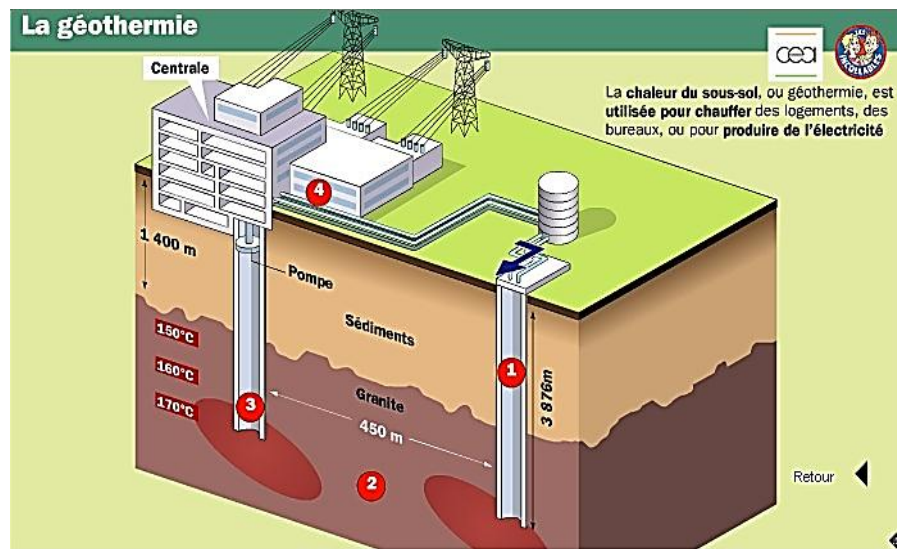


Fig. 1.4 Schéma d'une installation géothermique [3].

Les avantages

- Pollution non- toxique.
- Beaucoup d'énergie pour peu de place.

Les inconvénients

- Répartitions des sources.
- Installation coûteuse.

1.2.5. Energie solaire

1.2.5.1 Solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments [7], c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium ; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 Km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde 0.5 μm , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780 K [8].

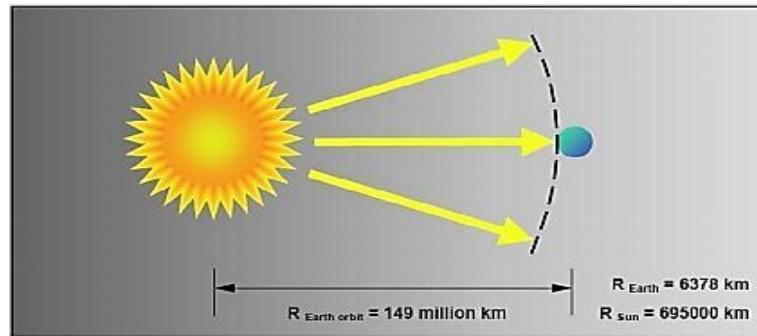


Fig. 1.5 Distance entre le soleil et la terre [8].

1.2.5.2 Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie est l'un des pays qui dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les régions sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En tenant compte de cette diversité, le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. La figure I.1 montre la carte de l'irradiation solaire en Algérie [9].

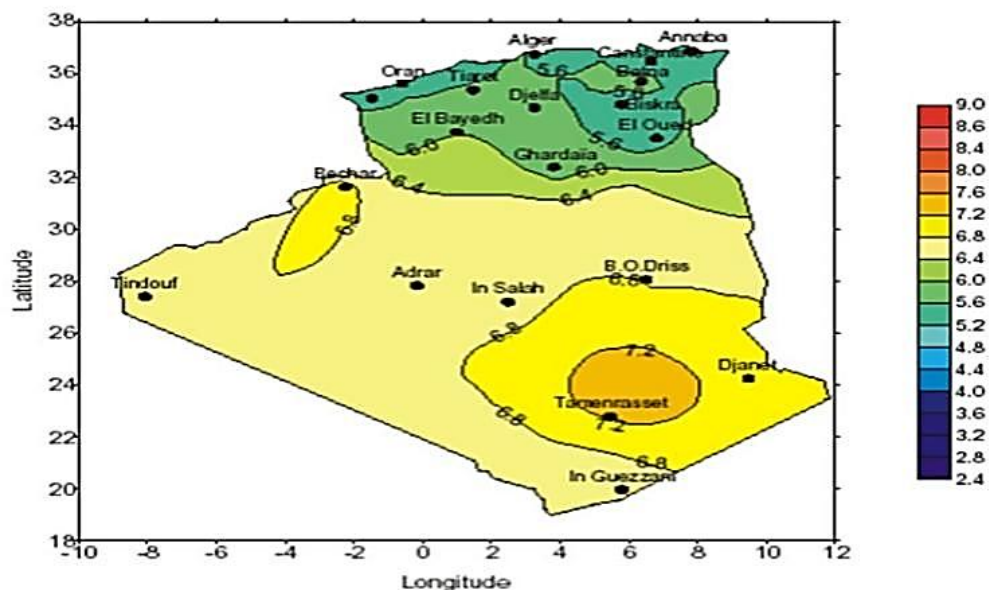


Fig. 1.6 : La carte d'éclairement solaire de l'Algérie [9].

1.2.5.3 Composition du rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s. Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la

chromosphère du soleil et l'atmosphère de la terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons.

Le spectre alors observable depuis la surface de la terre est donc un spectre de raies d'absorptions

Ainsi, à la surface de la terre le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

Le rayonnement ultra-violet émis par le soleil est classé en 3 types d'ultra-violet : les UV-A ayant une longueur d'onde de 380 (cette valeur peut varier légèrement selon la source) à 315 nanomètres ($1\text{nm}=1 \times 10^{-9}$ mètre), les UV-B dont la longueur d'onde est comprise entre 315 et 280 nm ainsi que les UV-C qui ont une longueur d'onde allant de 280 à 200 nm. Cependant seuls les UV-A et une petite partie des UV-B parviennent jusqu'à la surface de la terre car en traversant l'atmosphère la totalité des UV-C et la majeure partie des UV-B sont absorbées, soit réfléchies. Ainsi le rayonnement solaire que nous recevons comprend seulement 5% d'ultra-violet, ces 5% étant composés à 95% d'UV-A et à 5% d'UV-B [3].

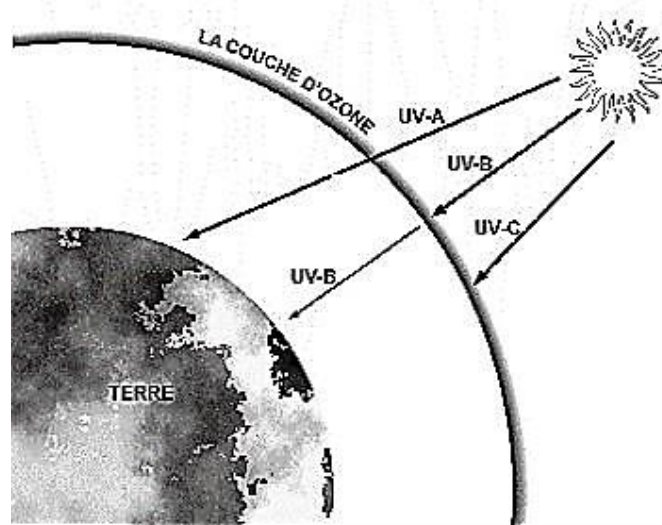


Fig. 1.7 Absorption de certains types de rayons ultraviolets par la couche d'ozone [3]

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " ΔE ". L'énergie d'un photon de fréquence ν (en hertz), dont la longueur d'onde λ (en mètre) est égale à la célérité divisée par ν , est exprimée par la relation

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : étant la constante de Planck c'est-à-dire $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}^{-1}$. Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

L'énergie que transmet le soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à 1350 W/m^2 (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 W/m^2 .

a. Rayonnement direct : Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

b. Rayonnement diffus : C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

c. Rayonnement réfléchi : C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo.

d. Rayonnement global : Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

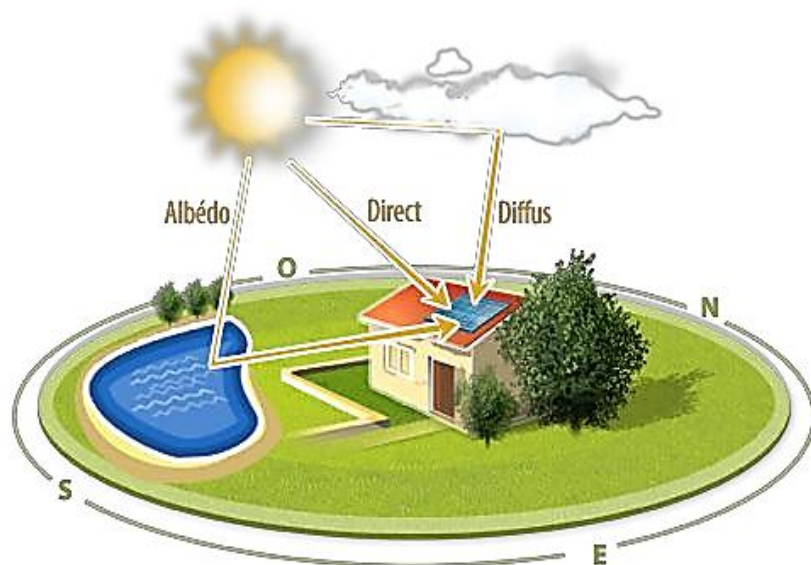


Fig. 1.8 Composantes solaires [3]

1.2.5.4 Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par Becquerel en 1839 il découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en explication pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium [15].

Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_c - E_v$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction.

Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires.

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. l'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure à E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [16].

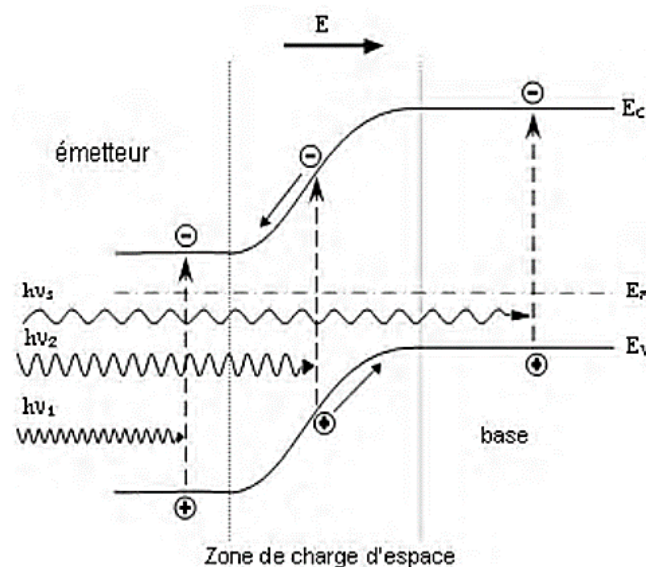


Fig. 1.9 Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [16]

1.2.5.5 Description des systèmes photovoltaïques

1.2.5.5.1 Cellule solaire

La cellule solaire est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par un processus appelé EFFET PHOTOVOLTAÏQUE [10].

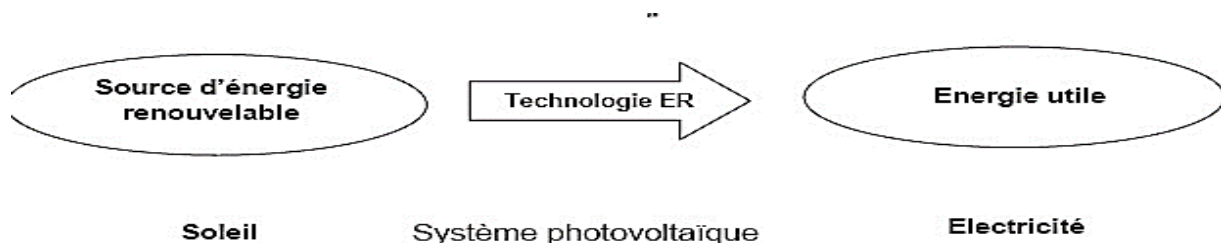


Fig. 1.10 Conversion de la lumière en énergie électrique

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore.

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés [10].

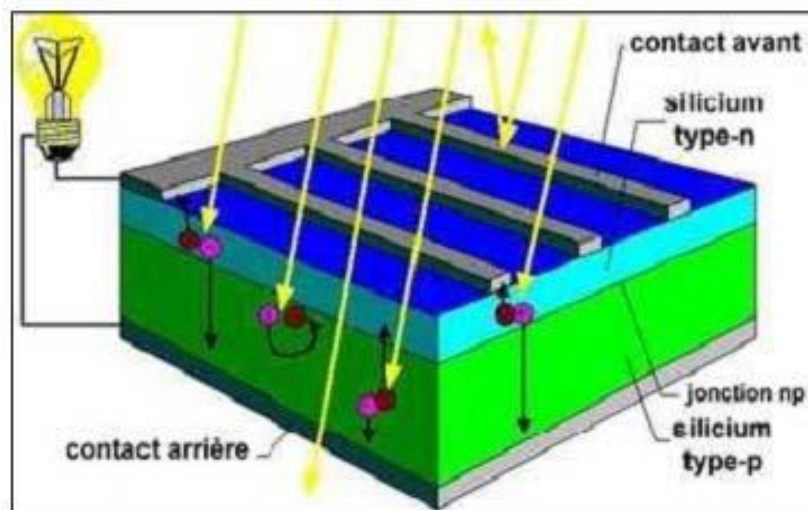


Fig. 1.11 Représentation schématique d'une cellule solaire [10]

1.2.5.5.2. Technologies des cellules solaires

Les technologies des cellules solaires se divisent en deux grandes familles :

A) Cellule cristalline (qu'il soit mono ou poly)

Est une technologie éprouvée et robuste (espérance de vie : 30 ans), dont le rendement est de l'ordre de 13 %. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts

à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentent près de 80 % de la production mondiale en 2000 [17].

- **Cellule monocristalline**

Sont des cellules qui s'approche-le plus du modèle théorique, elles sont effectivement composée d'un seul cristal divise en deux couches. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que la cellule poly-cristalline.

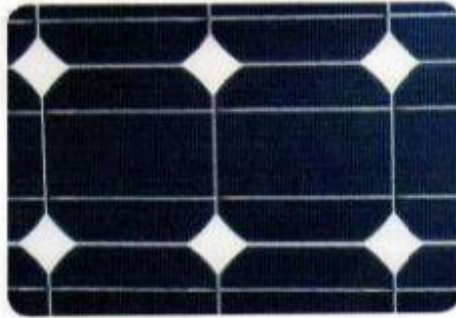


Fig. 1.12 Cellule au silicium monocristallin.

- **Cellule poly-cristalline**

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées : elles représentent 49 % de l'ensemble de la production mondiale en 2000. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication, leurs rendements est de 13% jusqu'à 20% en labo.

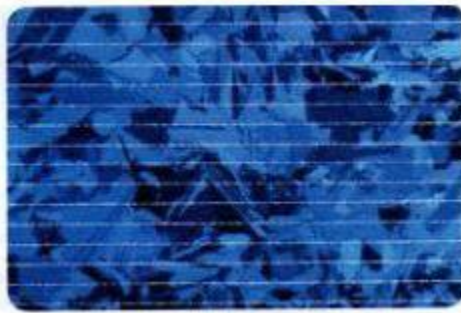


Fig. 1.13 Cellule au silicium poly-cristallin.

