

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

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
Ph/ENR/11/2022



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Énergétique et
Energie renouvelable

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Belguendouz Mohand Ali Brahimi Mohammed

Intitulé

**Optimisation des performances d'un panneau
solaire à air- Système Hybride PV/T
-Etude expérimental-**

Soutenu le 11 / 06 /2022 devant le jury composé de :

Mahdi Khaled	Université M ^{ed} Boudiaf M'sila	Président
Taloub Djedid	Université M ^{ed} Boudiaf M'sila	Rapporteur
Bouras Abdelkarim	Université M ^{ed} Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021/2022



Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre promoteur Mr. **TALOUB Djedid**, pour son orientation, sa confiance, sa patience, qui ont constitué un apport considérable sans laquelle ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'elle trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Un grand merci pour monsieur **DJEGHAM Ali**, pour son accueil, sa permanente disponibilité, ses conseil pertinents, sa patience et diligence.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Nous adressons avec tout mon respect mes remerciements à tout le groupe « Energétique » chaque un par son nom.

Enfin, nous tenons également à remercier nos familles et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail



Dédécace

BRAHIMI Mohamed

Avant tout, je remercie **Dieu** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère **mère**, qui n'a jamais cessé de prier pour moi, **Sabah**.

A mon très cher **père**, pour ses encouragements, **Mostapha**.

A mes très chers **frères**, Tarek, Amira, zakaria, yassin.

A mon cher oncle, **Al-hadj Al-nawari**.

A ma future femme **Rania** « **hoym** ».

A notre professeur **Abd Alkarim** et **Mohi Al-din**.

A mes amis et mes collègues de promotion

Merci d'etre toujours la pour moi.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes enseignants.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin a la réalisation de ce travail.



Dédécace

BELGUENDOZ Mohand Ali

Avec l'aide de dieu tout puissant,

Je dédie ce travail

A mon très cher père « **Makhloof** » pour sa patience pendant le temps requis pour ce mémoire et pour ses encouragements,

A ma très chère **mère** « **karima** » source d'amour et tendresse, qui n'a jamais cessé de prier pour moi, que dieu vous protégé et vous garde pour nous.

A mes sœurs **Merieme** et **Rawane**

A mes frères **Zakaria** et **Dhiyae eddine**

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail à mes grands parents

Dahbiya et **Oulhadj**.

A mon grand-père **Said** et ma grande mère **Nouera**

A mes chère tante **Salima** et **Kahina**.

A mon oncle **Ahmed** et son épouse **Nabila**. A la mémoire de mon oncle **Samir**, puisse dieu avoir pitié de lui et faire sa demeure un paradis.

A « **Assma** » et sa famille **Miloudi**.

A mes cousins et cousines : **Anfel, Nardjes, Kenza, Ramzi, massi, Louenes, Amirouche, Koussailla, Roumaissa, Walid**

Ainsi qu'à tous les membre de ma famille **Belguendouz** et la famille **Arab**

A mes amies **Islam, Abdelhakim, Said, Ahmed, Mohammed**

En un mot, à toute ma grande famille et à toutes les personnes que j'aime...

Résumé

La combinaison capteur solaire photovoltaïque-thermique produit à la fois de l'électricité grâce à l'énergie solaire photovoltaïque et de la chaleur grâce à l'énergie thermique car on sait que le panneau photovoltaïque traditionnel produit trois fois plus de chaleur que l'électricité. L'augmentation de la chaleur à l'intérieur du module est l'une des principales raisons de la baisse des performances des panneaux solaires photovoltaïques. D'où la nécessité d'une technique d'évacuation thermique. L'intérêt d'une technique hybride est le refroidissement des cellules photovoltaïques grâce à la circulation d'un fluide, qui sera réchauffé lors de son passage dans le capteur. La nouveauté de cette étude est de récupérer cette énergie thermique par chauffage ou séchage. Les séchoirs précédents fonctionnaient avec des capteurs thermiques grâce à l'effet de serre, qui ne donne que de la chaleur. Le but de ce travail est la réalisation expérimentale d'un capteur PV/T et donc l'examen de l'impact de différents paramètres sur la performance énergétique du capteur PV/T. Les résultats suggèrent que ce type de collecteur est une belle alternative aux modules photovoltaïques et aux collecteurs thermiques installés individuellement.

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

The combination photovoltaic-thermal solar collector produces at the same time electricity gratitude to photovoltaic solar energy and warmth gratitude to thermal energy because it is known that the traditional photovoltaic panel produces three times more heat than the electricity. The increase in warmth inside the module is one of the principal reasons of the reduced performance of photovoltaic solar panels. Thus the necessity for a thermal evacuation technique. The benefit of a hybrid technique is the cooling of the photovoltaic cells gratitude to the circulation of a fluid, which will be warmed during its passage via the sensor. The novelty of this study is to recover this thermal energy by heating or drying. Previous dryers worked with thermal sensors thanks to the greenhouse effect, which gives only heat. The purpose of this work is the realization experimental of a PV/T sensor and so the examination of the impact of different parameters on the energy performance of the PV/T sensor. The impacts recommend that this kind of collector is a nicely alternative to photovoltaic modules and thermal collectors seated individually.

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

تنتج المجمعات الشمسية الكهروضوئية الحرارية كلاً من الكهرباء من خلال الطاقة الشمسية الكهروضوئية والحرارة من خلال الطاقة الحرارية لأنه من المعروف أن الألواح الكهروضوئية التقليدية تنتج ثلاثة أضعاف الحرارة من الكهرباء. تعد الزيادة في الحرارة داخل الوحدة أحد الأسباب الرئيسية لانخفاض أداء الألواح الشمسية الكهروضوئية. ومن هنا تأتي الحاجة إلى تقنية إزالة الحرارة. تتمثل فائدة التقنية الهجينة في تبريد الخلايا الكهروضوئية بفضل دوران المائع، والذي سيتم تسخينه أثناء مروره عبر المستشعر. إن حداثة هذه الدراسة هي استعادة هذه الطاقة الحرارية بالتسخين أو التجفيف. كانت المجففات السابقة تعمل بأجهزة استشعار حرارية بفضل تأثير الاحتباس الحراري، الذي يعطي الحرارة فقط. الغرض من هذه الأطروحة هو التحقق التجريبي لمستشعر PV / T وبالتالي فحص تأثير المعلمات المختلفة على أداء الطاقة لمستشعر PV / T. تشير النتائج إلى أن هذا النوع من المجمعات هو بديل جيد للوحدات الكهروضوئية والمجمعات الحرارية المثبتة بشكل فردي.

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 : Généralités sur les énergies renouvelables.....	9
1.1 Introduction.....	9
1.2 Forme des énergies renouvelables.....	10
1.3 Energie solaire.....	13
1.3.1 Énergie solaire photovoltaïque.....	13
1.3.2 Énergie solaire thermique.....	13
1.3.3 Énergie solaire thermodynamique.....	14
1.4 Gisement solaire.....	15
1.4.1 Généralités sur le rayonnement solaire.....	15
1.4.2 Données géométriques et astronomiques.....	16
1.4.3 A. Coordonnées géométriques.....	16
1.4.4 B. Déclinaison du soleil.....	18
1.5 Description des capteurs photovoltaïque.....	18
1.5.1 Principe et historique.....	18
1.5.2 Générateur PV.....	18
1.5.3 Système photovoltaïque.....	19
1.5.4 Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque.....	20
1.5.5 Présentation des capteurs solaires thermiques.....	20
1.5.6 Différents types des capteurs thermiques.....	20
1.5.6.1 Introduction aux transferts thermiques.....	22
1.5.6.2 Transfert par conduction.....	22
1.5.6.3 Transfert par convection.....	23
1.5.6.4 Transfert par rayonnement.....	24
1.7 Conclusion.....	25
Références.....	25
Chapitre 2 Synthèse bibliographique des capteurs solaires hybrides PVT.....	28
2.1 Introduction.....	28
2.2 Description des capteurs solaires hybrides PV/T.....	29
2.2.1 Historique.....	29
2.2.2 Différents types de PVT.....	30
2.2.2.1 Capteurs solaires PV/T à air.....	30
2.2.2.2 Capteurs solaires PV/T à eau.....	33
2.2.2.3 Capteurs PV/T de concentration.....	39
2.3 Etat d'art sur le PV/T.....	40
2.3.1 Etude bibliographique sur le capteur hybride PV/T.....	41

2.3.2 Techniques pour augmenter les performances de PV/T.....	42
2.3.3 Modèles analytiques de capteur PV / T.....	45
2.4 Conclusion.....	48
Références	49
Chapitre 3 Matériels utilisés et Méthode de fabrication du PVT.....	56
3.1 Introduction	56
3.2 Système solaire hybride PV/T.....	57
3.3 Principe du capteur PV/T.....	57
3.4 Panneaux solaires hybrides PV/T à air.....	58
3.5 Description et fonctionnement du dispositif expérimental.....	58
3.5.1 Réaliser et caractérisation d'un capteur hybride (PV/T).....	58
3.5.2 Description du système PV/T.....	58
3.5.3 Dimensions du capteur solaire hybride PV/T (Aérovoltaique).....	58
3.5.4 Panneau photovoltaïque.....	59
3.5.5 Méthode de fabrication.....	59
3.6 Instruments des mesures.....	61
3.7 Conclusion.....	65
Références.....	66
Chapitre 4 Résultats et Discussions -Système PV et PV/T à vide et en charge.....	67
4.1 Introduction.....	67
4.2 Résultats et Discussions.....	69
4.3 Conclusion.....	73
Références.....	74
Conclusion générale.....	76
Résumé	

Liste des figures

Fig. 1.1 Energie Biomasse [3].....	8
Fig. 1.2 Energie hydraulique [4].....	9
Fig. 1.3 Une source d'énergie géothermique [3].....	11
Fig. 1.4 Energie éolienne [5].....	12
Fig. 1.5 Fonctionnement des panneaux photovoltaïques.....	13
Fig. 1.6 Fonctionnement des panneaux thermiques.....	14
Fig. 1.7 Solaire thermodynamique [6].....	15
Fig. 1.8 Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale = direct + diffus + albédo [11].....	16
Fig. 1.9 Coordonnées terrestres.....	17
Fig. 1.10 Intégration de 900 m ² de modules PV Sarnasol sur la toiture (inclinée à 20°) d'une école Lugano en Suisse (12 branches de 5 modules PV Sarnasol) [18].....	19
Fig. 1.11 Les principaux composants et des matériaux la conception du capteur thermique..	21
Fig. 1.12 Les trois modes de transfert thermique.....	25
Fig. 2.1 Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride a air [44].....	31
Fig. 2.2 Modifications du capteur solaire PV/T hybride à air [45].....	31
Fig. 2.3 Schéma d'intégration de composants solaires à la façade Sud d'un bâtiment [48]...	33
Fig. 2.4 Capteur solaire PV/T hybride à deux fluides et à fonctions superposée.....	33
Fig. 2.5 Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau.....	34
Fig. 2.6 Le capteur solaire PV/T hybride à eau [52].....	35
Fig. 2.7 Premier et second prototypes construits [53].....	36
Fig. 2.8 Section du capteur solaire hybride à eau étudié [56].....	37
Fig. 2.9 Capteurs PVT de concentration.....	39
Fig. 2.10 Systèmes d'exploitation de l'énergie solaire.....	41
Fig. 2.11 Amélioration de l'extraction de chaleur du système d'air PV / T avec (a) des nervures, (b) une feuille ondulée et (c) des tubes.....	43
Fig. 2.12. Vue des différentes conceptions de modèles PV / T.....	43
Fig. 2.13 : Section de PV/ T à eau / air.....	44
Fig. 2.14 : PV/T Bi-fluide à deux absorbeurs.....	44
Fig. 2.15 : Les formes des deux types d'absorbeur.....	47
Fig. 3.1 Schéma du capteur hybride PV/T à air.....	57
Fig. 3.2 formation d'une boîte en bois rectangulaire.....	60
Fig. 3.3 Fixation de polystyrène et l'aluminium.....	60
Fig. 3.4 Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air.....	61
Fig. 3.5 (a) Compteur solaire et (b) Multimètre utilisés dans l'expérience.....	62
Fig. 3.6 Station météorologique de type Davis.....	63
Fig. 3.7 Capteur d'humidité.....	63
Fig. 3.8 Capteur de température.....	64
Fig. 3.9 Banc d'essai à vide du capteur solaire hybride PV/T à air et PV.....	64
Fig. 3.10 Banc d'essai en charge du capteur solaire hybride PV/T à air.....	65
Fig. 4.1 Banc d'essai du capteur solaire PV/TH hybride à air en charge [3-5].....	68
Fig. 4.2 Banc d'essai du capteur solaire PV/TH hybride et PV à vide [3-5].....	68
Fig. 4.3 L'énergie solaire mesurée sur et sous le toit collecteur PV.....	70
Fig. 4.4 Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV et PV/T à vide.....	70
Fig. 4.5 Variation de l'intensité en fonction de temps pour les deux panneaux PV à vide et PV/T en charge.....	71

Fig. 4.6	Variation de la tension en fonction de temps pour les deux panneaux à vide.....	71
Fig. 4.7	Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV/T à vide et en charge.....	71
Fig. 4.8	Variation de la tension en fonction de temps pour PV/T à vide et en charge.....	72
Fig. 4.9	Variation de la température à la sortie de PV/T en fonction de temps à vide et en Charge.....	72
Fig. 4.10	Variation de la température à la surface intérieure de PV/T en charge et en vide selon le temps et l'ensoleillement. (Mesures du 22/05/2022).....	73

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique [8].....	15
Tableau 1.2. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [8].....	15
Tableau 1.3 Eléments fondamentaux d'un capteur solaire.....	21
Tableau 3.1 Dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude expérimentale.....	59
Tableau 3. 2 Caractéristiques du module solaire« TWINSEL» dans des conditions de test standard.....	59

Nomenclature

T	Température effective des cellules en Kelvin [K]
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]
σ	Constante de Stefan [5,67.10 ⁻⁸ W m ⁻² K ⁻⁴]
ε_p	Facteur d'émission de la surface
\dot{m}	Débit massique [kg.s ⁻¹]
C	Chaleur spécifique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
ρ	Masse volumique [kg m ⁻³]
V	Volume [m ³]
\dot{q}	Densité volumique d'énergie générée [W m ⁻³]

Introduction générale

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables. Cette vision algérienne s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle énergétique durable.

Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles. En se basant sur la recherche scientifique à travers les universités algérienne et la coopération avec les compétences internationales.

Une des solutions proposées et en constante évolution est la conception de composants dits hybrides permettant la production simultanée d'énergie thermique et d'énergie électrique. L'avantage de ces types de capteurs solaires hybrides est de permettre la réduction de la température de fonctionnement des panneaux photovoltaïques et par conséquent l'amélioration de leur rendement électrique par la récupération de l'énergie thermique qu'ils dissipent à l'aide d'un fluide caloporteur.

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. La plus grande part de recherche est consacrée au développement des modules photovoltaïques et des capteurs solaires thermiques. Le capteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T) constitue une bonne alternative aux capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques séparément installés, car non seulement il combine deux fonctions complémentaires, mais il offre aussi une double fonctionnalité dans un seul capteur. Le rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique dépend de sa forme de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci. Il existe une gamme étendue de capteurs solaires à air avec différentes dispositions de l'absorbeur.

Pour notre étude, nous avons choisi un capteur avec le passage d'air situé entre l'absorbeur et l'isolant. Les capteurs solaires à air sont importants dans les applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux et le séchage de nombreux produits (agro-alimentaires, matériaux de construction, bois...). Notre travail consiste à réaliser et à caractériser un capteur hybride (PV/T) afin de l'utiliser pour le séchage des produits agricoles ou des plantes médicinales. Les capteurs hybrides utilisant de l'air et de l'eau comme fluide caloporteur ont été évalués expérimentalement et économiquement.

Le capteur solaire PV/T 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. 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 Djegham et al. [1]. En 2006, Tiwari et al [2] ont présenté une étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire PV/T à air ventilé naturellement ou mécaniquement. Ce capteur solaire est constitué de deux modules PV de 0.61m^2 de surface chacun, connectés en série et montés sur une couche isolante noncorrosive 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 %. En 2007, Tripanagnostopoulos [3] a réalisé l'étude de capteurs solaires PV/T 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/T à air a été modifiée à moindre coût.

En général, deux types de capteurs PV/T peuvent être distingués : les collecteurs PV/T avec couverture en verre qui produisent une chaleur à haute température, mais avec un rendement électrique légèrement inférieur, et les capteurs PV/T sans vitrage qui produisent de la chaleur relativement à basse température et qui possèdent des performances électriques élevées [3,4]. Les capteurs hybrides sans vitre supplémentaire délivrent relativement des températures faibles, et doivent être combinés avec des pompes à chaleur pour chauffer de l'air ambiant ou de l'eau [5,6]. Une des applications des modules photovoltaïques en combinaison non directe avec les capteurs thermiques est dans les systèmes SDHW (Solar Domestic Hot Water) qui consistent en général à alimenter la résistance interne nécessaire au chauffage de l'eau par l'électricité générée par les modules photovoltaïques [7].

Des travaux (2003 - 2004) ont été consacrés aux aspects de la production simultanée de l'énergie calorifique et de l'énergie électrique par des modules photovoltaïques [8]. Les capteurs hybrides à base de silicium amorphe qui ont un rendement de conversion photovoltaïque faible (près de 7 %) ont été étudiés par Adamoto et son équipe [9]. Elswijk et al. [10] ont conclu dans une étude que dans l'habitat, un capteur hybride PV/T a besoin de 38 % moins d'espace de toiture qu'un système combiné de modules photovoltaïques et de collecteurs thermiques avec le même rendement approximatif. Le rendement thermique a été trouvé de l'ordre de 77 %, avec un coefficient de perte de chaleur de 23 W/m²K (travaux de Bakker et al. [11]). Zondag et al. [12] ont étudié l'effet de la résistance thermique sur le rendement du capteur hybride. On peut considérer, que pour les capteurs hybrides, un rendement total de conversion comme étant la somme du rendement thermique et du rendement électrique. Tripanagnostopoulos a appliqué le système basé sur le refroidissement des modules photovoltaïques aux capteurs hybrides à concentrateurs [13]. Arslan et al. [14] ont travaillé sur la réalisation et le test d'une nouvelle conception d'un capteur photovoltaïque-thermique air-fluide à ailettes. Utilisation de différents débits massiques pour effectuer une analyse numérique et expérimentale. Le rendement électrique a augmenté de 0,42 % grâce au refroidissement du panneau photovoltaïque. Choi et al. [15] ont suggéré une nouvelle conception de capteur hybride d'air PV/T doté d'un canal d'air double flux à unique passage pour étudier les performances électriques et thermiques dans des conditions météorologiques naturelles. Pour améliorer les performances de transfert de la chaleur entre le module PV et le flux d'air, une nervure de section irrégulière a été placée

sur la surface arrière du module PV. Les résultats ont montré que le rendement thermique moyen du capteur PV/T est passé de 35,2 % à 56,72 % et le rendement électrique moyen de 14,23 % à 14,81 % avec l'augmentation du débit massique d'air. Shahsavari et al. [16] ont analysé l'exergie et la performance énergétique d'un capteur d'air photovoltaïque-thermique (PV/T) à ventilation naturelle. Ils ont étudié les types de capteurs PV/T vitrés et non vitrés. Pour augmenter l'absorption la chaleur aux panneaux photovoltaïques, une fine feuille d'aluminium a été placée dans un canal d'air. Les conclusions étaient qu'il existe une longueur de capteur optimale et une profondeur de canal optimale auxquelles l'énergie totale et l'efficacité exergétique du système sont maximales. Singh et al. [17] ont modélisé le système PV/T semi-transparent à double canal (DCSPV/T) dans lequel l'air circule à travers deux canaux, un canal en dessous de PV et l'autre canal au-dessus de PV pour absorber la chaleur liée aux côtés supérieur et inférieur de la cellule photovoltaïque et comparé à un autre système qui n'a qu'un passage sous la cellule photovoltaïque. Les résultats ont montré que le système à double canal a un rendement électrique, un gain thermique et un rendement exergétique global de 30,49 %, 35,63 % et 3,19 % respectivement. Mieux qu'un système monocanal. Kaiser et al. [18] ont utilisé un capteur PV/T à passage unique non vitré composé d'un seul module PV, pour appliquer une étude expérimentale et détecter l'étendue de l'effet de taille de l'écart sur la température de la cellule PV et son efficacité. Dans le cas de ventilation naturelle et forcée. Les résultats ont montré que dans le cas de la ventilation naturelle, ils obtenaient un rapport d'aspect (profondeur de conduit/longueur de conduit) d'environ 0,11 pour minimiser la température de la cellule PV. Alors que dans le cas de la ventilation forcée, il a été constaté que des dimensions plus petites peuvent être utilisées. Tandis que pour un rapport d'aspect constant, il a été constaté que la vitesse de l'air affectait fortement le refroidissement PV. Pour une vitesse du conduit $V = 6$ m/s, une augmentation de puissance de 19 % est observée par rapport au cas de la ventilation naturelle ($V = 0,5$ m/s). Khaled et Mohamed [19] ont conclu que le milieu poreux a un effet aux performances du capteur hybride PV/T à double passage. L'étude a montré l'efficacité du média poreux à mesure que la zone d'échange thermique était élargie et ainsi augmentait l'efficacité thermique et la température de l'air sortant du capteur solaire hybride. Alors que l'efficacité du composé a augmenté de (3%). La valeur la plus élevée pour l'efficacité thermique et électrique quotidienne était de 80,23 %, 8,7 % dans le capteur qui utilisait un média poreux et une couverture en verre, tandis que la valeur la plus élevée pour l'efficacité thermique et électrique était de 51,25 %, 10,91 % sans média poreux et couverture en verre. Singh et al. [20] ont étudié l'effet du facteur de forme de la plaque absorbante et le débit massique aux

performances du capteur PV/T à l'air. Les résultats ont montré que l'efficacité du système PV/T est maximale lorsque le facteur de forme se situe dans la plage de 1,3 à 2,0 (absorbeur avec rainure incurvée). Sahlaoui et al. [21] ont développé un programme de simulation pour calculer les paramètres thermiques et électriques d'un capteur hybrid PV/T et validé par des résultats expérimentaux. Les résultats ont montré que l'efficacité globale du capteur PV/T est de 98% pour un débit massique de 0,073Kg/s, L'efficacité augmente lorsque le nombre des ailettes et sa hauteur diminue. Slimani et al. [22] ont travaillé sur quatre dispositifs solaires pour comparer les performances thermiques et électriques en utilisant la méthode d'analyse mathématique. Les dispositifs solaires sont : un module photovoltaïque unique (PV-I), un capteur PV/T conventionnel à l'air (PV/T-II), un capteur d'air PV/T vitré à passage unique (PV/T-III) et un capteur d'air PV/T vitré à double passage (PV/T-IV). Les résultats de l'efficacité électrique, thermique et énergétique globale étaient présentés. Saygin et al. [23] ont étudié expérimentalement un capteur solaire PV/T à l'air, l'air y pénètre par un trou au milieu du capteur et des directions opposées. Les performances thermiques et électriques du capteur solaire ont été obtenues à une distance entre le module PV et la couverture de 3 cm et 5 cm. Mojumber et al. [24] ont mené des expériences sur un capteur hybride PV/T à l'air par un passage unique avec des ailettes. Les résultats expérimentaux ont montré l'efficacité thermique et électrique de 56,19 % et 13,75 % respectivement, à 700 W/m² de rayonnement solaire. Naqvi [25] a augmenté l'efficacité électrique du panneau solaire, en le convertissant en un capteur solaire hybride PV/T à air en ajoutant un conduit du bois à l'arrière du panneau, avec des ailettes placés à l'intérieur du conduit pour augmenter la chaleur. Les résultats expérimentaux ont montré que le rendement électrique du capteur solaire hybride PV/T à air et du panneau solaire était de 14,8 % et 14,4 % avec une efficacité thermique de 64,6 %.