B) Cellule amorphe

Les coûts de fabrication sont sensiblement meilleur marchés que ceux du silicium cristallin. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple, alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même

puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000, alors qu'elles représentaient 12 % en 1999. D'autres techniques semblent gagner du terrain aujourd'hui, ce sont les technologies en ruban et les couches minces.



Fig. 1.14 Cellule au silicium amorphe (couche mince).

1.2.5.6 Module photovoltaïque

Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions supérieures à ceux que peuvent fournir les cellules élémentaires, il faut donc envisager des groupements. Pour cela les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension. Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique. [18]

1.2.5.6.1. Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module [19] :

- **La puissance crête P_c** : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard (25°C et un éclairement de 1000W/m²).
- **La caractéristique $I(V)$** : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide V_{co}** : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil », $P_m = U_m \cdot I_m$.
- **Rendement maximal** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

- **Facteur de forme** : rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale.

1.2.5.7. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (1.15) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule équation (1.2) :

- la résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt (R_{shu}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

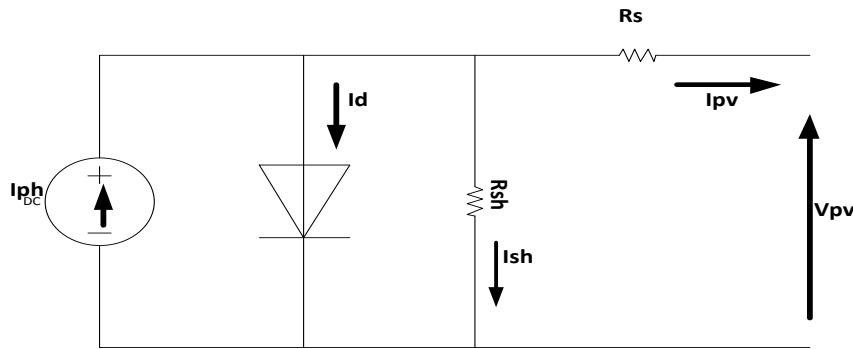


Fig. 1.15 Schéma équivalent électrique de la cellule PV

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par (1.2) et (1.3) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1.2)$$

Où

I_{sat} est le courant de saturation (A)

K est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/ K)

T est la température effective des cellules en Kelvin (K)

e est la charge de l'électron ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$)

I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur (A)

V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule (V)

I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (A)

R_{shu} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_{ser} est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions (1.3).

1.2.5.8. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique, Les plus usuels sont les suivants :

1.2.5.8.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V , on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc} + (I_{pv} * R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} + (I_{pv} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1.3)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc} + (I_{pv} * R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (1.4)$$

Devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}} \quad (1.5)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{CC} = I_{ph}$).

1.2.5.8.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul. (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{eV_{pv}}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (1.6)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (1.7)$$

1.2.5.8.3. Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (1.8)$$

Avec P_{inc} la puissance égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.2.5.8.4. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF , dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante. Il est de l'ordre de 0,7 pour les cellules performantes et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{ser} et R_{shu} . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * I_{co}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (1.9)$$

1.2.5.9. Angle d'inclinaison du panneau solaire (photovoltaïque) :

Le rendement des centrales solaires dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels figure l'angle d'incidence des rayons du soleil.

L'idéal serait que l'angle d'incidence des rayons du soleil, c'est-à-dire l'angle formé par le plan des panneaux solaires et ces rayons, soit toujours égal à 90° , car c'est ainsi que les panneaux reçoivent le plus de photons.

Tel n'est malheureusement pas le cas. D'abord, l'angle incident varie au fil de la journée : s'il augmente progressivement depuis le lever du soleil jusqu'à midi, heure du zénith, il diminue à nouveau jusqu'au couchant.

Ensuite, il atteint rarement 90° . À Berne, par exemple, l'angle incident maximal oscille entre 15° en hiver et 60° en été comme le montre la fig. 1.16.

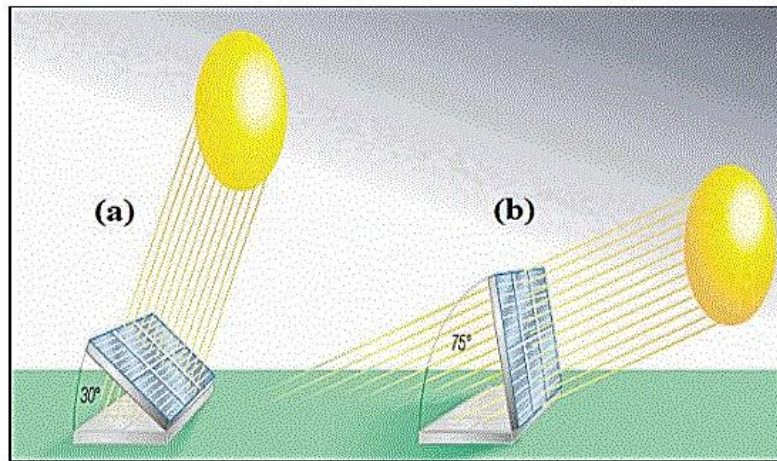


Fig. 1.16 Angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver [11].

1.2.5.10. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est sa nature intermittente. Pour une utilisation permanente, il est nécessaire de stocker l'énergie produite. Pour ce faire, il existe de nombreuses méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans le volant d'inertie, dans la batterie électrochimique (plomb, lithium) ou dans le super-condensateur [12].

Ces unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Correctement dimensionnées, elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez [13].

Le stockage contribue à stabiliser l'offre et la demande, à améliorer les conditions d'utilisation des réseaux de transport et de distribution, ainsi qu'à accroître le rendement de certaines unités de production à puissance nominale, tout en réduisant les émissions polluantes.

Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [14] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.

- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques notamment à la grêle).

- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.

- Le coût très élevé.

- Faible rendement de conversion.

- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

Pollution à la fabrication.

- Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir.

- En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [14].

1.2.5.11. Solaire à concentration thermodynamique

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit.

Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour éventuellement cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage (fig. 1.17) [7].



Capteurs thermodynamique cylindro- paraboliques

Capteurs thermodynamique paraboliques

Fig. 1.17 Deux exemples de modules à concentration thermodynamique [7].

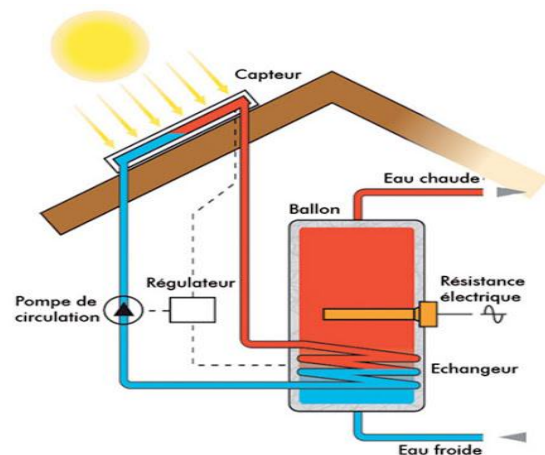
1.2.5.12. Solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, (fig1.18).

Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire.

Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [5].

**Figure 1.18** Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique [5].

1.3 Recherche bibliographique sur panneau solaire a air

Il existe non seulement plusieurs manières de fournir de l'énergie solaire, mais également différentes méthodes pour capter l'énergie solaire provenant d'un rayonnement incident. Le capteur solaire PV/TH à air relativement simple, est constitué d'une couche absorbante à dos isolé, refroidi par un courant d'air circulant entre l'absorbeur et un couvercle de verre. On peut augmenter sa surface d'échange de chaleur en donnant à l'absorbeur soit un pouvoir émissif élevé, soit avec une surface striée ou rainurée. Le capteur solaire absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur transmise à un fluide (air) qui sera utilisé pour d'autres applications [20], [21] [22], [23]. Kilani et al. [24] ont étudié théoriquement, expérimentalement et numériquement le comportement thermique du capteur hybride. Expérimentalement ont déterminé les caractéristiques électriques et thermiques d'un capteur Hybride PV-TH. Ils ont étudié la variation du rendement électrique du module PV avec la température des cellules. Ils ont constaté que ce rendement varie au cours de temps ; la hausse des températures des cellules correspond à une baisse du rendement. En effet, l'augmentation de température des cellules a un effet indésirable sur le rendement électrique du panneau. Du coté thermique, ils constatent que l'écart des températures d'entrée et de sortie ΔT est faible, cela est due à la faible absorption du rayonnement solaire ($\Delta T < 10^\circ\text{C}$). Cet absorbeur ne capte pas directement le rayonnement solaire. Dans la partie thermique, la température de sortie est presque confondue à celle des cellules (absorbeur). Ils ont trouvé que le rendement énergétique du capteur hybride étudié peut atteindre les 60%. Tiwari et al. [25] ont présenté une étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire PV/TH à air ventilé naturellement ou mécaniquement. Ce capteur solaire est constitué de deux modules PV, connectés en série et montés sur une couche isolante non- corrosive de Tedlar. Le module PV est composé de cellules photovoltaïques collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'EVA et protégées par une couche de verre. Des ventilateurs disposés à l'entrée de la lame d'air située entre le Tedlar et une couche isolante en bois permettent la ventilation forcée des modules PV en face arrière. L'énergie électrique produite est stockée dans une batterie électrique. Cette analyse a montré que la récupération complémentaire de l'énergie thermique produite permet une amélioration du rendement global du système PV/T à air d'environ 18 %. Tripanagnostopoulos [26] a réalisé l'étude de capteurs solaires PV/TH hybrides dont le fluide caloporteur est soit de l'air soit de l'eau, et pouvant être intégrés aux bâtiments. L'objectif de leurs travaux était de réduire la température de fonctionnement des modules PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous-face du composant. Pour cela, la configuration d'un capteur solaire

PV/TH à air a été modifiée à moindre coût. Touafek et al. [27] ont fait une étude de simulation numérique sur le comportement thermique des capteurs hybrides à travers l'élaboration de la cartographie thermique du capteur hybride photovoltaïque thermique (PV- TH). Ils ont étudié la distribution de la température dans les différentes couches du capteur. Ils ont établi par simulation numérique le comportement thermique de ce capteur hybride, ainsi que la cartographie de la température pour cinq configurations. L'objectif de cette étude est double, augmenter l'efficacité électrique du capteur, c'est-à-dire son rendement électrique en diminuant la température de fonctionnement et utiliser cette même chaleur pour chauffer de l'eau ou l'espace environnant. L'utilisation d'une vitre supplémentaire augmente la température du capteur hybride et améliore son rendement énergétique thermique. L'ajout d'une seconde vitre augmente d'avantage les performances thermiques, mais risque de diminuer le rendement électrique du capteur hybride qui dépend fortement de la température de fonctionnement du capteur. Oueslati et al. [28] ont présenté une analyse de performances de chauffage d'air d'un capteur solaire à air placé dans la direction nord-sud avec un angle d'inclinaison de 37° exposé au rayonnement solaire pendant la journée. La température de l'air à la sortie du capteur est très sensible à la variation du taux de radiation solaire. Pour une journée ensoleillée stable, la température de l'air à la sortie du capteur et l'efficacité augmentent linéairement avec le taux de radiation solaire. La grande efficacité est obtenue entre 15h et 16h, alors que le taux de radiation est plus grand à la mi-journée. Le rendement du capteur solaire à air dépend en grande partie du rayonnement solaire et de la géométrie de l'absorbeur. L'efficacité augmente linéairement avec la température de l'air à la sortie. Oueslati et al ont également démontré que la performance thermique d'un capteur solaire à air peut être étudiée par l'approche de Bond-Graph.

Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des sources et des formes d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie solaire. Avec une brève d'explication du principe de fonctionnement de ces énergies dans la production d'électricité, et Les avantages et les inconvénients de chaque énergie, et une recherche bibliographique sur le panneau solaire hybride PV/T a air.

Références

- [1] F. Poitiers, "Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, (2003).
- [2] Corinne Alonso, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie". L'université Paul Sabatier – Toulouse III. (2003).
- [3] Benabda Amina, "Contribution à l'étude d'une alimentation à base de panneaux photovoltaïques avec stockage". Université Badji Mokhtar, Annaba. (2018).
- [4] L. Leclercq, "Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes", thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, (2004).
- [5] A. Azizi, "Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride", thèse doctorat troisième cycle Université Badji Mokhtar, Annaba, (2019).
- [6] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, (2002).
- [7] M. Belhadj, " Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome " Mémoire de magister de l'université de Bechar. (2008)
- [8] R. P ,Mukund, "wind and solar power systems",Ph. D, Pe U. S merchant Marine Academy, Kings point ,New York,CRC Press LLC, (1999).
- [9] Cabal Cédric, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2008).
- [10] H. Née., H. Belghitri, " Modélisation, Simulation et optimisation d'un système hybride eolien –photovoltaïque", universoté de Tlemcen, (2010).
- [11] A. Jellad, "Modélisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque –Eolienne", thèse de doctorat université d'Annaba, Algeria, (2014).

-
- [12] A. t. Singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", Thèse de doctorat université Henri Poincaré, Nancy-I, (2010).
- [13] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batterie/supercapaciteurs", thèse de doctorat de l'université de Poitiers, (2013).
- [14] R. Khezzar, "Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque", revue des Energies Renouvelables. Vol. 13 N° 3, pp. 379-388, (2010).
- [15] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrière interdigitées", thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de Lyons, (2005).
- [16] T. Fogelman, "Système photovoltaïque pour les pays en développement", manuel d'installation et d'utilisation, agence Française pour la maîtrise de l'énergie, (AFME).
- [17] Les Dossiers Environnement de GAZACA «Les énergies renouvelables (partie II – L'énergie Solaire)» : (2006).
- [18] F. Benyarou, "Conversion des énergies » document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001-2002.
- [19] J. A. Gow and C. D. Manning, " Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies", IEE Proceedings on Electric power applications ,Vol 146,N°2, pp 193-200, (1999).
- [20] W. Gao, W. Lin, T. Liu, C. Xia, "Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters". Applied Energy. Vol, 84, 425–441. (2007).
- [21] H. P. Garg, R. Kumar, "Studies on semi-cylindrical solar tunnel dryers: thermal performance of collector". Applied Thermal Engineering. Vol, 20, 115-131. (2000).
- [22] J. A. Duffie, W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes". 2nd ed. New York: Wiley. (1991).
- [23] W. C. Dickson, P. N. Cheremisinoff, "Solar energy technology handbook". New York: Marcel Dekker. (1980).

-
- [24] B. Kilani, S. Dryssi, S. Ben Mabrouk, " Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque- thermique' Première Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electriques au Maghreb- CISTEM 2014. At: Golden Tulip El Mechtel Volume: 3.
 - [25] A. Tiwari, M. S. Sodha, A. Chandra et al, "Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India", Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, (2006).
 - [26] Y. Tripanagnostopoulos, «Aspects and improvements of hybrid photovoltaic thermal solar energy systems», Journal of Solar Energy, Vol. 81, (2007)
 - [27] K. Touafek, M. Haddadi, A. Malek, W. Bendaikha-Touafek, « Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°1, 153-165. (2008)
 - [28] H. Oueslati, S. Ben Mabrouk, A. Mami, « Evaluation of the performance of solar air collector by using Bond Graph approach», International Journal on Modelling and Simulations, Vol. 4 N°5, 2634 – 2643. (2011)

Chapitre

2

Transfert de chaleur

2.1. Introduction

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. En effet, dans certains systèmes réactionnels, c'est la vitesse des échanges de chaleur et non la vitesse des réactions chimiques qui détermine le coût de l'opération (cas de réactions fortement endo- ou exothermique). Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont [1] :

- L'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface,
- L'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur,
- La réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Le transfert de la chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu, même vide, qui les sépare.

Les transferts thermiques jouent un rôle essentiel dans diverses applications technologiques, il devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, calorifugeage, utilisation de l'énergie solaire...) [2].

2.2. Définitions

2.2.1. Température

Dans un objet, les molécules, les atomes qui le constituent bougent extrêmement rapidement, cette agitation désordonnée des particules est appelée agitation thermique. La température mesure le degré d'agitation des particules : plus les molécules d'un objet sont agitées, plus il est chaud. On mesure la température en degrés Celsius, Kelvin ou Fahrenheit [2].

CELCIUS-FAHRENHEIT

$$T_c = \frac{5}{9}(T_f - 32) \quad (2.1)$$

La vitesse absolue d'un point matériel M dans R s'écrit :

$$\vec{V}_{/R}(M) = \vec{V}_{/R}(M \in R_1) + \vec{V}_{/R_1}(M) \quad (2.2)$$

CELCIUS – KELVIN

$$T_k = T_c + 273.15 \quad (2.3)$$

On définit alors en chaque point M d'un corps (solide, liquide ou gazeux) une température, fonction scalaire des coordonnées du point et du temps. $\theta(M, t)$ Le lieu des points ayant à chaque instant la même température est appelé surface isotherme.

2.2.2. Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température.

Nous distinguerons deux cas [3] :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

2.2.3. Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température [3] :

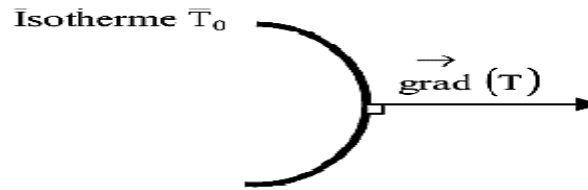


Fig. 2.1 Isotherme et gradient thermique.

$$\overrightarrow{grad(t)} = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.4)$$

Avec : $\vec{n}$ vecteur unitaire de la normale.

$\frac{\partial T}{\partial n}$ Dérivée de la température le long de la normale.

2.2.4. Quantité de chaleur

La chaleur représente l'énergie cinétique des molécules et des atomes de la matière. La mesure des quantités de chaleur, ou calorimétrie, est basée sur la mesure des transferts de chaleur. L'unité de quantité de chaleur est la calorie ou le joule (1 Cal = 4,18 Joules) par définition 1 calorie est la quantité de chaleur pour élever d'un degré un gramme d'eau [2].

2.2.5. Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [3]. Elle est exprimée en $(W.m^{-2})$ [1]:

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (2.5)$$

Où S est l'aire de la surface (m^2).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps, elle exprimée en (W).

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.6)$$

2.3. Formulation d'un problème de transfert de chaleur

2.3.1. Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être [3] :

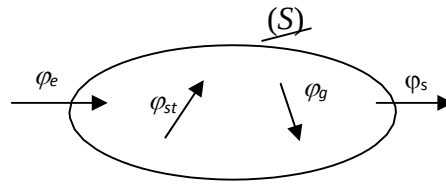
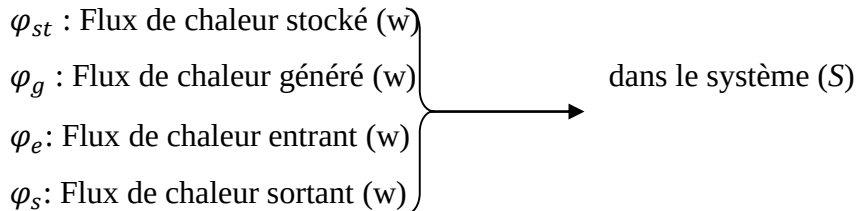


Fig. 2.2 Schéma Système(S) et de son bilan énergétique [3].



On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S), peut être représenté selon l'équation (2.6) :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_{st} + \varphi_s \quad (2.6)$$

2.4. Modes de transfert de chaleur

L'étude des phénomènes thermiques qui accompagnent la propagation de la chaleur et le calcul des valeurs du flux thermique représentent l'objectif fondamental du transfert thermique. Il existe trois modes de transferts thermiques, à savoir par [5] :

- La conduction thermique ou diffusion thermique
- Le rayonnement thermique
- La convection

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques. Cependant, seule la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide [4].

2.4.1. Conduction

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides ou entre les corps solides contigus [7]. Dans lequel l'énergie se transmet par contact direct des molécules sans déplacement de la matière, sous l'influence d'un gradient de température. On distingue deux mécanismes de transmissions de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules, et une transmission par les électrons libre [8] et la conduction dépend du transfert d'énergie entre les molécules au sein d'un matériau solide ou liquide [9].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [3].

Loi de Fourier

Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) propose en 1822 la loi de la conduction connue maintenant sous le nom de loi de Fourier. Cette relation indique que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de la température et se fait dans la direction des températures décroissantes. Dans le cas d'une conduction unidirectionnelle suivant l'axe x [6.]. La figure 2.4 présente le flux de chaleur qui traverse une surface A sur une longueur L grâce à un gradient de température ($\Delta T = T_c - T_f$) [5].

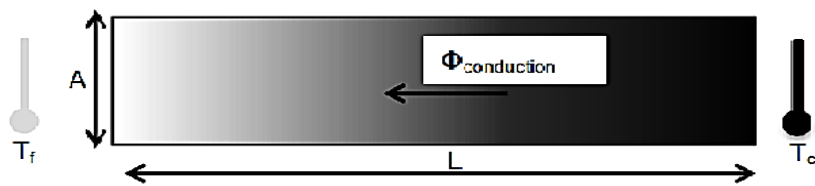


Fig. 2.3 Schéma explicatif de la loi de Fourier [5]

La loi de Fourier s'écrit [3] :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (2.7)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8)$$

Avec : ϕ Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ Conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

x Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S Aire de la section de passage du flux de chaleur

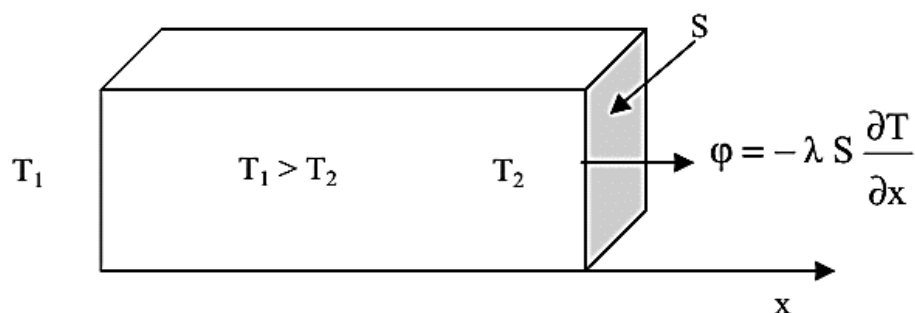


Fig. 2.4 Schéma du transfert de chaleur conductif

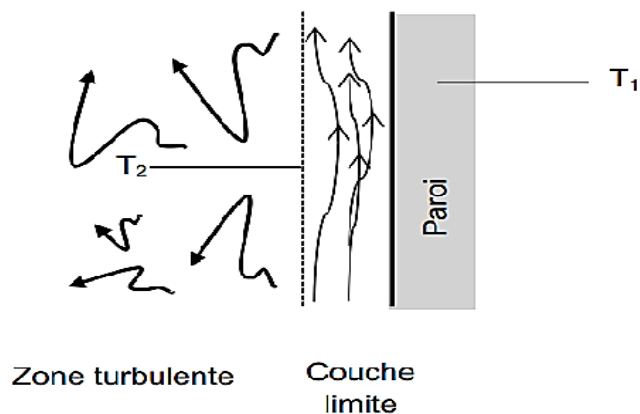
Dans le tableau 1.1 les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants [6].

Tableau 1.1 Conductivité thermique de certains matériaux [6].

Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)	Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

2.4.2. Convection

La convection est un processus physique de transmission de chaleur qui s'appuie sur un mouvement de matière. Celle-ci n'est possible que dans les milieux liquides et les gaz [5]. Dans ce cas le phénomène thermique est compliqué par des déplacements de matière et au transfert de chaleur se superpose le transfert de masse. Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide (ou agrégats) ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques (on parle alors de convection forcée) [10]. La figure 2.5 présente une paroi à la température T_1 et un fluide à température T_2 . Quel que soit le régime d'écoulement, il existe au voisinage immédiat de la paroi une zone d'écoulement laminaire appelée couche limite.

**Fig. 2.5** Schéma détaillé de transfert de chaleur par convection [5]

Le flux de chaleur transmis par convection, entre cette paroi et le fluide est décrit selon la loi de Newton définie par l'équation (2.9).

$$\varphi = hS(T_2 - T_1) \quad (2.9)$$

Le flux de chaleur transmis est donné par la relation dite loi de Newton.

Loi de Newton

Ce mécanisme de transfert défini par l'équation (2.10) [3] :

$$\varphi = hS(T_p - T_\infty) \quad (2.10)$$

Avec :

φ Flux de chaleur transmis par convection (W)

h Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

T_p Température de surface du solide ($^\circ\text{C}$)

T_∞ Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ\text{C}$)

S Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide [3] .

2.4.2.1. Différents types de convection

Types de convection qui peuvent être catégorisés comme suit :

- convection naturelle ou libre
- convection forcée
- convection mixte

2.4.2.1.1. Convection naturelle

La convection libre ou naturelle si le mouvement du fluide n'est dû qu'à des variations de masse volumique. Ces gradients de masse volumique sont le moteur de l'écoulement du fluide. Est basé sur le fait qu'il y'a déplacement de matière : il ne concerne donc que les fluides (liquides et gaz). Contrairement à la conduction où le transfert de chaleur se fait « par contact » Ainsi, la compréhension des mécanismes de convection naturelle est importante pour accéder à des modélisations, et donc des prédictions, des effets sur l'environnement (et par là même dans les équipements) [11].

Applications de la convection naturelle :

Les applications de convection naturelle sont nombreuses ;

- Chauffage d'une maison

- Formation de courants océaniques
- Formation des vents dans l'atmosphère.

2.4.2.1.2 . Convection forcée

La convection forcée se produit le mouvement à cause d'un procédé mécanique, indépendant des phénomènes thermiques par exemple une pompe ou un ventilateur c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides [12].

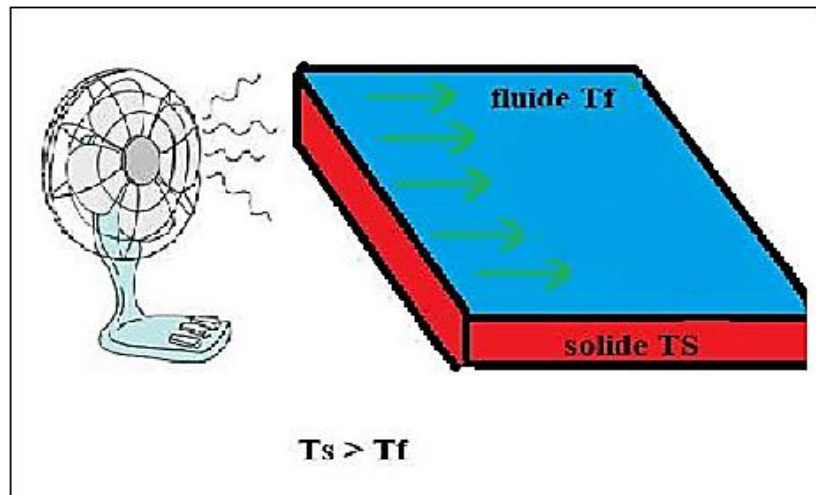


Fig. 2.6 Schéma de la convection forcée [12].

2.4.2.1.3. Convection mixte

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. Le transfert de chaleur par convection mixte et l'écoulement de fluide dans les cavités sont des sujets importants d'investigation en raison de leur effet sur de nombreuses applications d'ingénierie et des phénomènes naturels tels que l'énergie thermique, les industries pétrochimiques, l'aérospatiale, la construction et les capteurs solaires, etc. De plus, les problèmes de convection mixte sont caractérisés par trois paramètres de surveillance non dimensionnels, à savoir Numéro de Reynolds Re , le numéro de Grashof Gr et le numéro de Prandtl Pr [15].

2.5. Expression des nombres sans dimensions

- **Nombre de Reynolds**

Ce nombre joue un rôle fondamental dans la caractérisation de l'écoulement, il est défini par l'expression suivante [14] :

$$Re = \frac{u_m d}{\nu} \quad (2.11)$$

Avec ν est viscosité cinématique du fluide

V : est une vitesse caractéristique de l'écoulement [m/s]

D : est une des dimensions géométriques [m]

ν : est le coefficient de viscosité cinématique du fluide [m²/s].

– Si $Re < 2400$ on est en régime laminaire.

– Pour des vitesses plus élevées, $Re \gg 2400$, le régime turbulent apparaît

- **Nombre de Nusselt**

Ce nombre caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi, il est défini comme suit [14]:

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (2.12)$$

- **Nombre de Prandtl**

Ce nombre est entièrement caractéristique du fluide considéré [14]. L'inverse du nombre de Prandtl est appelé par les « thermiciens » français : le nombre de Stanton (S).

Dans le cas de gaz, Pr est sensiblement constant avec la pression et la température et ne varie qu'avec les changements thermiques de $C_p(T)$.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.13)$$

2.4.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est une énergie émise par la matière à une température supérieure au zéro absolu (soit -273,15 °C) sous forme de photons ou d'ondes électromagnétiques (émission qui se produit en surface pour les solides et les liquides opaques, et dans tout le volume pour les gaz ou les liquides transparents). Ces ondes dépendent de la température du corps rayonnant et ne nécessitent aucun support matériel. Pour se propager ; en fait, le transfert thermique radiatif est plus élevé dans le vide. Le rayonnement thermique se situe principalement dans le domaine spectral de l'ultraviolet à l'infrarouge long ce qui correspond approximativement aux longueurs d'ondes de 0.38 à 10³ μm [13]. Le transfert thermique par rayonnement est régi par la loi de Stefan– Boltzmann qui établit que la densité surfacique de flux d'énergie rayonnée par un corps noir est proportionnelle sa température superficielle absolue élevée à la puissance quatre.