Le but est donc double : augmenter le rendement électrique du module et exploiter deux types d'énergies : électrique et thermique. Nous avons mis en œuvre un prototype de capteur hybride et nous l'avons étudié expérimentalement pour évaluer ses performances électriques et thermiques. Pour cela, nous avons développé et réalisé un prototype de capteur hybride, et nous avons entamé des campagnes de mesures: de température, de puissance électrique et de rayonnement solaire sur une période de temps qui nous a permis la détermination pratique de l'ensemble des caractéristiques électriques et thermiques de ce capteur.

La caractéristique I (V) déterminée par expérimentation pour les deux capteurs a permis d'effectuer la comparaison des performances électriques du capteur hybride par rapport à un module photovoltaïque témoin laissé libre sur la même structure.

A partir de cette étude bibliographique concernant quelques travaux qu'on a pu rencontrer dans la littérature, on conclut que ce système d'hybride (PV/T) est un domaine de recherche très vaste et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental.

La présente mémoire se répartit en quatre chapitres. Le premier chapitre consiste à une généralité sur les énergies renouvelables, et à la formulation mathématique de quelques paramètres de transfert thermique. Ensuite, une description sur tous les modes de transfert de chaleur.

Le deuxième chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les principales thématiques abordées par les chercheurs sur le panneau solaire PV/T à air et à eau.

Ensuite, une réalisation du prototype d'un panneau solaire hybride à air avec les instruments et des appareils de mesures fait l'objet du troisième chapitre

Le chapitre quatre présente une Conception, réalisation et expérimental des tests fait dans la zone de l'université de M'sila sur un panneau solaire simple à vide et un panneau solaire hybride vide et en charge (PV/T), 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] Ali Djegham, Taloub Djedid, Bouras Abdelkarim, Zied Driss, "An Empirical Investigation of the Electrical and Thermal Performance of Photovoltaic-thermal Hybrid Sensor (PV/T)," WSEAS Transactions on Circuits and Systems, vol. 21, pp. 65-73, 2022
- [2] Tiwari, A., Sodha, M. S., Chandra A, and Joshi, J. C, Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India, Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, No, 3, 2006, pp. 175-189.
- [3] Tripanagnostopouls, Y, Aspects and improvements of hybrid photovoltaic thermal solar energy systems, Journal of Solar Energy, Vol. 81, No. 9, 2007, pp. 1117-1131
- [4] Jong, M. J .M. and Zondag, H. A, System Studies on Combined PV Thermal Panels, 9 the International Conference on Solar Energy in High latitudes, Northsun 2001, The Netherlands, May 6 - 8, 2001.

-
- [5] Bakker, M., Strootman, K. J., and Jong, M.J.M, PV/T Panels: Fully Renewable and Competitive, ISES SWC Göteborg, Germany, 2003.
- [6] Zondag H.A., and Van Helden, W.G.J, PV-Thermal Domestic Systems, 3 rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11 - 18, 2003.
- [7] Ghoneim, A. A., Al-Hasan A. Y., and Abdullah, A. H, An Economic Analysis of Photovoltaic-Powered Solar Domestic Hot Water Systems in Kuwait, *Renewable Energy*, Vol. 25, 2002, pp. 81 - 100.
- [8] Van Helden, W.G.J., Zondag, H.A., Bakker, M., Elswijk, M.J., Jong, M.J.M., and Strootman, K.J, PVT Panels and PVT Collectors: Pathways to Distributed Solar Cogeneration, European Solar Energy Conference (ESTEC), 26 - 27 June, 2003.
- [9] Adamoto, K., Supanich, P., Nualboonrueng, T. and Sichanugrist, P, A-Si Hybrid Solar Collector, 3rd World Conference on photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11 - 18, 2003.
- [10] Elswijk, M.J., Jong, M.J.M., Strootman, K.J., Braakman, J.N.C., de Lange, E.T.N., and Smit, W.F, Photovoltaic/Thermal Collectors in Large Solar Thermal Systems, 19 th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7 – 11 Juin, 2004.
- [11] Bakker, M., Elswijk, M.J., Zondag, H.A., Ottenbros M.T.N., and Van Helden, W.G.J, Outdoor Performance of Uncovered PV/Thermal Panels, 19 th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7 – 11 Juin, 2004.
- [12] Zondag, H.A., Elswijk M.J, and Bakker. M, PV-Thermal Collector Development – An Overview of the Lessons Learnt, 19 th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7 - 11 Juin, 2004.
- [13] Tripanagnostopoulos Y, Low Concentration Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Energy Systems, IP Programme- ICT Tools: PV Systems Teaching and Learning, Patra, 1st July - 10th July, 2004.
- [14] Arslan, E., Aktaş, M., & Can, Ö. F, Experimental and numerical investigation of a novel photovoltaic thermal (PV/T) collector with the energy and exergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 276, 2020, 123255.
- [15] Choi, H. U., & Choi, K. H, Performance evaluation of PV/T air collector having a single-pass double-flow air channel and non-uniform cross-section transverse rib. *Energies*, Vol. 13, No. 9, 2020, pp. 2-13.

-
- [16] Shahsavari, A., Ameri, M., & Gholampour, M, Energy and exergy analysis of a photovoltaic-thermal collector with natural air flow. *Journal of solar energy engineering*, Vol. 134, No. 1, 2012.
- [17] Singh, S., Agrawal, S., & Avasthi, D. V, Design, modeling and performance analysis of dual channel semitransparent photovoltaic thermal hybrid module in the cold environment. *Energy Conversion and Management*, Vol. 114, 2016, pp. 241-250.
- [18] Kaiser, A. S., Zamora, B., Mazón, R., García, J. R., & Vera, F, Experimental study of cooling BIPV modules by forced convection in the air channel, *Applied Energy*, Vol. 135, 2014, pp. 88-97.
- [19] Ahmed, O. K., & Mohammed, Z. A, Influence of porous media on the performance of hybrid PV/Thermal collector, *Renewable Energy*, Vol. 112, 2017, pp. 378-387.
- [20] Singh, H. P., Jain, A., Singh, A., & Arora, S, Influence of absorber plate shape factor and mass flow rate on the performance of the PVT system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 156, 2019, pp. 692- 701.
- [21] Sahlaoui, K., Oueslati, H., & Mabrouk, S. B. (2020, October). Modeling and Performance Optimization of Hybrid Photovoltaic Thermal Air Collector with Fins Absorbers. In 2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC) (pp. 1-6). IEEE.
- [22] Slimani, M. E. A., Amirat, M., Kurucz, I., Bahria, S., Hamidat, A., & Chaouch, W. B. , A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, Vol.133, 2017, pp. 458-476.
- [23] Saygin, H., Nowzari, R., Mirzaei, N., & Aldabbagh, L. B. Y, Performance evaluation of a modified PV/T solar collector: A case study in design and analysis of experiment. *Solar Energy*, Vol. 141, 2017, pp. 210-221.
- [24] Mojumder, J. C., Chong, W. T., Ong, H. C., & Leong, K. Y, An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design, *Energy and Buildings*, Vol. 130, 2016, pp. 272-285.
- [25] Naqvi, A., Ahmed, A., Jamal, M., Majeed, A., Khizar, A., & Shaheer, B, Performance evaluation of hybrid pvt air collector. a comparative approach, *GMSARN International Journal*, Vol. 16, No.2, 2022, pp. 121-127.

Chapitre

1

Généralité sur l'énergie renouvelable

1.1. Introduction

Ce chapitre présente le contexte général dans lequel s'inscrit notre travail « Optimisation des performances d'un panneau solaire a air-Système hybride PV/T-Etude expérimental- ». Dans un premier temps nous présentons la définition et l'utilisation d'énergie renouvelable dans le monde et son Importance dans notre vie quotidienne.

Sur notre planète la terre il existe des sources d'énergie inépuisable, des énergies naturelles qui ne s'épuisent jamais, on les appelle les énergies renouvelables. Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de source disponible sans limite de temps. 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 propre " 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 [1].

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des source traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables

offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie [2].

1.2. Forme des énergies renouvelables

1.2.1. Energie de la biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- ❖ Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie
- ❖ La biomasse elle-même peut être incinérée. Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autre, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro [3].

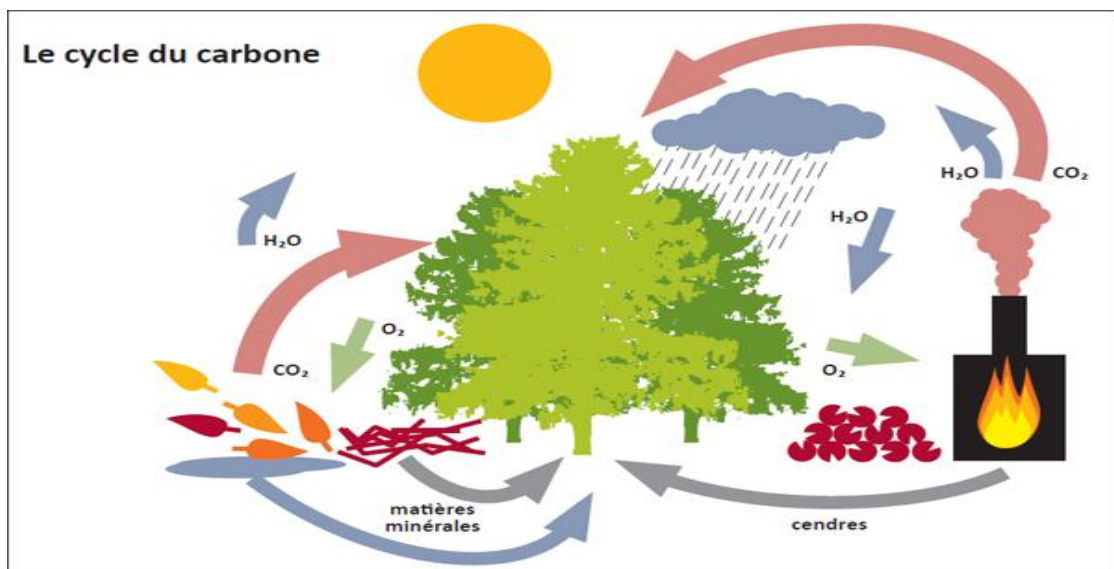


Fig. 1.1 Energie Biomasse [3]

1.2.2. Hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source à l'avantage de ne

pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [4].

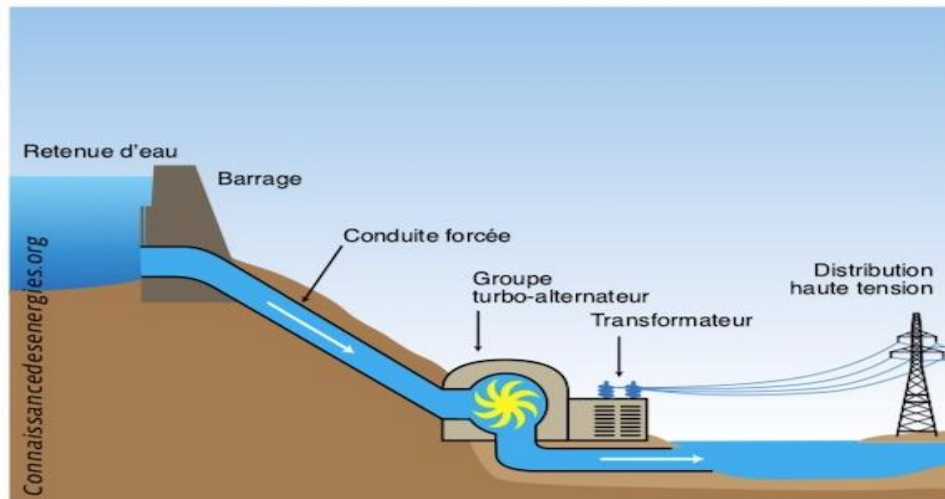


Fig. 1.2 Energie hydraulique [4]

1.2.3. La géothermie

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques. Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure [3]

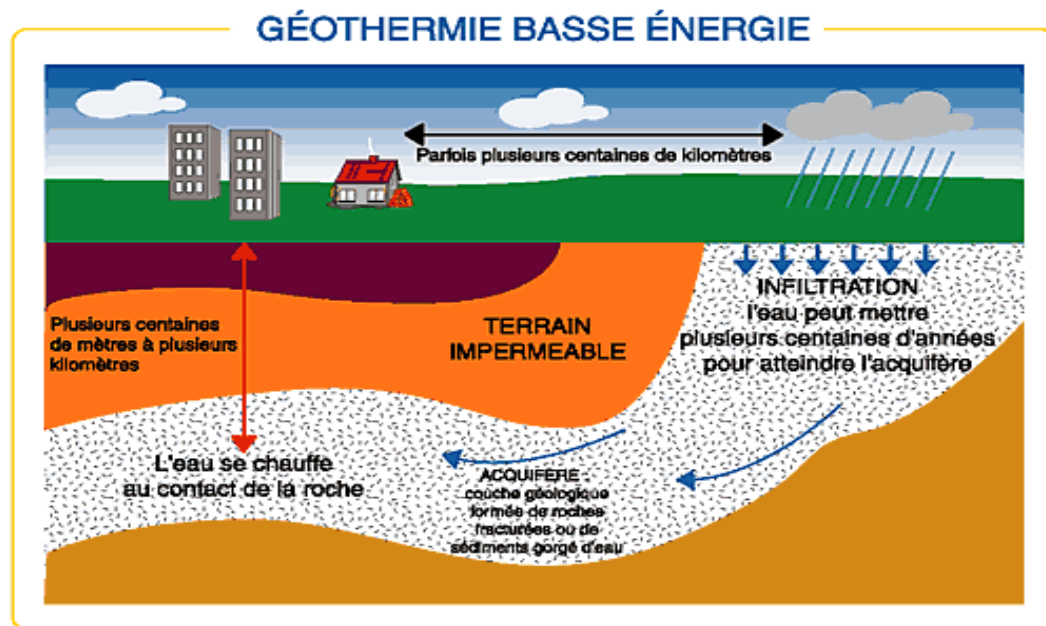


Fig. 1.3 Une source d'énergie géothermique [3]

1.2.4. 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, appelée aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [5].



Fig. 1.4 Énergie éolienne [5]

1.3. Energie solaire

On distingue deux grandes applications de l'énergie solaire dans la production de l'énergie :

1.3.1. Energie solaire photovoltaïque

Le principe fondamental de la production photovoltaïque est de transformer le rayonnement Solaire en courant électrique au moyen d'un panneau ou module photovoltaïque ; les cellules qui compose ces panneaux sont en général produite à l'aide d'un matériau semi-conducteur appelé le silicium, lorsque la lumière de soleil vient frapper la surface du panneau, les photons qui transportent l'énergie lumineuse transmettent cette énergie aux électrons de silicium. Ces électrons vont alors se mettre au mouvement, ce déplacement crée un courant électrique continu. Il est indispensable de transformer l'énergie continu on énergie alternative afin de pouvoir la consommer ou l'injecter sur le réseau c'est le rôle de l'onduleur (appareil centrale dans la chaine de production).

Les panneaux photovoltaïques sont également utilisés sur les sites isolés ou pour alimenter la signalisation ou des équipements embarqués.

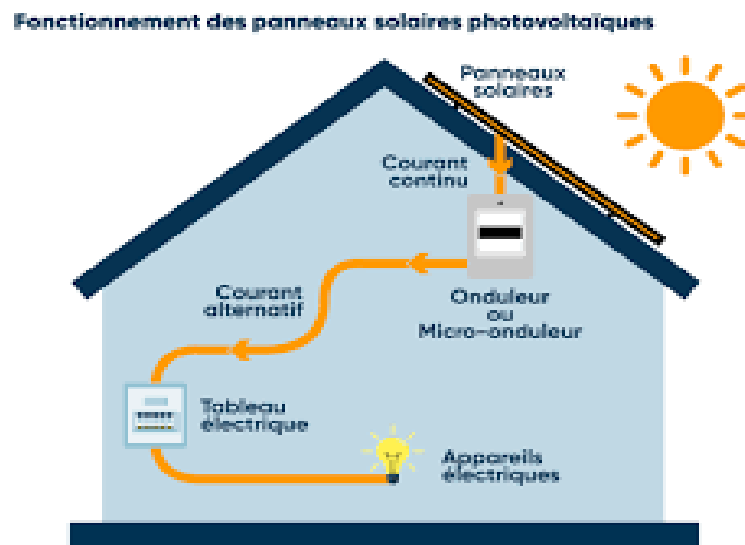


Fig. 1.5 Fonctionnement des panneaux photovoltaïques

1.3.2. Energie solaire thermique

Le panneau solaire thermique est à distinguer du panneau photovoltaïque il ne produit pas d'électricité, il est destiné à la production d'eau chaude sanitaire ou de chauffage. Le principe fondamental de panneau solaire thermique est de recuire le rayonnement solaire et de le transformer en chaleur, ce type de panneau est le plus souvent constitue d'un tube de cuivre en serpentín soudé sur une plaque noir appeler absorbeur, l'absorbeur est chauffé par le rayonnement solaire et transmet sa chaleur à un liquide caloporteur antigel qui circule dans le tube. Ce fluide chaud rejoint ensuite un ballon de stockage dans lequel il réchauffe l'eau

froide sanitaire, ainsi le solaire thermique peut être utilisé pour obtenir de l'eau chaude sanitaire du chauffage.

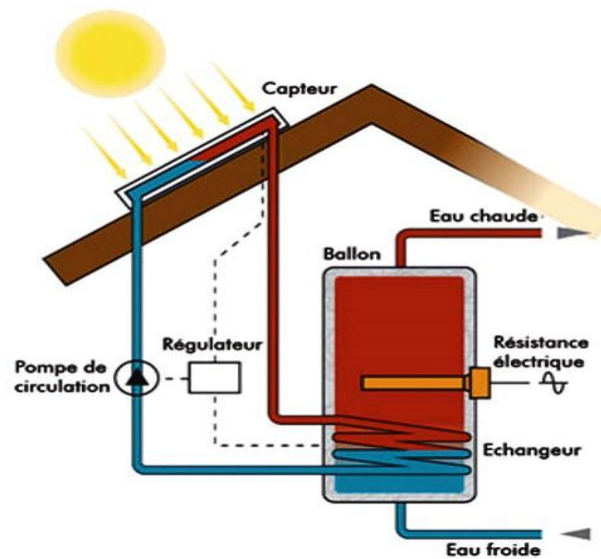


Fig. 1.6 Fonctionnement des panneaux thermiques

1.3.3. Energie solaire thermodynamique

Le système solaire thermodynamique est une technologie simple et révolutionnaire, 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 [6].