- **Loi de Stéfán-Boltzmann**

Ce mécanisme de transfert défini par l'équation (2.11) [3] :

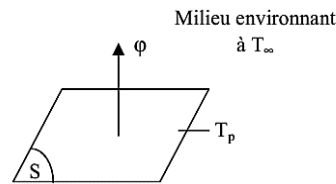


Fig. 2.7 Schéma du transfert de chaleur radiatif

$$\varphi = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (2.10)$$

Avec :

φ Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ε_p Facteur d'émission de la surface

T_p Température de la surface (K)

T_∞ Température du milieu environnant la surface (K)

S Aire de la surface (m^2)

2.6. Flux de chaleur lié à un débit massique

Lorsqu'un débit massique $\dot{m}$ de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , on doit considérer dans le bilan (2.7) un flux de chaleur entrant correspondant [3] :

$$\varphi_e = \dot{m} C_p (T_1 - T_2) \quad (2.10)$$

Avec :

φ_e Flux de chaleur entrant dans le système (W)

$\dot{m}$ Débit massique ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

C Chaleur spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_1, T_2 Températures d'entrée et de sortie (K)

2.7. Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante et en l'absence de changement d'état) [3] :

$$\varphi_{st} = \rho V_c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

Avec :

φ_{st} Flux de chaleur stocké (W)

ρ Masse volumique (kg m^{-3})

V Volume (m^3)

C Chaleur spécifique ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T Température (K)

t Temps (s)

Le produit ρV_c est appelé la capacitance thermique du corps.

2.8. Génération d'énergie

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme [3].

$$\varphi_g = \dot{q} \cdot V \quad (2.12)$$

Avec :

φ_g Flux d'énergie thermique générée (W)

$\dot{q}$ Densité volumique d'énergie générée (W m^{-3})

V Volume (m^3)

Référence

- [1] H. Michel, 'Introduction aux phénomènes de transfert'. Université de Technologie Compiègne. France, (1994-1998).
- [2] K. Foudil, 'Polycopié de Cours transfert thermique'. Université Mustapha Stambouli de Mascara, (2017).
- [3] Y. Jannot, 'Cours : transferts thermiques', école des Mines Nancy, (2012).
- [4] S. Klaleche,. A. Madjour,' Simulation Numérique de la Convection Forcée Entre Deux Disques En Présence D'un Nano fluide', université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2015).
- [5] H. GIDIK, 'thèse de doctorat : Réalisation d'un fluxmètre thermique à gradient tangentiel de température à paroi auxiliaire textile intégrant des fils thermoélectriques : application à la mesure des transferts thermiques et hydriques', l'université des sciences et technologies de lille, France, (2015).
- [6] B. Grandjean, 'cours transfert de chaleur'. Université Laval à Québec. (2013).
- [7] M. L. Dadda,' Étude de la convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée', Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, (2016).
- [8] A. Aouchiche,. A. Haddadi, 'étude numérique du refroidissement d'une plaque chauffée par un jet l'impactant dans un canal', université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2015).
- [9] A.K.Haghi,' Heat&mass transfer in textiles', WSEAS press, Second edition, (2011).
- [10] S. Bensaada., M. T. Bouziane, 'Cours : transfert de chaleur', l'université Biskra.
- [11] B. Lahcen., L. Yves,. B. Brahim, ' Instabilité thermo convective d'un écoulement Poiseuille-Rayleigh-Bénard-Marangoni dans un canal ouvert à surface libre', thèse de doctorat Université Ibn Zohr-Agadir. (2012).
- [12] L. Souiadi., Z. Nemouchi., Kadja, 'La convection mixte dans un canal horizontal muni de blocs chauffés', mémoire de magister l'université kassdi merbah – Ouargla . (2013).

-
- [13] C. Mahboub, 'Etude des phénomènes de transfert thermique' dans les échangeurs de la chaleur destinés aux applications solaires', 'Thèse Phd, Université Mohamed Khider –Biskra. (2016).
 - [14] F. Kreith, 'Transmission de la chaleur et Thermodynamique' ,Université du Colorado ,(1967).
 - [15] H. Faid., K. Cherief, ' Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité différentiellement chauffée remplie de nano-fluide ', université Mohamed Boudiaf - m'sila. (2019).

Chapitre

3

Système Hybride PV/TH -Réalisation du prototype d'un panneau solaire a air-

Dans ce chapitre, on présente les résultats des essais effectués sur le panneau solaire PV hybride et panneau solaire simple. En premier lieu, on fait une description sur le panneau solaire PV hybride, ensuite, on donne la méthode de réalisation du prototype expérimental en se référant aux paramètres mesurés nous permettent d'appuyer valoriser notre capteur, pour une éventuelle utilisation de notre panneau solaire PV hybride dans une action de chauffage des bâtiments ou de séchage de produits agro- alimentaires.

3.1 Introduction

Les panneaux solaires PV sont une solution pour les endroits isolés, non raccordés au réseau électrique et pour rendre des installations autonomes. L'énergie solaire peut également s'avérer très avantageuse dans le cas d'installations chez des particuliers. Cependant, les panneaux solaires ne sont actuellement pas rentables pour une production à grande échelle, à cause de nombreuses limites. Dans l'utilisation de l'énergie solaire, la faible densité de l'énergie et le caractère intermittent de cette dernière est due aux variations des conditions climatiques.

Un capteur photovoltaïque thermique (PV-T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue sous forme de chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV sont connectées à un échangeur de chaleur dans lequel circule un fluide caloporteur. Plusieurs configurations de capteur existent et diffèrent selon la nature du fluide

utilisé (eau ou air), le type d'absorbeur (concentrateur, plan,...) et selon le type de systèmes auxquels il est raccordé (préchauffage eau chaude, eau chaude sanitaire, chauffage domestique, ...). [1].

3.2 Système solaire hybride : PV/T

Capteur solaire photovoltaïque (PV) couplé à un système thermique (T), qui permet le refroidissement du module PV.

En effet, on sait que le rendement PV diminue avec l'augmentation de la température. De ce fait, la combinaison d'un système thermique permet d'améliorer les performances.

3.3 Principe du capteur PV/T

La principale caractéristique d'un système solaire hybride PV/T est la conversion de rayonnement solaire en électricité et en chaleur au même temps et elles sont généralement tenues au même endroit, ce qui rend la combinaison de ces systèmes particulièrement intéressante, via le procédé d'extraction de chaleur du PV/T. La cellule photovoltaïque est activement refroidie ce qui permet de stabiliser ces performances électriques élevées (le rendement total de l'énergie produite par unité de surface est augmenté); un mètre carré de surface de PV/T donne plus d'électricité et de la chaleur par rapport à un mètre carré de module photovoltaïque et d'un mètre carré d'un capteur solaires thermiques séparément installés, les systèmes combinés permettent une apparence plus uniforme sur les toits et diminuée des coûts de l'installation [2].

3.4 Types de systèmes PV/TH

Il existe différents types de systèmes d'énergie solaire hybrides qui dépendent d'un processus distinct.

3.4.1 Panneaux solaires hybrides PV/TH à eau

Dont les capteurs solaires sont dotés d'un échangeur thermique à eau. L'eau chaude est alors utilisée pour l'eau chaude sanitaire.

3.4.1.1 Principe de fonctionnement

Les capteurs dits hybrides à eau sont des capteurs photovoltaïques pourvus d'un échangeur de chaleur à eau permettant à la fois de refroidir le panneau et de produire de l'eau chaude. Cette eau chaude peut être destinée à la production d'eau chaude sanitaire (schéma ci-contre) voire de chauffage. Cette solution a l'avantage de combiner production d'électricité et de chaleur sur un seul et même panneau. Le refroidissement des panneaux grâce au circuit d'eau permet une légère augmentation de leur rendement par rapport à une

installation intégrée « classique ». Pour augmenter la puissance électrique et optimiser la rentabilité, des panneaux photovoltaïques classiques de même apparence sont généralement mis en complément aux panneaux hybrides.

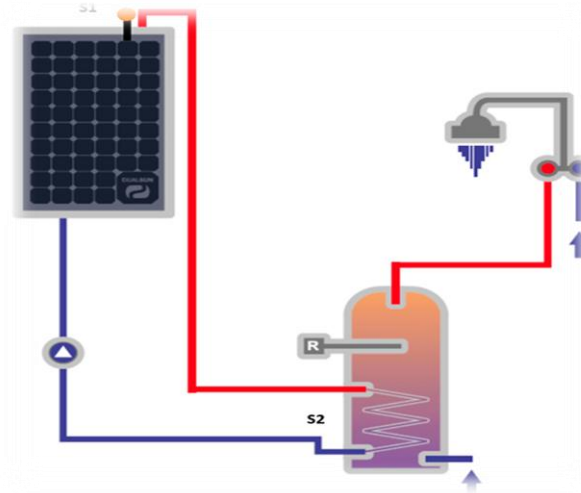


Fig. 3.1 Panneau solaire hybride PV/T à eau

3.4.2 Panneaux solaires hybrides PV/TH à air

Ces Panneaux récupèrent l'air chaud des panneaux solaires pour chauffer la maison : il s'agit des panneaux aérovoltaiques

3.4.2.1 Principe de fonctionnement

Les systèmes photovoltaïques sont des collecteurs photovoltaïques, dont la face arrière est ventilée pour la récupération et la diffusion de l'air chaud dans la maison et / ou entrée d'air dans un ballon thermodynamique. La ventilation du panneau permet une ventilation accrue efficacité par rapport à une installation tout-en-un `` classique "

Les panneaux solaires aérovoltaiques combinent deux technologies :

- La technologie photovoltaïque pour produire de l'électricité
- La technologie thermique pour produire de la chaleur.

C'est également ce que l'on appelle des panneaux solaires hybrides PV/T à air.

L'aérovoltaique est un mixte de panneaux solaires photovoltaïque qui produisent de l'électricité et de panneaux solaires thermique pour chauffer l'habitation (panneaux solaires 2 en 1)

Lorsqu'un panneau photovoltaïque est éclairé par le soleil, il chauffe. En moyenne, un panneau solaire produit 3 fois plus de chaleur au niveau de sa face arrière que d'électricité, et ce quelle que soit la saison.

L'avantage du panneau aérovoltaique, c'est qu'il récupère cette chaleur. La création de chaleur est en plus amplifiée grâce à un sas placé sous les capteurs solaires.

L'air chaud est récupéré par un module de ventilation et est ensuite diffusé dans l'habitation grâce à un système de VMC.

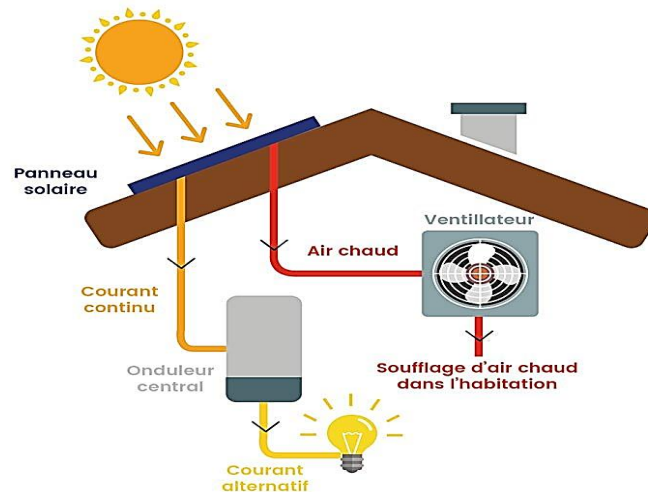


Fig. 3.2 Panneau solaire hybride PV/TH à air

De plus, grâce aux propriétés du silicium présent dans les cellules photovoltaïques, la température sous les panneaux solaire devient plus fraîche dans la nuit. En effet, la silice est le principal composant du sable.

On l'a peut-être remarqué sur la plage :

- La journée au soleil le sable est très chaud
- À l'inverse la nuit, le sable est très froid.

C'est grâce à cette propriété que les panneaux aérovoltaiques diffusent de l'air plus frais en été, de quoi rafraîchir de quelques degrés votre logement la nuit. Leur durée de vie peut aller jusqu'à 40 ans.

3.5 Avantages et inconvénients de l'aérovoltaique

3.5.1 Avantages de l'aérovoltaique

En utilisant les 2 faces d'un panneau solaire, l'aérovoltaique apporte 4 fonctions au lieu d'une pour le photovoltaïque basique :

1 / Production d'électricité

- Production d'électricité et climatisation (appoint)
- Performance (Le système de refroidissement des panneaux photovoltaïque permet d'augmenter la production d'électricité de 10% par rapport à des panneaux photovoltaïques classiques.

2 / Production de chauffage

- Jusqu'à 50 % d'économie de chauffage
- Récupérer de la chaleur normalement perdue sous les panneaux
- Réduction de votre facture énergétique
- Profiter de la gratuité de l'air ambiant

3 / Rafraîchissement nocturne

- Chaleur en hiver...
- Rafraîchissement en été
- Équipement combinant les deux fonctions

4 / Ventilation

- Ventilation par insufflation
- Qualité de l'air
- Un apport massif d'air neuf et purifié

3.5.2 Inconvénients de l'aérovoltaïque

- L'aérovoltaïque est un produit pas très ancien, nous disposons donc de peu de retour d'expérience de particuliers qui ont installé un système aérovoltaïque avec beaucoup de questions à se poser..... (Chauffage appoint efficacité, besoin de combles, rafraichissement ...).

- Coût très élevé

3.6 Utilisation des panneaux hybride

- Chauffage central pour les maisons, les poulaillers et les élevages
- Réfrigération et climatisation
- Chauffage à l'eau
- Séchage des aliments

3.7 Tableau récapitulatif

Tableau 3.1 Différence entre les types de panneaux solaires

	Fonction	Principal avantage	Principal inconvénient
Photo-voltaïque	Produire de l'électricité	25 à 45 % d'économies sur votre facture d'électricité / revente totale pour obtenir un revenu supplémentaire	Baisse de rendement au-dessus de 25°C
Thermique	Produire de l'eau chaude	Réduction facture énergétique de 15 %	Risque de surchauffe en été + besoin d'un autre système de chauffe-eau
Aéro-voltaïque	Produire de l'air chaud et de l'électricité	4 fonctions réunies en 1 système	Prix encore très élevés + entretien important et coûteux
Hybride	Produire de l'électricité et de l'eau chaude	Production d'électricité et d'eau chaude sur une même surface	Prix très élevés

3.8 Description et fonctionnement du dispositif expérimental

3.8.1 Réaliser et caractérisation d'un capteur hybride (PV/TH)

Notre travail consiste à réaliser et à caractériser un panneau solaire hybride (PV/TH) afin de l'utiliser pour le séchage des produits agricoles. Le panneau solaire hybride utilisant de l'air comme fluide caloporteur a été évalué expérimentalement. On présente les résultats des essais effectués sur le panneau solaire hybride. En premier lieu, on donne la méthode de réalisation du prototype expérimentalement, pour une éventuelle utilisation de notre panneau solaire hybride (PV/TH) dans une action de chauffage des bâtiments ou de séchage de produits agro-alimentaires. Une brève synthèse bibliographique des panneaux solaires hybrides ont été présentée dans le premier chapitre.

3.8.2 Description du système PV/TH

Ce capteur hybride de nouvelle conception est constitué essentiellement d'un module photovoltaïque de type « Solo Line 100 » en technologie monocristallin et un vitre avec une épaisseur de 4 mm collé au-dessous du module photovoltaïque.

Un fluide caloporteur « l'air » peut circuler à l'intérieur entre la face arrière du panneau photovoltaïque et la vitre pour l'extraction de la chaleur absorbé par les cellules solaires.

3.8.3 Dimensions du capteur solaire hybride PV/TH (Aérovoltaique)

Le tableau suivant présente les dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/TH utilisé dans cette réalisation :

Tableau. 3.2 Dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude expérimentale

Longueur	124 Cm
Largeur	59 Cm
Epaisseur	18 Cm

3.8.4 Panneau photovoltaïque

Dans le tableau 3.2, on présente les caractéristiques électriques et les caractéristiques mécaniques du module solaire« Solo Line 100» utilisé dans notre étude.

Tableau. 3.3 Caractéristiques du module solaire« Solo Line 100»

Caractéristiques électriques	
Puissance maximale P_{max} (Wc)	100
Courant de court-circuit I_{cc} (A).	5,87
Tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	21,60
Courant Optimum I_{op} (A)	5,39
Tension Optimum V_{op} (V)	18,7
Caractéristiques mécaniques	
Type de cellules	monocristallin
Nombre de cellules	36
Nombre de cellules 36 Dimensions	120×54×5 Cm ³
Poids	9,0 kg

3.8.5 Méthode de fabrication

Le capteur solaire à air étudié est un simple panneau solaire de puissance 100W, ces dimensions sont 120 cm de longueur, 54 cm de largeur, et 5 cm d'épaisseur. Sa construction constituée des éléments suivants : Bois, scie électrique, liv angles, Peinture noire, Foret, Polystyrène, Aluminium, et Adhésif.

Les processus de fabrication des panneaux solaires photovoltaïques hybride passent par quatre étapes comme suit :

Première étape : Nous coupons le bois avec une scie électrique en 5 morceaux pour former deux morceaux de dimension $(120 \times 18 \times 2)$ Cm³, deux morceaux de $(54 \times 18 \times 2)$ Cm³, et une seule pièce : (120×54) Cm³, ensuite, on peigne les blocs de bois, enfin, on fixe les pièces pour former une boîte en bois rectangulaire dimensionnelle $(124 \times 59 \times 18)$ Cm³ suivant les dimensions de panneau solaire utilisé.



Fig. 3.3 Coupure et préparation de bois utilisé suivant les dimensions du panneau



Fig.3.4 formation d'une boîte en bois rectangulaire

Deuxième étape : Nous formons quatre trous dans la partie inférieure (coté bas du boîte rectangulaire), de sorte que chaque trou a un diamètre de 6 cm, et entre le trou et l'autre une distance de 7 cm pour entre l'air.

A l'inverse, on perce un trou latéral d'un diamètre de 6 cm dans la partie supérieure pour sorte l'air chaud.



Fig. 3.5 formation des trous dans la partie inférieure et supérieure de boîte rectangulaire

Troisième étape : On met le polystyrène à l'intérieur de la planche (boîte rectangulaire) sur tous ses côtés comme isolation thermique pour rôle de limiter les déperditions calorifiques, puis on le fixe avec du ruban d'aluminium.



Fig. 3.6 Fixation de polystyrène et l'aluminium



Fig. 3.7 Boîte en bois prêt

Quatrième étape : On pose le panneau solaire simple sur la boîte en bois et l'installons prêt pour avoir un panneau solaire aérovoltaïque hybride.

L'objectif de cette étude est double, augmenter l'efficacité électrique du capteur, c'est-à-dire son rendement électrique, et au même temps utiliser cette chaleur pour le séchage des produits agro-alimentaires. La figure suivante montre le panneau solaire hybride de notre étude prêt à testé et comparé avec un panneau solaire simple, après le test doit être configuré à la chambre de séchage.



Fig. 3.8 Banc d'essai du capteur solaire PV/TH hybride à air

3.9 Résultats et Discussions

L'étude expérimentale nous a permis de déterminer les caractéristiques électriques et thermiques du panneau solaire hybride PV-TH. Ces données ont été vérifiées au moyen de plusieurs expériences sur la région de Annaba ou on a fait le stage pratique, on a étudié la variation (courant/tension) du module PV et PV/TH avec la température des cellules. On a fait une comparaison entre notre panneau solaire hybride PV/TH et un panneau solaire simple PV. Les deux panneaux sont orientés vers le sud avec un angle d'inclinaison 29° (cite d'Annaba) au même temps. Le principe est de faire prélever chaque fois les valeurs de la tension et le courant durant 1 heure en fonction de temps et la température. C'est à dire les acquisitions des mesures sont faites pour des pas de temps de soixante (60) minutes. Cette maquette permet de prélever plusieurs points de mesures. Les figures (3.9), (3.10), (3.11) illustrent les variations de courant et de tension suivant un moyen d'éclairement solaire pendant une heure ensoleillé $G = 893.4 \text{ W/m}^2$ mais caractérisée par des passages nuageux. Les mesures sont faites le 27/03/2021 dont la température ambiante est de l'ordre de 15°C , l'humidité $H = 67\%$, avec une vitesse de vent $V = 18 \text{ Km/h}$.

Ces figures montrent la relation de la caractéristique courant et tension avec la variation du temps pour rayonnement solaire moyen G . La lumière solaire se transforme en courant continu grâce à un ensemble de cellules photovoltaïques. Ces courants et tensions délivrés dépendent de la puissance du rayonnement reçue, G . Alors, lorsque l'éclairement augmente les courants augmentent au cours de temps dans les deux panneaux (PV et PV/TH); d'où le courant délivré est très important pour une valeur d'ensoleillement égale à 890 W/m^2 . Selon les figures (3.9) et (3.10), par contre, lorsque l'éclairement augmente les tensions diminuent, on peut aussi déduire que la température intervient dans le réchauffement des cellules photovoltaïques ou encore dans la chute de leur rendement. On remarque bien que la variation du courant est plus importante que la variation de tension lorsque l'ensoleillement augmente. Pendant une tranche minutaire de 6mn, la température diminue façon linéaire, cela est dû au réchauffement de panneau solaire PV/TH, qu'est en charge par rayonnement incident.

La figure (3.14) permet de faire connaître la température d'entrée (entre 31.7°C et 36.1°C). Cette augmentation de température peut être exploitée par la suite pour le chauffage des locaux ou le séchage des produits agro-alimentaires. La variation entre les températures d'entrée et de sortie de panneau PV/TH met en évidence le rôle du canal d'air qui permet de refroidir l'ensemble des cellules (l'absorbeur) par effet de convection.

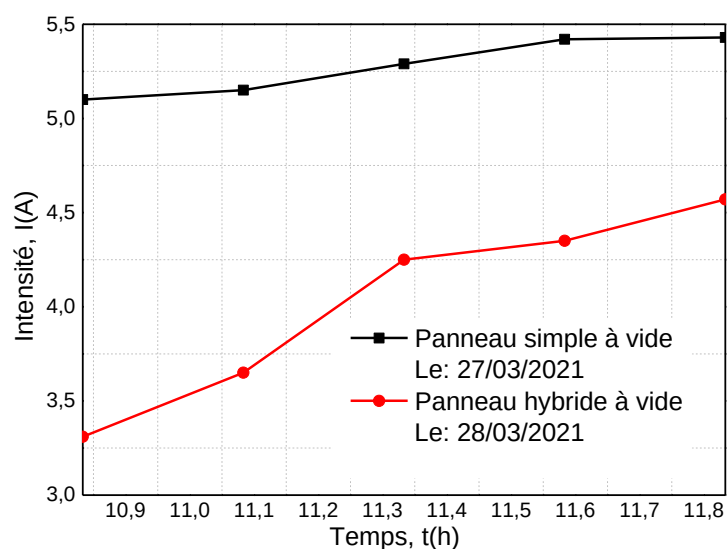


Fig. 3.9 Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV et PV/TH à vide

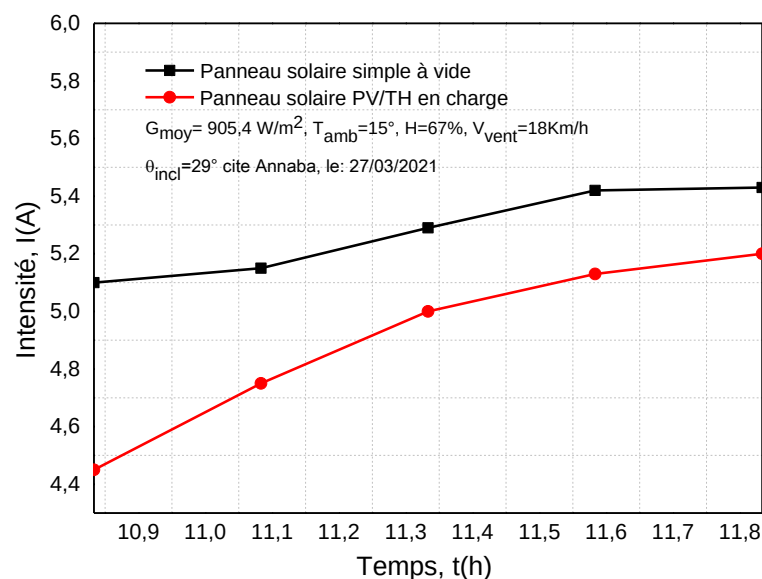


Fig. 3.10 Variation de l'intensité en fonction de temps pour les deux panneaux PV à vide et PV/TH en charge

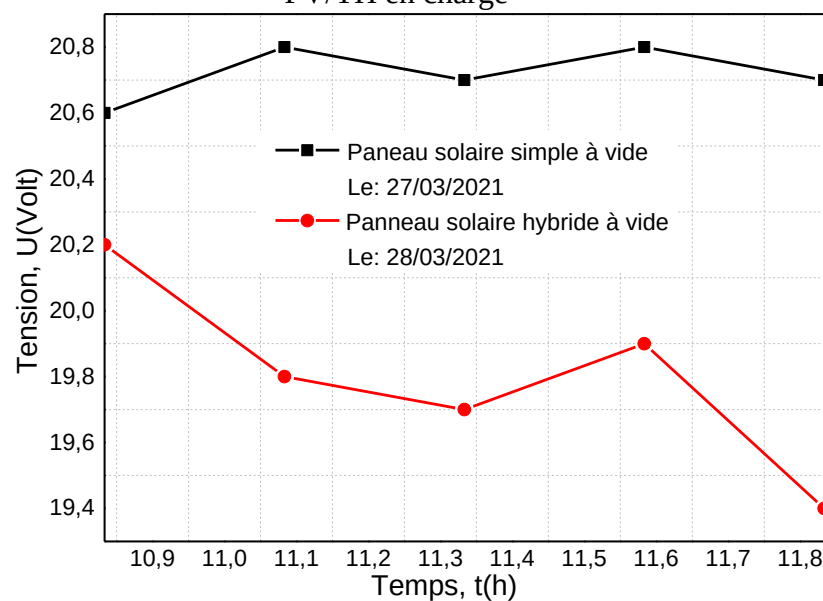


Fig. 3.11 Variation de la tension en fonction de temps pour les deux panneaux à vide

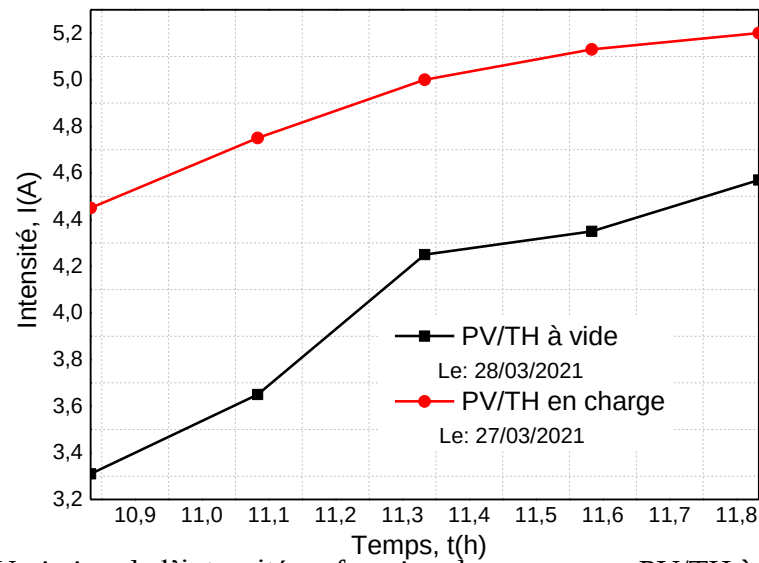


Fig. 3.12 Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV/TH à vide et en charge

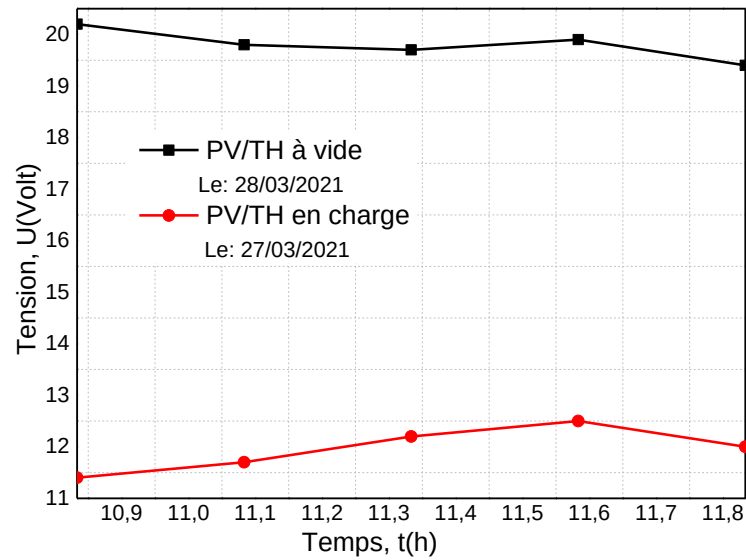


Fig. 3.13 Variation de la tension en fonction de temps pour PV/TH à vide et en charge

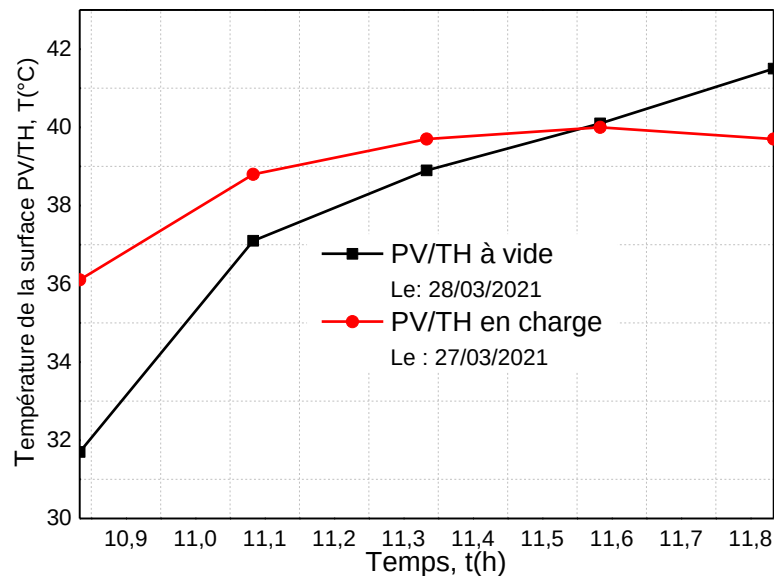


Fig. 3.14 Variation de la température de la surface de l'absorbeur de PV/TH en fonction de temps à vide et en charge

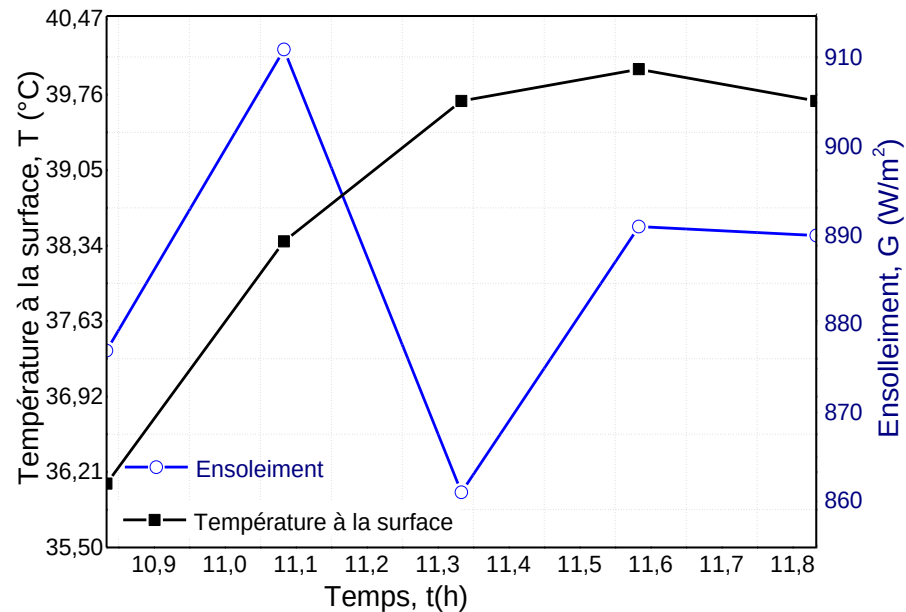


Fig. 3.15 Variation de la température à la surface de l'absorbeur de PV/TH en charge selon le temps et l'ensoleillement. (Mesures du 27/03/2021)

3.10 Conclusion

On peut conclure, selon les figures précédentes, que la variation journalière de l'ensoleillement nous montre bien que l'irradiation maximale est atteinte aux alentours de 11h – 11h :10mn.