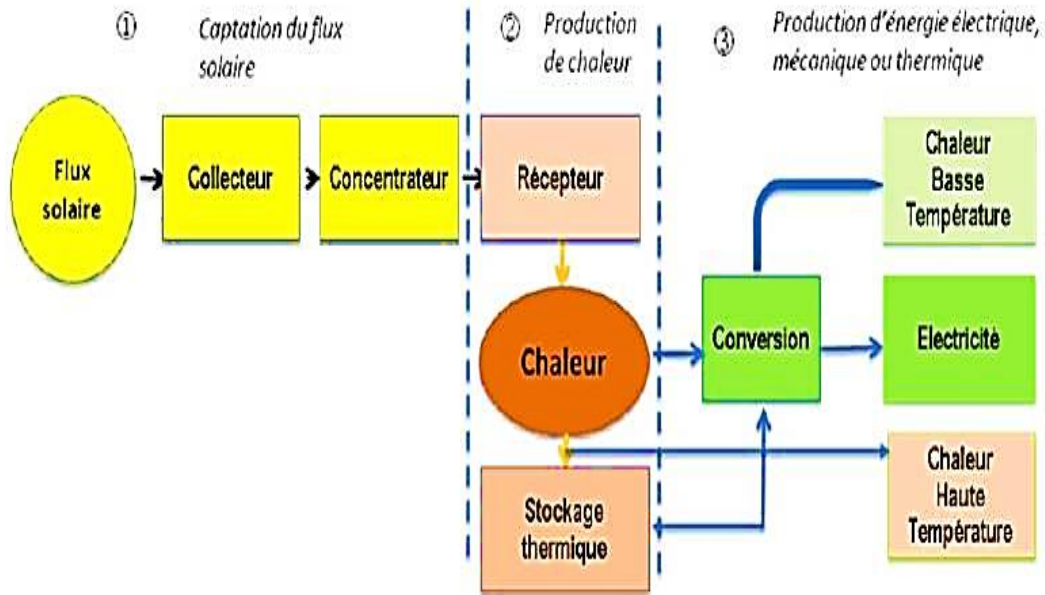


Fig. 1.7 Solaire thermodynamique [6]

1.4. Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [7].

1.4.1. Généralités sur le rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

✓ Le rayonnement direct

Tableau 1.1. Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique [8].

	Ciel	Conditions normales	Zones industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Le tableau 1.2 donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Tableau 1.2. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [8].

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	2500
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$G_{dirh} = c^* \times \tau_{dir} \quad (1.1)$$

G_{dirh} : éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal [9].
L'éclairement énergétique G_{dir} reçu sur un plan incliné est donné par :

$$G_{dir} = G_{dirh} \times \cos\theta \quad (1.2)$$

θ : angle d'incidence des rayons solaires [10].

✓ Le rayonnement diffus

Est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon [11].

❖ L'albédo

L'albédo est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [11].



Fig. 1.8 Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale = direct + diffus + albédo [11]

1.4.2. Données géométriques et astronomiques

1.4.3. A. Coordonnées géométriques

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques ; longitude et latitude, ainsi que par son altitude (Fig.1. 9).

La longitude d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien origine 0° le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention, on affecte le signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et de signe (-) les méridiens situés à l'Ouest. La longitude sera désignée ici par la lettre λ . Elle peut être comprise entre -180° et $+180^\circ$.

La latitude d'un lieu correspond à l'angle, avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu.

L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° , cette convention de signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud.

La latitude sera désignée ici par la lettre ϕ . Elle peut ainsi être comprise entre -90° et $+90^\circ$. L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique, géoïde, figurant le niveau moyen de la mer. On l'exprime généralement en mètre.

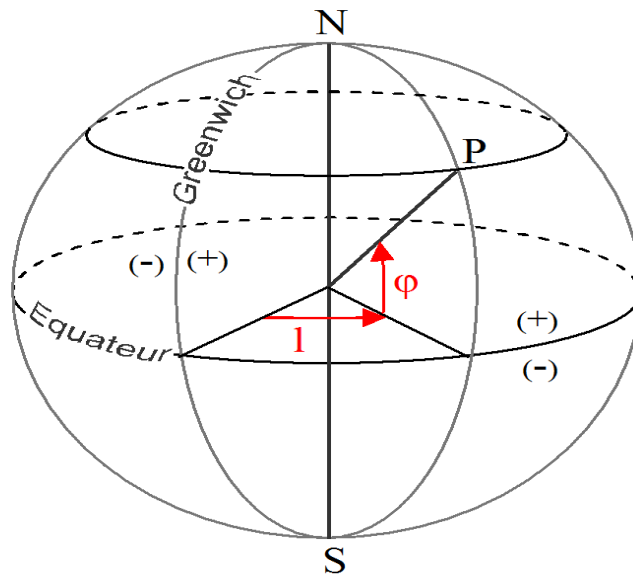


Fig. 1.9 Coordonnées terrestres

La constante solaire le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons et placé en dehors de l'atmosphère terrestre est appelé constante solaire. La valeur moyenne actuellement retenue est 1390 W/m^2 . La variation de la distance terre-soleil pendant l'année influence la valeur de la constante solaire. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire [12] :

$$C = 1353(1 + 0.033 \cos(0.984 J)) \quad (1.3)$$

Lorsqu'une plus grande précision est requise, on pourra utiliser le développement en série de Fourier :

$$I = 1353 + 45.326 \cos J + 0.88018 \cos 2J - 0.00461 \cos 3J + 1.8037 \sin J + 0.09746 \sin 2J + 0.18412 \sin 3J \quad (1.4)$$

Où : $J = 0.984 j$, j étant le nombre du jour de l'année (1, 2, 3,.....365 jours de l'année).

1.4.4. B. Déclinaison du soleil

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Sa valeur peut être calculée par la formule de Cooper (1969) [13] :

$$\delta^{\circ} = 23,45 \cdot \sin \left[\left(\frac{360}{365} \cdot (j + 284) \right) \right] \quad (1.5)$$

Où j : est le nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier.

1.5. Description des capteurs photovoltaïque

1.5.1. Principe et historique

En 1876, Adam et Day observent pour la première fois un effet photovoltaïque dans un solide. En effet, ils prouvèrent qu'un courant pouvait être généré suite à l'éclairement d'un barreau de sélénium en contact avec du platine. En 1883, Fritts réalisa la première cellule photovoltaïque à base de sélénium. Il fallut attendre de nombreuses années avant de voir un net progrès dans les performances photovoltaïques. En 1954, les laboratoires Bell (Etats-Unis) développèrent une cellule à base de silicium ayant un rendement de 6%. Au cours de la même année, les laboratoires de l'armée de l'air américaine publièrent également un rendement de 6% pour une cellule à base de Cu_2S /CdS.

Le premier choc pétrolier de 1973, fut un événement important dans le développement des cellules photovoltaïques. Suite à cet événement, une conférence fut organisée durant la même année aux Etats Unis. Elle déboucha sur la mise en place de moyens financiers permettant le développement du photovoltaïque. En 1975, l'Agence Américaine de Recherche et Développement de l'Energie, ayant pour but le développement des énergies renouvelables, fut fondé. Le premier choc pétrolier suivi de deux autres, en 1979 et 2008, ainsi que la raréfaction des énergies fossiles sont en grande partie à développer plusieurs types des panneaux photovoltaïques nouveaux et modernes à cause d'énorme avantages mais jusqu'aujourd'hui, le meilleur rendement fait est 34 % [14].

1.5.2. Générateur PV

Un générateur photovoltaïque PV est tout l'ensemble des cellules solaires, des connexions, des pièces de protection, supports, etc. Dans la présente modélisation, l'accent est mis uniquement sur la cellule / modules / panneau [15].

Les cellules solaires sont constituées d'une jonction p-n fabriqué dans une plaquette mince ou couche de semi-conducteur (en général du silicium). Dans l'obscurité, la sortie caractéristique I-V d'une cellule solaire présente une caractéristique exponentielle analogue à celle d'une diode [16].

Lorsque de l'énergie solaire (photons) frappe la cellule solaire avec une énergie supérieure à énergie de bande interdite du semi-conducteur, des électrons sont éjectés en vrac des atomes dans le matériau, ce qui crée des paires électron-trou [17].

Ces transporteurs sont entraînés à l'écart, sous l'influence des champs électriques internes de la jonction p-n et de créer un courant proportionnel à la radiation incidente. Lorsque la cellule est court-circuitée, ce courant circule dans le circuit extérieur ; quand en circuit ouvert, ce courant est shunté en interne par la diode intrinsèque de jonction p-n. Les caractéristiques de cette diode donc fixé les caractéristiques de la cellule de tension en circuit ouvert.

1.5.3. Système photovoltaïque

Ce type de système peut comprendre en dehors du panneau PV, une batterie permettant le stockage de l'énergie électrique produite, un système de régulation de charge permettant la gestion de la batterie, et éventuellement un onduleur permettant la conversion du courant continu en alternatif. Le système PV peut être connecté directement au réseau électrique par l'intermédiaire d'un onduleur.

De plus, présente un système PV composé de 12 branches de 5 modules PV nommés Sarnasol, et intégré à la toiture de 900 m² d'une école professionnelle de Lugano, au sud de la Suisse. Ces modules PV Sarnasol sont constitués de cellules PV amorphes UNI-SOLAR recouvertes d'une membrane flexible en polyoléfine. Ce système PV fournit une puissance électrique totale de 15.36 kWc, soit une production annuelle de 16423 kWh, soit 1069 kWh / kWc [18].

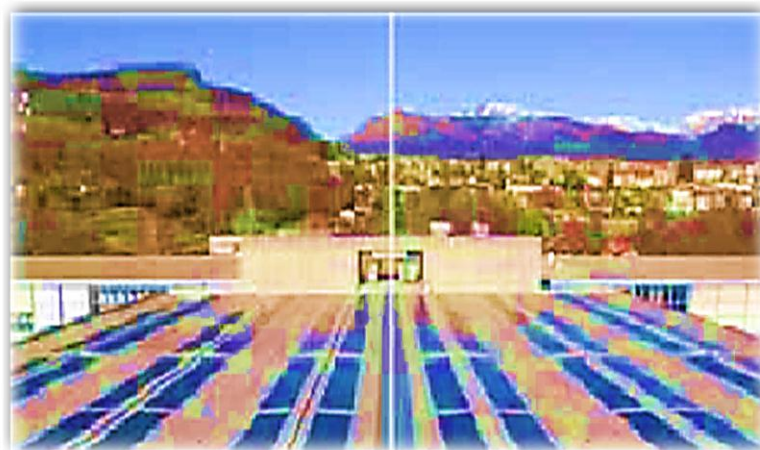


Fig. 1.10 Intégration de 900 m² de modules PV Sarnasol sur la toiture (inclinée à 20°) d'une école Lugano en Suisse (12 branches de 5 modules PV Sarnasol) [18].

1.5.4. Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC).

La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fem) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque [19].

1.5.5. Présentation des capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermiques permettent la production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Ils sont composés d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant, d'un système de refroidissement à l'aide d'un fluide caloporteur (air ou liquide), d'un isolant thermique latéralement et en sous-face, le plus souvent d'une couverture transparente (en face avant et exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre, et éventuellement d'un coffrage étanche à l'eau et d'un système de support mécanique de l'ensemble [20]. L'énergie solaire récupérée par le capteur solaire est transformée en énergie thermique est cédée au fluide caloporteur (air ou eau).

1.5.6. Différents types des capteurs thermiques

Les capteurs solaires sont caractérisés par leur mouvement (stationnaire, à poursuite simple et à poursuite double) et par leur température opératoire. Les capteurs stationnaires ont une position fixe et ne suivent pas la position du soleil dans le ciel. On en distingue trois types:

- Capteur solaire plan
- Capteur solaire parabolique composé
- Capteur solaire à tube sous vide

Puisque on va utiliser dans ce travail un capteur hybride qui contient un capteur solaire plan, donc dans ce qui suit, on va présenter un peu les détails et le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan typique.

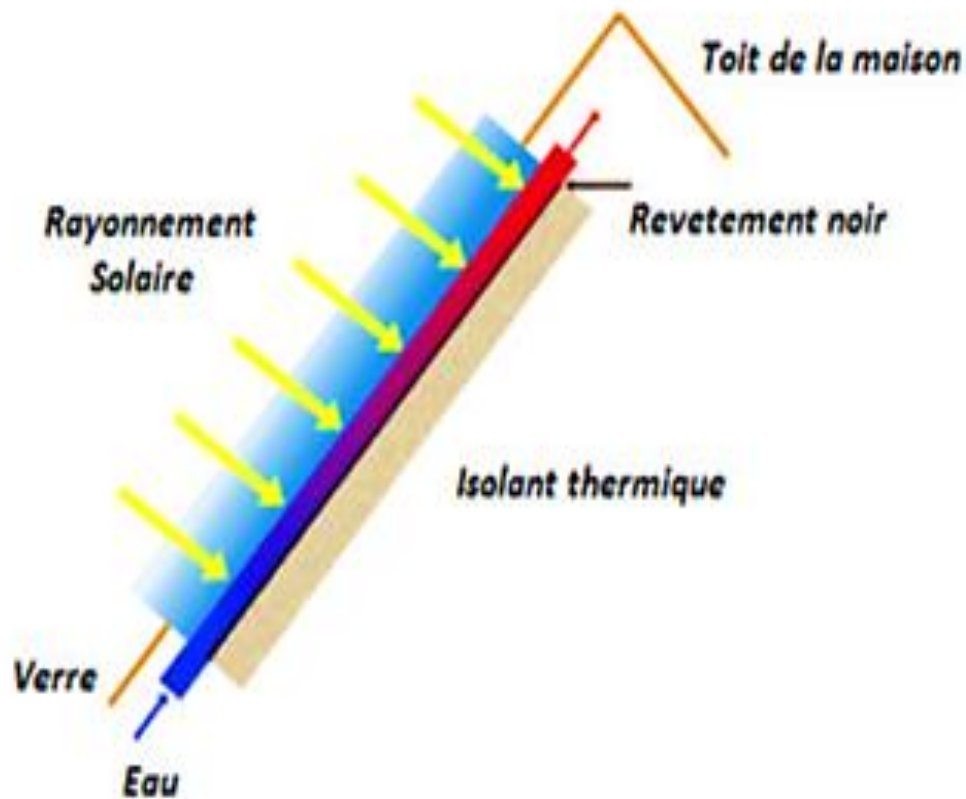


Fig. 1.11 Les principaux composants et des matériaux la conception du capteur thermique.

Quand l'énergie solaire passe à travers la couverture transparente et entre en contact avec la surface noire de l'absorbeur, une grande partie est absorbée et transférée au fluide circulant dans les tubes vers le ballon de stockage ou vers d'autres utilisations. La partie arrière de l'absorbeur est généralement constituée d'une couche isolante qui réduit les pertes par conduction. Les tubes peuvent être soudés à la plaque absorbante ou ils peuvent faire partie intégrale de la plaque [21].

Un capteur thermique se compose des éléments fondamentaux suivants tableau 1.3. :

Tableau 1.3 Eléments fondamentaux d'un capteur solaire

Couverture	Transparente : crée un effet de serre au-dessus de la plaque absorbante : en général un verre trempé dit solaire, présentant une faible teneur en fer pour permettre un haut degré de transmission lumineuse ;	<ol style="list-style-type: none"> 1- Simple vitrage 2- Panneau solaire composée 3- plaques ou feuilles en matière plastique
-------------------	--	---

Absorbeur	Noire : permet la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique transportée par le fluide ;	1- Métaux (Cu, Al, Fe) 2- Plastique (polypropylène, polyéthylène)
Transporteur de chaleur	Fluide : le fluide caloporteur qui évacue la chaleur jusqu'à l'extérieur du capteur ;	1- Eau 2- Air
Isolation	Matériau : réduit la déperdition de chaleur par la face arrière et les côtés du capteur ;	1- Polyuréthane 2- Laine minérale 3- Laine de fibres de verre
Boîte (Box)	Matériau : contient tous les éléments constitutifs fragiles du capteur comme les tubes, la plaque absorbante...	1- Aluminium 2- Acier galvanisé 3- Plastique 4- Bois

1.5.6.1. Introduction aux transferts thermiques

Les capteurs solaires reçoivent l'énergie et la convertissent soit en électricité pour les panneaux photovoltaïques ou en chaleur pour les capteurs solaires thermiques ou bien en électricité et en chaleur pour les capteurs hybrides. Non toute cette énergie est convertie en électricité et/ou en chaleur puisque les capteurs ne sont pas 100% efficaces. La majeure partie de cette énergie est perdue à l'environnement.

Cette énergie peut être transférée en général sous trois formes, transfert par conduction, par convection et par rayonnement [21].

1.5.6.2. Transfert par conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière [21].

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation [20] :

$$q = -k \times A \times \text{grad}T \quad (1.6)$$

q : flux de chaleur.

k : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange.

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- La face supérieure et inférieure de la vitre hcv .
- La face supérieure et inférieure de l'isolant his .
- L'absorbeur et l'isolant.

Dans le cas d'un capteur solaire, l'énergie est absorbée par la vitre et par les cellules de silicium et la chaleur est conduite à l'arrière et avant du capteur par l'intermédiaire des couches intervenantes. La loi de Fourier pour l'état d'équilibre, des applications unidimensionnelles est comme suit [22] :

$$Q = -\lambda. A. \frac{dT}{dx} \quad (1.7)$$

Où :

Q : Est le flux de chaleur transmis par conduction [W]

λ : Est la conductivité thermique du matériau [W/mk]

A : La surface de la section perpendiculaire [m^2]

$\frac{dT}{dx}$: la variation de la température en ce qui concerne la longueur de chemin de transfert de chaleur

Pour une plaque plane simple d'épaisseur L , l'équation devient :

$$Q = -\lambda. A. \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (1.8)$$

Et pour une plaque composite composée de deux matériaux :

$$Q = -\lambda. A. \frac{T_2 - T_1}{\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2}} \quad (1.9)$$

1.5.6.3. Transfert par convection

Le transfert de chaleur pour l'écoulement interne dans un passage est fortement dépendant si l'écoulement est laminaire ou turbulent. Le nombre de Reynolds pour l'écoulement dans un canal est donné par [23] :

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques. On distingue deux types de convection :

- **La convection forcée**

Le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (une pompe).

- **La convection naturelle**

Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo-circulation. Le transfert thermique convectif est régi par la loi de NEWTON :

$$q = h \times s \times (T_p - T_f) \quad (1.10)$$

q : le flux échangé par convection.

h : coefficient de convection.

s : surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p : Température de la paroi solide.

T_f : Température du fluide.

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

1.5.6.4. Transfert par rayonnement

Le rayonnement se produit par l'intermédiaire de l'émission et de l'absorption électromagnétique entre les corps des différentes températures et se nomme rayonnement thermique. Il n'exige aucun milieu pour se propager. L'exemple le plus évident de ceci est rayonnement solaire rassemblé sur la surface terrestre. La puissance émissive de corps noir, ou l'émetteur parfait du rayonnement thermique, est proportionnel à la quatrième puissance de sa température, comme donné par Stefan-Boltzmann. Ceci peut être réécrit pour l'émission de la fréquence de l'énergie ou de la puissance [23].

Ce mode de transfert ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel, on s'intéresse principalement aux échanges radiatifs qui existent.

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétique est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques [24].

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [24] :

$$c = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (1.11)$$

q : densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : émissivité thermique du matériau.

σ : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,67 \cdot 10^{-8} (W / m^2 k^4)$

T : température absolue du corps

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel.

- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

On peut associer ces 3 modes de transferts par cette figure :

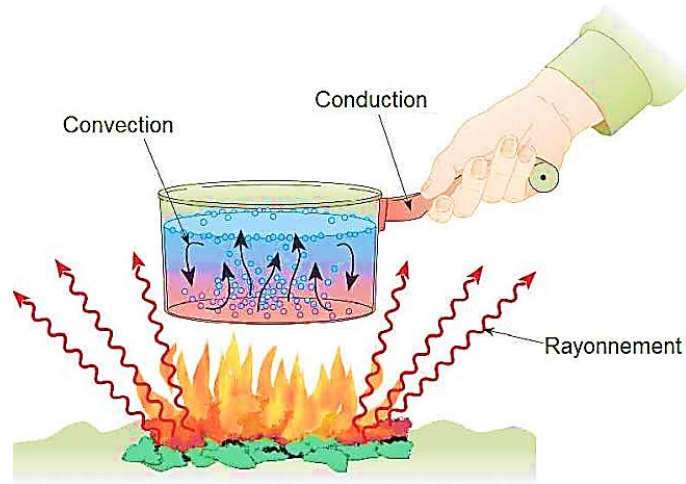


Fig. 1.12 Les trois modes de transfert thermique

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différents types des énergies renouvelables dites décentralisées. On donne des généralités sur le rayonnement solaire, et on a présenté les principes de fonctionnement des capteurs photovoltaïques et thermique, en mettant en exergue les types de ces capteurs utilisés, et enfin, on a vu les différents modes de transfert thermique.