Cette étude ce fait dans une zone humide (cite d'Annaba) permet de retirer les remarques suivantes:

- La température à la surface du panneau solaire hybride PV/TH est une résultante de la température ambiante ainsi que de l'intensité du rayonnement captée par l'absorbeur de PV/TH.
- Le module thermique permet de faire élever la température d'entrée (entre 31.7°C et 36.1 °C). Cette augmentation de température peut être exploitée par la suite pour le chauffage des locaux ou séchage des produits agro-alimentaires.
- La variation entre les températures d'entrée et de sortie met en évidence le rôle du canal d'air qui permet de refroidir l'ensemble des cellules (l'absorbeur) par effet de convection.

La combinaison de panneaux photovoltaïques avec un collecteur d'air thermique améliore ses performances. L'air chaud peut être utilisé dans diverses activités telles que le séchage agricole, le chauffage domestique, etc., il est donc utile de compléter les avantages de l'énergie solaire. Un mélange d'énergies où l'énergie solaire peut être utilisée au maximum en plus d'autres énergies renouvelables où les besoins énergétiques peuvent être entièrement produits par son utilisation.

Références

- [1] P. Dupeyrat, H. Pabiou, G. Kwiatkowski, C. Ménézo, “Optimisation de la conversion solaire grâce au concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique“. Conférence SFT. (2011).
- [2] A. Khelifa, ‘En Contribution à la conception et modélisation d’un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT’. (2017).

Chapitre

4

Conception, réalisation et expérimental d'un déshydrateur hybride

Dans ce chapitre, on présente la mise au point d'un prototype de séchoir solaire indirect muni d'un appoint électrique en convection forcée, composé de deux parties essentielles : Le panneau solaire aérovolaïque, la chambre de séchage et le stock de régulation. Le séchage solaire des produits agroalimentaires reste souvent un maillon mal maîtrisé et excessivement coûteux pour les producteurs. La teneur en eau des produits doit être diminuée rapidement pour conserver les principes actifs, mais à basse température pour ne pas les détériorer. L'aspect pratique consiste à la conception, la réalisation et l'expérimentation du séchoir solaire direct à chauffage partiellement solaire fonctionnant en convection forcée. Ce déshydrateur est construit presque entièrement en matériaux locaux et est utilisable dans les conditions optimales à partir de l'énergie solaire. Le processus d'étude a été réalisé dans deux régions différentes, la wilaya d'Annaba, qui se caractérise par une humidité élevée et des températures basses, contrairement à la wilaya de M'sila avec une faible humidité avec une chaleur élevée. On a décrit l'appareil, son procédé de fabrication et ses pièces, avec une étude de la température et de l'humidité de l'appareil pendant le processus de séchage.

4.1 Introduction

Le séchage est une opération qui consiste 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 couplés. Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas forcément sa vaporisation – pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. – et qu'on appellera d'une façon générale « déshydratation ». [1]

4.2 Déshydratation

La déshydratation est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figues, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) .[1]

4.2.1 Classification des séchoirs solaires

Les séchoirs solaires pouvant être classifiés en deux grandes catégories :

4.2.1.1 Séchoirs solaires passifs

Ce type de séchoir utilise seulement des sources d'énergie renouvelable et peut être, à leur tour, classifié en trois catégories :

- Séchoirs passifs indirects.

- Séchoirs passifs directs.
- Séchoirs passifs mixtes.

4.2.1.2 Séchoirs solaires actifs

Ce type de séchoir emploie une source non renouvelable en tant que source de chaleur supplémentaire ou comme source auxiliaire. [2]

Les séchoirs solaires peuvent également être classifiés en séchoirs à convection naturelle et séchoirs solaires à convection forcée. Dans les séchoirs solaires à convection naturelle, le flux d'air est généralement établi par courant d'air induit. Dans les séchoirs solaires à convection forcée, le débit d'air est fourni en utilisant un ventilateur entraîné par un moteur électrique /module solaire, soit par combustible fossiles [2].

4.2.2 Modes de fonctionnement

Les différents modes de fonctionnement est conception typique de séchoirs solaire sont présentés sur la figure 4.1.

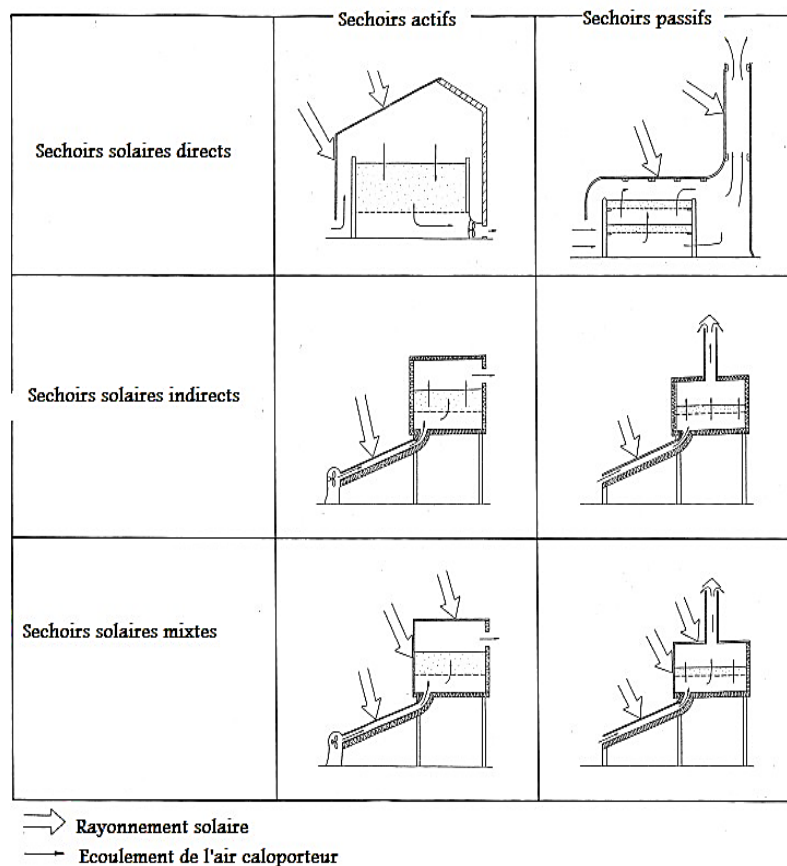


Fig. 4.1 Différents types de séchoirs solaires [2].

4.3 Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire

L'évaporation, éléments de base du séchage des aliments, est influencée par trois données météorologiques principales [3] :

- L'humidité atmosphérique
- La température du milieu ambiant
- La vitesse du vent

D'autres phénomènes agissent d'une façon moins marquée ou n'ont pas la même importance pratique ce sont [3] :

- La nébulosité
- La radiation solaire.

En fin, une troisième catégorie comprend des facteurs dont l'action est indirecte, mais présente un gros intérêt technique ce sont [3] :

- La pluviométrie
- Les orages.

4.4 Conditions nécessaires pour obtenir la valeur nutritionnelle la plus élevée du produit séché

Afin d'obtenir un produit ayant une meilleure valeur nutritionnelle, certaines conditions doivent être remplies, notamment [4] :

- Évitez un blanchiment excessif.
- Le processus de séchage doit avoir lieu dans les plus brefs délais sans augmenter la température.
- Ne mettez pas de grandes quantités d'un produit agro-alimentaire à sécher dans un sèche-linge.
- Placez les morceaux de nourriture sur des plateaux de séchage, en laissant un espace entre chaque morceau.
- Maintenez une bonne circulation d'air dans le sèche-linge.
- Effectuez un processus de séchage lorsque l'humidité relative de l'air est faible.
- Vérifiez les produits de temps en temps pour vous assurer qu'ils sont secs.
- Stockez les produits secs dans des conteneurs qui ne permettent pas à l'humidité ou à l'oxygène de pénétrer à l'intérieur.

- Placez les produits déshydratés dans un endroit frais, sec et sombre.

4.5 Stockage des produits séchés

La période de stockage des produits après l'achèvement du processus de séchage dépend de nombreuses conditions, notamment [5] :

- le type de nourriture.
- Facteurs liés au processus de séchage.
- Méthode d'emballage et d'emballage des produits.
- Emplacement de stockage.

4.6 Domaines d'utilisation du séchage

Si le processus de séchage consomme beaucoup d'énergie, ce processus est impliqué dans de nombreuses industries. Dans de nombreux cas, les produits en question ont un rôle proche dans la vie quotidienne, et ils peuvent

La procédure de sélection du processus de séchage pour diverses raisons :

- Maintenez le produit faiblement humide.
- Le liquide doit être éliminé pour continuer le processus de séchage.
- Le produit a une bonne texture et une bonne finition grâce à l'élimination de l'eau

La plupart des produits que nous consommons subissent le processus de séchage, à titre d'exemple :

- L'industrie alimentaire comme les viandes fumées, le fromage et les légumes.
- Industrie des pâtes et papiers dans ce type d'industrie, le papier est obtenu par séchage de la pâte
- En rouleaux rotatifs chauffés.
- Fabrication de bois à haute température d'humidité lors de sa coupe.
- Industrie des matériaux de construction et de la céramique comme les briques, les carreaux.
- Biotechnologie et industrie pharmaceutique [6].

4.7. Matériel et méthode de mesure

4.7.1 Description du système de déshydrateur et leurs composants

Le système étudié, présenté en fig. 4.2 et fig. 4.3 est un séchoir convectif partiellement solaire constitué des éléments suivants :

*Une unité de production d'air chaud constituée d'un panneau solaire hybride à air, de surface 0.648 m^2 , incliné de 29° (latitude de la ville de Annaba), et incliné de 32° (latitude de la ville de M'sila) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. Le couvert de panneau solaire hybride est en tôle al est peint en noir. L'isolation thermique, d'épaisseur 2 mm, est en polystyrène.

*Une chambre de séchage (Cuissière) c'est une pièce de de hauteur utile 63 cm, de profondeur 52 cm et de largeur 61 cm. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polyuréthane de 50 mm d'épaisseur. A l'intérieur de cette cuissière, on dispose d'un chariot mobile sur des rails et contenant trois claies (étagères) sur lesquelles on étale le produit à sécher. Un ventilateur de capacité ($P = 60\text{W}$) qui distribue l'air à l'intérieur de la chambre de séchage pour accélérer le processus de séchage.

*Une conduite d'aspiration aéraulique constitué d'un tunnel de section dans le sens de sa hauteur. Ce conduit assure le transport du l'air chaud vers la chambre de séchage.

*Une armoire de commande qui régit un système électrique comprenant :

- un ventilateur centrifuge c'est un élément qui permet de créer un écoulement forcé transformé la température chaude dans le foyer vers la chambre de séchage,
- des thermorégulateurs à affichage digital relié à une sonde avec le panneau hybride et la chambre de séchage, et des transistors électriques.

*Une unité de production d'énergie c'est panneau solaire ajouté travaille par l'effet de serre. Ce dispositif thermique de chauffage est placé juste à côté de panneau solaire hybride collé à côté du caisson, en aval du ventilateur et au niveau de l'ouverture par où entre l'air caloporteur dans le conduit de séchage. Cette unité assure un chauffage d'appoint en cas d'insuffisance de panneau solaire hybride PV/TH.

*Le support est un élément qui porte le dispositif. Il est procédé en cornières soudés à l'arc électrique pour diminuer le poids et faciliter la mobilité et le stockage. C'est la partie qui recueille toutes les pièces de l'appareil, sa hauteur est d'un mètre, 52centimètres de longueur et 61 de large.

1 : Cuissière

2 : Verre

3 : Elément thermique

4 : Panneau solaire aérovoltaique

5: Panneau solaire

6-7-8/ Support de fixation

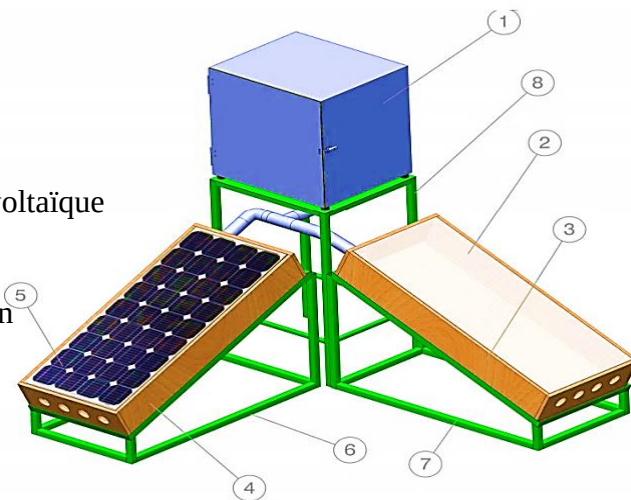


Fig. 4.2 Schéma du système de déshydrateur

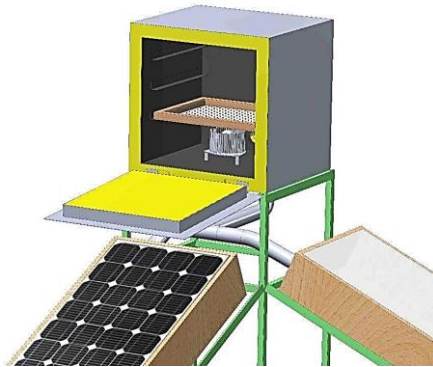


Fig. 4.3 Schéma du système de déshydrateur à l'intérieur d'une cuissière

4.7.2 Méthode de fabrication

Le séchoir est passé par plusieurs étapes de montage, comme suit :

Premièrement : Fabrication de panneau solaire aérovoltaique avec des dimensions (124 x 59 x 18) en cm, ce qui a été expliqué détaillé dans le troisième chapitre.