Références

- [1] Benabda A., Contribution à l'étude d'une alimentation à base de panneaux photovoltaïques avec stockage, Thèse de doctorat en Electronique, Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2018.
- [2] Belakehal, Soltane., Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables. Thèse de doctorat, Université de Constantine. 2010.
- [3] Kanchev Hristiyan., Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain. Thèse de doctorat, Genie Electric, Ecole centrale de Lille, 2014.
- [4] Darras Christophe., Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène : applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre

- du projet PEPITE (ANR PAN-H). Thèse de doctorat, Energétique et Génie des Procédés, Université Pascal Paoli, 2010.
- [5] Azizi A., 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] Belhadj M., Modélisation d'un Système de Captage Photovoltaïque. Mémoire de Magister, Université de Béchar, Algérie, 2008.
- [7] Merzouk M., and Kasbadji Merzouk N., Le Chauffe-eau Solaire à Usage Domestique Analyse des Limites Technico-Economiques de l'Expérience Algérienne. *Revue des Energies Renouvelables*, 2003, pp. 225-229.
- [8] Debili Narimene. Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque. Magister en Electronique, Université de Constantine, 2015.
- [9] Bonal, Jean., *Energies alternatives 2e édition*, ISSN : 2916097317, 2011.
- [10] Perrin de Brichambaut C., Vauge C., *Le gisement solaire, Technique et Documentation*, Lavoisier, Paris 8, 1982.
- [11] Bellel, N. Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur. Diss. Thèse de magistère, Université de Constantine, 1989.
- [12] Khelifa Abdelkrim. Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT. Thèse de doctorat, Université de Batna-1-, 2017.
- [13] Brahim Aghilas. Etude de performances d'un capteur solaire plan a eau. Mémoire de Master 2, Université de Lorraine, 2016.
- [14] Chow, Tin Tai., A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied energy*, Vol. 87. No. 2. 2010, pp. 365-379.
- [15] Hansen A. D., Sørensen P. E., Hansen L.H., Bindner H. W., Models for a stand-alone PV system. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1219(EN), 2001.
- [16] Walker Geoff., Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia*, Vol. 21, No. 1, 2001, pp. 49-55.
- [17] Lorenzo Eduardo., *Solar electricity: engineering of photovoltaic systems*. ISBN: 8486505550 9788486505554, 316 pages, Earthscan/James & James, 1994.
- [18] Pola O., Chianese D., Bernasconi A., Flat roof integration of a-Si triple junction modules laminated together with flexible polyolefin membranes. *Solar Energy*. Vol. 81. No. 9, 2017, pp. 1144-1158.

-
- [19] Duffie J A., Beckman W, A., Solar engineering of thermal processes, Photovoltaic and Wind. Fifth Edition, University of Wisconsin–Madison, Copyright 2013, John Wiley and Sons. 1980.
- [20] Kalogirou. S. A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 3, 2004, pp. 231-295.
- [21] Enrênez T., Bibring J .P., Blanc M., Barucci M. A., Roques F., Zarka P., Le système solaire, Éditions et EDP sciences, Paris. 2003.
- [22] Eiker U., Solar technologies for buildings, John Wiley sans Sons, England. 2001.
- [23] Sotehi O., Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire , thèse de magistère, Université de Constantine. (2009).
- [24] Mefti A., bouroubi M .Y., Mimouni H., Evaluation du potentiel énergétique solaire. Bulletin des énergies renouvelables, No. 2, décembre, 2002.

Chapitre

2

Synthèse bibliographique des capteurs solaires hybrides PV/T

2.1. Introduction

La plupart des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermiques et électriques ou d'analyser l'aspect économique des systèmes hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire assuré. Pour cela, quelques auteurs mettent l'accent sur le développement de modèles thermiques analytiques ou réalisés suivant une analogie électrique, et plus rarement de modèles électriques de photo-conversion en régime permanent ou dynamique. Certaines de ces analyses s'appuient en outre sur des confrontations avec des études expérimentales en conditions contrôlées ou in situ sur divers sites.

D'autres recherches ont pour but l'optimisation des performances des composants solaires existants en améliorant les conditions de fonctionnement (inclinaison, orientation du composant...) ou en proposant des configurations géométriques innovantes. Ainsi, elles se basent sur la modification des dimensions ou des propriétés des matériaux de construction (isolant thermique, absorbeur, cellules PV...) ou des fluides caloporteurs (air, eau glycolée...). Ces améliorations visent à accroître la quantité d'énergie solaire absorbée et les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur ou à réduire voire éliminer les pertes thermiques extérieures du capteur solaire hybride [1].

Dance ce chapitre, nous présentons une description des capteurs solaire hybrides PV/T, Aussi, nous présentons tout d'abord bref historique. Puis nous décrivons brièvement les différents types de PV/T. De plus, nous avons parlé d'état d'art sur le PV/T.

2.2 Description des capteurs solaires hybrides PV/T

Le capteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T) est un module qui produit non seulement de l'électricité mais également de l'énergie thermique. Puisque la demande de la chaleur solaire et l'électricité solaire se complètent souvent, cela semble une idée logique de développer un dispositif qui peut être conforme aux deux demandes. La combinaison d'un capteur thermique et d'un panneau photovoltaïque dans un seul capteur permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire. Un effet de synergie peut être obtenu dans une structure associant ces deux dispositifs de façon judicieuse à ceux du système photovoltaïque et thermique séparément installés. La production de l'énergie totale (électrique et thermique) du capteur PV/T dépend de l'entrée (c'est-à-dire l'énergie du rayonnement solaire, la température ambiante et de la vitesse du vent) et de la sortie qui est la température de fonctionnement du système. Cette production dépend aussi du mode de l'extraction de la chaleur. Il existe principalement deux types de capteurs hybrides PV/T. Le type liquide et le type air, la différence entre les deux étant le caloporteur qui peut être du liquide ou de l'air.

Au cours des années précédentes, une grande quantité de travaux de recherches sur les capteurs PV/T ont été menés. Provenant de plusieurs développements indépendants qui ont tous eu comme conséquence l'idée d'intégrer le photovoltaïque et le flux de chaleur produit dans un seul capteur.

Les principaux travaux de recherches et développements visaient les systèmes connectés au réseau et les systèmes autonomes, ainsi que les concentrateurs [2].

2.2.1 Historique

La première étape sur les capteurs PV/T était les travaux de Wolf [3] et Kernet Russell [4], pour la conception et la performance des capteurs PV/T employant de l'eau ou de l'air pour le refroidissement.

Ensuite, les études de Hendrie [5], Florschuetz. [6], Cox et Raghuraman. [7], qui ont développé des logiciels de simulation permettant l'étude des performances des capteurs PV/T à air, en mettant l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur les rendements thermique et électrique. Pour l'intégration au bâti des capteurs PV/T : Sopian et al (1996) [8], Garg et Adhikari [9], Brinkworth et al. [10], Moshfegh et Sandberg [11], qui avaient proposé l'étude théorique et expérimentale des phénomènes thermiques et aérodynamiques au sein d'une lame d'air permettant la ventilation naturelle en sous face d'une façade photovoltaïque et d'une toiture comportant des panneaux PV, suivie par les études de Brinkworth [12].

Eicker et al. [13] donnent des résultats de suivi d'un système BIPVT, Bazilian et al. [14] ont évalué plusieurs modèles expérimentaux du système PV/T à air intégré au bâti. Les

applications des systèmes PV/T à air ont été présentées par Chow [15], Hegazy [16], Ito et Miura [17], Infield et al. [18], Charron et Athienitis [19], Brinkworth et Sandberg [20].

Parmi les plus importantes études sur les systèmes PV/T à eau, l'étude de Bergene et Lovvik [21] qui ont effectué une analyse détaillée sur les types de fluides dans les systèmes PV/T, tandis que les recherches de Elazari [22] sont concentrées sur la conception, l'amélioration des performances et les aspects économiques des capteurs PV/T à eau. Pour les travaux de Hausler et Rogash [23] menés sur ce sujet sont basés sur la constitution des systèmes de stockage de chaleur à base de capteur PV/T et mêmes ceux effectués par Kalogirou [24].

Huang et al. [25] ont présenté un système PV/T avec le stockage de l'eau chaude, et Sandness and Rekstad [26] ont donné des résultats pour les PV/T avec un absorbeur en polymère.

Les modèles 3D dynamique et l'état d'équilibre 3D, 2D et 1D pour PV/T-Eau ont été étudiés et présentés par Zondag et al. [27, 28].

Dans les dernières années, des travaux expérimentaux sur les systèmes PV/T à eau et PV/T à air, y compris l'utilisation de réflecteurs diffus, ont été publiés par Tripanagnostopoulos et al. [29, 30], Mazon et al. [31], Dupeyrat et al. [32], Ibrahim et al. [33], Ciulla et al. [34], Kim et al. [35], Aste et al. [36, 37], Helmers et al. [38, 39], Fortuin et al. [40], Touafek et al. [41], et Matuska [42].

2.2.2 Différents types de PV/T

2.2.2.1 Capteurs solaires PV/T à air

Ce type de capteur 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 [43].

En 2006, Tiwari et al. [44] ont présenté une étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire PV/T à air ventilé naturellement ou mécaniquement. Ce capteur solaire est constitué de deux modules PV de 0.61m² de surface chacun, 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 (fig 2.1). 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%.

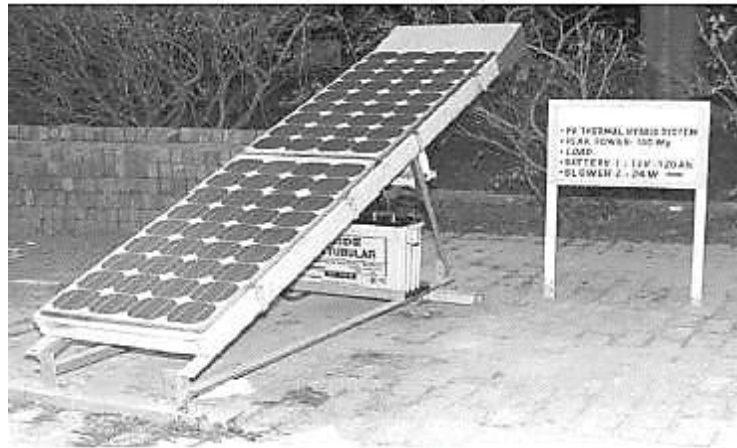


Fig. 2.1 Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air [44].

Tripanagnostopoulos [45] a réalisé l'étude de capteurs solaires PV/T 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/T à air a été modifiée à moindre coût.

Des études paramétriques menées sur un système PV/T à air ont montré qu'une faible épaisseur de la lame d'air améliore les transferts thermiques mais réduit le débit massique de ventilation de la lame, d'où une réduction du rendement thermique du système. Pour pallier à ce problème en optimisant les transferts de chaleur convectifs et radiatifs, la solution proposée est d'accroître la surface d'échange entre l'air et les modules PV. Pour cela, des configurations intégrant des plaques nervurées ou planes, des tubes soudés à l'absorbeur ou des ailettes au sein de la lame d'air ont été envisagées (figure 2.2).

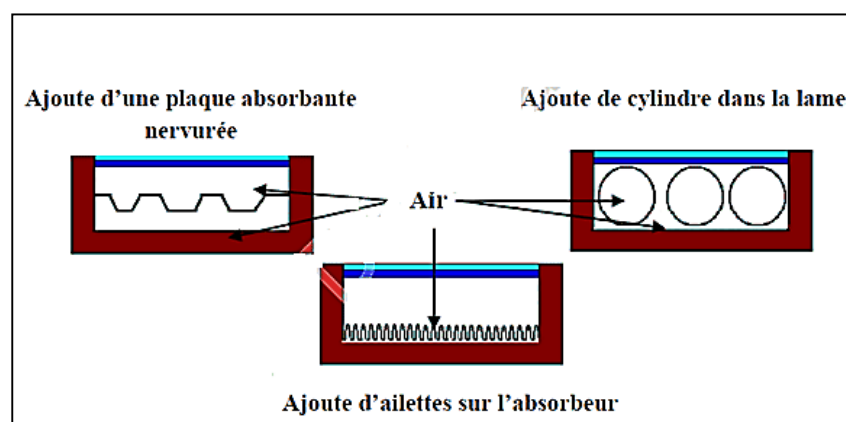


Fig. 2.2 Modifications du capteur solaire PV/T hybride à air [45].

Touafek et al. [46] 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/T). 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. [47] 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. Mei et al. [48] présentent le modèle dynamique d'un capteur solaire PV/T à air intégré à la façade d'un bâtiment. Cette étude s'inscrit dans le prolongement d'un projet européen précédent visant l'intégration des systèmes photovoltaïques au bâti (ventilation naturelle sur les deux faces de panneaux PV intégrés à la façade et à la toiture de la bibliothèque publique Mataro (Espagne) en 1997 par la société Teulades Multi-Funcional (TFM)). La façade sud du bâtiment considère comporte de haut et en bas, des capteurs solaires à air, des panneaux PV connectés en série et séparés d'un double vitrage intérieur par une lame d'air de 14 cm, et une paroi en briques. Les modules PV sont composés de cellules poly-cristallines encapsulées entre deux couches de verre. Les autres façades sont composées de béton cellulaire et de bardages métalliques. L'air est aspiré à la base de la lame d'air située à l'arrière des panneaux PV (Figure 2. 3).

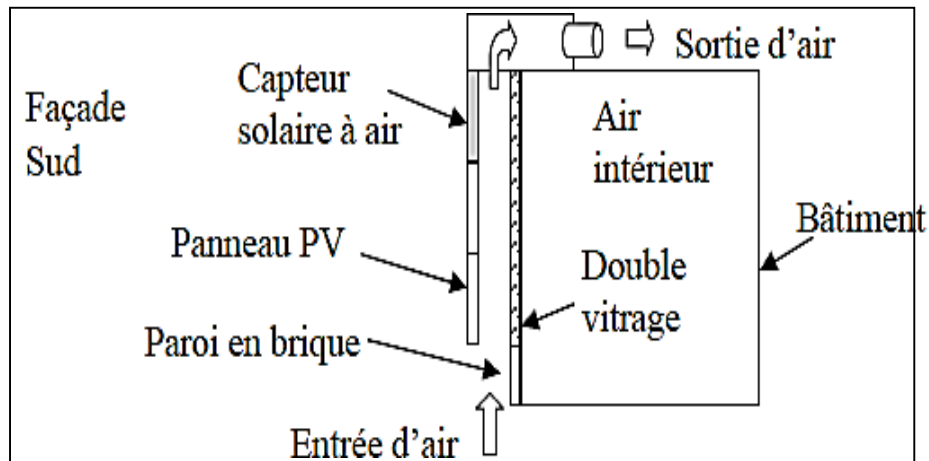


Fig. 2.3 Schéma d'intégration de composants solaires à la façade Sud d'un bâtiment [48].

2.2.2.2 Capteurs solaires PV/T à eau

Tripanagnostopoulos [49] a effectué l'étude d'un capteur solaire hybride faisant appel à deux types de fluides caloporteurs disposés de manière superposée. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement afin d'évaluer le comportement de chacune des formes de production thermique (à air ou à eau).

Le système le plus performant schématisé sur la figure 4, comporte un absorbeur soudé à des tubes en cuivre situé en face avant du composant, une plaque métallique plane et des ailettes disposées sur la paroi inférieure de la lame d'air.

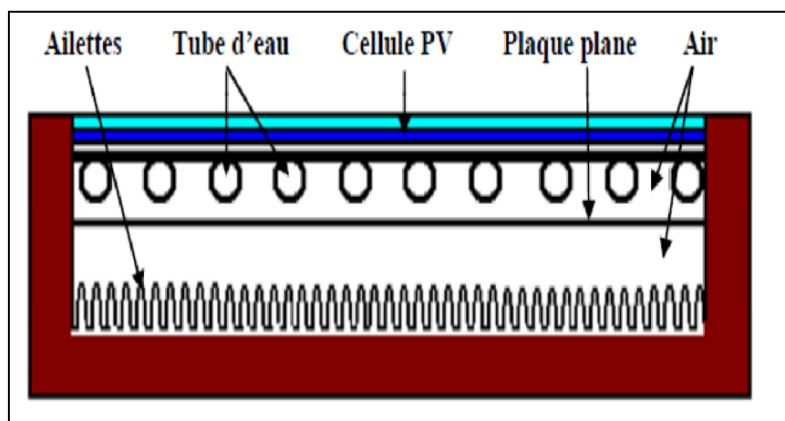


Fig. 2.4 Capteur solaire PV/T hybride à deux fluides et à fonctions superposées.

Un capteur solaire PV/T hybride vitré a été étudié. Ce système est composé de cellules PV en silicium monocristallin collées sur un absorbeur en plastique noir polyphénol en oxyde par l'intermédiaire de 0.5 mm d'adhésif à base de silicium. Ce système est composé de cellules PV en silicium monocristallin collées sur un absorbeur en plastique noir polyphénol en oxyde par l'intermédiaire de 0.5 mm d'adhésif à base de silicium. Cet absorbeur est muni de canaux de circulation d'eau en sous-face (figure 2. 5).

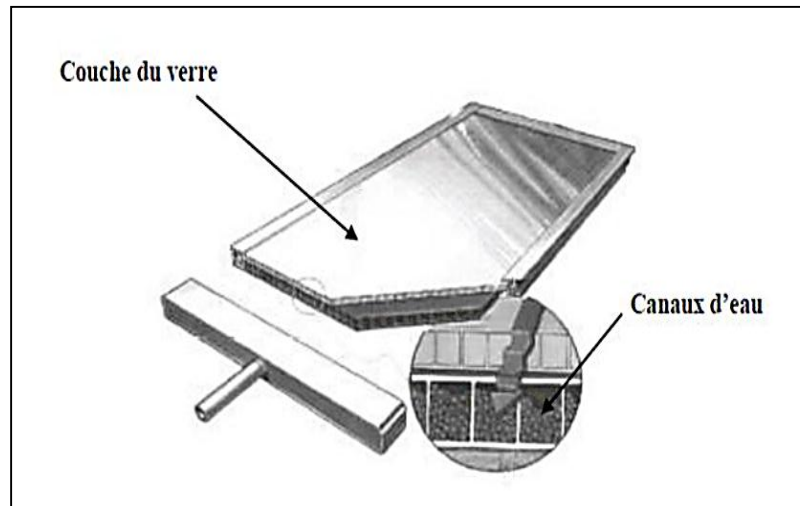


Fig. 2.5 Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau.

L'eau circule par l'intermédiaire de la force de gravité. Le panneau PV de surface 0.32 m^2 est constitué de 6 rangées de 5 cellules PV en série de 1.5 Wc chacune. L'analyse de ce prototype a consisté en la conception, et la modélisation du composant complétée par une étude expérimentale en vue d'évaluer ses performances thermique et électrique, et les interactions entre la production thermique en eau chaude et la production électrique. Pour cela, des modèles analytiques existants ont été modifiés en vue de les adapter à ce système hybride. La température de l'absorbeur croît dans la direction de l'écoulement du fluide caloporteur ; du haut vers le bas du capteur solaire dans ce cas.

Des travaux sur les performances électriques et thermiques d'un capteur PV/T à eau ont été étudiés par Ben Cheikh et al. [50].

Ils ont présenté une étude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride à travers l'élaboration d'un bilan thermique qui fait intervenir les échanges thermiques entre les différents composants du capteur hybride. Les résultats typiques de programme de simulation de cette étude ont été pris sous les conditions suivantes : $T_{fin}=T_{amb}=298 \text{ K}$, $V=1 \text{ m/s}$ et $G=1000 \text{ W/m}^2$. Ils ont fait aussi une étude paramétrique sur la température du fluide en faisant varier le débit massique et le rayonnement G . La température du fluide à la sortie diminue en fonction du débit massique et sa valeur augmente avec l'augmentation du rayonnement G . La température de la cellule dans le cas d'un modèle PV est plus élevée que celle d'un capteur PV/T qui assure le refroidissement du modèle PV, contrairement au rendement électrique qui est plus élevé dans le cas d'un capteur PV/T. Le rayonnement G a une influence sur le rendement thermique du capteur hybride, il varie linéairement avec l'éclairement et il atteint une valeur de $60,38\%$ pour un éclairement de 1000 W/m^2 et pour $T_{e,f}=T_a$ (en maintenant les autres valeurs constantes).

Patrick Dupeyart et al. [51] ont présenté une étude des performances énergétiques de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques couplés à un système de production d'eau chaude sanitaire. Le modèle choisi de capteur PV/T sous l'environnement TRNSYS. Les paramètres de ce modèle ont été adaptés en tenant compte des récents résultats expérimentaux obtenus au Fraunhofer ISE sur plusieurs types de capteur PV/T. Des simulations ont été réalisées pour la configuration de boucle d'eau chaude solaire (Chambéry). La production annuelle électrique des cellules PV ($Q_{elec} = 624 \text{ KW h}$) ce qui correspond à un rendement annuel de 10,4% et la production thermique annuelle ($Q_{th} = 624 \text{ KW h}$). Une comparaison a été faite entre les performances de l'installation PV-T et d'installations purement solaires thermiques et purement solaire PV de même surface. Le résultat de ces simulations montre qu'une installation intégrant un capteur PV/T voit sa production thermique diminuer de 36% par rapport à un capteur thermique classique et sa production électrique diminuer d'environ 19% par rapport à un capteur PV de même dimensions.

Fraisse et al. [52] étudient un système combinant un capteur solaire hybride à eau et un plancher solaire dans une phase d'intégration à un bâtiment situé à Macon. Le système est composé de cellules mono et poly-cristallines (Figure 2. 6).



Fig. 2.6 Le capteur solaire PV/T hybride à eau [52].

Ils démontrent qu'en présence d'un vitrage le rendement électrique annuel du système hybride combiné est de 6.8 %, ce qui est inférieur de 28 % au rendement d'un capteur solaire PV non intégré (9.4 %). Ils expliquent cette baisse de rendement électrique par un accroissement de la température de fonctionnement des panneaux PV (pouvant être supérieure à 100 °C) dû à la couverture de verre. Par contre, en absence de vitrage le rendement électrique est de 10 %, ce qui est supérieure de 6 % à celui du capteur solaire PV non intégré.

La forte augmentation de la température des modules PV en été, empêche l'utilisation de l'EVA comme adhésif des panneaux PV dans un composant vitré. De plus, ils notent que dans ce type de configuration, l'utilisation de cellules amorphes est la plus adaptée car elles sont moins sensibles aux variations de températures. Cependant, les rendements électriques obtenus sont faibles étant donné le bas rendement électrique des cellules PV amorphes (à savoir, 4 à 7 %) et les pertes thermiques liées au vitrage.

En 2007, Chow et al. [53] présentent la modélisation et l'étude comparative des performances d'un capteur solaire PV/T hybride à eau, d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire à eau. Deux prototypes de capteurs solaires hybrides ont été construits, le premier ayant été modélisé en 2006 [54].



Fig. 2.7 Premier et second prototypes construits [53].

Le second composant, plus performant a été modélisé plus finement. C'est un capteur solaire vitré composé d'un panneau PV en silicium cristallin collé à un absorbeur métallique (Figure 7). Des tubes de circulation d'eau sont soudés à l'arrière de cet absorbeur. Le système est couplé à un ballon de stockage horizontal. Les résultats de la simulation montrent que le rendement thermique annuel moyen en eau de ce capteur solaire PV/T hybride à eau est de 38.1 % et celui du capteur solaire à eau, de 43.2 %. De plus, la comparaison du capteur solaire hybride avec un capteur solaire PV montre que le refroidissement avec de l'eau comme fluide caloporteur permet de réduire la température de fonctionnement des modules PV. Dans ce sens, la production d'énergie électrique annuelle du capteur solaire hybride est supérieure de 2.2 % à celle du capteur solaire PV.

Chow et al. [55] ont poursuivi cette étude des capteurs solaires hybrides PV/T à eau à travers l'intégration d'un système à la façade d'un bâtiment et l'étude expérimentale de ses

performances thermiques et électriques. Le rendement thermique a été estimé à 38.9 % à basse température et le rendement électrique à 8.56 %.

En 2007, Kalogirou et Trip Anagnostopoulos [56] poursuivent une étude précédente menée sur les capteurs solaires PV/T hybrides à air, en analysant cette fois, le comportement des capteurs solaires PV/T hybrides à eau comportant des panneaux PV à base de cellules en silicium poly-cristallin ou des cellules amorphes, sur trois sites. Ces composants ont été intégrés à des bâtiments industriels et ont chacun une surface totale de 300 m².

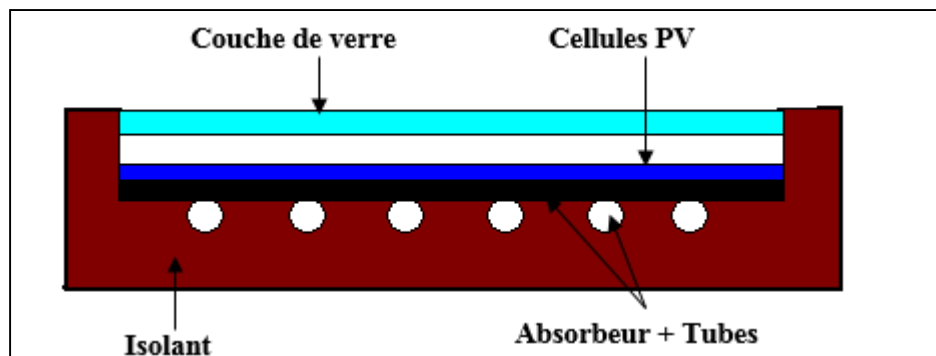


Fig. 2.8 Section du capteur solaire hybride à eau étudié [56].

Le capteur solaire hybride a été isolé en face arrière par une couche de 5 cm de polyuréthane (Figure 2. 8). Les résultats de simulations réalisées à partir du logiciel TRNSYS montrent que la production électrique d'un capteur solaire PV est supérieure de 25 % à celle du composant hybride. Mais, le système hybride permet de couvrir une grande partie des besoins en énergie thermique des bâtiments considérés. L'évaluation de l'aspect économique de ces systèmes a montré qu'ils sont avantageux en particulier pour les sites bien ensoleillés. Le constat a été fait que les systèmes hybrides à eau constitués de modules PV sans protection thermique en face avant, ont d'importantes pertes thermiques entraînant ainsi un faible niveau de température de fonctionnement du système. Une couverture de verre peut ainsi être ajoutée en face avant pour y remédier, bien que les absorptions et réflexions supplémentaires inhérentes du rayonnement solaire entraînent une baisse du rendement électrique.

La recherche sur les capteurs solaires hybrides à liquide caloporteur est en constante évolution, ainsi la liste des systèmes proposés précédemment n'est pas exhaustive. Au niveau du marché, la recherche bibliographique effectuée en particulier dans le rapport de synthèse EU-Project PV – Catapult sur les composants hybrides nous a permis de constater que peu de capteurs solaires de type liquide ont été commercialisés, jusqu'à présent.

Nous pouvons citer le capteur solaire PV/T à eau non vitré commercialisé par la société Millenium Electric. De plus, la société ECN propose le capteur solaire PV/T vitré PVTWINS.

C'est le produit d'une collaboration entre ECN, ZEN Solar et Shell Solar and Renewable Energy Systems (RES), en Angleterre.

De 1996 à 1997, Solarwatt conduit un projet visant à produire un capteur solaire PV/T à eau. Cependant, le système n'ayant pas passé le test de résistance aux conditions climatiques faute d'une bonne isolation électrique des modules PV lors d'une démonstration en Allemagne, le concept fut abandonné.

Plus tard, les entreprises SDA, Sunearth Unisolar mènent de 1997 à 2003 un projet intitulé PV BONUS consistant à combiner un capteur solaire PV laminé Unisolar à un capteur solaire thermique Sunearth. Mais, les nombreuses difficultés techniques rencontrées dues principalement à l'incompatibilité mécanique des matériaux de construction, ont empêché l'aboutissement du projet. La compagnie Power light conduit de 1997 à 2003, le projet PV BONUS dans lequel a été développé un système composé d'un capteur solaire PV laminé flexible Unisolar collé sur un absorbeur flexible EPDM. Cependant, suite à des décollements des modules PV, la commercialisation a été repoussée. En 1999, ICEC développe et teste un composant PV/T à liquide caloporteur mais, la mise en vente du produit n'a pas été effectuée. En Juillet 2004, dans le cadre du projet de Recherche Intégré PRI6.2 [57] et d'un soutien ADEME, un prototype de capteur solaire PV/T à eau a été développé en partenariat avec Clipsol, le LOCIE et le CETHIL.

Touafek et al. [58] ont étudié la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride. Ils ont établi par simulation numérique le comportement thermique de ce capteur PV/T, ainsi que la cartographie de température pour cinq configurations : la première configuration représente le capteur photovoltaïque isolé thermiquement et non recouvert. La deuxième configuration était le capteur photovoltaïque isolé thermiquement, et sur lequel une vitre supplémentaire a été déposée. La troisième configuration était l'installation d'un échangeur de chaleur, constitué d'une plaque en cuivre et d'un serpentin en tubes de cuivre, au-dessous du module photovoltaïque. Ils supposent l'état stationnaire, c'est-à-dire que le fluide s'écoule à l'intérieur de la tubulure et qu'il n'y a pas de circulation pendant la durée de la simulation. Tandis que dans la quatrième configuration, ils ont ajouté une vitre supplémentaire au-dessus du capteur. Et enfin ils ont déposé une seconde vitre au-dessus du capteur hybride, représentant ainsi la cinquième configuration. Les résultats de la simulation sur le comportement thermique du capteur solaire PV/T y sont présentés et discutés.

2.2.2.3 Capteurs PV/T de concentration

Le capteur PV/T à concentration veut dire la concentration du rayonnement solaire sur un capteur hybride PVT.

Garg et Adhikari [9] ont démontré l'utilisation de plusieurs CPCs (capteur de concentration parabolique) tronqués dans un module simple de PV/T. Ils ont constaté que leur capteur pour le chauffage à air, avec un taux de concentration de 3, a eu comme conséquence de meilleures efficacités une fois intégré dans un système. Un système semblable a été également démontré par Othman et al. [59] (2005). Cependant, où Garg et al. [9] ont employé un passage simple pour chauffer l'air, ils ont utilisé un double passage avec une surface à ailettes arrière dans leur système. Le but de la surface à ailettes était d'améliorer le transfert thermique sur le visage arrière du module PV.

Le système de Tripanagnostopoulos et al. [60] (un système de chauffage à air) est peut-être l'incarnation le plus simple d'un concentrateur de PV/T. Comme mentionné, ceci a utilisé un réflecteur plat pour diriger le rayonnement solaire supplémentaire sur un capteur PVT. Cependant, la concentration du rayonnement solaire peut également être réalisée avec les objectifs paraboliques composés les réflecteurs des concentrations (CPC), linéaires ou circulaires de Fresnel ou avec des plaques paraboliques. Un arrangement typique d'un capteur PVT de CPC est montré sur la figure (2. 9).

Comme mentionné, la concentration par les réflecteurs linéaires de Fresnel est également possible. Un système basé sur cette méthode qui a eu un rapport de concentration de 11. Ils pouvaient obtenir une efficacité thermique maximum approximativement de 60 % de leur système sans la charge électrique. D'ailleurs, ils ont identifié le fait qu'une des résistances thermiques principales dans leur capteur PV/T était celle entre la cellule PV et le plat d'amortisseur sur lesquels il a été collé [1]. Une autre variation sur la ligne focalisant des collecteurs PV/T est les GERCURES (concentrant le système de la chaleur et d'alimentation) ; actuellement en service à une des résistances à l'université nationale australienne (ANU). Ce système, est discuté, utilise un réflecteur parabolique de cuvette avec un module de PV/T monté à son foyer. Le système a un taux de concentration de 37 et a un maximum rapport efficacité combinée de 69%.

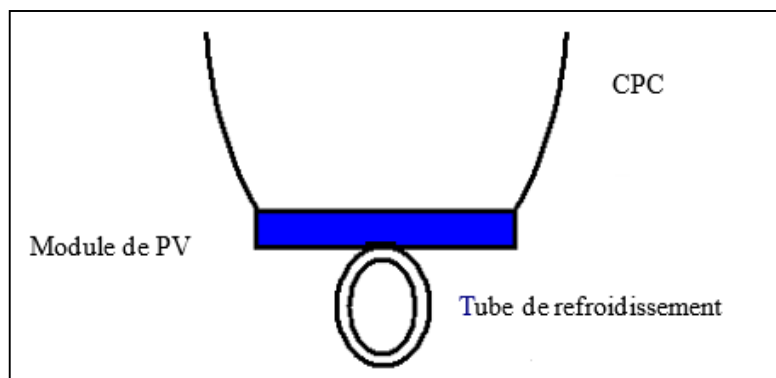


Fig. 2.9 Capteurs PVT de concentration.

Le système a eu une efficacité thermique inférieure que ceux rapportés dans d'autres études, les pertes de chaleur du système de GERCURES où beaucoup inférieur, en raison de son plus petit secteur de chauffage. Les imperfections dans la forme de concentrateur ont eu comme conséquence l'illumination non uniforme affectant de ce fait l'exécution électrique.

2.3 Etat d'art sur le PV/T

Nous présenterons comme une synthèse sur les différentes conceptions et les résultats bibliographiques sur les capteurs solaires hybrides (PV/T). De ce fait, notons que la recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. En 2005, Zondag et al. [61,62] propose un état de l'art sur les capteurs solaires PV/T hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV Catapult. Parmi les premières études recensées par [61,62], certaines mettent l'accent sur l'évolution de la configuration géométrique des composants et d'autres sur les méthodes de modélisation.

En 1976, Wolf [63] effectue l'analyse d'un capteur solaire thermique comportant des modules PV à base de silicium et couplé à un système de stockage de chaleur.

Par la suite, l'étude réalisée par Kern et Russel [4] en 1978 donne les principes de base des capteurs solaires employant de l'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. En 1982, Hendrie [64] développe un modèle théorique de système PV/T hybride en se basant sur des corrélations liées à des capteurs solaires standards. En 1981, Raghuraman [65] présente des méthodes numériques permettant la prévision des performances des capteurs solaires plans PV/T à eau ou à air. Plus tard, en 1985, Raghuraman [66] développent des logiciels de simulation permettant l'étude des performances des systèmes PV/T hybrides à air, et mettent l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur les rendements thermique et électrique de ces composants solaires. En 1986, Lalovic et al. [67] proposent un nouveau type de cellules amorphes a-Si transparentes comme solution économique pour la construction de modules PV.

Diverses études expérimentales et théoriques ont été réalisées ensuite, en vue du développement des systèmes PV/T hybrides.

La plupart des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermiques et électriques ou d'analyser l'aspect économique des systèmes hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire assuré. Pour cela, quelques auteurs mettent l'accent sur le développement de modèles thermiques analytiques ou réalisés suivant une analogie électrique, et plus rarement de modèles électriques de photo-conversion en régime permanent ou dynamique. Certaines de ces analyses s'appuient en outre sur des confrontations avec des études expérimentales en conditions contrôlées ou in situ sur divers sites.

D'autres recherches ont pour but l'optimisation des performances des composants solaires existants en améliorant les conditions de fonctionnement (inclinaison, orientation du capteur...) ou en proposant des configurations géométriques innovantes. Ainsi, elles se basent sur la modification des dimensions ou des propriétés des matériaux de constitution (isolant thermique, absorbeur, cellules PV...) ou des fluides caloporteurs (air, eau...). Ces améliorations visent à accroître la quantité d'énergie solaire absorbée et les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur ou à réduire les pertes thermiques extérieures du capteur solaire hybride.

2.3.1 Etude bibliographique sur le capteur hybride PV/T

Le soleil est la source de la plupart de nos approvisionnements en énergie renouvelable et de l'utilisation directe du rayonnement solaire (Voir figure 10). Les capteurs solaires thermiques sont utilisés pour convertir le rayonnement solaire en énergie thermique, dans un collecteur thermique, un liquide ou un gaz est chauffé et pompé, ou autorisé à circuler par convection thermique, autour d'un circuit et utilisé pour le chauffage domestique ou industriel. Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour la conversion directe de la lumière du soleil en électricité. La différence la plus importante entre le système solaire thermique et photovoltaïque est que les systèmes solaires thermiques produisent de la chaleur et des systèmes photovoltaïques produisent de l'électricité. Les Cellules PV utilisent une petite fraction de la radiation solaire incidente pour produire de l'électricité et le reste est tourné essentiellement dans la chaleur perdue dans les cellules, ce qui provoque l'augmentation de la température des cellules PV par conséquent l'efficacité du module. Le refroidissement soit par circulation naturelle ou forcée peut réduire cette température des cellules photovoltaïques. Une alternative à la cellule photovoltaïque est d'utiliser le système photovoltaïque thermique (PV/T), où la cellule photovoltaïque est couplée avec des dispositifs d'extraction de chaleur.

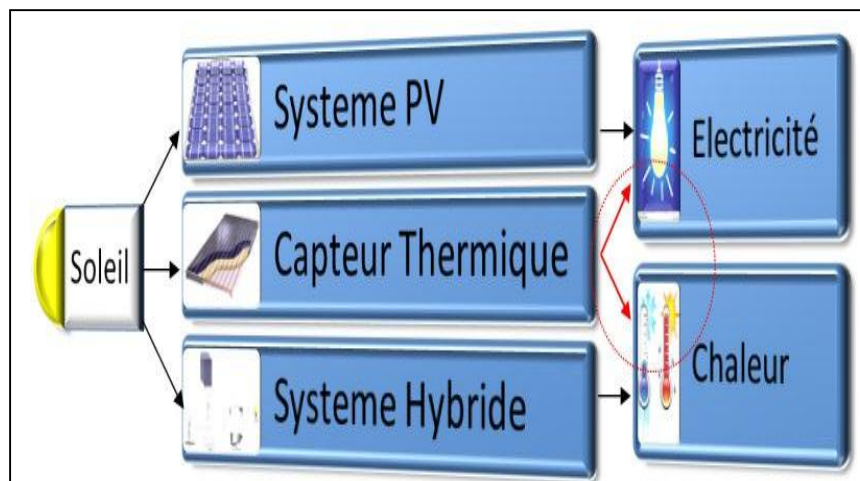


Fig. 2.10 Systèmes d'exploitation de l'énergie solaire.

Le refroidissement simultané du module PV maintient rendement électrique au niveau satisfaisant et donc le collecteur PV / T propose une meilleure façon d'utiliser l'énergie solaire grâce à l'efficacité globale ajoutée. Les caractéristiques intéressantes du système PV / T sont :

- le même système peut être utilisé pour produire de l'électricité et de la production de chaleur.
- l'efficacité combinée est toujours supérieure à l'aide de deux systèmes indépendants et est particulièrement attrayant dans BIPV lorsque l'espace de toit est limité.
- la production de chaleur peut être utilisée à la fois pour le chauffage et le refroidissement (refroidissement desséchant) applications en fonction de la saison et pratiquement étant adapté pour des applications domestiques.
- peut être facilement être modernisés / intégrée à la construction sans aucune modification majeure et le remplacement du matériel de toiture avec le système PV / T peut réduire la période de récupération.

2.3.2 Techniques pour augmenter les performances de PV/T

Il existe de nombreux procédés d'amélioration de la performance des collecteurs PV / T telles que l'utilisation d'ailettes fixées à la surface arrière de la PV, feuille ondulée ou treillis métallique dans le canal ou de fournir une circulation sur les deux surfaces avant et arrière du module photovoltaïque.

Plusieurs éléments de géométrie peuvent être placés entre le module photovoltaïque et la paroi de canal opposé, ainsi que sur la paroi arrière, par laquelle l'extraction de chaleur peut être effectuée de manière plus efficace. Grattage la paroi du canal en face avec des nervures et/ ou en utilisant la surface du mur de haute émissivité, ce qui est considérablement une amélioration de chauffage de fluide à faible coût a également été adapté (a). La feuille ondulée à l'intérieur de canal fluide le long de l'écoulement de fluide peut être fixé sur la surface arrière PV ainsi que sur la surface opposée de la paroi du canal (b). Une autre modification consiste à mettre tubes légers le long de l'écoulement de fluide. Dans le canal, avec une légère élasticité pour assurer un contact thermique satisfaisant avec surface arrière PV et la paroi du canal (c). Ces tubes sont chauffés par conduction, convection et rayonnement à partir de la surface arrière PV qui peuvent contribuer à l'extraction de chaleur de fluide, en évitant l'augmentation indésirable de canal en face de la température de surface de paroi.

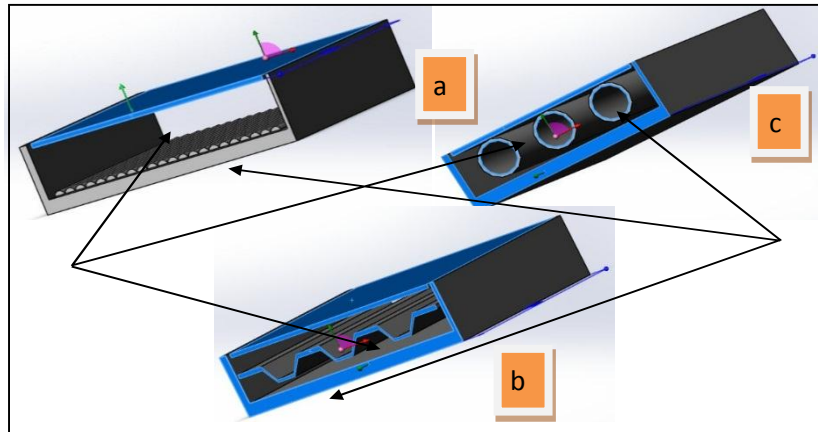


Fig. 2.11 Amélioration de l'extraction de chaleur du système d'air PV / T avec (a) des nervures, (b) une feuille ondulée et (c) des tubes.