Deuxièmement : On a réalisé un élément thermique de la taille (125 x 54 x 18) en cm, qui est le même que le panneau solaire, mais ne diffère que du côté opposé, où nous avons remplacé le panneau solaire par du verre, fig. 4.4.



Fig. 4. 4 Élément thermique et panneau solaire avant et après fabrication

Troisièmement : La chambre de séchage a été réalisée en découpant une partie d'un réfrigérateur car elle contient un isolant de ses dimensions (63 x 61 x 52) en cm, puis nous avons installé et fixé le ventilateur à l'intérieur de chambre de séchage, en plus de ça on a fait un trou dans la partie arrière de cette chambre de diamètre de six cm ordre d'entrer de la chaleur provenant du panneau solaire hybride et de l'élément thermique et finalement il a été peint en noir. Cette chambre se termine par une cheminée servant à évacuer l'air humide extrait des aliments séchés. Les parois internes de la chambre sont peintes avec du goudron en liquide (flincote).



Fig. 4.5 Fabrication de cuissière.

Quatrièmement : c'est l'assemblage à l'aide d'un support de fixation était en aluminium fig. 4.6.



Fig. 4.6 Déshydrateur

4.7.3 Fonctionnement du système

L'air frais capté de l'extérieur est préalablement chauffé dans les capteurs solaires. Il est ensuite collecté à la sortie de ce dernier par une canalisation de 5 cm de diamètre. Le ventilateur centrifuge aspire l'air chaud du capteur et le propulse à travers la conduite d'aspiration aéraulique pour atteindre enfin l'entrée de la chambre de séchage. A la sortie de la chambre de séchage, l'air asséchant est soit évacué vers l'extérieur.

4.8. Résultats et Discussions

4.8.1 Séchage de la tomate

4.8.1.1 Mode opératoire

Pour suivre la quantité d'eau évaporée de la tomate au cours du temps, nous avons mesuré sa masse à l'aide d'une balance a partirez d'une masse initiale de 700 g, chaque heure à partir de 9h:00 jusqu'à 15h :00. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale.

Les mesures de température (ambiante, chambre et récepteur) sont effectuées chaque 60 minutes.

4.8.1.2 Préparation du produit

Les graines de tomate sont lavées à l'eau du robinet, puis coupées en tranche circulaire un peu mince, ils ont été répartir sur la claie de séchage.

4.8.1.3 Produit séché

Après un temps nécessaire, nous avons obtenu du tomate séchée avec une teneur en eau à base sèche de 390 g en eau /27 g après séchage. fig. (4.7).



Fig. 4.7 Préparation et séchage de produit (Tomate). (Zone de M'sila)

Le processus d'étude a été réalisé dans la région de pôle universitaire de M'sila avec une faible humidité avec une chaleur élevée. On a décrit l'appareil, son procédé de fabrication et ses pièces, avec une étude de la température et de l'humidité de l'appareil pendant le processus de séchage de la tomate.

La figure. 4.8 présente la variation de la température de PV/TH et la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps, le 24/05/2021, la température ambiante de 25°C, d'humidité 30% (matin), et vitesse de vent 12 Km/h. On observe une augmentation relative dans les deux température où la température dans la chambre de séchage atteint à 49.7 degrés à 15 heures. Lorsque la température de panneau solaire hybride et l'ensoleillement sont minimaux dans le soir. On observe une augmentation relative dans la température de panneau solaire hybride et la quantité de rayonnement solaire où la température de panneau solaire hybride

commencer par 40.1°C jusqu'à atteint à 55.6°C, au maximum en une heure (12h : 30-13h:30) ensuite, descendez à la valeur 51.6°C lorsque le rayonnement solaire allant de 847 w/m² à 725 w/m².

La figure 4.9 présent variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2021 (Tomate). On observe une décroissance relative entre teneur en eau et l'ensoleillement, lorsque une diminution de quantité de teneur en eau de 0.65% jusqu'à la valeur 0.17% c'est-à-dire une diminution de la masse également de 390 grammes à 27 grammes en 6 heures.

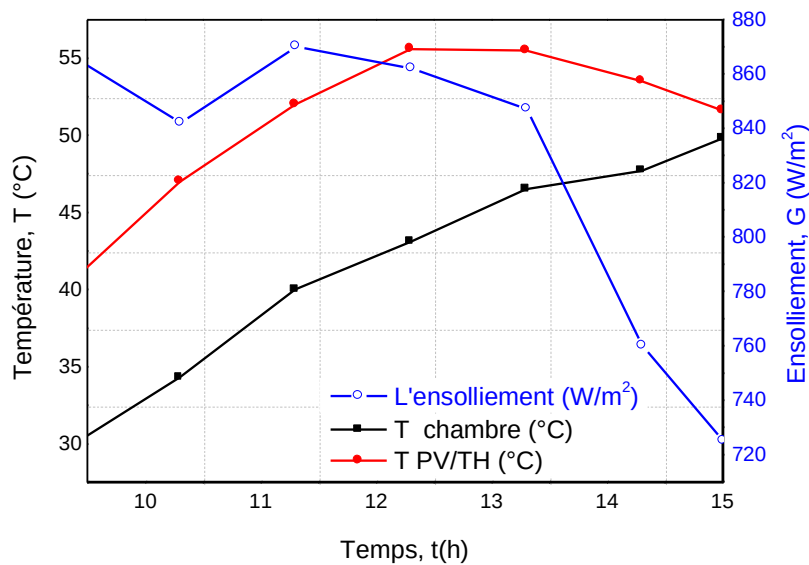


Fig. 4.8 Variation de la température de PV/TH et température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2021 (Tomate). (Zone de M'sila)

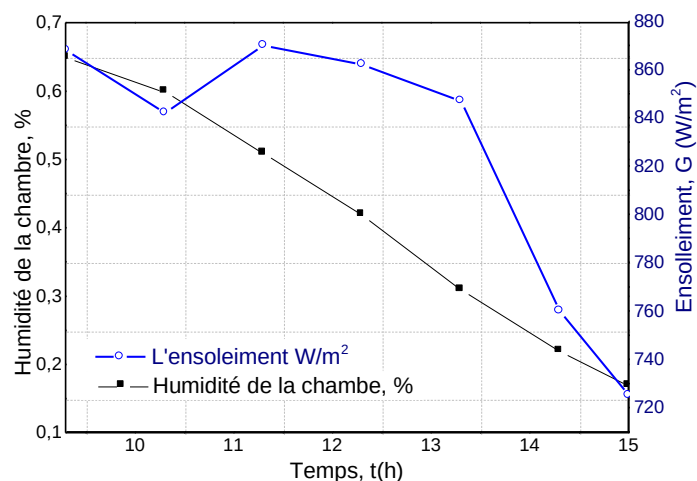


Fig. 4.9 Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 24/05/2021 (Tomate). (Zone de M'sila)

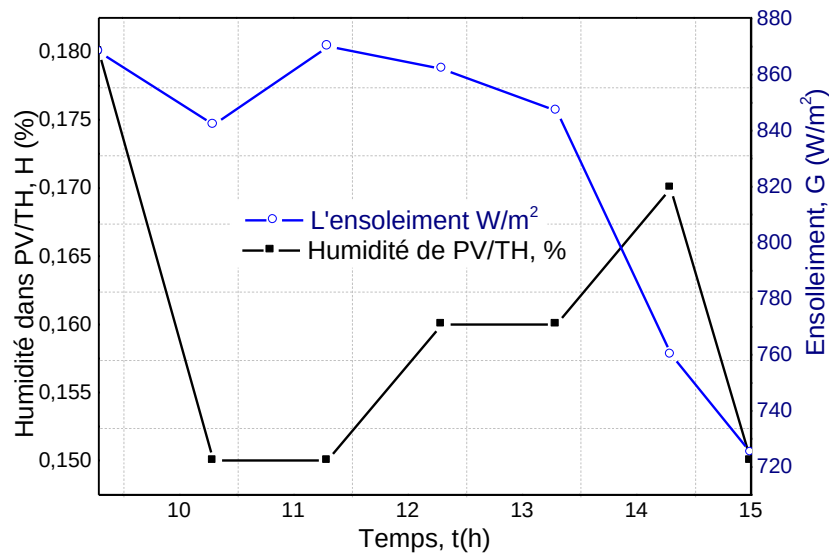


Fig. 4.10 Variation de l'humidité dans PV/TH selon enssoleillement et le temps le 24/05/2021 (Tomate). (Zone de M'sila)

Le processus d'étude, qui se suit a été réalisé dans la région de Annaba avec une humidité élevée. On a décrit l'appareil, son procédé de fabrication et ses pièces, avec une étude de la température et de l'humidité de l'appareil pendant le processus de séchage de la tomate.

La figure. 4.11 présente la variation de la température de chambre de séchage selon enssoleillement et le temps, le 29/03/2021, la température ambiante de $13^{\circ}C$, d'humidité 61% (matin), et vitesse de vent 11 Km/h.

On observe une augmentation dans la température de la chambre de séchage atteint 44.9 degrés à 14h :15mn. Lorsque l'ensolleillement est maximal. Alors la température de la chambre de séchage augmente avec l'augmentation de l'ensolleillement, ce qui implique une diminution de la masse également de 700 grammes à 50 grammes en 5 heures. La figure. 4.12 présente la variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon enssoleillement et le temps le 29/03/2021 du produit de la tomate dans la zone d'Annaba. On remarque qu'il y a deux phases :

- la première phase, l'humidité est maximale au début de séchage, et pour un ensolleillement faible (l'effet de l'humidité externe), l'humidité atteint 72% de 9h :15 à 10h :15 pour un ensolleillement de $960 W/m^2$, qui est plus humide.
- La deuxième phase une décroissance relative entre teneur en eau et l'ensolleillement, lorsque une diminution de quantité de teneur en eau de 40 % à 11h :15 jusqu'à la valeur 17% à 14h :15 . C'est-à-dire une diminution de la masse de la tomate séchée.

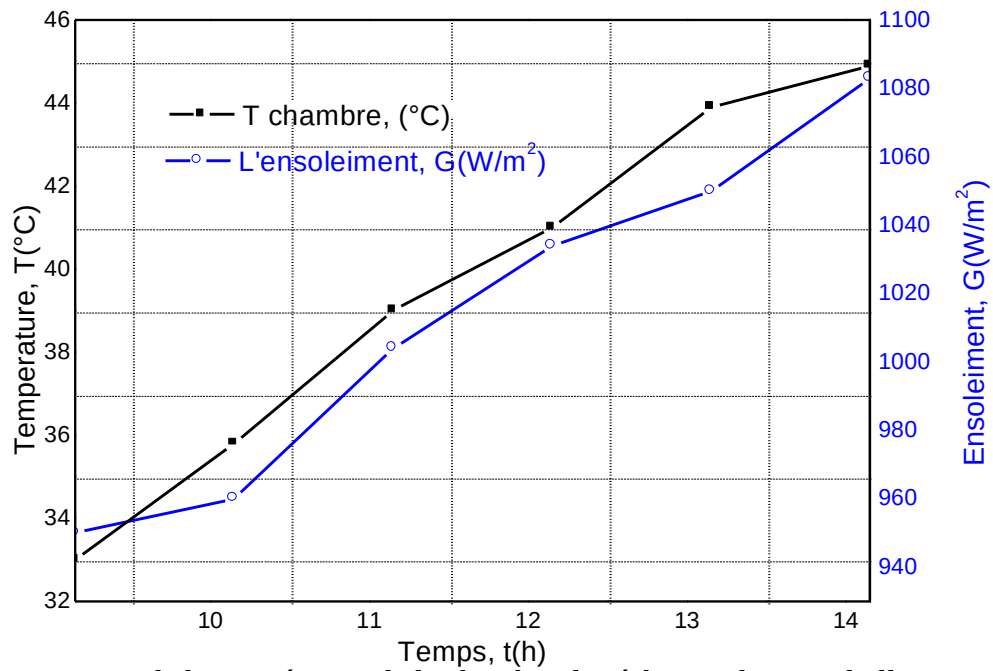


Fig. 4.11 Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 29/03/2021 (Tomate). (Zone d'Annaba).

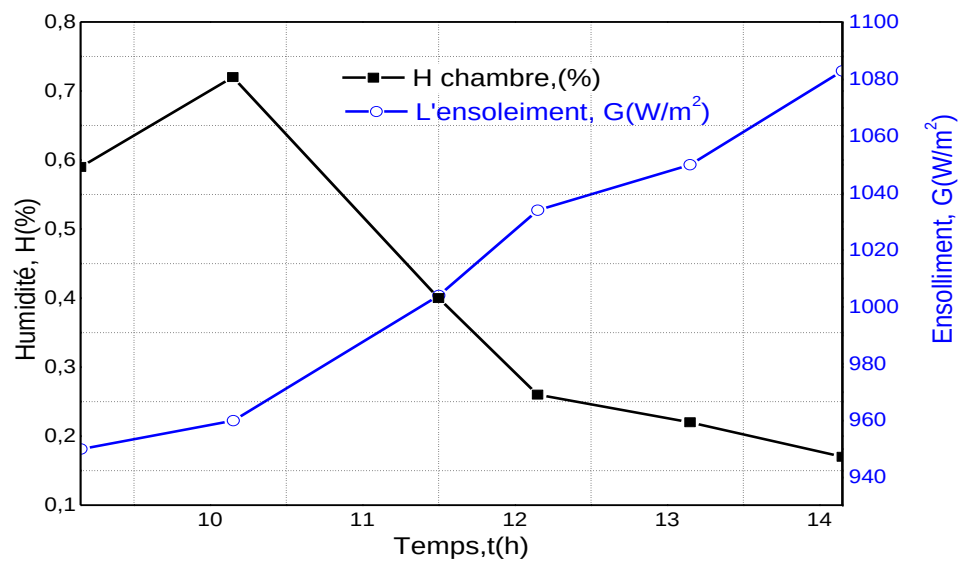


Fig. 4.12 Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 29/03/2021 (Tomate). (Zone d'Annaba).

4.8.2 Séchage de la fraise

4.8.2.1 Mode opératoire

Pour suivre la quantité d'eau évaporée de la fraise au cours du temps, nous avons mesuré sa masse à l'aide d'une balance à partir d'une masse initiale de 121 g, chaque heure à partir de 9h:15mn jusqu'à 14h :15mn. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale.

Les mesures de température (ambiante, chambre et récepteur) sont effectuées chaque 60 minutes.

4.8.2.2 Préparation du produit

Les graines de fraise sont lavées à l'eau du robinet, puis coupées en tranche un peu mince, ils ont été répartir sur la claie de séchage.

4.8.2.3 Produit séché

Après un temps nécessaire, nous avons obtenu du fraise séchée avec une teneur en eau à base sèche de 121 g / 9 g. fig. (4.13).



Fig. 4.13 Préparation et séchage de produit (Fraise).

Le processus d'étude, qui se suit a été réalisé dans la région de Annaba avec une humidité élevée. On a décrit l'appareil, son procédé de fabrication et ses pièces, avec une étude de la température et de l'humidité de l'appareil pendant le processus de séchage de la Fraise.

La figure. 4.14 présente la variation de la température de chambre de séchage selon ensoleillement et le temps, le 30/03/2021, la température ambiante de 17°C, d'humidité 67% (matin), et vitesse de vent 12 Km/h. On observe une que la température de la chambre de séchage augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement jusqu'à 12h :15 atteint 37 degrés à lorsque l'ensoleillement est maximal de 950 W/m². Alors la température de la chambre de séchage augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement, ce qui implique une diminution de la masse également de 121 grammes à 9 grammes en 5 heures figure 4.15.