Tripanagnostopoulos et al. [68-73] Ont fait des études approfondies pour améliorer la cinétique de transfert de chaleur dans le canal de fluide d'un système PV / T (figure 12).

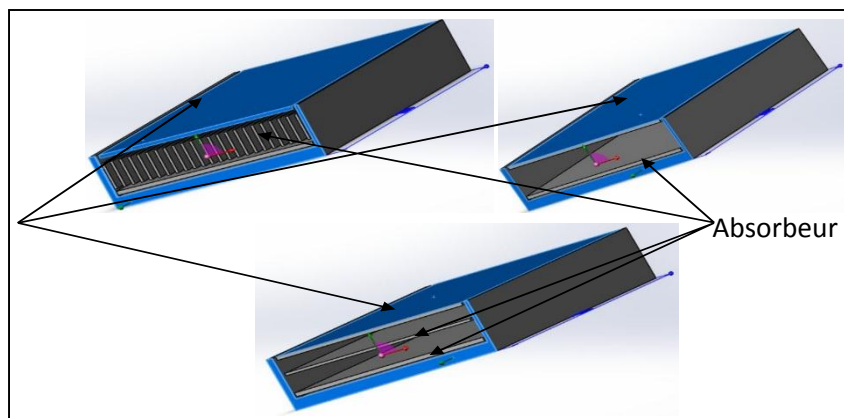


Fig. 2.12. Vue des différentes conceptions de modèles PV / T.

Ils ont étudié les modifications d'amélioration de la performance en utilisant soit ailettes paroi arrière ou de tôle mince et plat suspendue au milieu d'un système de PV / T pour atteindre une production thermique plus élevée et de faciliter le refroidissement du PV de manière à maintenir le rendement électrique au niveau acceptable. Les vues en coupe transversale de leurs modèles sont présentées dans la figure 13.

Le système se composait d'un canal simple, attachée derrière le module PV et pour les systèmes améliorés ils modifié les canaux en suspendant une tôle d'aluminium mince et plat au milieu du canal de fluide ou en attachant un profil ailettes rectangulaires sur le mur opposé à la surface arrière PV. Ils ont également suggéré pour joindre ailettes à la paroi arrière comme il est plus facile par rapport à les fixer à l'arrière du module photovoltaïque qui peut nécessiter des caractéristiques spéciales dans la production de modules photovoltaïques.

Des expériences ont également été réalisées pour les deux systèmes PV non émaillés et vitrage. Les résultats montrent que le vitrage supplémentaire améliore la production de chaleur il abaisse le rendement électrique d'un collecteur PV / T. Othman et al. [59] ont également confirmé que la fixation par ailettes à l'arrière du panneau photovoltaïque, a été amélioré le transfert de ainsi que l'efficacité globale du système.

Des nervures de l'ordre de 5 mm ont été formées sur la paroi du canal d'air inverse, dans le but de combiner les avantages de TMS et ailette (représenté sur la figure 13), où la formation de nervures stimule la performance des petites ailettes. Les côtes ont en outre été peintes en noir pour augmenter la transmission de chaleur par rayonnement à partir de la surface arrière TMS à la paroi du canal d'air. Cette méthode est particulièrement prometteuse et rentable, non seulement en termes de transfert de chaleur, mais aussi les coûts de fabrication, d'installation et matérielles sont beaucoup plus faibles pour le mentionné ci-dessus la géométrie de la plaque simple par rapport à d'autres conceptions.

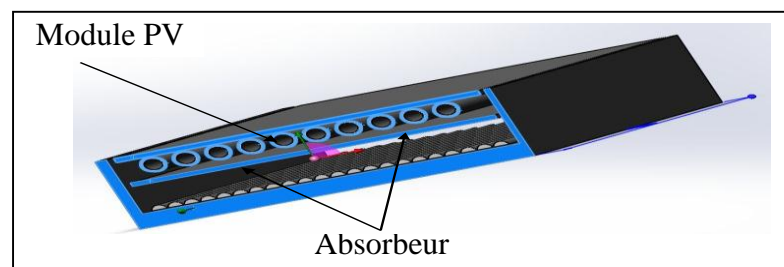


Fig. 2.13 : Section de PV/ T à eau / air.

Confirmant l'amélioration de la performance thermique de système en utilisant la plaque métallique à l'intérieur du canal de fluide, Tripanagnostopoulos et al. [73] aussi étendu en utilisant ladite modification de l'installation photovoltaïque dans lequel la surface de l'échangeur de chaleur est intégrée au-dessous du PV. Dans l'étude, au lieu d'utiliser une seule feuille, deux plaques métalliques (figure 14) ont été utilisées pour affecter une augmentation de la surface de transfert de chaleur. L'étude a montré que le système pourrait obtenir une efficacité thermique maximale d'environ 45% et 55% pour l'extraction de chaleur de l'air et le mode d'extraction de chaleur de l'eau, respectivement.

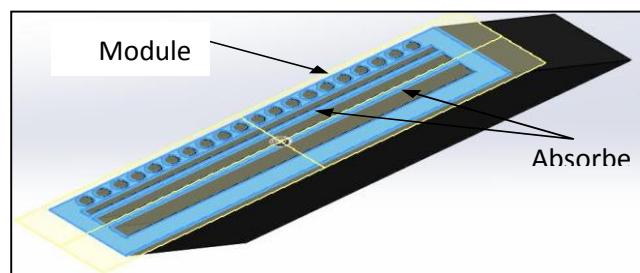


Fig. 2.14 : PV/T Bi-fluide à deux absorbeurs.

Pour fabriquer des dispositifs d'énergie solaire plus attrayant pour les applications potentielles, il est essentiel de développer un modèle thermique du photovoltaïque intégré et le système solaire thermique, qui pourrait être utilisé pour analyser la performance globale du système en vertu de diverses climatiques ainsi que les conditions de conception. Littérature montre donc qu'il existe modèles 1D, 2D et 3D dynamiques pour un système PV / T [74-77] et que le modèle 1D d'état stable simple pour calculer le rendement quotidien de système PV / T effectuée [76]. Par conséquent, on peut dériver une expression analytique de la température du module PV et de fluide sur la base de l'équilibre énergétique de chaque composant du système de refroidissement proposé.

2.3.3 Modèles analytiques de capteur PV / T

Des expressions analytiques ont été tirées en termes de conception et de facteurs climatiques pour prédire l'efficacité thermique instantanée pour la configuration actuelle. Dans les premiers travaux sur l'analyse théorique du système PV / T, Florschuetz [78] a fait une extension de l'équation Hottel-Whillier pour modéliser collecteurs PV / T en adoptant de simples modifications aux paramètres classiques utilisés dans le modèle d'origine et toutes les autres relations existantes prédire la performance de collecteur sont inchangées. Il a développé une relation linéaire simple pour prédire l'effet de la température de fonctionnement de la PV sur l'efficacité du système PV / T. Raghuraman [79] a également réalisé modèle numérique élaborée à la fois pour le capteur PV / T type liquide et de l'air et a constaté que le système avec de l'air comme fluide de travail pourrait atteindre une efficacité thermique d'environ 42%.

Jones [80] également dérivés d'une expression pour la température du module PV en fonction de rayonnement et la température ambiante. Le modèle dérivé dans leur étude a été basé sur la description théorique de la température du module décrit par Schott. Selon [80], il y avait plusieurs paramètres qui étaient responsables de la réduction du rendement électrique du module PV comme facteur de forme (PF), les pertes ohmiques entre deux cellules solaires successifs et la température du module. Chow [50] a développé un modèle dynamique explicite fondée sur le contrôle de volume approche aux différences finies pour un chauffe-eau PV / T à simple vitrage à plaque plane. Il a utilisé une couche adhésive mince faite d'une couche d'EVA et couche Tedlar pour fixer la plaque de PV sur la plaque absorbeur. Il a trouvé deux défauts de fabrication de PV / T l'attachement entre la plaque de PV et de la plaque de l'absorbeur, et la liaison entre la plaque de l'absorbeur et les tubes métalliques. Il a fait état d'une efficacité combinée maximale d'un collecteur parfaite pourrait être de plus de 70% et pourrait diminuer à moins de 60% pour un collecteur de faible qualité.

Un autre modèle physique a été développé par Bergene et Lovvik [81] pour faire des prédictions quantitatives de performance d'un système hybride photovoltaïque / thermique. Leur modèle a été purement basé dans l'analyse de différents modes de transfert de chaleur tels que la conduction, la convection et le rayonnement rencontrés dans le processus de transfert d'énergie. Ce modèle pouvait prédire la quantité de chaleur qui peut être tirée à partir du système ainsi que la puissance théorique de sortie. Leur modèle proposé prédit la performance du système assez bien avec l'efficacité du système, à la fois thermique et électrique, étant d'environ 60-80%.

Sopian et al. [82] a également développé un modèle d'état stable pour analyser la performance thermique de systèmes PV / T d'air simple et double passe. L'étude montre que le système PV/ T d'air à double passe avait une meilleure efficacité (thermique et combiné) par rapport au système à passage unique (typique) en raison du refroidissement efficace des cellules photovoltaïques.

Une étude approfondie sur les performances thermiques, électriques, hydrauliques et globaux des collecteurs PV / T a été réalisée par Hegazy [83]. Il a examiné quatre modèles avec l'air circulant soit sur l'absorbeur ou en dessous et sur les deux côtés de l'absorbeur en un seul passage ou dans un double mode de passe. Sur la base des résultats de la performance, il a suggéré que la conception, dans lequel on laisse l'air de passer des deux côtés de l'absorbeur, est le modèle le plus approprié pour convertir l'énergie solaire en chaleur à basse qualité et l'énergie électrique de haute qualité. Aussi tel système était simple à être construit par des artisans locaux dans les zones rurales des pays en développement.

Récemment, suite aux travaux de Hegazy [83], en 2005 Othman et al. [59] conçu et fabriqué un prototype solaire photovoltaïque thermique de l'air double passé avec CPC avec des ailettes. Le système a été testé pour ses performances sur une large plage de conditions de fonctionnement, et signalé que la production d'électricité a diminué avec la température de l'écoulement d'air en augmentation, ce qui implique que la température de l'air doit être maintenue aussi faible que possible. Toutefois, si l'air chaud est nécessaire pour certaines utilisations finales, un compromis entre la maximisation de la production d'électricité et la production d'air chaud de la température utile est nécessaire.

Sandnes et Rekstad [26] ont développé un modèle analytique pour le système PV / T qui pourrait simuler l'évolution de la température et de la performance des deux unités thermiques et photovoltaïques. Ils ont combiné un collecteur de chaleur solaire polymère avec des cellules photovoltaïques en silicium monocristallin dans une unité de génération d'énergie hybride qui pourrait produire simultanément la chaleur à et de l'électricité. Ils testés expérimentalement l'unité de PV / T pour déterminer sa performance thermique et

photovoltaïque, en plus des mécanismes d'interaction entre PV et les systèmes d'énergie thermique. Les résultats de simulation sont en accord avec les données expérimentales, et leurs résultats ont montré que les cellules solaires en collant sur la surface absorbante, l'énergie solaire absorbée par le comitè pourrait être considérablement réduit (10% de l'énergie incidente). Selon eux, ceci a été attribué en raison de l'absorption optique plus faible dans les cellules solaires par rapport à la plaque d'absorbeur noir. En outre, il y avait une augmentation de la résistance de transfert de chaleur entre la surface absorbante et le fluide caloporteur introduit dans l'interface cellule / absorbeur- plaque qui a abouti à une réduction du facteur de dissipation de la chaleur du collecteur, FR.

Niccolò Aste et al. [84,85] ont présenté une analyse thermique a été réalisée, L'étude a porté sur deux les types absorbeurs, caractérisés par des conceptions différentes : un absorbeur un tube de forme serpentin et un absorbeur avec des tubes parallèle. À partir de l'analyse thermique, d'autres configurations électriques ont été simulés afin de définir la meilleure solution pour optimiser au maximum le rendement photovoltaïque. Il remarque à partir des résultats obtenus, que l'absorbeur de forme parallèle est de meilleures performances que l'absorbeur de forme serpentine dans toutes les configurations électriques analysés (figure 15).

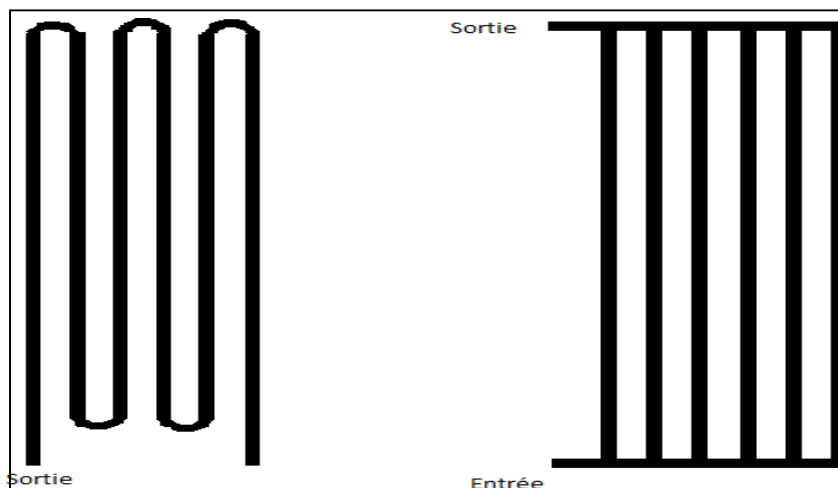


Fig. 2.15 : Les formes des deux types d'absorbeur.

Jin-Hee Kim et Jun-Tae Kim [86] ont analysé expérimentalement les performances électriques et thermiques d'un capteur PV/T non vitré avec un absorbeur d'Aluminium. Ils ont été conclus que pour un refroidissement complet de PV/T l'efficacité énergétique globale du système est d'environ 65%. En combinant les valeurs moyennes de ses rendements thermiques et électriques. Ils ont étudié et évalué les performances électriques et thermiques

du système hybride BIPV/T à air intégré dans la façade d'un bâtiment par la simulation sous logiciel de simulation TRNSYS avec les sous-modèles du type 567 et du type 56.

Zhang et al. [87] ont discutée sur le potentiel du marché mondial d'énergie solaire thermique, photovoltaïque (PV) et photovoltaïque / thermique PV/T.

2.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce capteur les différents type de concentration et leurs principe de fonctionnement et le système de capteur solaire hybride, c'est-à-dire un système de cogénération permettant la production simultanée d'énergie électrique et d'énergie thermique par circulation d'un fluide caloporteur.

La synthèse bibliographique réalisée sur les capteurs solaires thermiques (à air et à eau) et sur les capteurs solaires photovoltaïques existants à été présentés, a mené à la conception de prototype du capteur PV/T hybride à eau.

Les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques ont été traités par plusieurs chercheurs et dans plusieurs laboratoires de recherche. Ceci témoigne de l'importance et de l'avenir de ces capteurs dans les systèmes énergétiques. Néanmoins plusieurs efforts restent à mener afin d'améliorer les performances thermiques et électriques de ces capteurs. La résistance thermique entre la couche des cellules photovoltaïques et le fluide caloporteur circulant au-dessous de l'absorbeur devrait être réduite au maximum. Un transfert à basse température a comme conséquence un grand gradient de température et donc une température élevée du capteur photovoltaïque. Ceci diminue le rendement thermique et électrique du capteur.

Dans ce travail l'effort est dirigé sur l'amélioration du transfert thermique entre la couche des cellules solaires et le fluide caloporteur. L'objectif est de réaliser un nouveau type de capteur hybride PV/T de configuration simple et efficace, permettant une meilleure exploitation de la chaleur des cellules solaires.

Références

- [1] Khelifa Abdelkrim., Etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PV/T., Mémoire de Magister, Université de Batna. (2011).
- [2] Khelifa Abdelkrim., Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T. Université Hadj Lakhdar Batna. (2017).
- [3] Wolf, M., Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences, *Energy Conversion*, Vol. 16, 1976, pp. 79-90.
- [4] Russell, R. F., Uniform temperature heat pipe and method of using the same, Patent US4320246; 1982. USA.
- [5] Hendrie, S. D., Evaluation of combined Photovoltaic/Thermal collectors. Proc. of Int. Conf. ISES, Atlanta, Georgia, USA, May 28 – June 1, 1979, Vol.3, 1865-1869.
- [6] Florschuetz, L. W., Extention of the Hottel -Whillier model to the analysis of combined photovoltaic / thermal flat plate collectors, *Solar Energy*, Vol. 22, 1979, pp. 361-366.
- [7] Cox, C. H. and Raghuraman, P., Design considerations for flat - plate-photovoltaic/thermal collectors. *Solar Energy*, Vol. 35, 1985, pp. 227-241.
- [8] Sopian, K., Liu H.T., Yigit, K.S., Kakac, S. and Veziroglu, T. N., Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 37. No. 11, 1996, pp. 1657-1670.
- [9] Garg, H. P., and Adhikari, R. S., Conventional hybrid photovoltaic / thermal (PV/T) air heating collectors: steady – state simulation, *Renewable Energy*, Vol. 11, 1997, pp. 363-385.
- [10] Brinkworth, B. J., Cross, B. M., Marshall, R. H. and Hongxing Yang., Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy*, Vol. 61, 1997, pp. 169-179.
- [11] Moshfegh, B., Sandberg, M., Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. *Renewable Sustainable Energy Rev*, Vol. 2, 1998, pp. 287–301.
- [12] Brinkworth, B. J., Marshall, R. H., Ibarahim, Z., A validad model of naturally ventilated PV cladding. *Solar Energy*, Vol. 69, 2000, pp. 67-81.
- [13] Eicker, U., Fux, V., Infield, D. and Mei, Li., Heating and cooling of combined PV- solar air collectors facades. In Proc. Int. Conf. 16th Europ. PV solar energy. 1-5 May Glasgow, UK, 2000. 1836-1839.
- [14] Bazilian, M., Leeders, F., van der Ree, B. G. C. and Prasad, D., Photovoltaic

- cogeneration in the built environment. *Solar Energy*, Vol. 71, No. 1, 2001, pp. 57-69.
- [15] Chow T.T., Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, Vol. 75, 2003, pp. 143-152.
- [16] Hegazy A. A., Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 41, 2000, pp. 861-881.
- [17] Ito S. and Miura N., Usage of a DC fan together with photovoltaic modules in a solar air heating system. In Proc (CD-ROM) ISES World Congress Goteborg, Sweden, 14-19 June (2003).
- [18] Infield D., Mei Li., Eicker U., Thermal performance estimation for ventilated PV facades. *Solar Energy*, Vol. 76, 2004, pp. 93-98.
- [19] Charron R., Athienitis A.K. Optimization of the performance of double-facades with integrated photovoltaic panels and motorized blinds. *Solar Energy*, Vol. 80, 2006, pp. 482-491.
- [20] Brinkworth B.J., Sandberg M., Design procedure for cooling ducts to minimise efficiency loss due to temperature rise in PV arrays. *Solar Energy*, Vol. 80, 2006, pp. 89-103.
- [21] Bergene T. and Lovvik O.M., Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*, Vol. 55, 1995, pp. 453-462.
- [22] Elazari A. 1998., Multi Solar System – Solar multimodule for electrical and hot water supply for residentially building. In Proc. 2nd World Conf. On Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6-10 July, Vienna, Austria, 2430-2433.
- [23] Hausler T. and Rogash H. 2000. Latent heat storage of photovoltaics. In Proc. 16th Europ. PV Solar Energy Conf., 1-5 May, Glasgow, U.K. Vol III, 265-2267.
- [24] Kalogirou S.A., Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-Thermal solar system for Cyprus. *Renewable Energy*, Vol. 23, 2001, pp. 247-260.
- [25] Huang B.J. Lin T.H. Hung W.C. and Sun F.S., Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, Vol. 70, 2001, pp. 443-448.
- [26] Sandness B., Rekstad J., A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate-experimental study and analytical model. *Solar Energy*, Vol. 72, 2002, pp. 63-73.
- [27] Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A., The thermal and electrical yield of a PV-Thermal

- collector. *Solar Energy*, Vol. 72, 2002, pp. 113-128.
- [28] Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A., The yield of different combined PV-thermal collector design. *Solar Energy*, Vol. 74, 2003, pp. 253-269.
- [29] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P., Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy*, Vol. 72, 2002a, pp. 217-234.
- [30] Tripanagnostopoulos Y., Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, Vol. 81, No. 9, 2007, pp. 1117-1131.
- [31] Mazon R., Kaiser A.S., Zamora B., Garcia J.R., Vera F., Analytical model and experimental validation of the heat transfer and the induced flow in a PV cooling duct in environmental conditions. WREC 2011, Linköping, Sweden 8-13 May 2011, 2907- 2915.
- [32] Dupeyrat P., Menezo Ch., Fortuin S., Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. *Energy and Buildings*, Vol. 68, 2014, pp. 751-755.
- [33] Ibrahim Adnan, Yusof Othman Mohd, Ruslan Mohd Hafidz, Mat Sohif, Sopian Kamaruzzaman., Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable Sustainable Energy Rev*, Vol. 15, No. 1, 2011, pp. 352-65.
- [34] Ciulla G., Lo Brano V., Cellura M., Franzitta V., Milone D., A finite difference model of a PV-PCM system. *Energy Procedia*, Vol. 30, 2012, pp. 198-206.
- [35] Kim J.H., Kim J.T., The experimental performance of an unglazed PV-thermal collector with a fully wetted absorber. *Energy Procedia*, Vol. 30, 2012, pp. 144-151.
- [36] Aste N., Del Pero C., Leonforte F., Thermal-electrical optimization of the configuration a liquid PVT collector. *Energy Procedia*, Vol. 30, 2012, pp. 1-7.
- [37] Aste N., Del Pero C., Leonforte F., Water flat plate PV-thermal collectors: A review. *Solar Energy*, Vol. 102, 2014, pp. 98-115.
- [38] Helmers H., Kramer K., Multi-linear performance model for hybrid (C) PVT solar collectors. *Solar Energy*, Vol. 92, 2013, pp. 313-322.
- [39] Kramer K., Helmers H., The interaction of standards and innovation: Hybrid photovoltaic-thermal collectors. *Solar Energy*, Vol. 98, 2013, pp. 434-439.
- [40] Fortuin S., Hermann M., Stryi-Hipp G., Nitz P., Platzer W., Hybrid PV-Thermal collector development: concepts, experiences, results and research needs. *Energy*

- Procedia, Vol. 48, 2014, pp. 37-47.
- [41] Touafek K., Khelifa A., Adouane M., Theoretical and experimental study of sheet and tubes hybrid PVT collector. *Energy Conversion and Management*, Vol. 80, 2014, pp. 71-77.
- [42] Matuska T., Performance and economic analysis of hybrid PVT collectors in solar DHW system. *Energy Procedia*, Vol. 48, 2014, pp. 150-156.
- [43] Singo, A.T., *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome*", Thèse de doctorat université Henri Poincaré, Nancy-I, (2010).
- [44] Tiwari, A., Sodha, M. S., A rametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91, No. 1, 2007, pp. 17-28.
- [45] Y. Tripanagnostopoulos Y., Aspects and improvements of hybrid photovoltaic thermal solar energy systems, *Journal of Solar Energy*, Vol. 81, No. 9, 2007, pp. 1117-1131.
- [46] Touafek K., Haddadi M., Malek A., Bendaikha-Touafek W., Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, No. 1, 2008, pp. 153-165.
- [47] H. Oueslati, S. Ben Mabrouk, A. Mami, « Evaluation of the performance of solar air collector by using Bond Graph approach », *International Review on Modelling and Simulations*, Vol. xx, (2011).
- [48] Mei L., Infield D., Eicker U., Fux V., Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV façade, *Energy and buildings*, Vol. 35, 2003, pp. 605-617.
- [49] Tripanagnostopoulos Y., Tzavellas D., Chortatou M., Zoulia I., Hybrid PV-T systems with dual heat extraction operation, *Proceedings of 17th European PV Solar Energy Conference*, Munich (2001).
- [50] Ben Cheikh El Houcine H. and Marir- Benabbas M., Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PVT, *Revue des énergies renouvelables*, Vol. 16, No.2, 2013, pp. 257-268.
- [51] Patrick Dupeyrat, Yu Bai, Gérald Kwiatkowski, Gilles Fraisse et Christophe Menezo, Performances énergétiques de capteurs solaires hybrides PV-T pour la production d'eau chaude sanitaire.
- [52] Fraisse, G., Menezo, C., Johannes, K. Energy performance of water hybrid PV/T

- collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, Vol. 81, No. 11, 2007, pp. 1426-1438.
- [53] Chow T. T., He W., Ji J., Performance evaluation of photovoltaic-thermo syphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, Vol. 81, 2007, pp. 123-130.
- [54] Chow T.T., He W., Ji J., Hybrid photovoltaic-thermo syphon water heating system for residential application. *Solar Energy*, Vol. 80, No. 3, 2006, pp. 298-306.
- [55] Chow T.T., He W., Ji J., An experimental study of façade-integrated photovoltaic/water-heating system. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 1, 2007b, pp. 37-45.
- [56] Kalogirou S. A., Tripanagnostopouls Y., Industrial application of PVT solar energy systems. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 8-9, 2007, pp. 1259-1270.
- [57] Assoa Y. B., Performances de capteurs solaires PV/T hybrides bi-fluides intégrables à l'enveloppe des bâtiments. Etude expérimentale et modélisation adaptée, thèse, N° d'ordre 2008-ISAL-0007, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [58] Touafek K., Haddadi M., Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, No. 1, 2008, pp. 153-165.
- [59] Othman M.Y.H, Yatim B, Sopian K, Bakar M.N.A., Performance analysis of adouble- pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins. *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 13, 2005, pp. 2005-2017.
- [60] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P., Hybrid Photovoltaic, Thermal solar systems. *Solar Energy*, Vol. 72, 2002a, pp. 217-234.
- [61] Zondag, H. A., Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 4, 2008, pp. 891-959.
- [62] Zondag, H. A., Bakker, M., Helden, N W. G. J. Eds., PV/T Roadmap-a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. *Rapport EU- Project PV – Catapult*, Vol. 38, No. 24, 2006.
- [63] Wolf M., Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, Vol. 16, No. 1-2, 1976, pp.79-90.
- [64] Hendrie S. D., Photovoltaic / thermal collector development program. *Rapport*

- final. Etats-Unis : Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [65] Raghuraman P., Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/ thermal, flat-plate collector performance. *Journal Solar Energy Engineering*, Vol. 103, No. 2, 1981, pp. 291-298.
- [66] Cox III C.C., Raghuraman P., Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors. *Solar Energy*, Vol. 35, No. 3, 1985, pp. 227-241.
- [67] Lalovic B., Kiss Z., Weakliem H., A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. *Solar Cells*, Vol. 19, No. 2, 1986, pp. 131-138.
- [68] Tripanagnostopoulos Y. Tzavellas D., Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. In: *Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference*, Munich, Allemagne, 2001, pp. 2515-2518.
- [69] Tripanagnostopoulos Y., Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, Vol. 81, 2007, pp. 1117-31.
- [70] Tonui J. K, Tripanagnostopoulos Y., Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy*, Vol. 32, 2007, pp. 623-37.
- [71] Tonui J.K, Tripanagnostopoulos Y., Air cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy*, 2007; Vol. 81, 2007, pp. 498-511.
- [72] Tonui J K, Tripanagnostopoulos Y., Performance improvement of PV/T solar collectors with natural airflow operation. *Solar Energy*, Vol. 82, 2008, pp. 1-12.
- [73] Tripanagnostopoulos Y, Tzavellas D, Zoulia I, Chortatou M., Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. *Proceedings of the 17th PV solar energy conference*, Munich; 22-26 October 2001.
- [74] Huang B. J, Lin T. H, Hung W. C, Sun F. S., Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, Vol. 70, No. 5, 2001, pp. 443-8.
- [75] Zondag H. A., De Vries D. W., Van Helden W. G. J., Van Zolengen R. J. C., Steenhoven A. A., The thermal and electrical yield of a PV thermal collector. *Solar Energy*, Vol. 72, No. 2, 2002, pp. 113- 28.
- [76] Chow T. T. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, Vol. 75, 2003, pp. 143-52.
- [77] Kalogirou S. A. Use of TRYSYS for modelling and simulation of a hybrid PV thermal solar system for Cyprus. *Renewable Energy* 2001; Vol. 23, 2001, pp.

- 247-60.
- [78] Florschuetz L. W., Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar Energy*, Vol. 22, 1979, pp. 361-366.
- [79] Raghuraman P., Analytical prediction of liquid and air photovoltaic/thermal flat plate collectors' performance. *Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 103, 1981, pp. 291-298.
- [80] Jones A. D., A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy* 2001; Vol. 70, No. 4, 2001, pp. 349-59.
- [81] Bergene T, Lovvik O. M., Model calculations on a flat plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*, Vol. 55, No. 6, 1995, pp. 453-62.
- [82] Sopian K, Yigit K. S, Liu H. T, Kakac S, Veziroglu T. N., Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energy Conversion and Management*, Vol. 37, 1996, pp. 1657-1670.
- [83] Hegazy A. A. Comparative study of the performance of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, 2000, pp. 861-81.
- [84] Niccolò Aste., Claudio Del Pero., Fabrizio Leonforte, Thermal-electrical optimization of the configuration a liquid PVT collector, *Energy Procedia*, Vol. 30, 2012, pp. 1 – 7.
- [85] Niccolò Aste, Claudio Del Pero, Fabrizio Leonforte Water flat plate PV–thermal collectors: A review; *Solar Energy*, Vol. 102, 2014, pp. 98–115
- [86] Jin-Hee Kim, Jun-Tae Kim., A simulation study of air-type building-integrated photovoltaic-thermal system ; *Energy Procedia*, Vol. 30, 2012, pp. 1016 –1024.
- [87] Xingxing Zhang, Xudong Zhao, Stefan Smith, Jihuan Xu, Xiaotong Yu., Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, 2012, pp. 599– 617.

Chapitre

3

Matériels utilisés et Méthode de fabrication du PV/T

Dans ce chapitre, on présente les matériels utilisés dans la fabrication de 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.



Fig. 3.1 Schéma du capteur hybride PV/T à air

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 Panneaux solaires hybrides PV/T à air

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

3.5 Description et fonctionnement du dispositif expérimental

3.5.1 Réaliser et caractérisation d'un capteur hybride (PV/T)

Notre travail consiste à réaliser et à caractériser un panneau solaire hybride (PV/T) 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/T) 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 [3-5].

3.5.2 Description du système PV/T

Ce capteur hybride PV/T d'air de nouvelle conception, qui a un canal d'air à passage unique. La figure 1 montre la vue réelle et Schéma du capteur hybride PV/T à air. Le capteur hybride d'air PV/T se compose de module PV, d'isolant "polystyrène", ruban d'aluminium et de boîte en bois. Les dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette réalisation la longueur, la largeur et l'épaisseur de 167 cm, 105 cm et 23 cm, respectivement. L'unité photovoltaïque PV utilisée dans cette étude est disponible sur le marché commercial. La longueur, la largeur et l'épaisseur du module PV étaient de 165cm, 99.2 cm et 3.5 cm, respectivement. Pour plus des détails sur les caractéristiques électriques du module solaire " TWINSEL " selon les conditions de test standard (Intensité solaire $1000 W/m^2$, température du module $25 ^\circ C$, AM 1.5), sont indiqués dans le tableau 3.2.

Un fluide caloporteur « l'air » peut circuler à l'intérieur la boîte du capteur hybride PV/TH pour refroidissement les cellules solaires.

3.5.3 Dimensions du capteur solaire hybride PV/T (Aérovoltaique)

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

Tableau. 3.1 Dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude expérimentale

Longueur	167 Cm
Largeur	101 Cm
Epaisseur	22 Cm

3.5.4 Panneau photovoltaïque

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

Tableau. 3.2 Caractéristiques du module solaire« TWINSEL» dans des conditions de test standard

ITEM NO.	SYP270S
Puissance maximale nominale (Pmax)	270W +3%
Tri de puissance	0~4.99W
Tension à Pmax	31.2V
Courant à Pmax	8.66A
Tension en circuit ouvert (Voc)	38.2V
Courant de court-circuit (Isc)	9.20A
Tension maximale du système	DC 1500V
Type de cellules	Polycrystalline
Essai de charge mécanique	5400Pa
Poids	18 kg
Dimensions	165×99.2×3.5 cm
Toutes les conditions de test standard techniques	AM1.5 E=1000W/m ² Tc=25°C
Classe d'application de sécurité	Class A

3.5.5 Méthode de fabrication

Le capteur solaire à air étudié est un simple panneau solaire de puissance 270W, ces dimensions sont 165 cm de longueur, 99.2 cm de largeur, et 3.5 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 les étapes suivantes : Nous coupons le bois avec une scie électrique en 5 morceaux pour former deux morceaux de dimension (167×22×2) cm³, deux morceaux de (101×22×2) cm³, et une seule pièce : (167×101×1) cm³, ensuite, on peigne les blocs de bois, enfin, on fixe les

pièces pour former une boîte en bois rectangulaire dimensionnelle (167×101×22) cm³ suivant les dimensions de panneau solaire utilisé. Ensuite on forme 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.3.2 formation d'une boîte en bois rectangulaire.

Puis 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. 3.3 Fixation de polystyrène et l'aluminium

Enfin on pose le panneau solaire simple sur la boîte en bois et l'installons prêt pour avoir un panneau solaire aérovoltaique 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 [3-5].



Fig. 3.4 Banc d'essai du capteur solaire hybride PV/T à air

3.6 Instruments de mesures

L'installation du séchoir est composée d'un ensemble d'instruments permettant de mettre en place un dispositif expérimental capable de suivre et d'analyser, en temps réel, l'évolution des variables énergétiques et thermiques : les variables énergétiques concernant les différents flux solaires, et celles thermiques concernant les températures des éléments du séchoir, la température ambiante, l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir, la vitesse et la direction du vent, etc.

Les températures élevées affectent négativement l'efficacité électrique des cellules solaires PV. Ce problème peut être résolu en faisant circuler de l'air sous les cellules solaires pour améliorer l'efficacité électrique. Les relevés de température ont été mesurés par des capteurs de température de type RTD-PT-100 au sommet et à proximité du module PV, la température de l'entrée, de la sortie, de la surface de l'absorbeur PV/T et de l'air ambiant. Les ventilateurs donnent un flux d'air forcé à l'intérieur du conduit d'air rectangulaire à travers l'entrée pour refroidir les cellules PV. A l'aide d'une station météorologique de type Davis, les valeurs de rayonnement solaire, de vitesse du vent, de température extérieure et d'humidité sont obtenues pendant toute la durée de l'expérience. A l'aide d'un compteur solaire, les valeurs de rayonnement solaire sous le panneau solaire sont obtenues pendant toute la durée de l'expérience. Nous avons enregistré les valeurs de courant et de tension à l'aide d'un multimètre numérique.



(a)



(b)

Fig. 3. 5 (a) Compteur solaire et (b) Multimètre utilisés dans l'expérience

La station météo complète (figure 3.6) de type Davis Instruments est l'appareil utilisé dans cette étude, dont la liaison entre les capteurs extérieurs (ISS) et la console se fait par ondes radio sur la fréquence 868.0 – 868.6 MHz avec une portée de 300 mètres au maximum. La console est équipée d'un large écran LCD rétro-éclairé, elle peut être fixée contre un mur ou posée sur une table ou une étagère. La console permet de visualiser les conditions météo en temps réel, les extrêmes (maxi et mini), les graphiques correspondant aux différentes variables. Il est également possible de régler des alarmes et de connecter la console sur un ordinateur (avec l'interface Weather Link non fournie).

L'ISS est très robuste et peut être installée sur un mât (tube) ou sur un poteau en bois. Une double sonde pour mesurer la température et l'humidité extérieure est placée dans un abri anti radiations (solaires) normalisé. Le pluviomètre est équipé d'un système à 2 augets

basculants pour mesurer les précipitations. L'anémomètre - girouette peut être désolidarisé de l'ISS pour être installé sur un toit par exemple grâce à son câble de 12 mètres.

Cette station permet de mesurer :

- ❖ La température intérieure - Résolution 0,1°C.
- ❖ La température extérieure - Résolution 0,1°C.
- ❖ L'humidité intérieure – Résolution : 1%.
- ❖ L'humidité extérieure – Résolution : 1%.
- ❖ La pression atmosphérique - Résolution : 0,1 h Pa.
- ❖ L'indice de chaleur - Résolution 1°C.
- ❖ La vitesse du vent de 3 à 241 km/h - Résolution 1 km/h.
- ❖ La direction du vent - Résolution 1°.

Un kit classique pour la station, permet d'exploiter très finement les données collectées par les stations météo Vantage Pro2. Ce kit comprend un enregistreur de données (datalogger) qui fonctionne en mode connecté à un PC, et un logiciel d'exploitation Weather-Link. Il est possible de consulter en temps réel les données climatiques ou en mode non connecté.



Fig. 3.6 Station météorologique de type Davis

L'humidité exprime la présence d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau dans l'air ambiant. Quand on parle de mesure d'humidité, on fait allusion au taux d'humidité exprimé en % qui correspond à l'humidité relative. Le taux d'humidité est étroitement lié à d'autres grandeurs physiques, telles que la température et la pression.



Fig. 3.7 Capteur d'humidité

Les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Il est constitué de deux métaux différents, liés l'un à l'autre à une de leur extrémité, produisant ainsi un courant dont la tension varie selon la température. Le changement de tension est mesuré et interprété par un régulateur électronique, la mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck (c'est un effet thermoélectrique). Leur principal défaut est leur imprécision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une incertitude inférieure à $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Fig. 3.8 Capteur de température

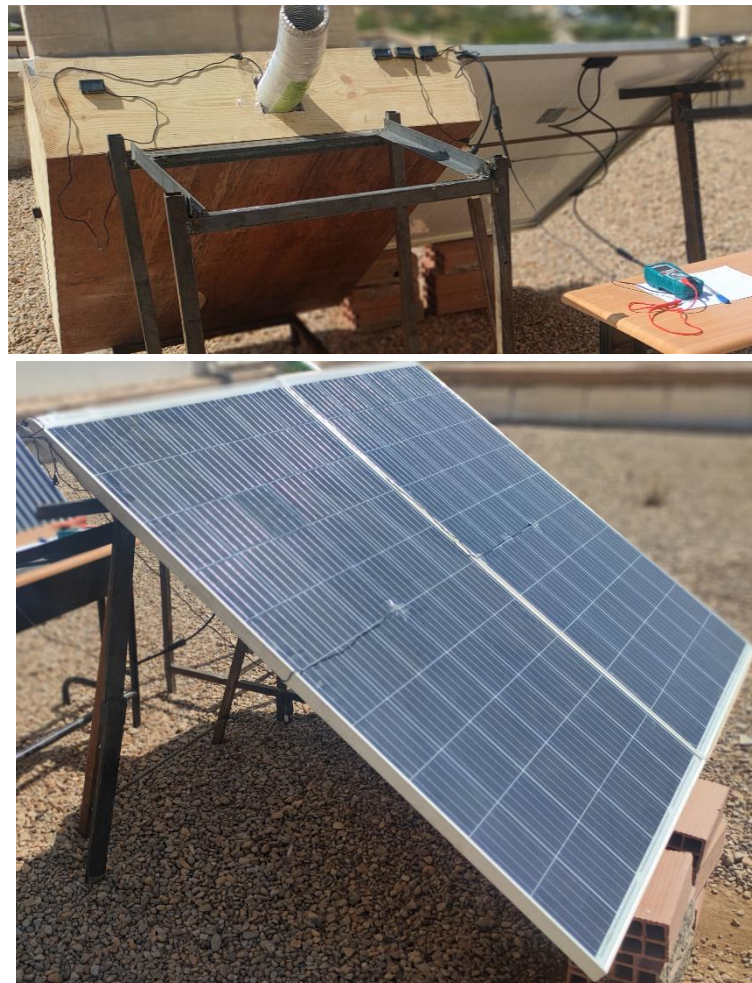


Fig. 3.9 Banc d'essai à vide du capteur solaire hybride PV/T à air et PV



Fig. 3.10 Banc d'essai en charge du capteur solaire hybride PV/T à air.

3.7 Conclusion

On peut conclure que 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).
- [3] Oussama Zaoui, Imane Sarrai, Djedid Taloub, Conception et fabrication d’un déshydrateur par un système aérovoltaique hybride (photovoltaïque-thermique, Mémoire Master 2, Université de M'sila, 2021.
- [4] Djegham, A., Taloub, D., Bouras, A, Experimental study of a dehydrator by a hybrid aerovoltaic system (photovoltaic- thermal), International conference on Mechanical Sciences ICMS'21 University Oum El Bouaghi 15th 16 November 2021.
- [5] ALI DJEGHAM, DJEDID TALOUB, ABDELKARIM BOURAS, ZIED DRISS, An empirical investigation of the electrical and thermal performance of photovoltaic-thermal hybrid sensor (PV/T), Wseas transactions on circuits and systems, Vol. 21, 2022, pp. 65-73.

Chapitre

4

Résultats et Discussions *-Système PV et PV/T à vide et en charge-*

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats des essais effectués sur le panneau solaire hybride et panneau solaire simple les deux à vide et le panneau solaire hybride en charge. Dans le chapitre précédent, on a fait une description sur le panneau solaire PV hybride, ensuite, on donne la méthode de réalisation du prototype expérimental en se référant aux paramètres de mesurés nous permettent d'appuyer valoriser notre capteur, pour une éventuelle utilisation de notre panneau solaire hybride (PV/T) dans une action de chauffage des bâtiments ou de séchage de produits agro- alimentaires ou des plantes médicales.

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 a testé et comparé avec un panneau solaire simple, après le test doive t'être configuré à la chambre de séchage.



Fig. 4.1 Banc d'essai du capteur solaire PV/TH hybride à air en charge [3-5]



Fig. 4.2 Banc d'essai du capteur solaire PV/TH hybride et PV à vide [3-5]

4.2 Résultats et Discussions

Cette étude permet de déterminer les caractéristiques électriques et thermiques du panneau solaire hybride PV/T. Ces données ont été vérifiées au moyen de plusieurs expériences sur la région de M'sila, on a étudié la variation (courant/tension) du module PV et PV/T avec la température des cellules à vide et en charge. On a fait une comparaison entre le panneau solaire hybride PV/T à vide et en charge et un panneau solaire simple PV en vide.

Au cours de ces tests, nous mesurons les températures de chaque composant du capteur thermique hybride telles que les températures de l'entrée et de la sortie du couvercle d'air, la température de l'absorbeur et du bas du capteur, et la température du milieu de la couverture. Le but de ces essais est de montrer le comportement thermique du système hybride, et son efficacité thermique. Les mesures ont été prises à l'Université de M'sila située dans le sud algérien (latitude : 35.32° N ; longitude : 4.23E) altitude 471 m. Ce site a un climat méditerranéen avec des étés chauds. Les données sont mesurées et stockées au minimum tous les quarts d'heure, le rayonnement solaire globale horizontale et diffuse en W/m^2 , chaque valeur est mesurée avec un pyranomètre. D'autres paramètres météorologiques tels que la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent sont tous mesurés à l'aide d'une station météo placée sur le site. Nous avons pris les données pendant la journée de test. L'enquête expérimentale nous a permis de déterminer les caractéristiques électriques et thermiques du panneau solaire hybride PV-T.

La variation (courant/tension) du module PV et PV/T avec la température des cellules a été étudiée. La figure 4.3 illustre l'évolution de l'énergie solaire mesurée en une heure en fonction du temps. Le compteur solaire positionné en deux positions ; (1) au-dessus du toit du capteur solaire pour mesurer l'énergie solaire incidente et (2) directement sous le toit du capteur solaire pour mesurer la baisse de l'énergie solaire lorsqu'elle passe par le toit en acrylique. La figure montre que l'énergie solaire qui se produit augmente régulièrement jusqu'à l'après-midi, culminant à environ $848 W/m^2$ vers 12h30. Le rayonnement mesuré sous le toit observe un mouvement comparable. Au milieu, la magnitude de l'énergie solaire diminue d'environ 13,5 % lorsqu'elle passe par le toit en acrylique. Ceci est principalement dû à la faible réflectance et à la propriété absorbante du matériau de couverture en acrylique. Il y a un écart limite dans les mesures d'éclairement à la hauteur du toit, comme l'illustre la figure montrant que les conditions météorologiques sont presque constantes tout au long de la période de collecte des données. De plus, il y a le moindre changement dans l'irradiance solaire mesurée sous le toit du capteur [3-5].

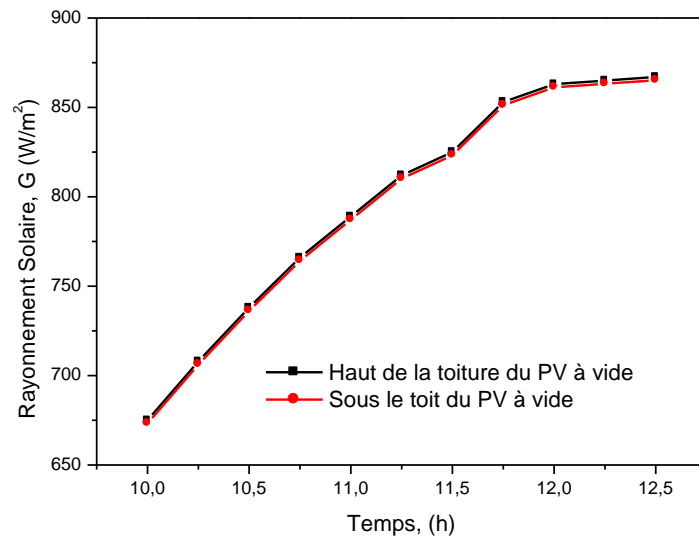


Fig. 4.3 L'énergie solaire mesurée sur et sous le toit collecteur PV.

Lorsque l'éclairement augmente les courants augmentent au cour de temps dans les deux panneaux (PV et PV/T); d'où le courant délivré est très important pour une valeur d'ensoleillement égale à 867 W/m². Selon les figures (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), et (4.8) par contre, lorsque l'éclairement augmente la tension démunie, 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 démunie façon linéaire, cela est dû au réchauffement de panneau solaire PV/T, qu'est en charge par rayonnement incident [3-5].

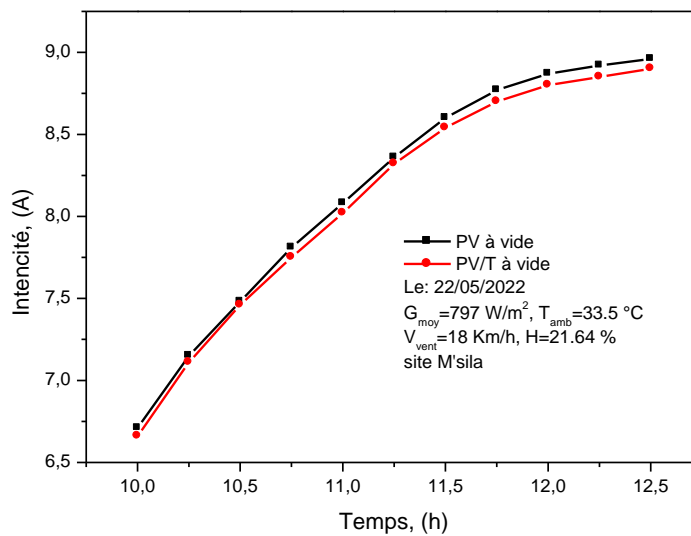


Fig. 4.4 Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV et PV/T à vide

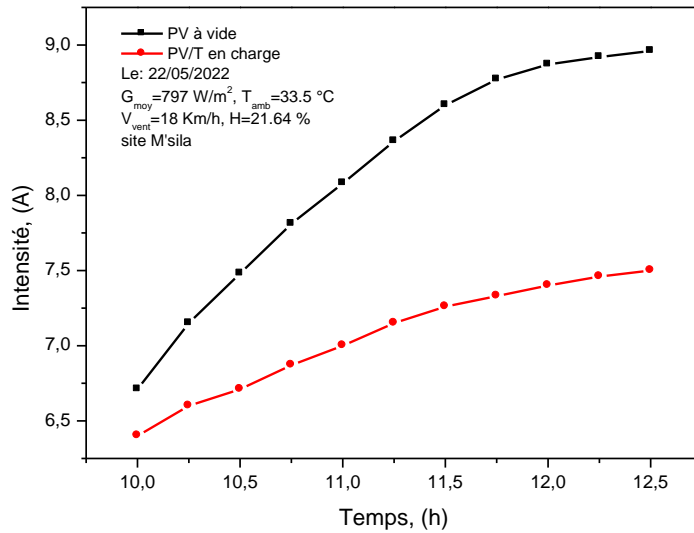


Fig. 4.5 Variation de l'intensité en fonction de temps pour les deux panneaux PV à vide et PV/T en charge

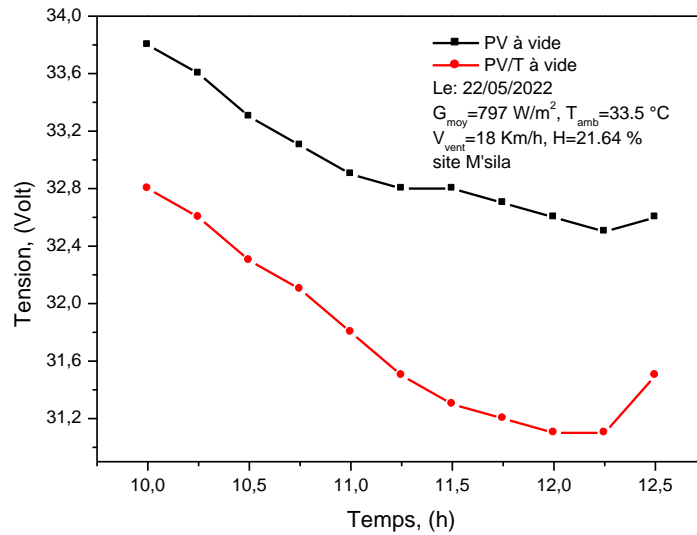


Fig. 4.6 Variation de la tension en fonction de temps pour les deux panneaux à vide

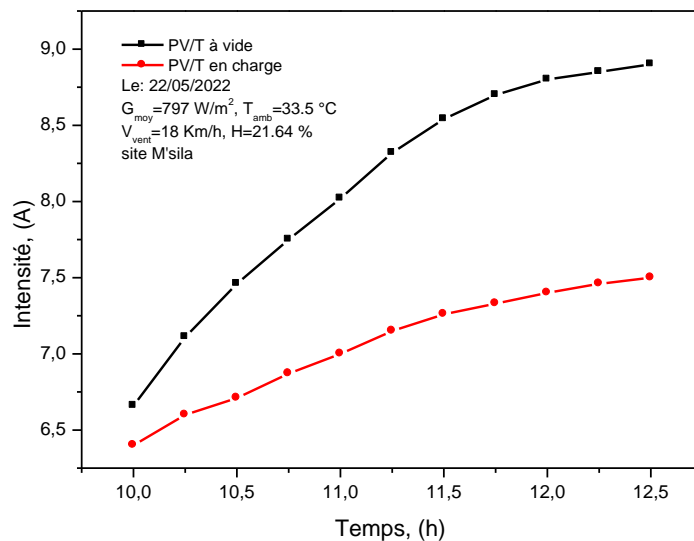


Fig. 4.7 Variation de l'intensité en fonction de temps pour PV/T à vide et en charge

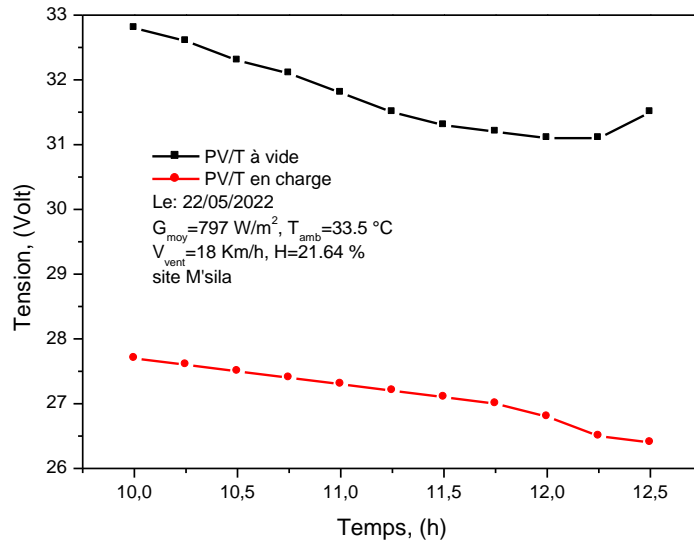


Fig. 4.8 Variation de la tension en fonction de temps pour PV/T à vide et en charge

Les figures (4.9) et (4.10) montrent les variations des profils de température à l'intérieur du panneau hybride PV/T en charge et en vide et la variation de la température à la sortie de PV/T avec le rayonnement solaire en fonction du temps. On peut voir que la température dans le panneau hybride PV/T sous vide augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire global, d'autre part, le panneau hybride PV/T en charge augmente légèrement en raison de la convection forcée due au ventilateur placé dans la partie supérieure du panneau (sortie d'air chaud). La figure (4.9) montre la température de sortie vers la chambre de séchage entre 45.9°C et 60.1°C dans le cas d'un panneau hybride PV/T en charge et entre 51.1°C et 67°C dans le cas d'un panneau hybride PV/T sous vide. Cette augmentation de température peut être utilisée ultérieurement pour le chauffage de locaux ou le séchage de produits alimentaires et de plantes médicinales. La variation entre les températures de sortie et d'entrée du panneau PV/T accentue le rôle du canal d'air, qui refroidit chaque cellule (l'absorbeur) par effet de convection [3-5].

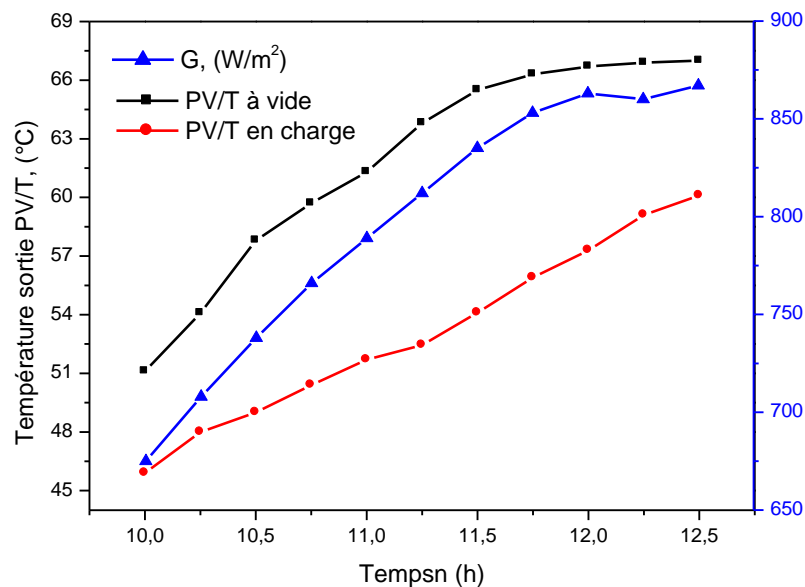


Fig. 4.9 Variation de la température à la sortie de PV/T en fonction de temps à vide et en charge

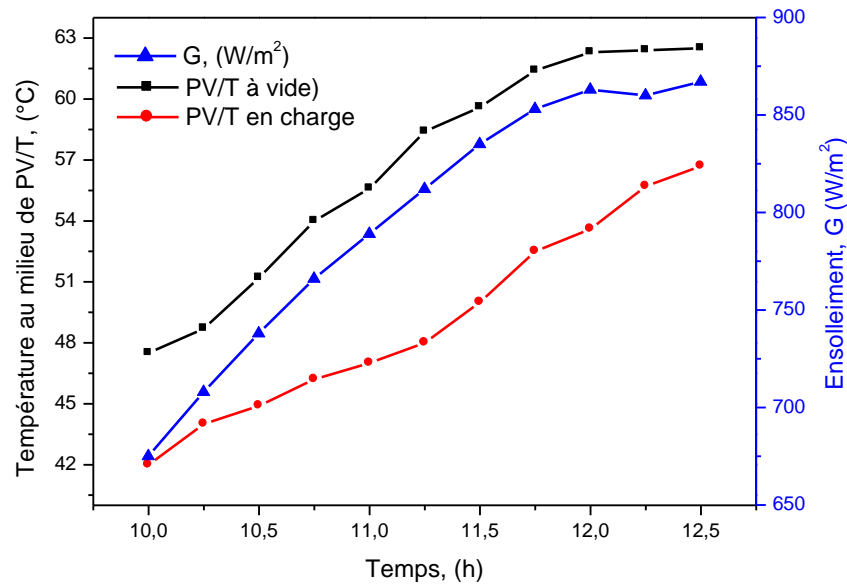


Fig. 4.10 Variation de la température à la surface intérieure de PV/T en charge et en vide selon le temps et l'insolation. (Mesures du 22/05/2022)

4.3 Conclusion

On peut conclure, d'après les figures précédentes, que la variation journalière de l'insolation nous montre que l'insolation maximale est atteinte aux alentours de 12 :00 – 12h :30mn le jour de test.

Le module thermique permet de faire augmenter la température d'entrée (entre 45.9°C et 60.1 °C). Cette augmentation de température peut être exploitée par la suite pour le chauffage des locaux ou séchage des produits agro-alimentaires.

-Le changement entre les températures d'entrée et de sortie accentue le rôle du canal d'air, qui refroidit toutes les cellules par effet de convection.

La combinaison de panneaux photovoltaïques avec un capteur thermique à air 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 mix d'énergies où l'énergie solaire peut être utilisée au maximum en complément 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).
- [3] Oussama Zaoui, Imane Sarrai, Djedid Taloub, Conception et fabrication d’un déshydrateur par un système aérovoltaique hybride (photovoltaïque-thermique, Mémoire Master 2, Université de M'sila, 2021.
- [4] Djegham, A., Taloub, D., Bouras, A, Experimental study of a dehydrator by a hybrid aerovoltaic system (photovoltaic- thermal), International conference on Mechanical Sciences ICMS'21 University Oum El Bouaghi 15th 16 November 2021.
- [5] ALI DJEGHAM, DJEDID TALOUB, ABDELKARIM BOURAS, ZIED DRISS, An empirical investigation of the electrical and thermal performance of photovoltaic-thermal hybrid sensor (PV/T), Wseas transactions on circuits and systems, Vol. 21, 2022, pp. 65-73.

Conclusion générale

La majorité du rayonnement solaire absorbé par les cellules photovoltaïques n'est pas convertie en électricité et provoque une augmentation de leur température et réduit en conséquence leur efficacité électrique. La température des capteurs photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'un matériau à changement de phase ou une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide. Cette chaleur extraite peut aussi être utilisée pour chauffer la fluide ou transformée en une autre énergie.

L'efficacité 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.

Il existe plusieurs configurations pour les capteurs solaires hybrides, on peut les classées selon le type du fluide caloporteur utilisé comme suite : PV/T à air, et PV/T à eau.

Notre travail fait partie d'une recherche et développement des systèmes solaire hybride à haute ou à basse température.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude expérimentales d'un capteur solaire photovoltaïque par la combinaison des deux capteurs photovoltaïque et

thermique (panneau photovoltaïque hybride PV/T), une étude expérimentale a été effectuée sur un capteur photovoltaïque.

En ce qui concerne la validation de nos résultats expérimentaux, nous avons montré que nos résultats expérimentaux concordent très bien avec la réalité.

Enfin, 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.

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

La combinaison capteur solaire photovoltaïque-thermique produit à la fois de l'électricité grâce à l'énergie solaire photovoltaïque et de la chaleur grâce à l'énergie thermique car on sait que le panneau photovoltaïque traditionnel produit trois fois plus de chaleur que l'électricité. L'augmentation de la chaleur à l'intérieur du module est l'une des principales raisons de la baisse des performances des panneaux solaires photovoltaïques. D'où la nécessité d'une technique d'évacuation thermique. L'intérêt d'une technique hybride est le refroidissement des cellules photovoltaïques grâce à la circulation d'un fluide, qui sera réchauffé lors de son passage dans le capteur. La nouveauté de cette étude est de récupérer cette énergie thermique par chauffage ou séchage. Les séchoirs précédents fonctionnaient avec des capteurs thermiques grâce à l'effet de serre, qui ne donne que de la chaleur. Le but de ce travail est la réalisation expérimentale d'un capteur PV/T et donc l'examen de l'impact de différents paramètres sur la performance énergétique du capteur PV/T. Les résultats suggèrent que ce type de collecteur est une belle alternative aux modules photovoltaïques et aux collecteurs thermiques installés individuellement.

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

The combination photovoltaic-thermal solar collector produces at the same time electricity gratitude to photovoltaic solar energy and warmth gratitude to thermal energy because it is known that the traditional photovoltaic panel produces three times more heat than the electricity. The increase in warmth inside the module is one of the principal reasons of the reduced performance of photovoltaic solar panels. Thus the necessity for a thermal evacuation technique. The benefit of a hybrid technique is the cooling of the photovoltaic cells gratitude to the circulation of a fluid, which will be warmed during its passage via the sensor. The novelty of this study is to recover this thermal energy by heating or drying. Previous dryers worked with thermal sensors thanks to the greenhouse effect, which gives only heat. The purpose of this work is the realization experimental of a PV/T sensor and so the examination of the impact of different parameters on the energy performance of the PV/T sensor. The impacts recommend that this kind of collector is a nicely alternative to photovoltaic modules and thermal collectors seated individually.

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

تنتج المجمعات الشمسية الكهروضوئية الحرارية كلاً من الكهرباء من خلال الطاقة الشمسية الكهروضوئية والحرارة من خلال الطاقة الحرارية لأنه من المعروف أن الألواح الكهروضوئية التقليدية تنتج ثلاثة أضعاف الحرارة من الكهرباء. تعد الزيادة في الحرارة داخل الوحدة أحد الأسباب الرئيسية لانخفاض أداء الألواح الشمسية الكهروضوئية. ومن هنا تأتي الحاجة إلى تقنية إزالة الحرارة. تتمثل فائدة التقنية الهجينة في تبريد الخلايا الكهروضوئية بفضل دوران المائع، والذي سيتم تسخينه أثناء مروره عبر المستشعر. إن حداثة هذه الدراسة هي استعادة هذه الطاقة الحرارية بالتسخين أو التجفيف. كانت المجففات السابقة تعمل بأجهزة استشعار حرارية بفضل تأثير الاحتباس الحراري، الذي يعطي الحرارة فقط. الغرض من هذه الأطروحة هو التحقيق التجريبي لمستشعر PV / T وبالتالي فحص تأثير المعلمات المختلفة على أداء الطاقة لمستشعر PV / T. تشير النتائج إلى أن هذا النوع من المجمعات هو بديل جيد للوحدات الكهروضوئية والمجمعات الحرارية المثبتة بشكل فردي.

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