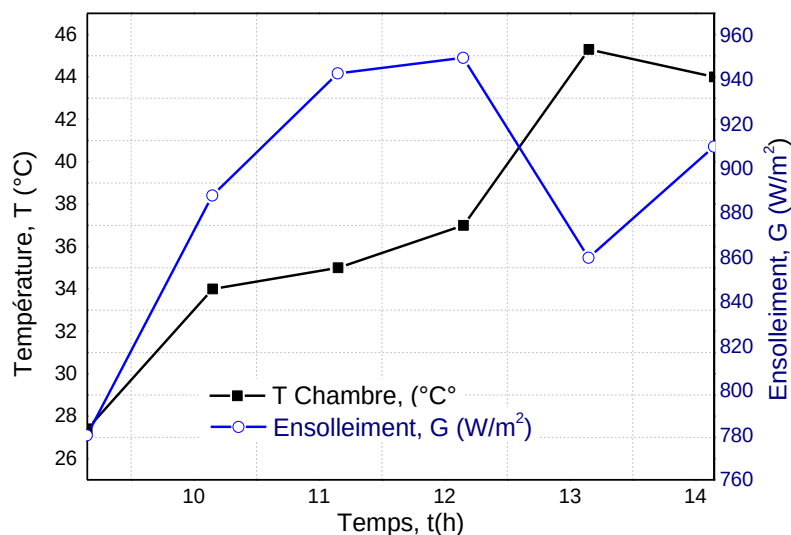


Fig. 4.14 Variation de la température de la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 30/03/2021 (Fraise). (Zone d'Annaba).

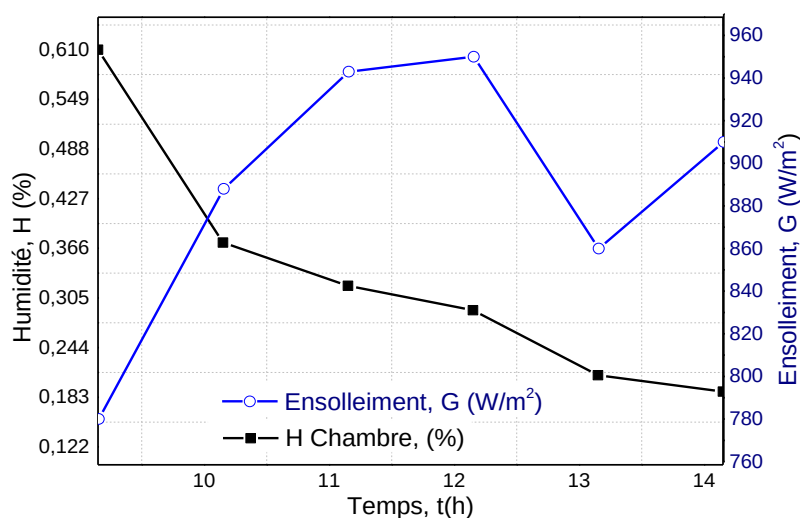


Fig. 4.15 Variation de l'humidité dans la chambre de séchage selon ensoleillement et le temps le 30/03/2021 (Fraise). (Zone d'Annaba).

4.8.3 Séchage de la feuille de laurier

4.8.3.1 Mode opératoire

Pour suivre la quantité d'eau évaporée de la feuille de laurier au cours du temps, nous avons comparé le séchage des feuilles de laurier directement (posé au soleil) par convection naturelle et le séchage par le déshydrateur (PV/TH) réalisé. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale. Les mesures de température (ambiante, chambre et récepteur) sont effectuées chaque 60 minutes.

4.8.3.2 Préparation du produit

Les feuille de laurier sont lavées à l'eau du robinet, puis, ils ont été répartir sur la claie de séchage.

4.8.3.3 Produit séché

Après un temps nécessaire, nous avons obtenu du feuille de laurier séchée avec une teneur en eau à base. Après broyage des deux échantillons, nous avons remarqué que les deux échantillons ont deux couleurs différentes, le noir lorsqu'il est exposé directement au soleil, et le vert lorsque nous utilisons le séchoir hybride.



a) Séchage directe (par soleil)



b) Séchage par déshydrateur hybride PV/TH

Fig. 4.16 Préparation et séchage de produit (feuille de laurier).

4.9 Conclusions

On a réalisé une conception d'un déshydrateur hybride, et on a passé à la phase de séchage de quelques produits agroalimentaires expérimentalement pour déterminer la variation de la température, et de l'humidité de l'air dans la chambre de séchage et leur influence sur la vitesse de séchage, et la variation de la température de produit séché.

A travers les résultats précédents nous concluons que la cinétique de séchage de produit étudié dépendent aux paramètres suivants:

- Le type de produit à sécher
- La teneur en eau initial de produit.
- La zone de séchage.

Références

- [1] J. Vasseur. 'Séchage : principes et calcul d'appareils Séchage convectif par air chaud (partie 1)', technique de l'ingénieur, Réf : J2451 v1. (INSA de Lyon). (2009).
- [2] S. Lahsasni, M. Kouhila, and M. Mahrouz, 'Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit. Energy conversion and management', 45, 249-261. (2004)
- [3] H. Rebour. A. Hauville. 'Etude du climat algérien en vue de déterminer les zones les plus favorables au séchage des fruits'. Annales de l'Institut national agronomique El Harrach. 6 (2). 12-42. (1951).
- [4] C. I. Speirs, & H. C. Coote, 'solar drying: practical methods of food preservation'. Geneva: International Labor Organization. (1986)
- [5] M. Green, & D. Schwarz, 'Solar drying technology for food preservation'. Eschbom, Germany: Gate Information Service info gate GTZ. (2001).
- [6] Vasseur, 'Séchage : principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1)'. (2009)

Conclusion générale

Le rendement d'un capteur solaire photovoltaïque dépend de la puissance du rayonnement solaire reçue, de la température des cellules, du type et du nombre des cellules. La combinaison du panneau solaire photovoltaïque avec un panneau solaire thermique à air améliore son rendement. Ce type de panneau récupère l'énergie thermique de façon acceptable. Ceci servira à chauffer l'air pour des activités de séchage agricole, de chauffage de l'habitat. On peut dire que les systèmes des panneaux solaires permettent la production simultanée de l'énergie électrique et de l'énergie thermique. Les panneaux solaires hybrides sont donc utiles pour compléter les besoins énergétiques solaires et électriques ensemble. L'idéal serait donc une mixité des énergies où le solaire serait utilisé au maximum de son potentiel ainsi que les autres énergies renouvelables.

La conception expérimentale fournit dans ce travail est une contribution à l'amélioration du déshydrateur encore largement utilisé en Algérie. Le déshydrateur présenté à une conception très simple et pas coûteuse. Il permet un gain de temps considérable sur la durée de séchage et préserve les produits des changements du temps. Notre séchage sur quelques produits agro-alimentaires très satisfaisants malgré quelques insuffisances que nous espérons améliorer très prochainement. Et delà, nous avons tout d'abord saisi le principe de fonctionnement de séchage, et ensuite, nous avons proposé un nouveau modèle de déshydrateur, dont, nous étions obligés d'étudier la possibilité de le mettre en marche. Nous avons pensé à sécher les tomates, les fraises, et les feuilles de laurier comme des tests, il a fallu déterminer les températures et les humidités de séchage

de ce produit, dont nous avons besoin dans les calculs qui suivent. Cette démarche, nous a permis de déterminer ; la variation des températures de panneau solaire hybride, et la température du produit à chaque instant dans la chambre de séchage. On est passé à la phase expérimentale pour déterminer la variation de la température, l'ensolleiment, et de l'humidité dans le panneau solaire hybride et leur influence sur la variation de la température de produit. En finalité de cette étude, nous pouvons dire que notre système tel qu'il est dimensionné est très économique à long terme, et réalisable avec des produits localement disponibles. Notre travail fait partie d'une recherche et développement des systèmes solaire hybride à haute ou basse température.

En ce qui concerne la validation de nos résultats expérimentaux, nous avons montré que nos résultats expérimentaux concordent très bien avec la réalité. Quant aux facteurs qui influencent sur le séchage, nous pouvons affirmer à la suite de nos travaux expérimentaux, que la durée de séchage dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer : la masse initiale du produit alimentaire à sécher, la température de séchage, la température de panneau solaire hybride, l'humidité et l'ensolleiment. L'étude entreprise a permis de déterminer la cinétique de séchage d'une variété particulière de la tomate dans deux zones différentes. En effet, pour une masse donnée du produit à sécher, les différents scénarios expérimentaux envisagée en jouant sur la masse initiale du produit, la température de séchage, le débit d'air asséchant et l'ensolleiment, ont permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres aérothermiques sur le processus de séchage de la tomate.

D'après ce que nous avons abordé dans notre étude expérimentale, le séchoir solaire hybride est lié à :

- La quantité de rayonnement solaire
- Le temps moyen de rayonnement solaire
- type de séchoir solaire
- Efficacité de matériau d'isolation
- Etude des propriétés de l'air de séchage هواء

Ces résultats permettent entre autres d'établir dans un travail ultérieur, la vitesse de séchage de toutes les variétés de produits agro-alimentaires rencontrées en Algérie.

En perspective, nous souhaitons prolonger nos travaux par :

- la détermination des cinétiques de séchage des plantes aromatiques et médicinales,
- l'étude de l'influence des autres paramètres du séchage sur la qualité du produit à sécher,
- l'étude d'un modèle économique pour estimer le coût du séchage solaire,
- Une attention particulière doit être portée à l'utilisation de séchoirs solaires hybrides dans les maisons en général,
- Augmentez la largeur, la longueur et la taille du séchoir solaire hybride pour augmenter la quantité de produit et utiliser des ventilateurs.

Résumé

Aujourd'hui, le monde tend vers l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable, y compris l'Algérie, elle est fortement appelée à être à jours grâce à son potentiel naturel dans ce domaine.

Parmi ses énergies renouvelables, l'énergie solaire où l'Algérie à lui donné déjà depuis des années une grande importance.

Dans ce mémoire, une proposition de projet qui est un séchoir solaire hybride fonctionne avec un panneau solaire hybride, et ce panneau donne de la chaleur et de l'électricité en même temps, car on sait que le panneau photovoltaïque traditionnel produit trois fois plus de chaleur que l'électricité. La nouvelle de cette recherche consiste à récupérer cette énergie thermique en chauffant ou en séchant. Les séchoirs précédents fonctionnaient avec des capteurs thermiques grâce à l'effet de serre, qui ne donne que de la chaleur.

Donc, Il a été développé et on a utilisé un panneau solaire hybride (thermique et photoélectrique) qui donne de l'électricité aux ventilateurs pour faire circuler l'air et accélérer le séchage et donne également de la chaleur, qui est responsable du séchage. Le séchage se fait à l'air chaud, car il réduit et absorbe l'humidité dans les produits agricoles. On a également ajouté un capteur thermique pour soutenir le panneau solaire hybride au cas où on aurait besoin d'augmenter la température. On a également ajouté une batterie pour stocker l'énergie électrique et l'utiliser lorsque le soleil se couche pour faire fonctionner la lampe dans la chambre de séchage, ce qui donne de la chaleur à l'intérieur de la chambre de séchage. Ainsi, le séchage est continu et rapide, car le temps de séchage est très court par rapport aux séchoirs précédents tout en préservant la valeur nutritionnelle du produit et de bonne qualité.

Mots clés : Capteur plan, énergie solaire, le panneau solaire PV, le panneau solaire PV/TH, cinétiques de séchage convectif, ensoleillement global, séchage des produits agroalimentaires.

Abstract

Today, the world tends towards the exploitation of renewable energy resources, including Algeria, it has strongly called upon to be up to date thanks to its natural potential in this area. Among its renewable energies, solar energy, where Algeria has already given it great importance for years.

In this memoire, a project proposal, which is a hybrid solar dryer works with a hybrid solar panel, and this panel, gives heat and electricity at the same time, because it has known that the traditional photovoltaic panel produces three times more energy heat than electricity. The novelty of this research consists in recovering this thermal energy by heating or drying. The previous dryers worked with thermal sensors thanks to the greenhouse effect, which only gives heat. Therefore, it was developed and used a hybrid solar panel (thermal and photoelectric) which, gives electricity to the fans to circulate the air and speed up the drying and gives off heat, which is responsible for the drying. The drying is done with hot air as it reduces and absorbs moisture in agricultural products. A thermal sensor has also been added to support the hybrid solar panel in case the temperature needs to be increased. A battery has also been added to store electrical energy and use it when the sun goes down to operate the lamp in the drying chamber, which gives heat inside the drying chamber. Thus, the drying is continuous and fast, because the drying time is very short compared to previous dryers while preserving the nutritional value of the product and of good quality.

Key words: Flat panel collector, solar energy, the solar panel PV, the solar panel PV/TH, convective drying kinetics, global radiation, drying of agrifood products.

ملخص

تتجه دول العالم اليوم بخطى متسارعة نحو استغلال منابع الطاقات المتجددة، والتي من بينها الجزائر التي يسقط عليها كنه شمسي طبيعي معتبر جدا . من بين الطاقات المتجددة نجد الطاقة الشمسية التي أولتها الدولة الجزائرية أهمية كبرى، وكان بحثنا هو اقتراح مشروع عبارة عن مجفف شمسي هجين يعمل باللوحة الشمسية الهجين وهذا اللوح الذي يعطينا حرارة وكهرباء في آن واحد حيث نعلم أن اللوح الكهروضوئي التقليدي ينتج حرارة أكثر بثلاث مرات من الكهرباء والجديد هو استعادة هذه الطاقة الحرارية في تسخين أو التجفيف , ونحن استعملناها في المجفف الشمسي كما نعلم أن المجففات السابقة كانت تعمل بالمجمعات الحرارية عن طريق ظاهرة الاحتباس الحراري التي يقوم بها المجمع، والذي يعطينا حرارة فقط. فتم تطويره واستعملنا اللوح الشمسي الهجين (الحراري والكهروضوئي) الذي يعطينا كهرباء التي نستعملها في تشغيل المراوح لتدوير الهواء وتسريع التجفيف ويعطينا الحرارة أيضا والتي هي مسؤولة عن التجفيف ويكون التجفيف بالهواء الساخن حيث يقوم بخفض وامتصاص نسبة الرطوبة الموجودة في المواد واستعملنا أيضا المجمع الحراري لنمدد به اللوح الشمسي الهجين في حال احتجنا إلى رفع درجة الحرارة , وقمنا أيضا بإضافة بطارية لتخزين الطاقة الكهربائية واستعملناها عند غياب الشمس لتشغيل المصباح الموجود في الغرفة الذي بدوره يعطينا حرارة داخل غرفة التجفيف وهكذا يكون التجفيف مستمر وسريع حيث تكون مدة التجفيف قصيرة جدا مقارنة بالمجففات السابقة مع الحفاظ على القيمة الغذائية للمنتج وذو نوعية جيدة

الكلمات المفتاحية: المجمع المسطح، الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية الكهروضوئية، الألواح الشمسية الكهروضوئية الهجين، حركات التجفيف بالحمل الحراري، أشعة الشمس العالمية، تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية.