

République Algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université de BLIDA -1-  
Faculté de technologie  
Département des Énergies Renouvelables



**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme du Master**  
**Option : Conversion Photovoltaïque**

Thème :

**ETUDE ET RÉALISATION D'UN PANNEAU HYBRIDE  
PHOTOVOLTAÏQUE THERMIQUE (PVT)  
PARTIE I : PVT A EAU / PARTIE II : PVT A AIR**

**Présenté par : ELGUAIZI Imene.**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Monsieur	BOUKENOUI. R	M.C. B	USDB1	Président
Monsieur	LAFRI. D	M.C. B	USDB1	Examineur
Monsieur	DOUMAZ.T	M.A. A	USDB1	Encadreur
Monsieur	BOUZAKI .M.M	M.C.B	USDB1	Co- Encadreur

**2022-2023**

# REMERCIEMENTS

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Je remercie tout d'abord, Allah qui m'a donné la force et le courage de terminer mes études et élaborer ce modeste travail.

Ce mémoire est le résultat d'un long travail de recherche, j'adresse mes remerciements à mon professeur et mon encadreur Mr DOUMAZ Toufik qui m'a donné la chance pour faire ce travail. Merci pour vos précieux conseils et vos compétences techniques, vos encouragements, vos orientations. Merci pour votre gentillesse, et votre aide qui m'a permis de finaliser ce travail.

Je remercie également mon Co-promoteur Dr BOUZAKI Mohammed Moustafa pour son aide et ses orientations tout au long du réalisation.

Mes remerciements sont dédiés aussi à mon professeur Dr KACI Karim pour son aide, son soutien moral et pour tout les documents fournis pour l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr BOURAI Azzedine et Dr LAFER Abdelkader pour son aide dans la réalisation et pour tout les informations nécessaires qui m'a permis de bien finir mon travail.

Je remercie infiniment Mr CHARANE Hamid pour son aide dans la recherche de stage qui était en totale adéquation avec mes attentes.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury Dr BOUKENOUI Rachid et Dr LAFRI Djamel d'avoir accepter d'examiner ce travail et de l'évaluer.

Mon stage a été effecuté au niveau du SONELGAZ, je remercie infiniment Mr MAUCHE Ahmed et mon tuteur de stage Mr AOUANOUK Mohamed pour l'orientation au sein de l'entreprise, je remercie également toute l'équipe du service et maintenance d'électricité pour leur accueil, leur esprit d'équipe qui m'a beaucoup aidé à comprendre tous les phénomènes et les expériences et m'adonné toutes les informations nécessaires, merci énormément.

A tous les enseignants depuis la première année, leurs générosités et leurs soutiens m'obligent de leurs témoigner mon respect et ma loyale considération.

Enfin, je remercie, également, toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ELGUAIZI Imene.

## Dédicaces

*À tout être humain cherchant une goutte de vérité dans l'océan de la science.*

*J'adresse ce mémoire de fin d'études.*

*A mes chères parents « mon père DJAMEL et ma mère NACERA ACHOUR » qui m'ont tout donné sans rien en retour, dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines que ma permet de vivre ce jour. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce travail soit le témoignage sincère et affectueux de ma profonde reconnaissance pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*A mes chères sœurs : KHADIDJA, FATMA et MANEL pour tout le soutien et l'encouragement et de croyait en moi*

*A ma niece TASNIM, la perle de notre petite famille, que dieu la protège.*

*A mes chères amies : IHSSANE, FELLA, AMIRA & AMEL.*

*A tous mes camarades de ma promotion.*

*Merci Infiniment.*

*Imene*

**ملخص**

بعد الزيادة في استهلاك الطاقة الأحفورية، بدأت الجزائر انتقالاتاً للطاقة يهدف إلى تطوير الطاقة الكهربائية وخاصة الطاقة الكهروضوئية. تم تقديم حلول تكنولوجية مختلفة، مثل الألواح الشمسية الهجينة (كهروضوئية/حرارية) التي يتمثل مبدأها في تحسين كفاءة الألواح الكهروضوئية من خلال استعادة الحرارة التي تتبددها.

تهدف هذه مذكرة التخرج إلى إنتاج لوح شمسي هجين للماء والهواء للحصول على الكهرباء والماء الساخن في وقت واحد.

-يشتمل اللوح الشمسي الهجين على صفائح الألمنيوم مضمنة في اللوحة الكهروضوئية، وتتمثل خصوصية هذا اللوح في السماح للماء بالدوران في جميع أنحاء سطحه.

- يشتمل اللوح الشمسي الهجين للهواء على لوحة الألمنيوم مع حيرات خشبية.

تم إجراء الاختبارات في قسم الطاقات المتجددة، وتظهر النتائج أنه بالنسبة لـ اللوح الشمسي الهجين للماء، يصل ماء الخزان إلى 42 درجة، واستطاعة تساوي 86 واط حوالي 12:21.

بينما بالنسبة لنتائج اللوح الشمسي الهجين بالهواء، فإن الاستطاعة تساوي 74 واط ودرجة حرارة الخرج تصل إلى 71 درجة مع فرق في درجة الحرارة يساوي 20 درجة.

يمكن إجراء مقارنة بين اللوح الشمسي الهجين المائي والهوائي، ويمكننا استخلاص أن سخان الماء أكثر كفاءة من حيث زيادة الطاقة.

**الكلمات الرئيسية:** الطاقة الكهروضوئية، طاقة حرارية، لوحة حرارية كهروضوئية، خاصية تيار-جهد، لوحة كهروضوئية، لوح شمسي هجين مائي، لوح شمسي هجين هوائي.

## Résumé

Suite a l'augmentation de la consommation des energies fossiles, l'Algérie a entamé une transition énergétique visant a developper les EnR et surtout l'énergie photovoltaïque. Diverses solutions technologiques ont été introduites telles que les capteurs PVT dont le principe est l'amélioration du rendement des panneaux PV par la récupération de la chaleur qu'il dissipent.

Ce mémoire de fin d'étude a pour objectif de réaliser un PVT a eau et a air pour gagner de l'électricité et de l'eau chaude simultanément.

- Le capteur PVT a eau comprend des tôles en Al encastrées dans un panneau PV, la particularité de ce capteur est de laisser circuler l'eau sur toute sa surface.
- Le capteur PVT a air comprend une tôle en Al avec des chicanes en bois.

Les tests ont été effectués au département des EnR, et les résultats montrent que pour le PVT a eau, l'eau de la cuve atteint 42 degrés, et une puissance égale à 86 W vers 12h21.

Alors que pour les résultats du PVT à air, la puissance est égale à 74 W et la température de sortie atteint 71 degrés avec un  $\Delta T = 20^\circ C$ .

Une comparaison peut être établie entre le capteur PVT à air et le PVT à eau, on conclue que le chauffe-eau est plus efficace en termes de gain d'énergie.

**Mots clés :** Energie photovoltaïque, energie thermique, panneau photovoltaïque-thermique, caractéristique courant-tension, panneau photovoltaïque, capteur thermique à eau, capteur thermique à air.

### **Abstract**

Following the increase in fossil energy consumption, Algeria has started an energy transition aimed at developing EnR and especially photovoltaic energy. Various technological solutions have been introduced, such as PVT sensors whose principle is to improve the efficiency of PV panels by recovering the heat they dissipate.

This final study paper aims to produce a water and air PVT to gain electricity and hot water simultaneously.

- The water PVT sensor includes Al sheets embedded in a PV panel; the particularity of this sensor is to let water circulate all over its surface.

- The air PVT sensor includes an Al plate with wooden baffles.

The tests were carried out at the EnR department, and the results show that for the PVT has water, the water of the tank reaches 42 degrees, and a power equal to 86 W around 12:21.

While for the air PVT results, the power is equal to 74 W and the output temperature reaches 71 degrees with a  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ .

A comparison can be made between the air PVT sensor and the water PVT, it is concluded that the water heater is more efficient in terms of energy gain.

**Keywords:** Photovoltaic energy, thermal energy, photovoltaic-thermal panel, current-voltage characteristic, photovoltaic panel, water thermal sensor, air thermal sensor.

## Nomenclature

### Lettres latines majuscules

$AM$	Masse d'air
$Al$	Aluminium
$C_c$	Capacité calorifique de capteur thermique [j/Kg.K]
$C_w$	Capacité calorifique de l'eau [j/Kg.K]
$E_{el}$	Énergie électrique produite [Wh]
$EnR$	Energies renouvelables
$F$	Facteur de vue du ciel du capteur thermique
$FF$	Facteur de forme du PV
$FS$	Facteur spectral
$G_t$	Éclairement solaire sur le capteur [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{mpp}$	Courant au point maximum de puissance [A]
$I_{cc}$	Courant de court-circuit [A]
$M$	Débit massique [Kg/s]
$N$	Nombre de conduite
$P_{nom}$	Puissance nominale du PV [W]
$S_c$	Surface du capteur thermique [m <sup>2</sup> ]
$S_G$	Surface de la vitre PV sans cellules [m <sup>2</sup> ]
$S_{PV}$	Surface total de la vitre PV [m <sup>2</sup> ]
$S_S$	Surface de la section de la conduite [m <sup>2</sup> ]
$T$	Temps [s]
$T_e$	Température ambiante [K]
$T_m$	Température moyenne de l'eau du capteur thermique [K]
$T_{PV}$	Température de la cellule PV [K]
$T_{in}$	Température d'entrée d'eau dans le capteur thermique [K]
$T_{tk}$	Température moyenne de l'eau dans la cuve de stockage [K]
$T_{tk,i}$	Température d'entrée d'eau de la cuve de stockage [K]
$T_{out}$	Température de sortie d'eau du capteur solaire thermique [K]
$T_{PV-sky}$	Température moyenne PV ciel [K]
$T_{sky}$	Température du ciel [K]
$U_b$	Coefficient de perte thermique arrière du capteur thermique [W/m <sup>2</sup> . K]
$U_F$	Coefficient de perte thermique latéral et arrière du capteur thermique [W/m <sup>2</sup> . K]
$U_{tk}$	Coefficient de perte thermique de la surface extérieur de la cuve de stockage [W/m <sup>2</sup> . K]
$V_{mpp}$	Tension au point maximal de puissance [V]

### Lettres latines minuscules

$h$	Énergie électrique produite [Wh]
$h_v$	Coefficient de transfert convectif de chaleur externe [W/m <sup>2</sup> . K]

$h_{ePV}$	Coefficient de transfert convectif et radiatif de chaleur externe [W/m <sup>2</sup> . K]
$h_{ic}$	Coefficient de transfert convectif dans la lame d'air [W/m <sup>2</sup> . K]
$h_{rG-P}$	Coefficient de transfert radiative entre les cellules PV et le capteur thermique [W/m <sup>2</sup> . K]
$h_{rPV-sky}$	Coefficient de transfert radiative externe de chaleur entre les cellules PV et le ciel [W/m <sup>2</sup> . K]
$h_{rPV-P}$	Coefficient de transfert radiative entre les cellules PV et le capteur thermique [W/m <sup>2</sup> . K]
$k_{\alpha}$	Facteur de correction d'absorption du rendement PV
$k_{\gamma}$	Facteur de correction de température du rendement PV
$k_{\theta}$	Facteur de correction optique du rendement PV
$k_{\lambda}$	Facteur de correction spectral du rendement PV
$k_g$	Facteur de correction pour faible éclaircissement du rendement PV
$t_b$	Température ambiante de l'arrière du capteur thermique
$t_G$	Température de la vitre PV sans cellules [K]
$t_m$	Température de la lame d'air entre la vitre PV et le capteur thermique [K]
$w_e$	Vitesse du vent [m/s]

## Table des matieres

<b>CHAPITRE I .....</b>	<b>3</b>
<b>ETAT DE L'ART .....</b>	<b>3</b>
I.1.ÉTAT DE L'ART : .....	4
<b>CHAPITRE II:GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE .....</b>	<b>17</b>
II.1. INTRODUCTION : .....	18
II.2. UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE : .....	18
II.2.1. Les systèmes autonomes : .....	18
II.2.2. Les systèmes au fil du soleil : .....	18
II.2.3. Les systèmes avec stockage : .....	19
II.2.4. Les systèmes PV raccordé au réseau : .....	20
II.2.4.1. Systèmes à Injection du surplus : .....	21
II.2.4.2. Systèmes à injection de la totalité : .....	21
II.2.5. Les systèmes hybrides : .....	21
II.2.5.1. Un système hybride éolien-solaire : .....	21
II.2.5.2. Panneaux solaires avec générateurs diesel : .....	22
II.3. EFFET PHOTOELECTRIQUE : .....	23
II.4. CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : .....	24
II.4.1 Historique de la cellule photovoltaïque : .....	24
II.4.2. Les filières technologiques des cellules photovoltaïques : .....	25
II.4.2.1.1ère génération : cellules cristallines : .....	26
□ Le silicium cristallin : .....	26
II.5. ASSEMBLAGE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES : .....	32
II.5.1. Assemblage en série : .....	32
II.5.2. Assemblage en parallèle : .....	33
II.5.3. Assemblage en série-parallèle : .....	33
II.6. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT : .....	34
II.7. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE : .....	35
II.8. CARACTERISTIQUES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE : .....	36
II.8.1. Tension à circuit ouvert : .....	36
II.8.2. Courant de court –circuit : .....	36
II.8.3. Point du fonctionnement Pm : .....	36
II.8.4. Facteur de forme FF : .....	37
II.8.5. Le rendement( $\eta$ ) : .....	37
II.9. CONCLUSION : .....	39
<b>CHAPITRE III: MODELISATION DES CAPTEURS THERMIQUES .....</b>	<b>40</b>
III.1. INTRODUCTION : .....	41
III.2. DEFINITION DES CAPTEURS THERMIQUES : .....	41
III.3. LES TYPES DES CAPTEURS : .....	41
III.3.1. Les capteurs plans : .....	41
III.3.1.1. Capteur plan vitré : .....	42
III.3.1.2. Capteur solaire sans vitrage : .....	43
III.3.2. Capteur à tubes sous vide : .....	43
III.4. MODELISATION DU CAPTEUR THERMIQUE : .....	44
III.4.1. Le facteur d'extraction de la chaleur du collecteur ( $F_R$ ) : .....	45
III.5. LES CAPTEURS HYBRIDES PVT : .....	45
III.5.1. Classification des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques : .....	46

III.5.3. Performances électriques des capteurs hybrides : .....	46
III.6. MODELISATION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE : .....	47
III.6.1. Présentation du système étudié : .....	49
III.6.2. Bilan thermique des cellules photovoltaïques : .....	50
III.6.3. Bilan thermique du fluide caloporteur (l'eau) : .....	51
III.6.4. Bilan thermique sur la cuve de stockage : .....	52
III.7. CONCLUSION : .....	52
<b>CHAPITRE IV : VALIDATION EXPERIMENTALE. ....</b>	<b>53</b>
IV.1. INTRODUCTION : .....	54
IV.2.PVT A EAU : .....	54
IV.2.1. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI : .....	54
IV.3. REALISATION DU CAPTEUR HYBRIDE PVT : .....	55
IV.3.1. Le panneau photovoltaïque : .....	55
IV.3.2. Le capteur thermique : .....	56
Première réalisation : .....	57
Deuxième réalisation : .....	60
IV.3.3.Le circulateur d'eau : .....	61
IV.3.4 La cuve de stockage avec échangeur : .....	62
IV.3. INSTRUMENTS DE MESURE : .....	64
IV.3.1.IV.1. Agilent 34970A : .....	64
IV.4. TESTS EXPERIMENTAUX : .....	67
IV.4.1. Test préliminaire d'étanchéité : .....	67
IV.4.2. Tests finaux : .....	72
IV.5. CHAUFFE AIR : .....	73
IV.6. RESULTATS ET DISCUSSIONS : .....	75
IV.6.1.PVT A EAU : .....	75
IV.6.1.1. Résultats des tests préliminaires sur le capteur thermique : .....	75
IV.6.1.2. Résultats des tests préliminaires sur le panneau PV : .....	77
IV.6.1.3. Résultats des tests du le panneau hybride photovoltaïque-thermique : ....	79
IV.6.2.PVT à air : .....	81
IV.7. CONCLUSION : .....	83
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>84</b>
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE .....	87
ANNEXES .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>

## Liste des figures

FIGURE (I.1): STATISTIQUES DE PUBLICATION SCIENTIFIQUE SUR LES SYSTEMES HYBRIDES PV/T (SCOPUS 2023). .....	5
FIGURE (I.2) : PHOTOGRAPHIE DE L'ENSEMBLE DU SYSTEME PV/T COMBINE.....	6
FIGURE (I.3) : LES COUCHES DU COLLECTEUR PVT ET DU MODULE PVT PLACES SUR LA CHAMBRE DE LAMINAGE.....	6
FIGURE (I.4) : VUE EN COUPE TRANSVERSALE DU COLLECTEUR PVT.....	7
FIGURE (I.5) : VUE DE FACE DU COLLECTEUR PVT ET SCHEMA DIAGRAMMATIQUE DU SYSTEME PVT. ....	7
FIGURE (I.6) : CAPTEUR THERMIQUE ET SON SCHEMA. ....	8
FIGURE (I.7) : CAPTEUR PV/THERM AVEC LA CUVE DE STOCKAGE ET LA POMPE.....	8
FIGURE (I.8) : VARIATION HORAIRE D'UNE EFFICACITE EXEGETIQUE GLOBALE POUR CAPTEUR HYBRIDE SEMI-TRANSPARENT AVEC REFROIDISSEUR THERMOELECTRIQUE (PVT-TEC) PROPOSE, LE GENERATEUR SEMI-TRANSPARENT GPV [CASE-(I)] ET LE GENERATEUR SEMI-TRANSPARENT AVEC REFROIDISSEUR THERMOELECTRIQUE GPV-TEC [CASE-(II)].	9
FIGURE (I.9) : DES IMAGES DE LA CONFIGURATION EXPERIMENTALE A LIMASSOL (CHYPRE) EN ETE 2017.....	10
FIGURE (I.10) : CONFIGURATION EXPERIMENTALE.....	10
FIGURE (I.11) : UN SCHEMA DIAGRAMMATIQUE DE LA CONFIGURATION EXPERIMENTALE. ..	11
FIGURE (I.12) : CONFIGURATION EXPERIMENTALE DANS LE LABORATOIRE DE SIMULATION SOLAIRE DE L'UNIVERSITE DE CONCORDIA. ....	11
FIGURE (I.13) : HISTOGRAMMES COMPARATIFS QUOTIDIENS MOYENS DES RENDEMENTS ELECTRIQUES, THERMIQUES ET THERMIQUES GLOBAUX POUR LE GPV ET LE CAPTEUR HYBRIDE PV/T VITRE.....	12
FIGURE (I.14) : SCHEMA DIAGRAMMATIQUE DU SYSTEME PVT-ST. ....	13
FIGURE (I.15) : SCHEMA DIAGRAMMATIQUE DU SYSTEME PV-ST. ....	13
FIGURE (I.16) : SCHEMA DIAGRAMMATIQUE DU PROCESSUS DE TRANSFERT D'ENERGIE PVT. ....	13
FIGURE (I.17) : DIAGRAMME SIMPLIFIE DU PROCESSUS DE TRANSFERT D'ENERGIE ST.....	14
FIGURE (I.18) : VUE SCHEMATIQUE DE LA SECTION TRANSVERSALE DU PVT NOUVELLEMENT CONÇU.....	16
FIGURE (II.1) : UN SYSTEME DE POMPAGE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE. ....	19
FIGURE II.2 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME AVEC STOCKAGE. ....	19
FIGURE II.3 : INJECTION PARTIELLE ET INJECTION TOTALE RESPECTIVEMENT.....	20
FIGURE II.4 : SCHEMA DES CENTRALES SOLAIRES COUPLEES AU RESEAU. ....	20
FIGURE II.5 : SCHEMA D'UN SYSTEME PV CONNECTE AU RESEAU DECENTRALISE.....	20
FIGURE II.6 : SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-SOLAIRE.....	22
FIGURE II.7 : PANNEAUX SOLAIRES AVEC GENERATEURS DIESEL. ....	23
FIGURE II.9 : ÉVOLUTION DU RENDEMENT DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES ENTRE 1975 ET 2023 .....	26
FIGURE II.10 : REPARTITION DES MATERIAUX SUR LE MARCHE MONDIAL DU PHOTOVOLTAÏQUE. ....	26
FIGURE II.11 : PLAQUE DE SILICIUM MONOCRISTALLIN. ....	27
FIGURE II.12 : PLAQUE DE SILICIUM POLYCRISTALLINE.....	28
FIGURE II.13 : PANNEAU PV AU SILICIUM AMORPHE. ....	28
FIGURE II.14 : CELLULE TELLURURE DE CADMIUM (CdTe). ....	29
FIGURE II.15 : CELLULE HYBRIDE ORGANIQUE-INORGANIQUE. ....	30
FIGURE II.16 : CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE MULTI JONCTION (SOURCE. SPECTROLAB). ....	30
FIGURE II.17 : CELLULE D'ARSENIURE DE GALLIUM (GAAS).....	31

FIGURE II.18 : CARACTERISTIQUES RESULTANTES D'UN GROUPEMENT DE NS CELLULES EN SERIE. MODELISATION D'UNE CELLULE PV. ....	33
FIGURE II.20 : ASSEMBLAGE EN SERIE-PARALLELE DES CELLULES PV. ....	34
FIGURE II.21 : CARACTERISTIQUE $I = f(V)$ ET $P = f(V)$ D'UN PANNEAU SOLAIRE CONSTITUE DE 36 CELLULES EN SERIE POUR DIFFERENTS ENSOLEILLEMENTS $G$ AVEC $T = 30^{\circ}C$ . ....	34
FIGURE II.22 : CARACTERISTIQUE $I = f(V)$ ET $P=f(V)$ D'UN PANNEAU SOLAIRE CONSTITUE DE 36 CELLULES EN SERIE POUR DIFFERENTES TEMPERATURES $T$ AVEC $G = 1000W/m^2$ . ...	35
FIGURE II.23 : CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION ET LA PUISSANCE DELIVREE PAR MODULE PHOTOVOLTAÏQUE. ....	37
FIGURE III.1 : EXEMPLE D'UN CAPTEUR THERMIQUE. ....	42
FIGURE III.2 : CAPTEUR PLAN VITRE. ....	42
FIGURE III.3 : CAPTEUR SOLAIRE SANS VITRAGE. ....	43
FIGURE III.4 : CAPTEUR SOLAIRE A TUBE SOUS VIDE. ....	44
FIGURE III.6 : CLASSIFICATION DU SYSTEME PVT. ....	46
FIGURE III.8 : SECTION DU PROTOTYPE PV/T ET LOCALISATION DES PHENOMENES INTERDEPENDANTS. ....	50
FIGURE IV.1: CONFIGURATION DU SYSTEME PVT. ....	55
FIGURE IV.2: PHOTO DU MODULE PV CONDOR DE 160Wc. ....	55
FIGURE IV.3 : CAPTEUR THERMIQUE (VUE DE LA FACE AVANT ET DE LA FACE ARRIERE). ....	57
FIGURE IV.4 : LES TOLES EN ALUMINIUM (FACE ARRIERE DU CAPTEUR, LE JOINT METALLIQUE, LA FACE AVANT DU CAPTEUR). ....	58
FIGURE IV.5 : LES DEUX TYPES DE SILICONE UTILISES POUR LE COLLAGE. ....	59
FIGURE IV.6: LA MISE EN SANDWICH DES DEUX TOLES ET DE JOINT METALLIQUE. ....	59
FIGURE IV.7 : A) UNE RIVETEUSE. B) LES RIVETS. ....	60
FIGURE IV.8 : LA COLLE PU-1800 HARDENER. ....	60
FIGURE IV.9 : COLLAGE ET MISE DU GOUDRON DANS LES BORDURES DU CAPTEUR (TH). ....	61
FIGURE IV.10 : RIVETAGE DU CAPTEUR (TH). ....	61
FIGURE IV.11 : LE CIRCULATEUR D'EAU. ....	62
FIGURE IV.12 : ÉCHANGEUR DE CHALEUR. ....	62
FIGURE IV.13: CUVE DE STOCKAGE AVEC ECHANGEUR SANS ISOLATION. ....	63
FIGURE IV.14: CUVE DE STOCKAGE AVEC ECHANGEUR AVEC ISOLATION (LAINE DE VERRE). ....	64
FIGURE IV.15 : LE SYSTEME D'ACQUISITION DE DONNEES AGILENT 34970A. ....	65
FIGURE IV.16: UN CIRCUIT D'ACQUISITION DE 20 VOIX. ....	65
FIGURE IV.17 : UN THERMOCOUPLE TYPE J. ....	66
FIGURE IV.18 : EMBLEMES DES THERMOCOUPLES DANS LE CAPTEUR ET LE PANNEAU. ....	66
FIGURE IV.19: EMBLEMES DES THERMOCOUPLES DANS LES DOIGTS DE GANTS. ....	67
FIGURE IV.20 : EMBLEMES DU THERMOCOUPLE DANS LA CUVE DE STOCKAGE. ....	67
FIGURE IV.21 : TEST D'ETANCHEITE SUR LA TERRASSE DU DEPARTEMENT DES ENR. ....	68
FIGURE IV.22: INTERFACE AGILENT BENCHLINK DATA LOGGER 3. ....	68
FIGURE IV.23 : DONNEES ENREGISTREES DANS UN FICHIER EXCEL. ....	69
FIGURE IV.24 : LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE SUR LA TERRASSE DU DEPARTEMENT DES ENR. ....	69
FIGURE IV.25 : LE TRACEUR I-V. ....	70
FIGURE IV.26: LE TRACEUR I-V CONNECTE AVEC PC. ....	70
FIGURE IV.27: INTERFACE DU LOGICIEL IV_SWINGER2. ....	71
FIGURE IV.28 : DONNEES ENREGISTREES DANS LE FICHIER EXCEL. ....	71
FIGURE IV.29 : LE PANNEAU PVT INSTALLE SUR LA TERRASSE DU DEPARTEMENT DES ENR. ....	72
FIGURE IV.30 : VUE DE LA FACE AVANT DU CAPTEUR THERMIQUE A AIR. ....	73
FIGURE IV.31 : VUE DE LA FACE ARRIERE DU CAPTEUR THERMIQUE A AIR. ....	74

FIGURE IV.32: VUE EN PERSPECTIVE DU CHAUFFE AIR.....	74
FIGURE IV.33 : VARIATION DE LA TEMPERATURE D'ENTREE, DE SORTIE ET DE L'ECLAIREMENT. ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
FIGURE IV.34 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DE LA CUVE, DU CAPTEUR ET DE L'ECLAIREMENT. ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
FIGURE IV.35 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DU PANNEAU ET LA TEMPERATURE AMBIANTE. ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
FIGURE IV.36 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LA PUISSANCE DU PANNEAU PV. ....	78
FIGURE IV.37: VARIATION DE LA TEMPERATURE D'ENTREE, LA TEMPERATURE DE SORTIE ET L'ECLAIREMENT.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
FIGURE IV.38 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DE LA CUVE, LA TEMPERATURE DU CAPTEUR TH ET L'ECLAIREMENT SOLAIRE.....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
FIGURE IV.39 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DU PANNEAU PV ET L'ECLAIREMENT. .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
FIGURE IV.40 : VARIATION DE LA TEMPERATURE D'ENTREE DU CAPTEUR, DE SORTIE, LA DIFFERENCE DE TEMPERATURE ET L'ECLAIREMENT. ....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>

## Liste des tableaux

TABLEAU II.1 : COMPARATIF DES RENDEMENTS DES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES. ....	31
TABLEAU IV.1 : CARACTERISTIQUES ELECTRIQUE ET MECANIQUE DU PANNEAU PV .....	56
TABLEAU IV.2 : CARACTERISTIQUES DU CAPTEUR THERMIQUE : .....	57
TABLEAU IV.3: CARACTERISTIQUES DU CIRCULATEUR.....	61
TABLEAU IV.4: COMPATIF ENTRE SYSTEME THERMIQUE A EAU ET SYSTEME A AIR.....	83



---

# **Introduction Générale**

---

L'Algérie est un pays où les énergies fossiles sont disponibles en abondance. Dixième réserve mondiale de gaz, troisième réserve africaine de pétrole, l'avenir énergétique de notre pays semble assuré. Toutefois, avec la baisse du prix du pétrole ces dernières années, une crise énergétique s'est installée en Algérie qui a entraîné le gouvernement algérien à la recherche de nouvelles sources énergétiques pour palier au déficit.

Sur une capacité installée de 13 GWT en 2012, 98% des installations fonctionnent à l'énergie fossile. Ceci a permis d'atteindre un taux d'accès à l'électricité de 100%. En revanche, cette abondance crée une dépendance, qui pour y remédier, le gouvernement a mis en place en 2011, puis en 2015, un programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. L'objectif de ce programme est de porter la part des énergies renouvelables à 40% dans le mix énergétique d'ici à 2030.

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde, estimé à plus de 5 milliards de GWh. Le potentiel solaire est compris entre 1700 et 2650 kWh/m<sup>2</sup>/an suivant la localisation, pour un ensoleillement annuel de plus de 3500h [1].

14 centrales électriques photovoltaïques d'une capacité installée de 268 MW ont été mises en service en 2015, les Hauts Plateaux et le sud du pays. [2]

Une des problématiques du photovoltaïque est son rendement qui ne dépasse pas les 16% et qui diminue durant les périodes de chaleurs. Vu que l'Algérie est un pays chaud, des solutions de cogénération qui consiste à mettre en place des systèmes hybrides (PV Thermique) permettraient de pallier à ce problème en récupérant la chaleur émise par les systèmes photovoltaïque par des fluides caloporteur et ainsi refroidir ses modules.

La présente étude consiste en la réalisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à eau avec des produits locaux, muni d'une architecture et d'un design innovant pour le rendre plus performant par rapport à ce qui a été déjà fait en Algérie.

Ce système hybride permettra de fournir de l'électricité et de la chaleur en combinant les avantages d'un panneau solaire photovoltaïque et d'un capteur solaire thermique tout en gagnant :

- de l'espace lors de l'installation en toiture
- et de garder un bon rendement électrique du panneau photovoltaïque en période de chaleur
- de récupérer le surplus de chaleur dégagé par ce dernier lors de son exposition au soleil.

Ainsi le panneau hybride fournira plus d'énergie d'électricité pendant l'année par rapport à un panneau photovoltaïque classique de même puissance, et la chaleur récupérée par le

capteur thermique peut préchauffer l'eau sanitaire utilisée dans l'habitat pour réduire le cout de chauffage de l'eau.

Sur ce, il sera abordé dans le mémoire au premier chapitre ce qui a été déjà réalisé et étudié dans le domaine des capteurs solaires hybrides à eau grâce à un état de l'art.

Le second chapitre comporte les généralités sur l'énergie photovoltaïque.

Le troisième chapitre traite la modelisation thermique et électrique des panneaux photovoltaïque thermiques

Le quatrième chapitre aborde l'aspect experimental ainsi que les résultatst et les discussions.

Enfin le document se termine par une conclusion générale et les perspectives.

---

# **CHAPITRE I**

## **Etat de l'art**

---

### **I.1.État de l'art :**

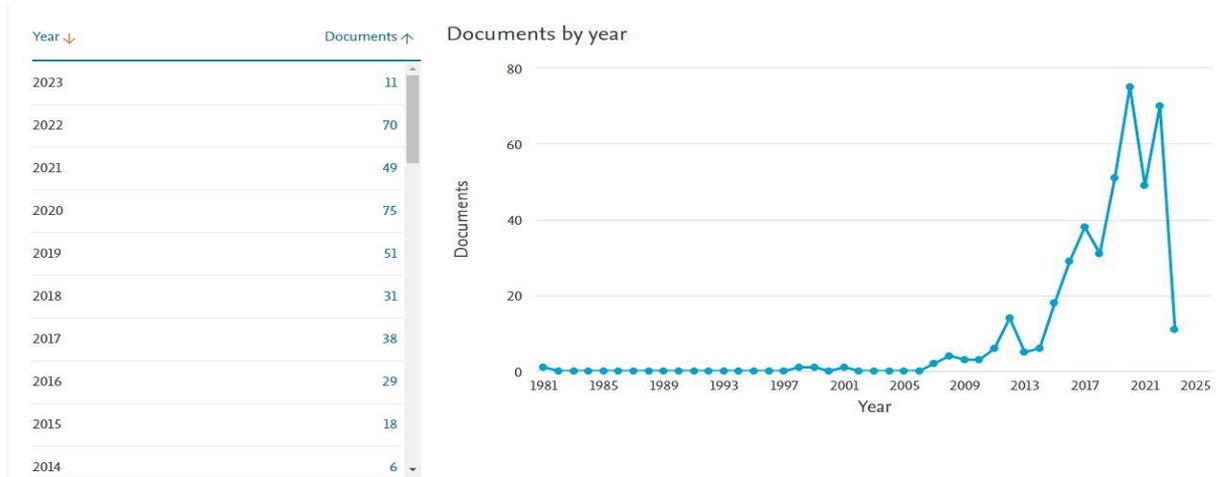
Le concept d'un capteur solaire photovoltaïque combiné avec un dispositif thermique est connu sous le nom de panneaux hybrides photovoltaïques et thermiques. Son fonctionnement consiste à convertir une partie du rayonnement solaire absorbé par le capteur photovoltaïque en électricité et à extraire une partie de la chaleur dissipée par les panneaux photovoltaïques grâce au fluide caloporteur soit de l'air ou de l'eau, ce qui entraîne un refroidissement des cellules. Ce panneau hybride produit simultanément de la chaleur et de l'électricité, ce qui améliore le rendement énergétique de ce système multifonctionnel tout en le rendant plus compétitif en matière d'investissement. En conséquence, le retour sur investissement est plus rapide.

Au cours de cette dernière décennie, les panneaux PV/T ont connu des progrès considérables en termes de conception, de matériaux et de performances. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la rentabilité de ces dispositifs, les chercheurs ont examiné diverses configurations, y compris les systèmes intégrés et les systèmes modulaires. De plus, l'intégration des panneaux hybrides dans les bâtiments et les réseaux électriques a ouvert de nouvelles perspectives pour l'utilisation plus efficace et durable de l'énergie solaire.

Une synthèse bibliographique a été effectuée pour examiner les développements et les avancées les plus récents dans les panneaux hybrides photovoltaïques et thermiques. Nous discuterons des différentes architectures, des matériaux utilisés, des mécanismes de conversion d'énergie et des avantages potentiels de ces systèmes.

La recherche sur les panneaux photovoltaïques thermiques a débuté dans les années 1970, peu de temps après la création des premières cellules photovoltaïques à base de silicium et ont été intensifiées durant les années 80.

Dans la littérature, nous avons remarqué un regain d'intérêt pour ce système hybride PVT depuis 2016.



**Figure (I.1):** Statistiques de publication scientifique sur les systèmes hybrides PV/T (scopus 2023).

✚ L'utilisation des deux fluides caloporteurs, eau et air, dans un capteur solaire hybride PVT a été récemment faite en début 2016. [1]

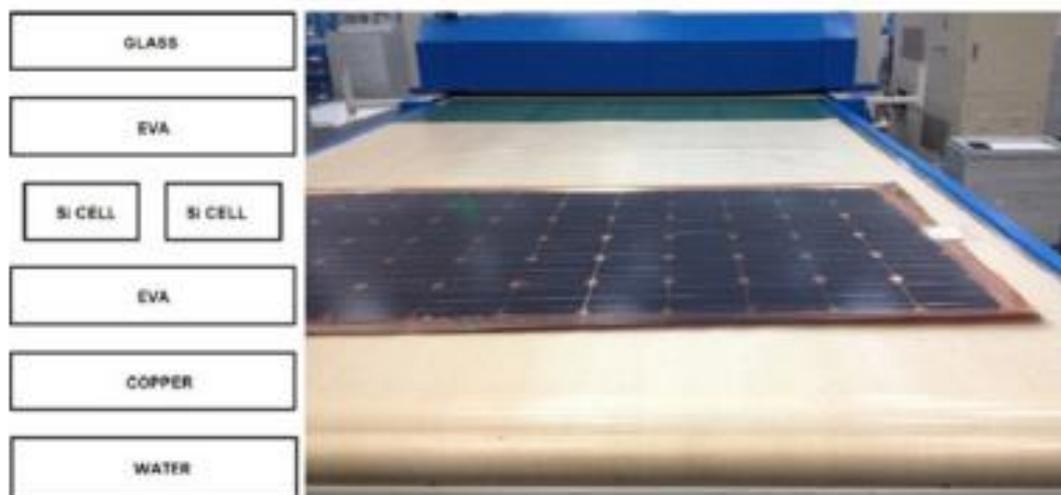
Le capteur est développé et testé dans le laboratoire d'énergie solaire de la faculté de science et de technologie, Université Kebangsaan Malaysia. Le générateur photovoltaïque monte au-dessus du système transparent, permettant à la lumière de passer vers l'absorbeur sur lequel sont fixés les tubes d'eau. Le cadre du capteur est rempli d'un isolant en fibre de verre. L'air et l'eau absorbent la chaleur du canal et la transforment en énergie thermique, ce qui permet de calculer les performances du système.

A base de l'équation Hottel-Whillier-Bliss. Les meilleurs résultats de l'expérience ont été obtenus avec une irradiation de  $800\text{W/m}^2$ , un débit d'air de  $0.05\text{kg/s}$  et un débit d'eau de  $0.02\text{kg/s}$ , et la température de sortie indiquée était de  $27.4^{\circ}\text{C}$ . Avec une puissance électrique moyenne de  $145\text{W}$ , il avait un rendement électrique de 17 % et un rendement thermique de 76 %. La figure représente l'ensemble du système PV/T combiné.

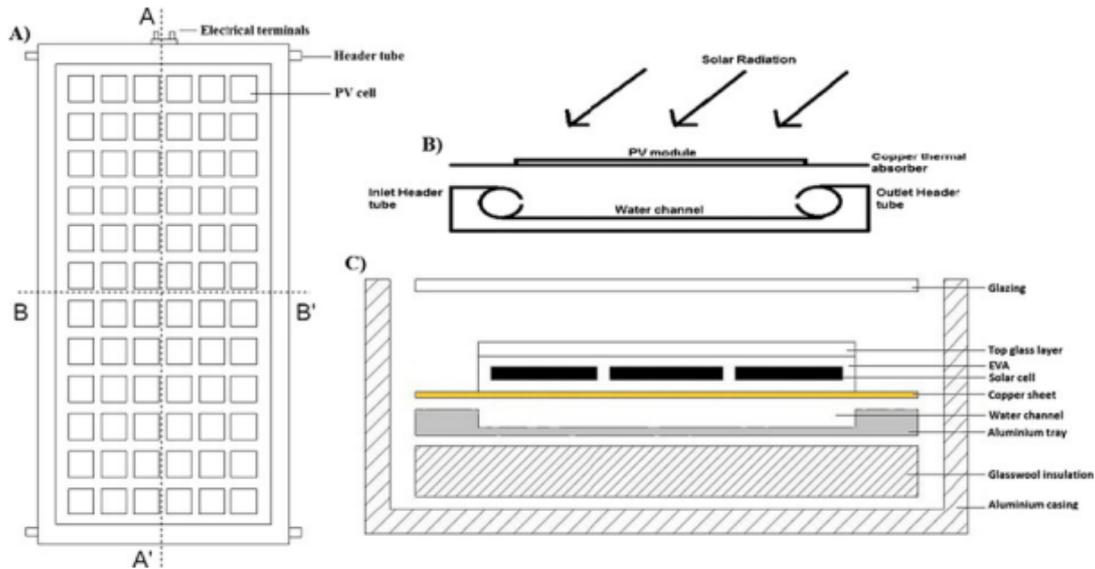


**Figure (I.2) :** Photographie de l'ensemble du système PV/T combiné. [1]

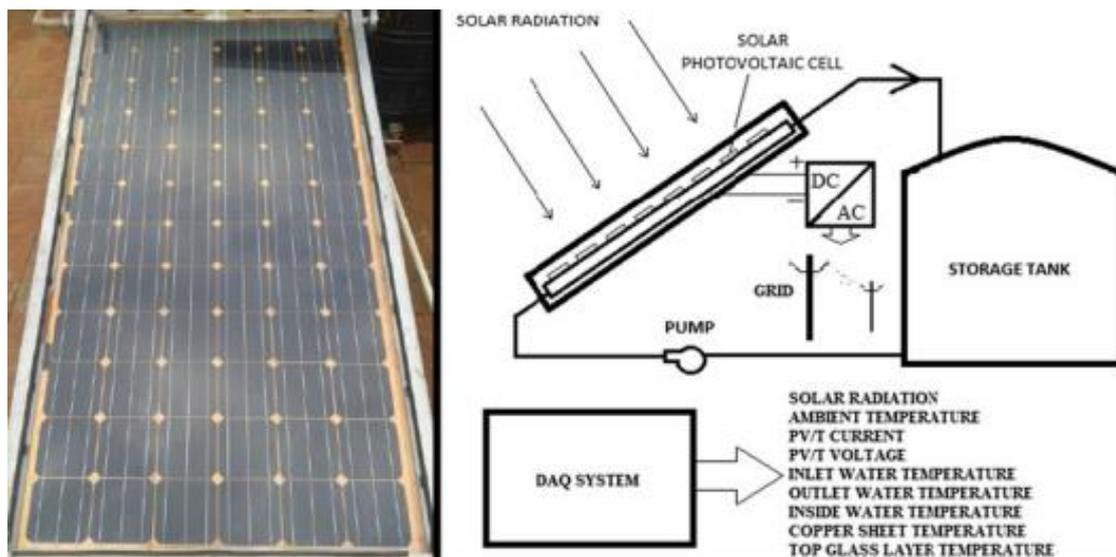
- ✚ Jee Joe Michael et Iniyan Selvarasan, ont développé un nouveau collecteur PVT en laminant directement les cellules solaires sur un absorbeur thermique en cuivre métallique. Les résultats montrent que la résistance thermique a été réduite de 9,93% pour un transfert de chaleur efficace des cellules photovoltaïques au fluide de transfert de chaleur, grâce à la présence de la feuille de cuivre. [2]



**Figure (I.3) :** les couches du collecteur PVT et du module PVT places sur la chambre de laminage. [2]

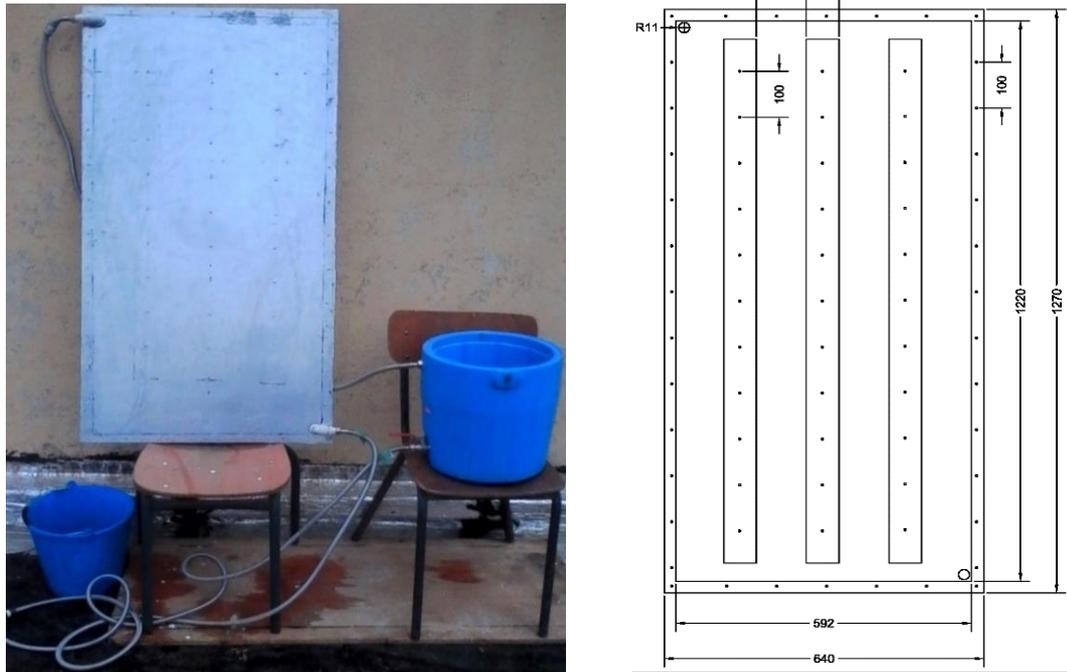


**Figure (I.4) :** Vue en coupe transversale du collecteur PVT.[2]



**Figure (I.5) :** Vue de face du collecteur PVT et schéma diagrammatique du système PVT. [2]

- ✚ Le travail de BOURAI en 2017, qui a conçu l'étude et la réalisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à eau avec des produits locaux, muni d'une architecture et d'un design innovant pour le rendre plus performant par rapport à ce qui a été déjà fait en Algérie. Les résultats montrent bien que la réalisation a été un succès avec un bon refroidissement, un gain de température pour l'eau et de puissance électrique pour le panneau photovoltaïque. [3]



**Figure (I.6) :** capteur thermique et son schéma. [3]

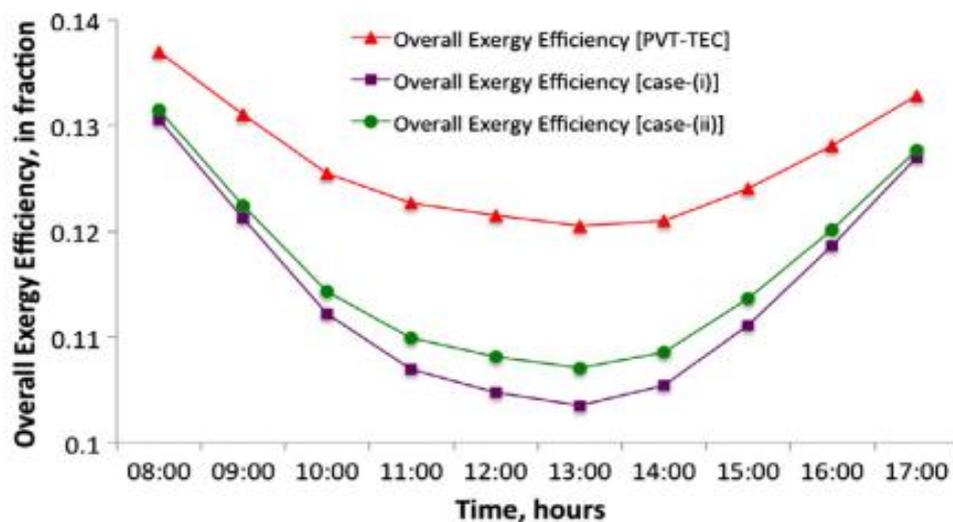


**Figure (I.7) :** capteur PV/THERM avec la cuve de stockage et la pompe. [3]

- ✚ En 2017, Erkata Yandri a utilisé le chauffage par effet Joule comme chaleur supplémentaire pour améliorer l'efficacité thermique du capteur solaire hybride

PV/T. il s'avère des résultats trouvés que l'efficacité thermique du capteur PV/T en mode PV/T est supérieure à celle du mode T dans la plage inférieure du gradient d'efficacité thermique de premier ordre. [4]

- ✚ Un modèle thermique de capteur hybride semi-transparent avec refroidisseur thermoélectrique (PV/T-TEC) proposé par Neha Dimri et al. Les résultats fournis par le modèle mettent en évidence que le rendement électrique de celui-ci est supérieur à ceux de générateur semi-transparent GPV et de générateur semi-transparent avec refroidisseur thermoélectrique GPV-TEC avec respectivement 7.266 et 4.723%. [5]



**Figure (I.8) :** variation horaire d'une efficacité exégétique globale pour capteur hybride semi-transparent avec refroidisseur thermoélectrique (PVT-TEC) proposé, le générateur semi-transparent GPV [case-(i)] et le générateur semi-transparent avec refroidisseur thermoélectrique GPV-TEC [case-(ii)]. [5]

- ✚ Jiajun Cen et al. [6] présentent en 2018 un modèle expérimental et théorique. Dans cette expérience trois types de panneaux photovoltaïques sont utilisés. Il a été démontré que le système est capable de fournir de l'eau chaude à une température de 80°C pour une famille de quatre personnes, tout en fournissant de également un excédent d'électricité pour les besoins domestiques.

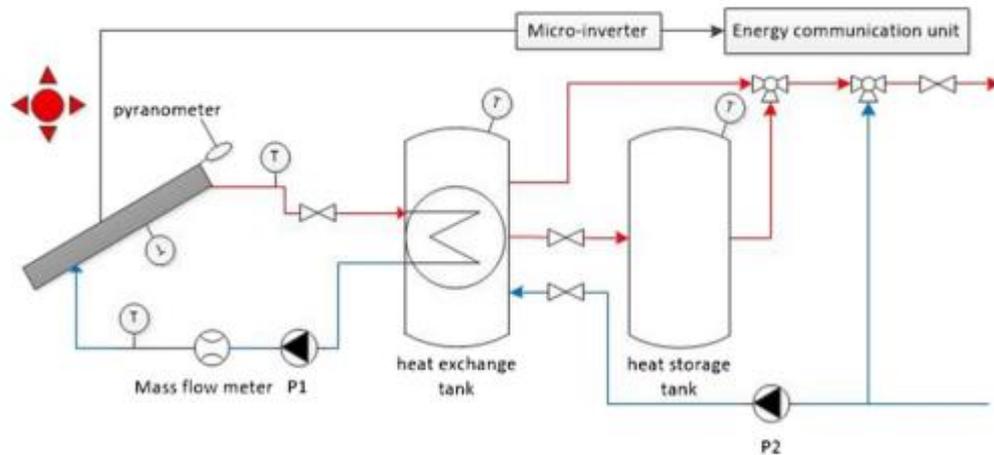


**Figure (I.9) :** des images de la configuration expérimentale à Limassol (Chypre) en été 2017. [6]

- ✚ Dans la même année, Jicheng Zhoua a effectué des expérimentations et des simulations utilisant TRNSYS sur un collecteur hybride PVT, en étudions l'effet de plusieurs facteurs sur la distribution de température, notamment l'espacement des tubes, les matériaux de l'absorbeur, la vitesse d'entrée et l'arrangement des rangées de tubes. Les résultats de performance montrent que les moyens les plus efficace pour augmenter l'uniformité de la distribution de température sont la réduction de l'espacement des tubes et l'utilisation des matériaux d'absorbeur. [7]



**Figure (I.10) :** configuration expérimentale. [7]



**Figure (I.11) :** Un schéma diagrammatique de la configuration expérimentale. [7]

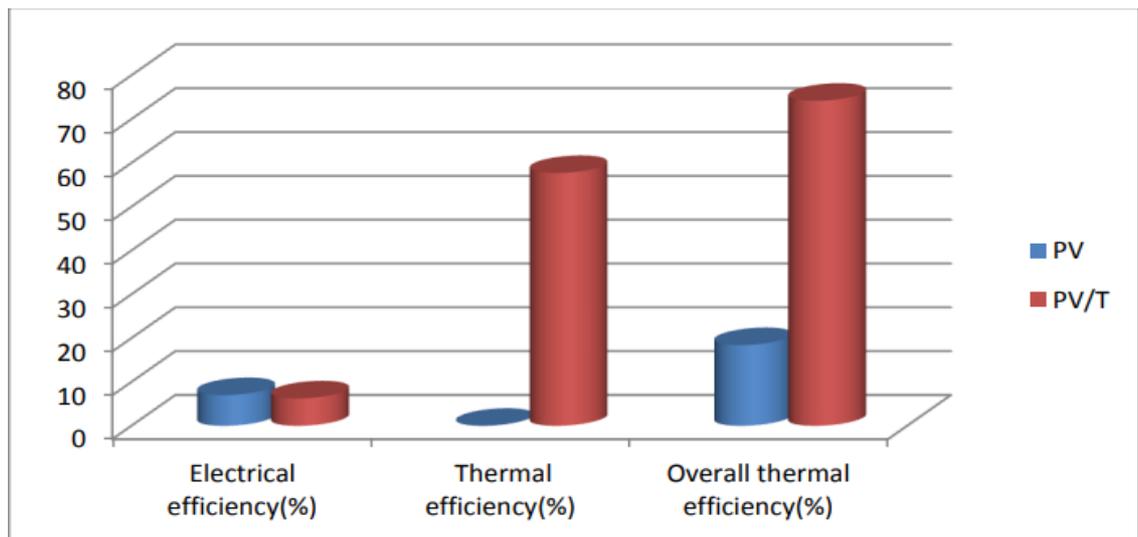
- ✚ L'étude réalisée par Neha Dimri et al., en 2019, qui présente un modèle thermique en considérant trois types différents des modules photovoltaïques, à savoir opaques, semi-transparents et à base d'aluminium, une comparaison est faite entre eux. Les résultats démontrent que le gain énergétique électrique global quotidien, le taux quotidien de gain énergétique thermique et le gain exégétique global quotidien sont les plus élevée pour [cas 3] le collecteur d'eau PVT-TEC à base d'aluminium. [8]



**Figure (I.12) :** Configuration expérimentale dans le laboratoire de simulation solaire de l'Université de Concordia. [8]

- ✚ En 2020, B. BOUMAARAF et al. [9] ont proposé une étude comparative entre un GPV et un capteur solaire hybride PV/T vitré. Deux modèles numériques ont été développés et évalués grâce a une simulation sous Matlab. Le GPV a été valide expérimentalement. Des évaluations de la performance électrique et thermique des deux systèmes ont été effectuées sous les conditions climatiques réelles de la ville de

Ghardaïa. Les rendements électriques atteignent respectivement 7% et 6.26% pour le GPV et le capteur solaire hybride PV/T vitré, tandis que les rendements thermiques globaux atteignent respectivement 18.43% et 74.2% pour les deux systèmes. L'environnement de simulation est considéré avec un débit massique de 0.0125kg/s. La figure représente les histogrammes comparatifs quotidiens moyens des rendements électriques, thermiques et thermiques globaux pour le GPV et le capteur hybride PV/T vitré. [10]



**Figure (I.13) :** histogrammes comparatifs quotidiens moyens des rendements électriques, thermiques et thermiques globaux pour le GPV et le capteur hybride PV/T vitré. [9]

- ✚ L'étude réalisée en 2021 par H. ZHONGHE et al, est une comparaison des performances électrique et thermiques entre les systèmes PVT-ST (Photovoltaïque-Thermique à Concentration Solaires) et PV-ST (Photovoltaïque à Concentration Solaires), cette étude montre que l'efficacité thermique et électrique du système PV-ST est supérieure à celle du système PVT-ST dans des conditions de température ambiante. Cela fait du PV-ST un système ayant une perspective d'application plus large. [11]

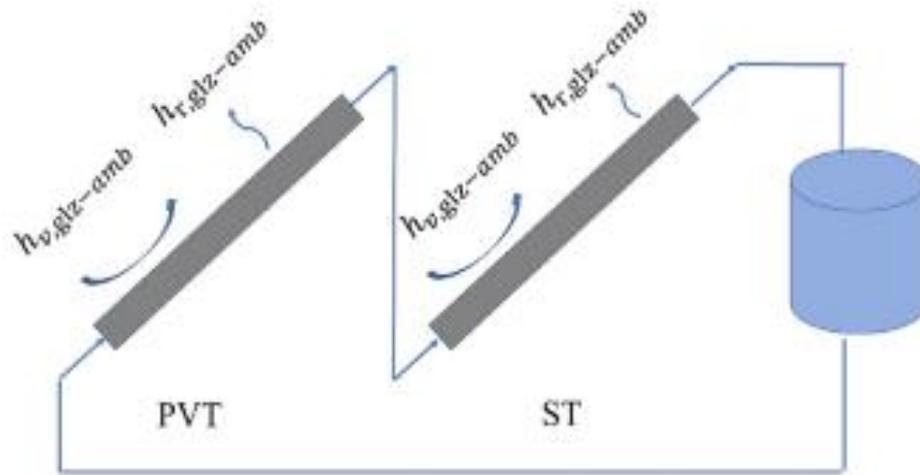


Figure (I.14) : Schéma diagrammatique du système PVT-ST.

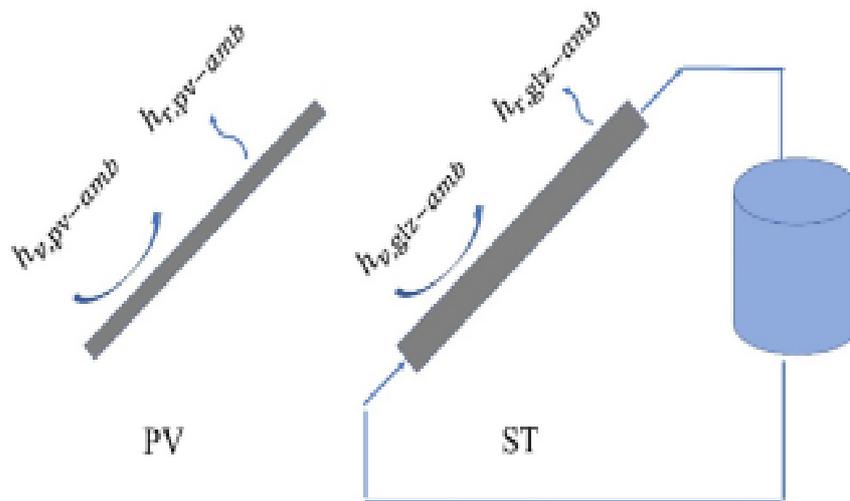


Figure (I.15) : Schéma diagrammatique du système PV-ST.

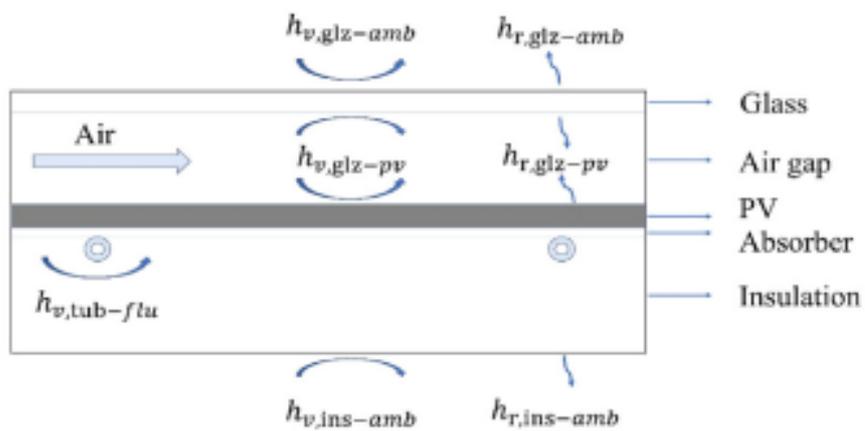
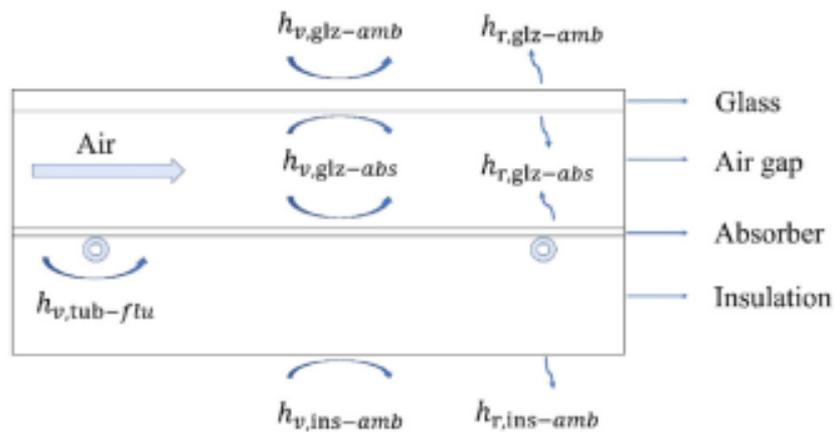


Figure (I.16) : Schéma diagrammatique du processus de transfert d'énergie PVT.



**Figure (I.17) :** Diagramme simplifié du processus de transfert d'énergie ST.

Les résultats sont les suivantes :

- En maintenant la surface totale et la génération d'électricité égales, plus la température ambiante ( $T_a$ ) est basse et plus la température de l'eau d'entrée ( $T_i$ ) est élevée, plus la température de sortie de l'eau du système PV-ST est supérieure à celle du système PVT-ST. Autrement dit, le système PV-ST présente davantage d'avantages. Surtout lorsque la température ambiante est inférieure à  $15\text{ }^\circ\text{C}$  et que la température de l'eau d'entrée est supérieure à  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , les avantages du système PV-ST sont plus évidents. Lorsque la température ambiante est supérieure à  $30\text{ }^\circ\text{C}$  et que la température de l'eau d'entrée est inférieure à  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , le système PVT-ST présente davantage d'avantages.
- Le système PVT-ST peut fournir de l'eau chaude à une température plus élevée que le système PV-ST en augmentant le rayonnement solaire. Autrement dit, sous un rayonnement solaire élevé, le système PVT-ST présente plus d'avantages, mais cet avantage diminuera progressivement à mesure que la température de l'eau d'entrée augmente.
- Plus la température ambiante et la température de l'eau d'entrée sont élevées, moins l'effet de refroidissement du PV est efficace et moins d'électricité est générée. Plus l'intensité du rayonnement solaire est élevée, plus l'énergie solaire est absorbée et plus de puissance est générée.

- ✚ Plus tard, en 2022, Hussein A. KAZEM et al, étudient l'impact de la poussière sur le système photovoltaïque-thermique dans des conditions climatiques difficiles.

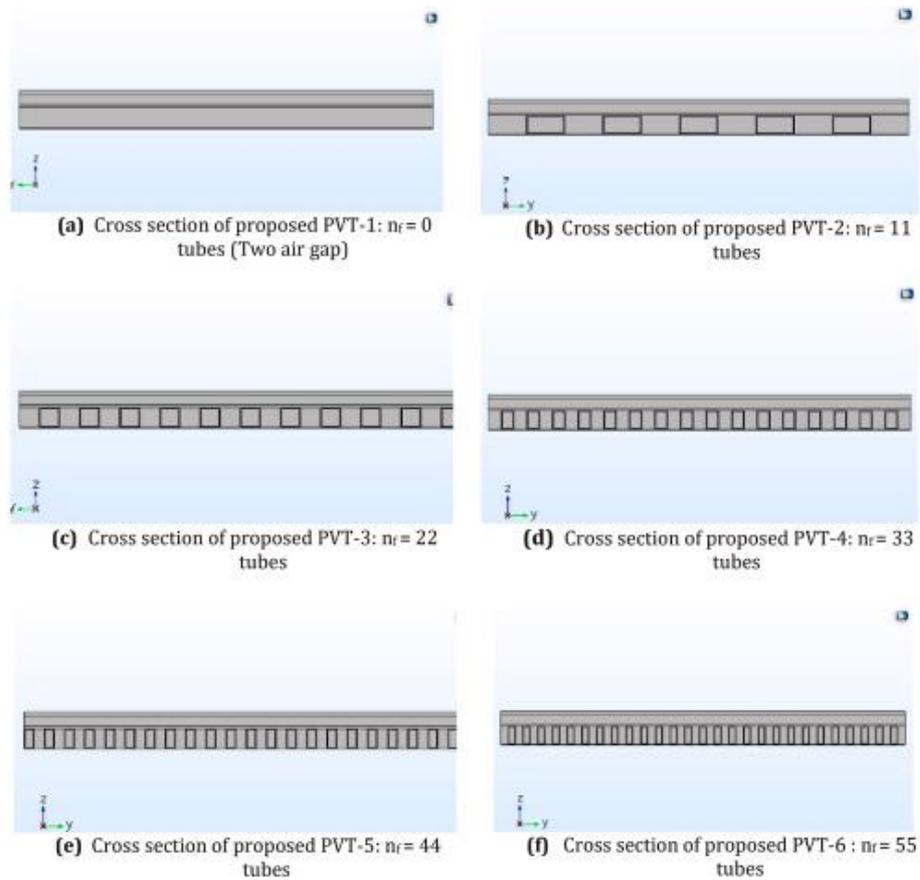
Dans cette étude, ils ont examiné l'impact de la poussière sur les systèmes PVT pour différentes configurations d'écoulement. L'objectif était d'évaluer comment l'accumulation de poussière affecte les performances électriques et thermiques d'un système PVT. Pour assurer la validité du système dans des conditions météorologiques extrêmes, ils ont réalisé cette étude dans la région de Sohar, Oman. Ils ont installé et testé deux collecteurs à écoulement en spirale ainsi qu'un système PV conventionnel, en évaluant leur résistance à la poussière. Pendant deux mois (juillet et août 2021), puis ils ont mesuré les performances du PVT avec une accumulation de poussière, puis ils l'ont comparé avec celles du système PV autonome. Ils ont par la suite calculé, évalué et discuté l'impact de la poussière sur les rendements électrique et thermique. Les résultats ont été comparés à d'autres études similaires portant sur les systèmes PV conventionnels, car il n'y a pas encore d'étude approfondie sur les systèmes PVT dans ce contexte. [12]

- ✚ En 2023, Ezzeddine TOUTI et al. [13] ont concentré ce travail sur la conception d'un prototype novateur de collecteur d'air PVT. Cette conception a été élaborée après une analyse approfondie de différents prototypes à travers des études expérimentales et numériques. L'objectif principal est d'améliorer les performances thermiques et électriques du collecteur d'air PVT développé. La simulation numérique, utilisant COMSOL Multiphysics, a été effectuée pour étudier les aspects électriques et thermiques du système.

Les résultats des tests expérimentaux ont validé une amélioration des performances électriques et thermiques. En effet, lorsque le nombre de conduits d'air augmente de manière significative, l'efficacité thermique s'accroît.

En effet, les résultats expérimentaux ont confirmé une amélioration des performances électriques et thermiques. Par exemple, l'efficacité thermique moyenne maximale est passée de 30,87% avec le PVT-1 (nf = 0) à 53,88% avec le PVT-5 (nf = 44). De même, la température maximale moyenne du panneau PV était de 53,37 °C dans le prototype PVT-1 sans tubes carrés, tandis que la température minimale du panneau PV était de 42,7 °C dans le prototype PVT-6 avec 55 tubes. Les caractéristiques électriques ont également été améliorées, avec une augmentation de la puissance électrique de 115,05 W (PVT-1) à 121,47 W (PVT-6). Ainsi, l'efficacité électrique a été améliorée grâce au refroidissement du module

PV. Les résultats indiquent que le PVT-5 avec 44 tubes carrés présente l'efficacité globale maximale de 58,48%. En conclusion, ce prototype offre des perspectives de fabrication pour diverses applications, notamment les séchoirs alimentaires et la production d'électricité dans les zones rurales où l'accès à l'électricité est limité.



**Figure (I.18) :** Vue schématique de la section transversale du PVT nouvellement conçu.  
[13]

---

# **CHAPITRE II**

## **Généralités Sur L'énergie Photovoltaïque**

---

## **II.1. Introduction :**

Dans le présent chapitre, nous allons présenter des généralités sur les panneaux photovoltaïques, Le but d'un système photovoltaïque (PV) est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique.

## **II.2. Un système photovoltaïque :**

Un système photovoltaïque est un système qui utilise des panneaux solaires photovoltaïques afin de transformer l'énergie solaire en électricité. Il est constitué d'un ensemble de panneaux photovoltaïques, des régulateurs de charge qui contrôlent le courant délivré par les panneaux ainsi que la charge et la décharge des batteries, d'un système de stockage d'énergie électrique (dans certains cas) et des onduleurs qui transforment l'énergie électrique en courant alternatif pouvant servir à alimenter des charges électriques.

Les systèmes photovoltaïques peuvent être classés en deux catégories principales : les systèmes autonomes et les systèmes connectés au réseau électrique.

### **II.2.1. Les systèmes autonomes :**

Un système photovoltaïque autonome est un système qui fonctionne de manière indépendante sans être raccordé au réseau électrique. Les batteries sont nécessaires au stockage d'énergie durant les périodes nocturnes et non-ensoleillées dans les systèmes photovoltaïques autonomes. En plus on utilise les systèmes autonomes pour alimenter les maisons éloignées, les îles, les régions montagneuses, l'équipement de surveillance à distance, les pompes à eau et d'autres applications. On distingue deux types des systèmes autonomes :

### **II.2.2. Les systèmes au fil du soleil :**

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage c'est à dire sans système de secours ce qui montre la figure (II.1). Le pompage photovoltaïque est l'application la plus fréquente soit : pompage à courant continu ou à courant alternatif. L'inconvénient de ces systèmes est la dépendance aux conditions climatiques, c'est-à-dire elles limitent l'utilisation de l'énergie solaire dans les régions où le temps est souvent couvert. Ces systèmes utilisent, en général, un autre moyen de stockage tel que les réservoirs d'eau pour le pompage PV.

[15]

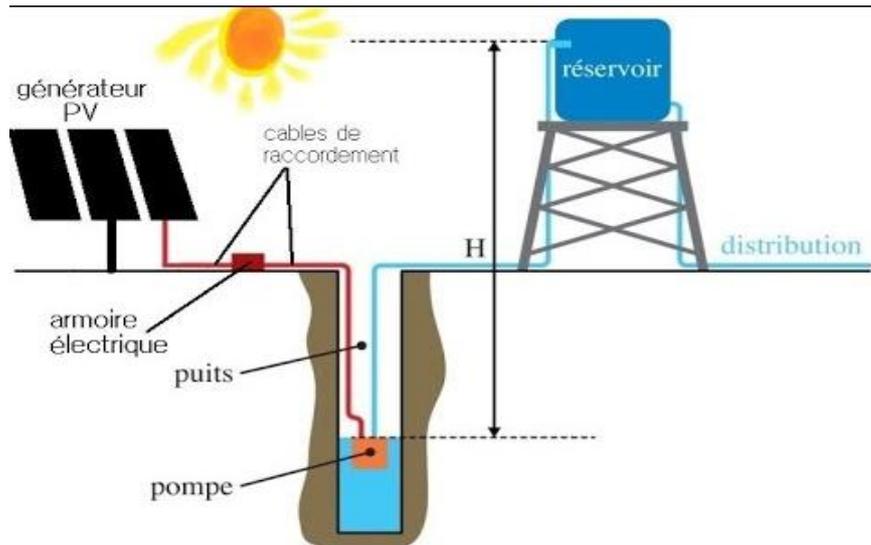


Figure (II.1) : Un système de pompage solaire photovoltaïque.

### II.2.3. Les systèmes avec stockage :

Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage. Un système de stockage sert à alimenter les charges durant les périodes ayant un ensoleillement faible (passage des nuages) ou une absence totale de l'ensoleillement (les nuits). Le système de stockage sert à emmagasiner l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie (Figure II.2). [16]

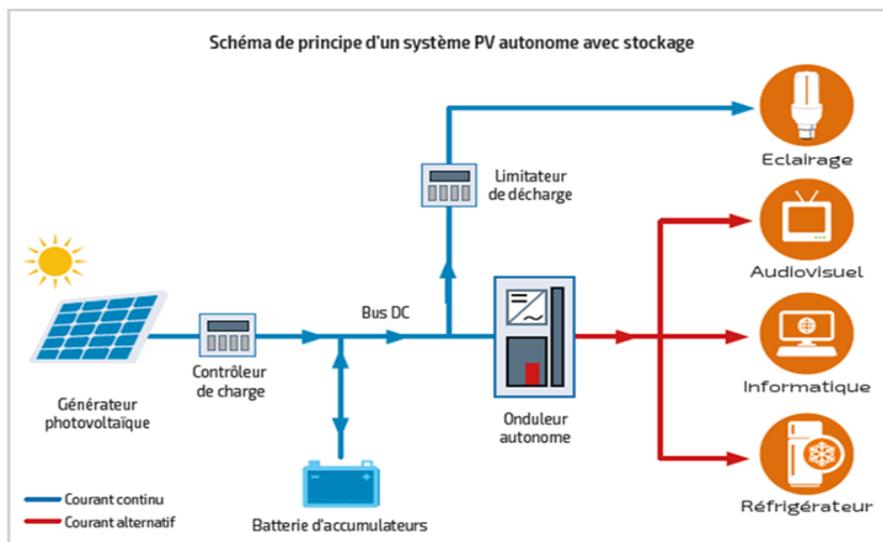
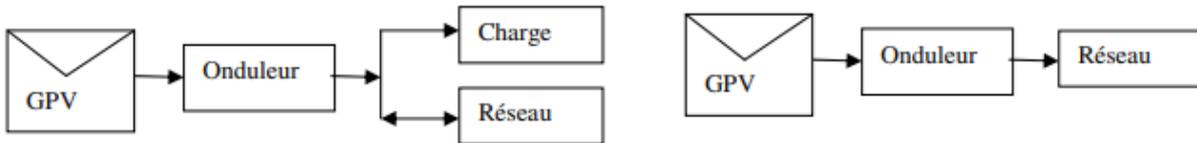


Figure II.2 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque autonome avec stockage.

### II.2.4. Les systèmes PV raccordé au réseau :

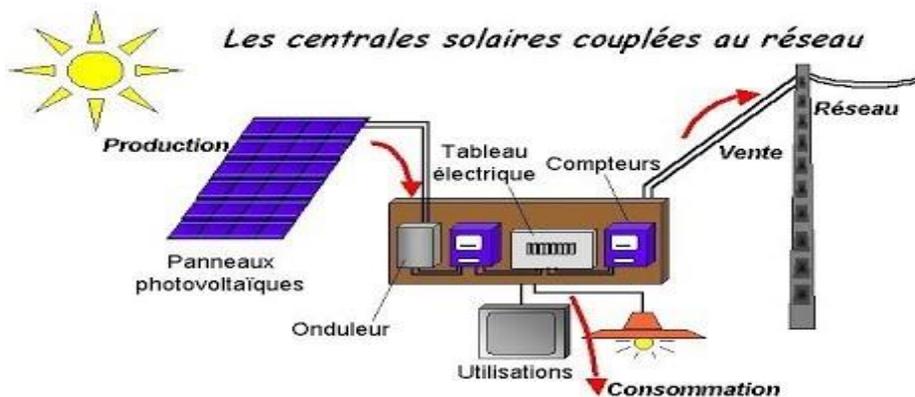
Un système photovoltaïque raccordé au réseau est un système de production d'énergie électrique à partir des panneaux photovoltaïques, qui est mis au point pour être connecté au réseau électrique (injection partielle ou totale dans le réseau électrique) (Figure II.3). [16]



**Figure II.3 :** injection partielle et injection totale respectivement. [16]

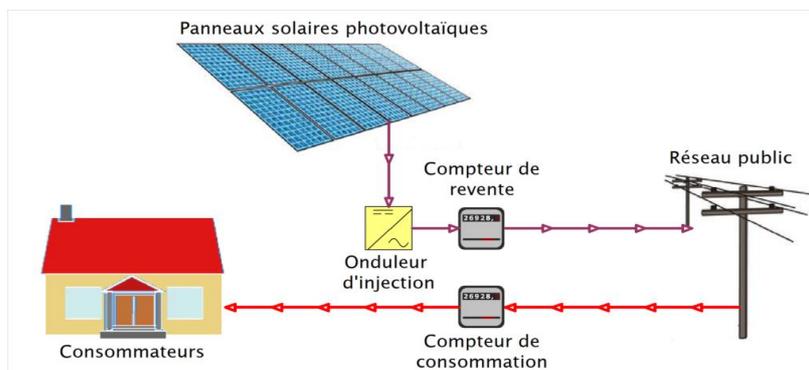
Les systèmes connectés au réseau ont deux types :

- Systèmes centralisés (centrale solaire photovoltaïque) : Ils sont utilisés pour renforcer le réseau conventionnel durant les périodes de pic.[16]



**Figure II.4 :** Schéma des centrales solaires couplées au réseau.

- Systèmes décentralisés c'est-à-dire installés chez des particuliers : par exemple, les toits de maisons individuelles, de mairies, de granges, etc.



**Figure II.5 :** Schéma d'un système PV connecté au réseau décentralisé.

On distingue deux types de systèmes :

#### **II.2.4.1. Systèmes à Injection du surplus :**

Le consommateur utilise la puissance fournie par le solaire pour alimenter ces charges. Dans le cas du surplus, il l'injecte dans le réseau. L'installation du client producteur avec achat des excédents de production doit être équipée de deux compteurs, un compteur de production et un compteur de consommation. [16]

#### **II.2.4.2. Systèmes à injection de la totalité :**

Dans cette configuration, toute la production de l'installation photovoltaïque est injectée dans le réseau électrique. Sachant que les besoins du consommateur sont satisfaits par ce dernier. [16]

#### **II.2.5. Les systèmes hybrides :**

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. [17] Il intègre un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité.

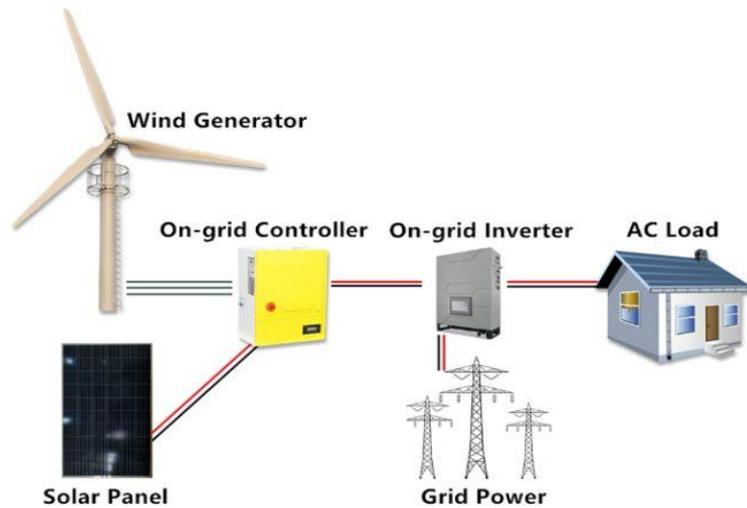
La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours. [18]

##### **II.2.5.1. Un système hybride éolien-solaire :**

Un système hybride éolien-solaire est un système qui combine la puissance de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne (voir Figure II.6). La meilleure façon de réduire la consommation de combustibles fossiles est d'utiliser ce type de système. Ces sites sont souvent des systèmes solaires hors réseau utilisés dans des endroits éloignés, et le transport de diesel sur de longues distances est coûteux. Le secteur minier et sur les îles utilisent souvent ce système hybride solaire. [19] L'énergie éolienne et l'énergie solaire se complètent. Les heures de pointe de chaque système se produisent à des moments différents de la journée et de l'année.

La production d'électricité de ces installations solaires hybrides est plus constante et fluctue moins que les sous-systèmes à deux composants. Si le raccordement au réseau est accessible, il peut être connecté au réseau électrique. De cette manière, il est possible de vendre le

surplus d'électricité produit. L'inconvénient est qu'il n'a la capacité de stocker l'énergie solaire qu'à l'aide de systèmes de batteries.



**Figure II.6 :** Système hybride éolien-solaire.

#### **II.2.5.2. Panneaux solaires avec générateurs diesel :**

C'est un système solaire hybride combinant un moteur diesel avec un système photovoltaïque. Ce type combine des générateurs solaires photovoltaïques (PV) et diesel (voir Figure II.7). La production d'énergie photovoltaïque a un coût presque marginal. Par conséquent, il est traité en priorité dans le réseau. Le but de cette technologie est de fournir de l'électricité pendant 24 heures aux clients, mais de réduire les heures de fonctionnement du générateur diesel d'une manière optimale. [20]

De nombreuses installations sans raccordement électrique au réseau adoptent ce type de système. Dans certains cas, nous pouvons utiliser des générateurs diesel en cas de panne de courant. Il est souvent une option viable d'inclure le stockage de la batterie. La batterie est utile en raison de la fluctuation de l'énergie solaire et de la portée limitée d'un générateur. Le dimensionnement des batteries doit être pensé pour servir et optimiser la contribution des panneaux solaires photovoltaïques aux systèmes hybrides.

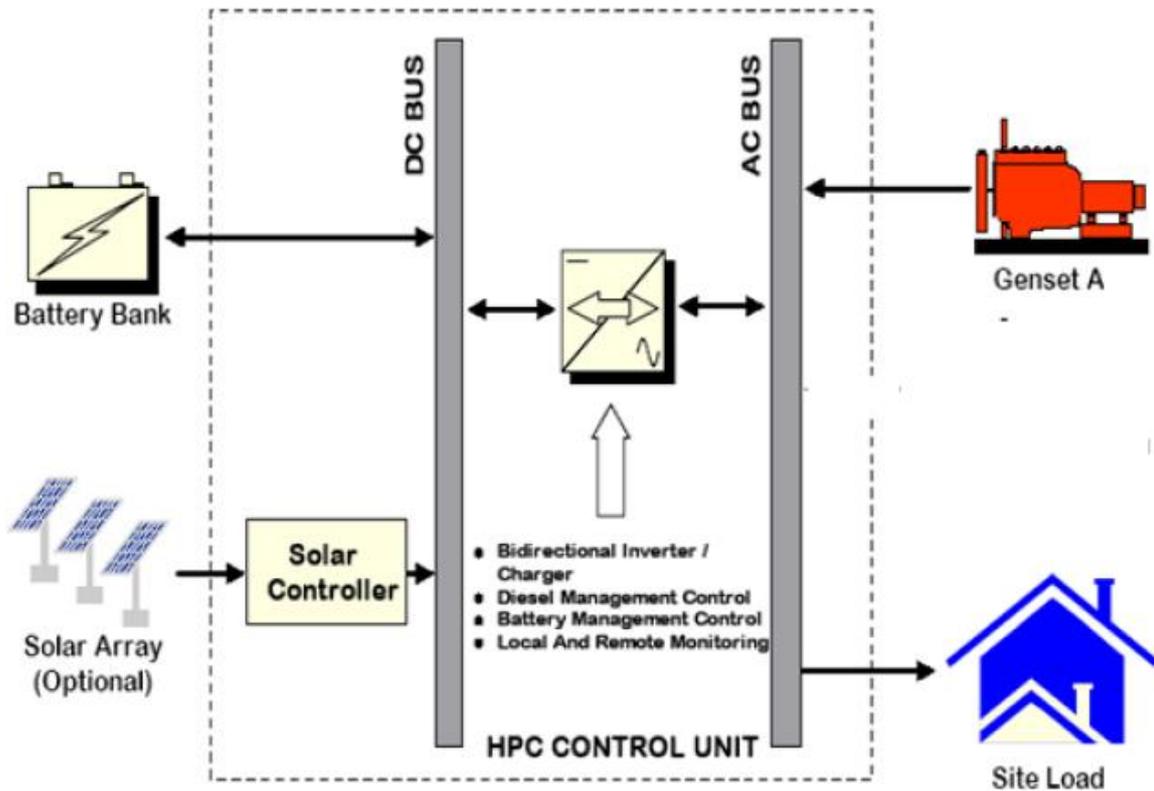


Figure II.7 : Panneaux solaires avec générateurs diesel. [20]

En effet, un système photovoltaïque simple est constitué de panneaux photovoltaïques, de régulateur, d'un onduleur et de batterie de stockage.

Chaque composant a des propriétés connues. Pour notre travail, on discute des panneaux solaires. Ces derniers sont un assemblage des cellules solaires en série, en parallèle ou série-parallèle pour délivrer la tension et le courant escomptés.

### **II.3. Effet photoélectrique :**

Un matériau, généralement métallique, est dit photoélectrique s'il émet des électrons lorsqu'il est soumis à un rayonnement électromagnétique (rayonnement infrarouge, lumière visible, ultraviolet) de fréquence suffisamment élevée -- dépendant du matériau.

Ce phénomène a été expliqué pour la première fois par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz, en 1887. Toutefois, la physique classique, qui considère la lumière comme une onde, ne permet pas de rendre correctement compte de l'effet photoélectrique. C'est donc Albert Einstein qui a donné une explication plus complète en 1905, en introduisant son hypothèse de quantification du rayonnement. [21]

Lorsque des photons heurtent un matériau, les électrons les absorbent. Si l'énergie caractéristique des photons -- qui est liée à leur fréquence -- est supérieure à l'énergie de liaison des électrons, ceux-ci sont éjectés. Ainsi, augmenter l'intensité de la lumière émise ne permet pas d'amorcer l'effet photoélectrique. En effet, la fréquence des photons n'est pas fonction de l'intensité de la lumière. En revanche, une fois l'effet photoélectrique déclenché, le courant -- le nombre de photoélectrons émis par unité de temps -- est proportionnel à l'intensité de la lumière reçue.

L'effet photovoltaïque représente également l'une des manifestations de l'effet photoélectrique.

## **II.4. Cellule photovoltaïque :**

Les cellules photovoltaïques sont les composants de base des panneaux solaires photovoltaïques qui permettent la conversion directe de l'énergie solaire à une énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir des matériaux semi-conducteurs qui sont conçus pour optimiser les deux étapes clés de processus photovoltaïque : l'absorption de la lumière incidente et la collecte des électrons à la surface. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium [22]. Ces derniers sont constitués d'une des faces de la cellule est dopée N (par exemple avec du phosphore) et d'une face dopée P (par exemple avec du bore), avec des électrodes métalliques placées sur les deux faces pour collecter les électrons et permettre le passage d'un courant électrique. La face supérieure de la cellule est traitée pour maximiser l'entrée du rayonnement, en utilisant des traitements de surface tels que des couches anti-reflets et des couches de verre pour protéger et sceller la cellule. Enfin, les deux faces de la cellule sont équipées d'électrodes pour collecter les électrons. [23] [24]

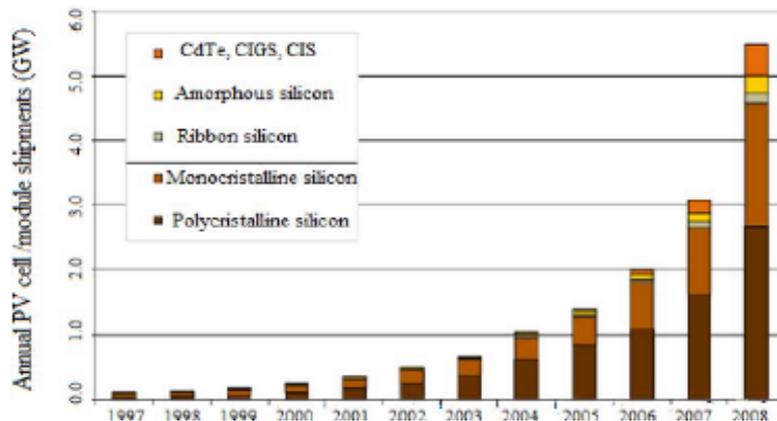
### **II.4.1 Historique de la cellule photovoltaïque :**

- L'historique du photovoltaïque débute en 1839 lorsque le physicien Antoine BECQUEREL et son fils Alexandre EDMOND présentent pour la première fois un effet photoélectrique. Leur expérience permet d'observer le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide, modifié par un éclairage. [25]
- Werner Von SIEMENS expose en 1875 devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

- A partir de l'année 1954, Albert EINSTEIN a découvert que l'énergie de la lumière était transportée par des particules appelées photons. C'est également à cette période que la première cellule photovoltaïque présentant un rendement satisfaisant a été mise au point.
- En 1958, une cellule photovoltaïque présentant un rendement de 9% a été mise au point. Les premiers satellites fonctionnant à l'aide de cellules solaires ont été envoyés dans l'espace cette même année. Et la 1ere maison alimentée par des cellules photovoltaïques. [22].
- En 1973 est construite à l'Université de Delaware et en 1983 La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. Enfin en 2013 "LEM" et "HEWELIUSZ", les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITE, décolleront. [26]

#### II.4.2. Les filières technologiques des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, classées en fonction de leurs technologies de fabrication. En réalité il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, le silicium poly-cristallin, les couches minces et les cellules organiques.



**Figure II.8 :** Évolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [27]

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs.

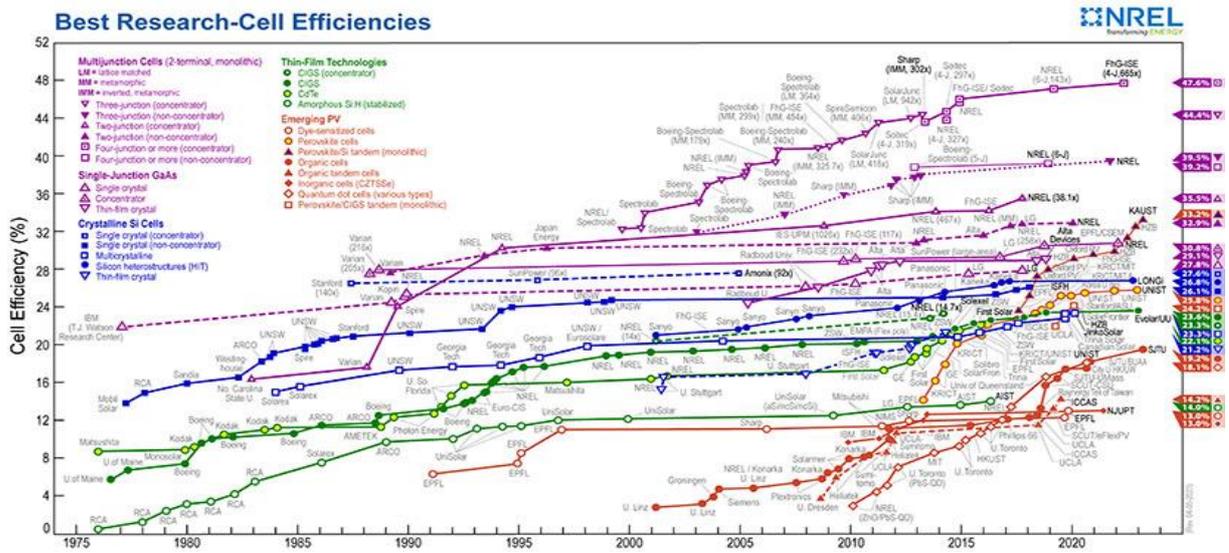


Figure II.9 : Évolution du rendement des différentes technologies entre 1975 et 2023. [28]

II.4.2.1.1ère génération : cellules cristallines :

- Le silicium cristallin :

La filière de production de modules photovoltaïques à base de silicium est actuellement responsable de 99% de la part de marché de l'industrie photovoltaïque comme illustre la figure. Il est le deuxième élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Les propriétés du silicium en font un matériau très polyvalent : parfaitement stable à haute température et non toxique, ce qui est essentiel pour la fabrication de circuits électroniques. [29].

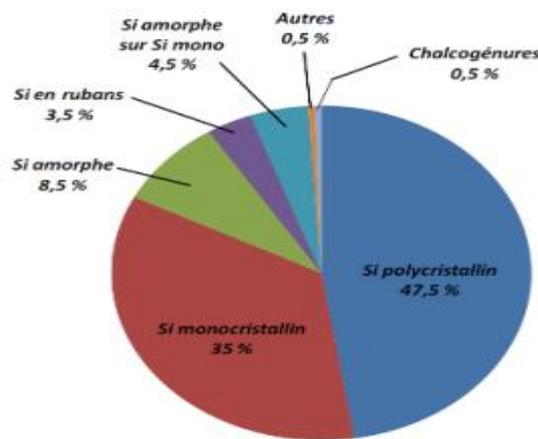


Figure II.10 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque. [30].

Le silicium cristallin est actuellement la technologie la plus utilisée pour les cellules solaires, représentant plus de 80% du marché. Bien que certains annoncent depuis longtemps sa fin, elle reste prédominante grâce aux avancées technologiques de ces dernières années. Cette filière comprend deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

- **Silicium monocristallin :**

Après le processus de refroidissement, le silicium se solidifie pour former un unique cristal. [31]. Ce dernier est découpé en fines tranches qui deviendront des cellules d'une couleur bleue uniforme comme la figure (II.11) montre.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin. [32]

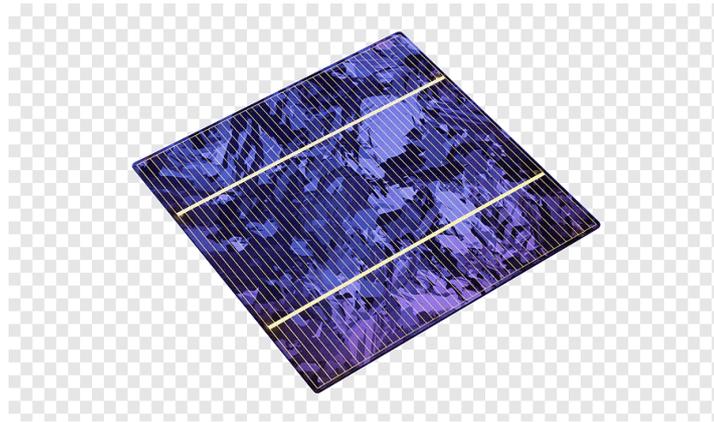


**Figure II.11 :** Plaque de silicium monocristallin.

- **Silicium polycristallin (multicristallin) :**

C'est la technologie la plus répandue et largement utilisée aujourd'hui, et qui représente près de 50% du marché. Le silicium polycristallin est constitué de multiples petits cristaux regroupés ensemble pour former une structure solide hétérogène (voir Figure II.12).

Son rendement est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche, il est possible de dire que la fabrication du silicium multicristallin est relativement simple et que les coûts de production sont très bas. [33]



**Figure II.12 :** Plaque de silicium polycristalline.

- **Silicium amorphe :**

Le silicium amorphe est une forme de silicium qui présente une structure désordonnée. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. [33].



**Figure II.13 :** Panneau PV au silicium amorphe.

- **Tellure de cadmium (CdTe) :**

Le tellure de cadmium (CdTe) est un matériau semi-conducteur conçu pour absorber et convertir la lumière solaire en électricité (Figure II.14). Il est utilisé dans la fabrication de cellules photovoltaïques à couches minces. Les cellules photovoltaïques au CdTe sont connues pour leur efficacité élevée et leur faible coût, ce qui les rend populaires dans le domaine de l'énergie solaire. Sur la base du cycle de vie, le CdTe PV présente la plus faible

empreinte carbone, la plus faible consommation d'eau et le plus court délai de récupération d'énergie de toutes les technologies solaires.

La haute efficacité de conversion de la lumière en électricité, en particulier sous ensoleillement direct, est l'un des principaux avantages des cellules photovoltaïques au CdTe. Par rapport aux autres technologies photovoltaïques, elles sont également moins sensibles aux changements de température.

De 2013 à 2016, le rendement des cellules CdTe est passé de 17% à 22,1% [34], cependant, il convient de noter que le tellure de cadmium est considéré comme un matériau toxique. L'utilisation de matériaux rares peut également devenir un facteur limitant l'évolutivité industrielle de la technologie CdTe à moyen terme. [35]



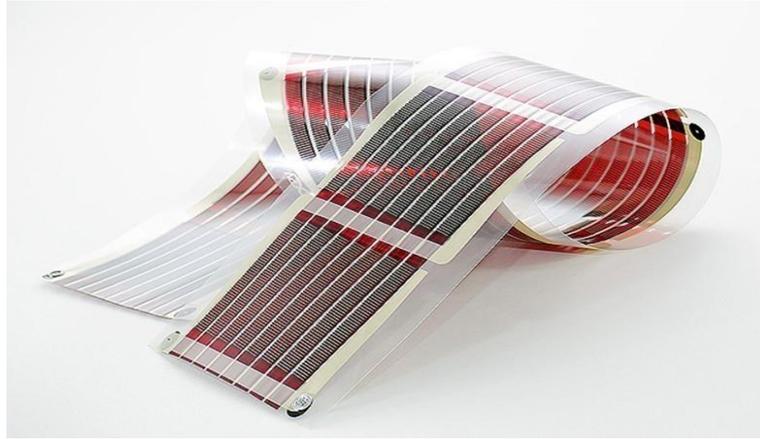
**Figure II.14** : Cellule Tellure de cadmium (CdTe).

- **Pérovskites :**

Les cellules pérovskites sont des cellules composées d'un hybride organique qui utilisent des polymères ou des molécules organiques comme matériau actif [36] et inorganique avec une structure similaire à celle d'une pérovskite.

Ces cellules ont été introduites en 2000 avec une efficacité de 3,8 %. Depuis 2016, le rendement est passé à 22,1 %, ce qui la rend une option intéressante! Ils n'ont pas de coûts de production élevés.

Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures). [28]



**Figure II.15 :** Cellule hybride organique-inorganique.

- **Les cellules multi-jonction :**

Les cellules multi-jonction sont des dispositifs photovoltaïques qui utilisent plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs pour absorber différentes parties du spectre solaire et convertir la lumière en électricité.

Ils sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent une efficacité élevée, telles que les satellites et les systèmes de concentration solaire. Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (au delà de 30 %). [37]



**Figure II.16 :** cellule photovoltaïque multi jonction (Source. Spectrolab).

- **Arséniure de gallium (GaAs) :**

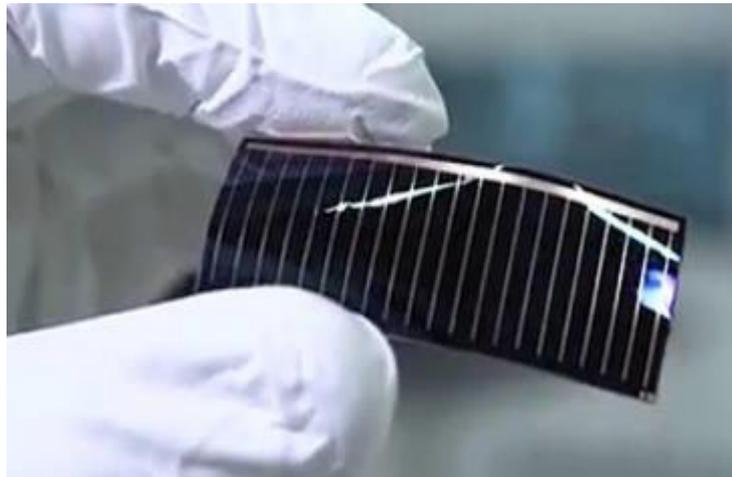
Le GaAs est un semi-conducteur dit « III-V » car le gallium et l'arsenic sont respectivement dans les colonnes III et V dans le tableau de classification périodique des éléments. Il est

largement utilisé dans divers domaines, y compris l'industrie électronique et la technologie des cellules solaires (Figure II.17).

L'arséniure de gallium a quelques propriétés électriques tels que :

- L'arséniure de gallium est connu pour sa capacité à convertir l'énergie solaire en énergie électrique à un taux très élevé. Il peut atteindre un rendement supérieur à 30%, ce qui le rend parmi les cellules solaires à haute efficacité.
- Un autre atout de l'arséniure de gallium est son gap direct ce qui signifie que les électrons peuvent passer directement d'une bande d'énergie à une autre sans avoir besoin d'une transition indirecte.
- Les cellules photovoltaïques à base de GaAs sont utilisées dans des applications spatiales en raison de leur rendement élevé et leurs capacités à fonctionner à des températures élevées.

Il est important de noter que l'arséniure de gallium est souvent utilisé en combinaison avec d'autres matériaux pour former des cellules solaires à structure hétérojonction afin d'optimiser les performances.



**Figure II.17** : cellule d'Arséniure de gallium (GaAs).

Ce tableau donne le comparatif des rendements des différents types des cellules photovoltaïques.

**Tableau II.1** : Comparatif des rendements des différents types de cellules. [39]

Type	cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)	Niveau développement
<b>1ère génération</b>				
Silicium monocristallin	24.70%	22.70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20.30%	16.20%	11-15%	Production industrielle
<b>2e génération</b>				
Silicium amorphe	13.40%	10.40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9.40%	7%	Production industrielle
CIS	19.30%	13.50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16.70%		6-9%	Prêt pour la production
<b>3e génération</b>				
Cellule organique	5.70%			Au stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8.40%		Au stade de la recherche
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production exclusivement applications spatiales

## **II.5. Assemblage des cellules photovoltaïques :**

La cellule photovoltaïque unique produit une puissance très faible (1 à 3 W) avec une tension de moins d'un volt, qui n'est pas suffisante pour répondre aux besoins des équipements électriques, elle est donc assemblée pour donner la puissance souhaitée. Il existe trois types d'assemblage. [40]

### **II.5.1. Assemblage en série :**

Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule [41].

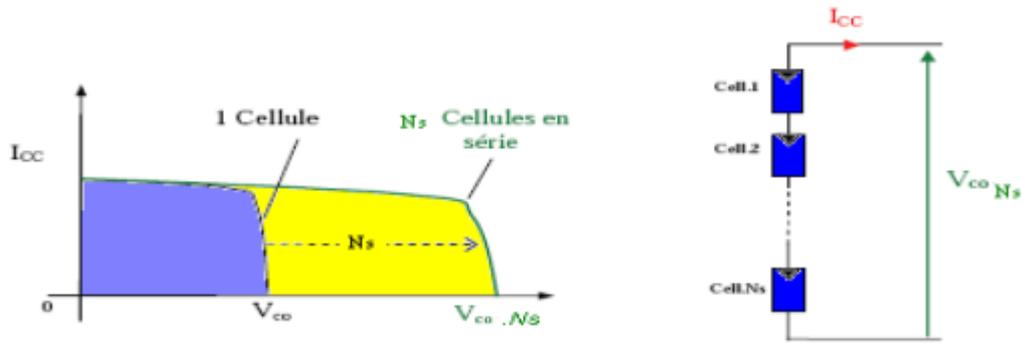
L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $N_s$  cellules.

$$V_{CON_s} = N_s \times V_{CO} \quad (II.1)$$

Avec :  $V_{CON_s}$  : Somme des tensions en circuit ouvert en série.

$N_s$  : Nombre des cellules en série.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble (voir figure II.18).



**Figure II.18 :** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_s$  cellules en série.

Modélisation d'une cellule PV. [41]

### II.5.2. Assemblage en parallèle :

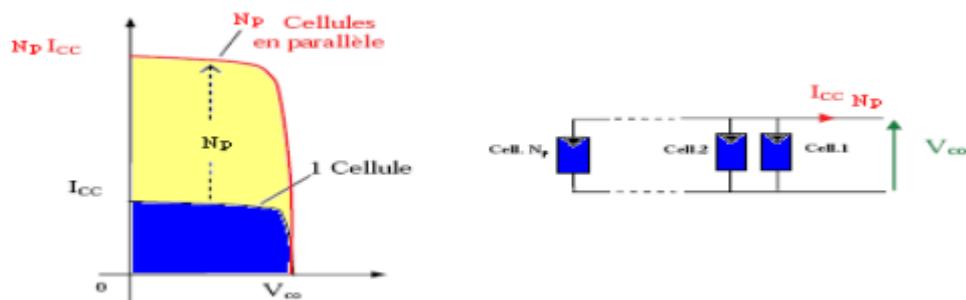
Une association parallèle de  $N_p$  cellules permet d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (Figure II.19).

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules. [41]

$$I_{CC\ N_p} = N_p \times I_{CC} \quad (II.2)$$

Avec :  $I_{CC\ N_p}$  : Somme des courants en court-circuit en parallèle.

$N_p$  : Nombre des cellules en parallèle.



**Figure II.19 :** Caractéristiques résultant d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle. [41]

### II.5.3. Assemblage en série-parallèle :

Pour augmenter la tension et le courant ensemble, les cellules doivent être assemblées en série-parallèle [42]. Cela permet également de maximiser l'efficacité globale du système solaire en optimisant les performances des cellules solaires (Figure II.20).

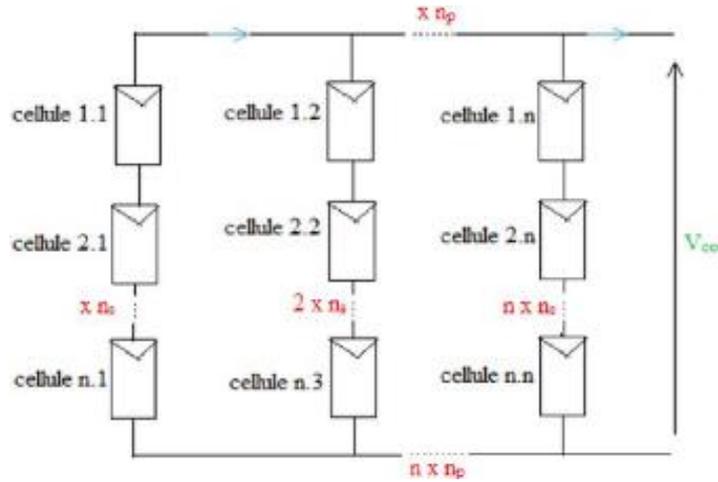


Figure II.20 : Assemblage en série-parallèle des cellules PV.

### II.6. Influence de l'éclairement :

En traçant les courbes  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  pour différents ensoleillements à température constante [43] (Figure 20). Il est évident que les fonctionnalités du capteur solaire sont fortement influencées par l'éclairement.

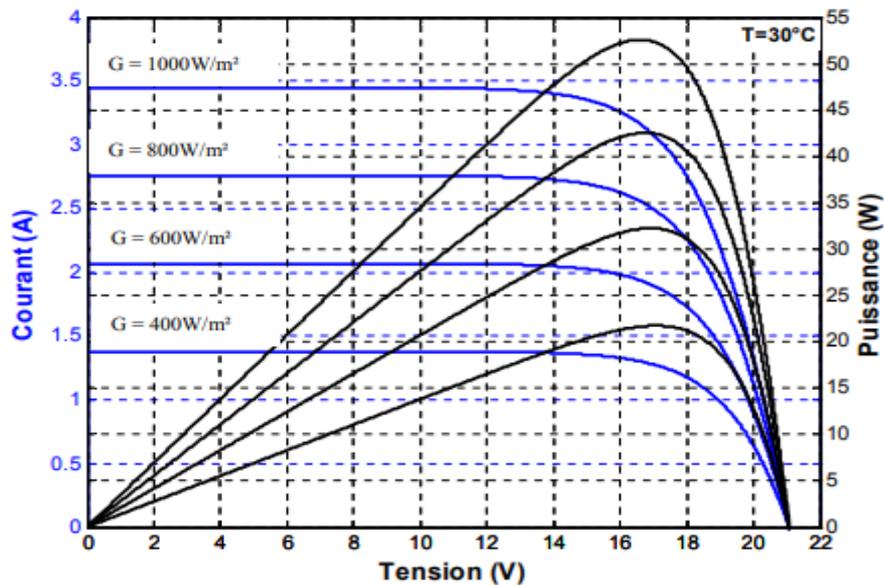
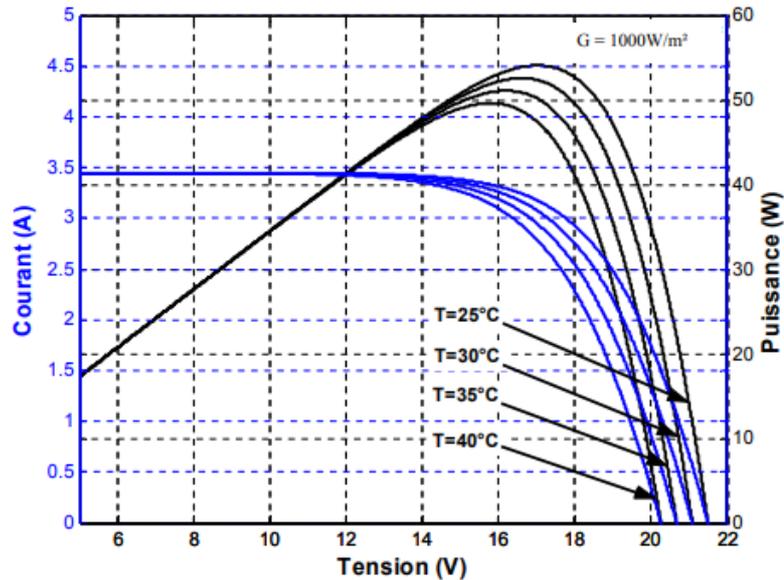


Figure II.21 : Caractéristique  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements  $G$  avec  $T = 30^\circ\text{C}$ .

- Le courant  $I_{SC}$  est fortement influencé par les changements de température pour des ensoleillements variables et des températures constantes, mais la tension  $V_{OC}$  est fortement influencée par les changements de température alors que le courant  $I_{SC}$  reste confiné dans un intervalle restreint. [44]

## II.7. Influence de la température :

En traçant les courbes  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  pour différentes températures à un éclairement constant. Il est évident que les fonctionnalités du capteur solaire sont fortement influencées par la température.



**Figure II.22 :** Caractéristique  $I = f(V)$  et  $P=f(V)$  d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différentes températures  $T$  avec  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .

- La figure montre que la puissance de sortie dépend à la fois de l'éclairement et de la température de la cellule, ce qui est expliqué par l'augmentation du courant de saturation de la diode  $D$ , ce qui entraîne un taux de recombinaison élevé dans le semi-conducteur. [45] [46]
- Il est également démontré que la tension de fonctionnement  $V$  du capteur et l'éclairement et la température ne sont pas les seuls facteurs influençant la puissance de sortie. Pour une tension  $V$  spécifique, la puissance de sortie est maximale. C'est là que tout fonctionne et qu'il faut faire fonctionner le panneau pour qu'il fonctionne au mieux. [44].

## **II.8. Caractéristiques d'un module photovoltaïque :**

Les caractéristiques d'une cellule solaire sont des paramètres dérivés de la relation courant-tension  $I$  (V), permettant ainsi de comparer différentes cellules solaires dans des conditions similaires. [47]

### **II.8.1. Tension à circuit ouvert :**

La tension de circuit ouvert d'une cellule solaire est obtenue lorsque le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt, et diminue avec la température et les variations de l'intensité lumineuse. Cette relation peut être exprimée par la formule suivante : [47]

$$V_{OC} = \frac{KT_c}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (II.3)$$

Avec :  $\frac{KT_c}{q}$  : représentant le potentiel thermodynamique.

$T_c$  : est la température absolue.

$q$  : la constante de charge d'électron,  $1.602 \cdot 10^{-23} \text{C}$ .

$K$  : la constante de Boltzmann,  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .

$I_{ph}$  : le courant photonique.

$I_s$  : le courant de saturation.

### **II.8.2. Courant de court-circuit :**

Lorsque les bornes d'une cellule solaire sont court-circuitées ( $V=0$ ), un courant est généré. Ce courant augmente avec l'intensité lumineuse incidente sur la cellule et dépend également de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, du mouvement des porteurs de charge et de la température ambiante. [47]

### **II.8.3. Point de fonctionnement $P_m$ :**

C'est la grandeur utilisée pour évaluer les performances d'une cellule photovoltaïque éclairée (Figure II.23) et c'est donné par la relation suivante : [48]

$$P_m = V_m * I_m \quad (II.4)$$

Avec :  $V_m$ : La tension correspondante à la puissance maximale.

$I_m$ : Le courant correspondant à la puissance maximale.

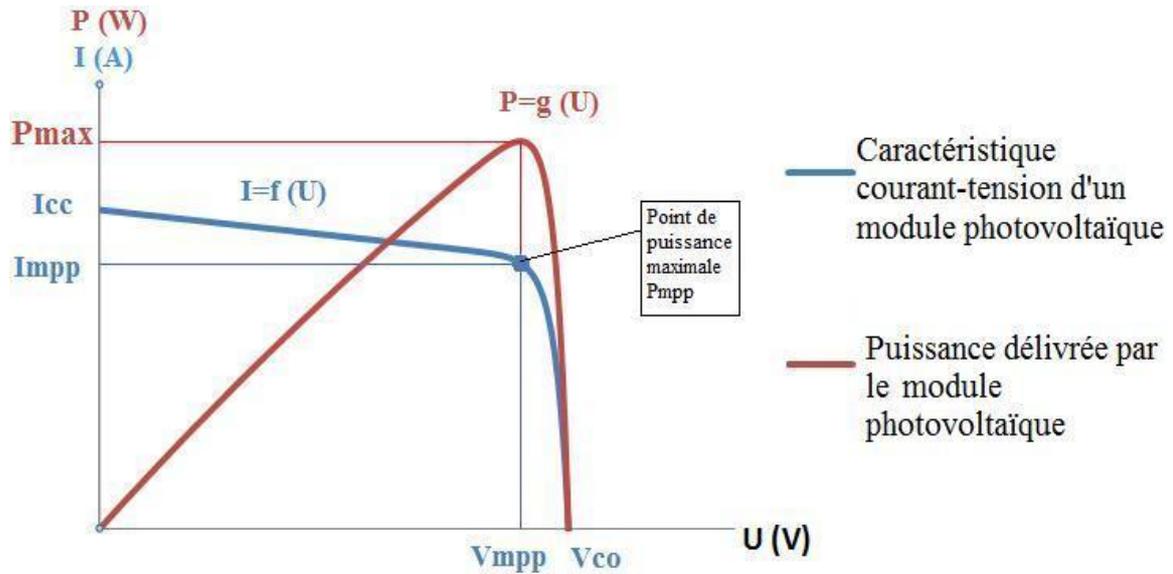


Figure II.23 : Caractéristique courant-tension et la puissance délivrée par module photovoltaïque.

#### II.8.4. Facteur de forme FF :

C'est un paramètre important pour évaluer la qualité d'une cellule solaire ou d'un générateur photovoltaïque, également appelé facteur de remplissage. Ce coefficient est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance du rectangle formé par le produit du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ). Plus la valeur de ce facteur est élevée, plus la puissance exploitable de la cellule est élevée. [48]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (II.5)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en %, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85. [48]

#### II.8.5. Le rendement( $\eta$ ) :

Le rendement des cellules photovoltaïques correspond à leurs capacité de conversion de l'énergie lumineuse en puissance électrique.

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et l'intensité du rayonnement solaire incident sur cette dernière. Le rendement énergétique s'écrit : [47]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc} \cdot S} \quad (II.6)$$

Avec :  $P_{inc}$ : la puissance incidente.

$S$  : surface de la cellule photovoltaïque.

Ou bien :

$$\eta = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{P_{inc} * S} \quad (II.7)$$

Pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques, il est important d'augmenter le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel, car il permet d'évaluer les performances de la cellule.

Cependant, le problème crucial avec les panneaux photovoltaïques est leur génération d'énergie, qui est en fait un obstacle majeur pour cette technologie. Il est compris entre 15 et 20% et il est affecté par plusieurs facteurs, tels que l'ombrage, l'encrassement, la qualité des matériaux utilisés, la technologie de conversion de l'énergie et la température.

L'augmentation de cette dernière réduit l'efficacité et la durée de vie des modules PV, car la production d'électricité diminue avec l'augmentation de la température. Cela peut également entraîner une dégradation des composants du panneau.

La production de l'énergie photovoltaïque dépend essentiellement du rendement électrique du panneau utilisé pour avoir une installation fiable (le rendement du panneau doit être constant), cela nous oblige à garder une température constante du panneau, pour ce faire il existe plusieurs méthodes pour diminuer en gardant constante cette technologie, notamment :

- Ventilation naturelle : les panneaux doivent avoir un espace adéquat en dessous pour permettre une circulation d'air suffisante. Cela permet de dissiper la chaleur accumulée et de maintenir les panneaux plus frais.
- Ventilation forcée : utilisations des ventilateurs ou des systèmes de refroidissement pour augmenter la circulation de l'air autour des panneaux. Cela peut être particulièrement efficace dans les environnements chauds.
- Revêtements réfléchissants : des revêtements réfléchissants sont appliqués sur la surface des panneaux pour minimiser l'absorption de la chaleur solaire. Cela peut réduire la température des panneaux.
- Les panneaux hybrides photovoltaïques-thermiques : ils permettent à la fois la conversion de l'énergie solaire en électricité via des cellules solaires et leurs refroidissements par la récupération de la chaleur en faisant circuler dans un capteur

thermique un fluide caloporteur de l'eau ou de l'air, ce qui peut être particulièrement utile dans les zones très chaudes ou les installations avec une production élevée d'énergie. Ces capteurs solaires hybrides permettent la production simultanée d'énergies thermique et électrique.

### **II.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné une description sur l'énergie solaire et le principal composant du module PV : les cellules, aussi les différentes technologies et les caractéristiques du panneau PV.

---

## **CHAPITRE III**

### **Modélisation Des Capteurs Thermiques**

---

### **III.1. Introduction :**

Chaque installation solaire an un capteur solaire, qui convertit les rayonnements solaires en chaleur avec le plus grand rendement possible. Il existe plusieurs types avec différents paramètres et composants et ils sont compatibles avec la plupart des applications.

### **III.2. Définition des capteurs thermiques :**

C'est un appareil prévu pour absorber des rayons du soleil puis les convertir en énergie thermique (chaleur) transmise grâce à un fluide caloporteur (l'air ou l'eau) il sert le plus souvent à produire de l'eau chaude sanitaire et peut aussi intervenir pour le chauffage solaire, mais une surface de capteurs plus importante est alors nécessaire.

### **III.3. Les types des capteurs :**

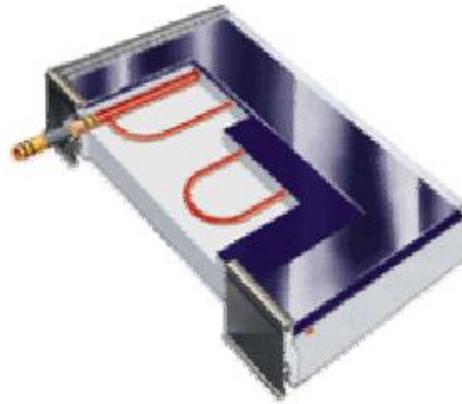
Les capteurs thermiques à basse température sont classés selon deux grandes familles :

- Les capteurs plans.
- Les capteurs à tubes sous vide.

#### **III.3.1. Les capteurs plans :**

Les capteurs solaires plans (voir Figure III.1) sont destinés à convertir l'énergie solaire en énergie thermodynamique ou en énergie thermique [48]. Ils sont constitués 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, et 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 [49]. Le capteur solaire transforme l'énergie solaire en énergie thermique qui est ensuite transférée au fluide caloporteur.

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150° C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil. [50]



**Figure III.1 :** Exemple d'un capteur thermique. [42]

Ils sont classés selon deux types :

#### **III.3.1.1. Capteur plan vitré :**

L'effet de serre est utilisé par ce type de capteur solaire thermique (la figure III.2) pour capter l'énergie solaire. Ils sont généralement constitués d'un châssis sous forme de coffre, d'un isolant en fond, d'un absorbeur noir en tubes de cuivre munis d'ailettes dans lesquelles circule le fluide caloporteur et d'une vitre. [51]

C'est le modèle le plus répandu, est utilisé dans les installations de chauffage de l'eau sanitaire ou des locaux. La température de fonctionnement est généralement comprise entre 30°C et 60°C. [52]



**Figure III.2 :** Capteur plan vitré. [53]

### III.3.1.2. Capteur solaire sans vitrage :

Le capteur le plus simple que l'on puisse imaginer est utilisé pour chauffer les piscines en plein air, car il ne permet pas la production d'eau chaude sanitaire sauf dans les pays chauds. La température de fonctionnement est généralement inférieure à 30°C. [54]



Figure III.3 : capteur solaire sans vitrage. [53]

### III.3.2. Capteur à tubes sous vide :

Les capteurs sous vide montrés dans la figure III.4 permettent d'atteindre des températures plus élevée (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif. Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur, l'autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration.

Ces capteurs conviennent bien à la production d'eau chaude en montagne ou dans les pays du nord compte tenu de leur bon rendement pour des températures extérieures basses.

Ils sont bien adaptés pour les applications de chauffage commercial et industriel ainsi que pour les applications de refroidissement par des cycles de réfrigération régénérâtes [55] [56]



Figure III.4 : Capteur solaire à tube sous vide. [53]

#### **III.4. Modélisation du capteur thermique :**

Exposer un capteur solaire thermique au rayonnement solaire et mesurer les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur et le débit du fluide caloporteur sont les méthodes de base pour évaluer ses performances.

L'énergie utile est [3] :

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_0 - T_i) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$\dot{m}$ : Débit massique (en [Kg/s]).

$C_p$  : Chaleur spécifique de l'eau (en [J/Kg K]).

$T_0$  : la température de sortie du fluide.

$T_i$  : la température d'entrée du fluide.

L'équation suivante peut être utilisée pour décrire les performances thermiques d'un collecteur fonctionnant dans des conditions régulières [3] :

$$Q_u = S_c F_R [I_s(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (\text{III.2})$$

D'où :

$S_C$  : Surface du capteur thermique (en  $[m^2]$ ).

$I_S$  : Rayonnement total (en  $[w/m^2]$ ).

$U_L$  : Coefficient de transfert de chaleur (en  $[w/m^2 K]$ ).

$F_R$  : Le facteur d'extraction de la chaleur du collecteur.

$\tau\alpha$  : le produit de transmittivité-absorptivité du rayonnement par le capteur.

#### **III.4.1. Le facteur d'extraction de la chaleur du collecteur ( $F_R$ ) :**

Le facteur d'extraction de la chaleur du collecteur est la proportion du gain réel de l'énergie utile du collecteur au maximum du gain utile possible si la surface du collecteur entière était à la température d'entrée du fluide. Il est défini comme suit [51] :

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{S_c [I_S - U_L(T_i - T_a)]} \quad (III.3)$$

Le rendement instantané du capteur est donné par :

$$\eta_i = \frac{Q_u}{I_S S_c} = F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{I_S} \quad (III.4)$$

Le rendement thermique est calculé par :

$$\eta_i = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{I_S S_c} \quad (III.5)$$

#### **III.5. Les capteurs hybrides PVT :**

Les capteurs photovoltaïques thermiques (PVT) combinent un module photovoltaïque avec un capteur solaire thermique pour réaliser simultanément la conversion de l'électricité du rayonnement solaire et la récupération de la chaleur. Cette combinaison augmente l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire.

Les panneaux photovoltaïques absorbent environ 15 à 20 % du rayonnement solaire pour produire de l'électricité, tandis que le reste est utilisé pour chauffer les cellules photovoltaïques [58], ce qui entraîne une variété de problèmes. [59].

La production de l'énergie totale (électrique et thermique) du PV/T dépend de l'entrée : l'énergie du rayonnement solaire, la température ambiante et 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. [51]

### III.5.1. Classification des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques :

Le capteur solaire PV/T plan peut être classé comme la figure III.6 en capteur PV/T d'eau, capteur PV/T d'air ou en combinaison de capteur PV/T eau/air, selon le type de fluide utilisé. [59].

La figure montre les différents types de capteurs solaires PVT disponibles dans la littérature.

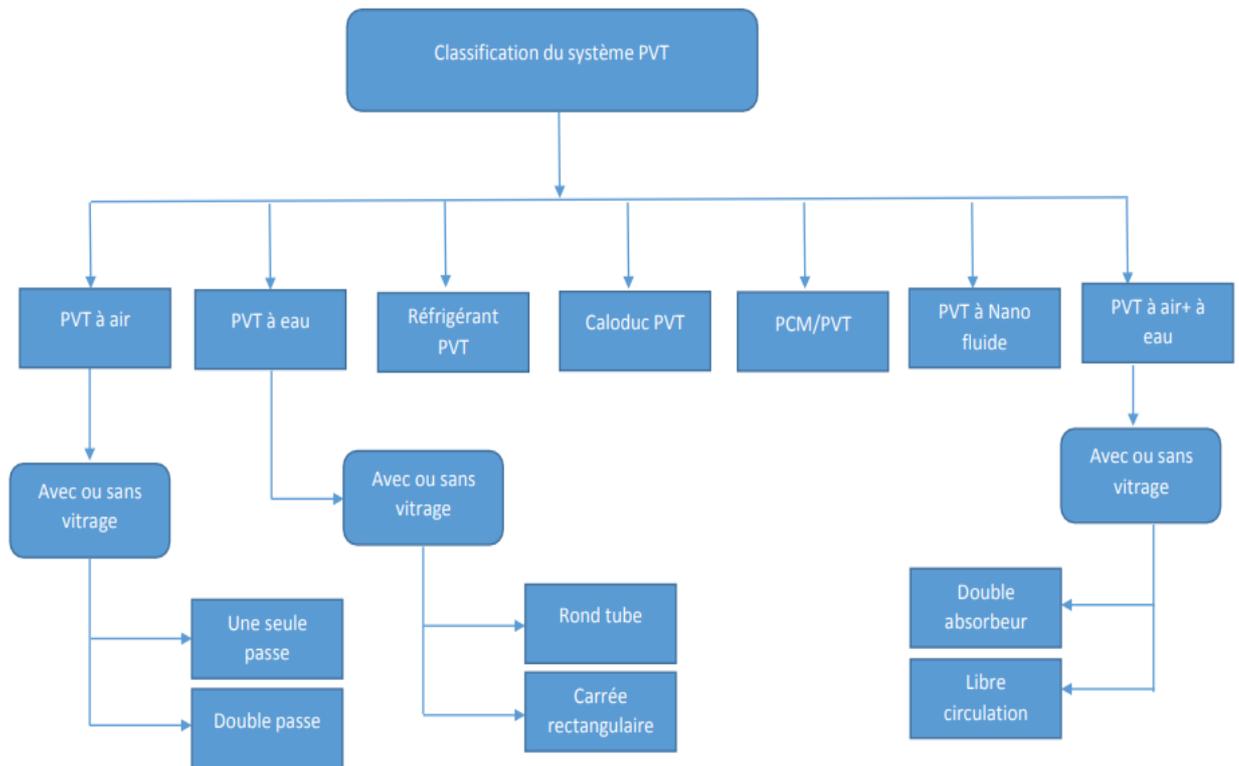


Figure III.6 : Classification du système PVT. [60]

### III.5.3. Performances électriques des capteurs hybrides :

On obtient les performances électriques des capteurs hybrides en traçant la caractéristique instantanée  $I=f(V)$  du capteur. Cette dernière nous fournira les paramètres électriques du capteur ainsi que le point de puissance maximum ( $P_m$ ).

Le rendement électrique du capteur hybride se calcule de la même façon que celui du capteur photovoltaïque classique. C'est le rapport entre la puissance utile ( $P_m$ ) de sortie du capteur et la puissance d'entrée qui est l'éclairement solaire par unité de surface ( $G \cdot S$ ).

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{G \cdot S} \quad (III.6)$$

Pour les capteurs hybrides on considère le rendement total qui est la somme du rendement électrique et du rendement thermique pour des conditions de rayonnement choisies. [51]

### **III.6. Modélisation d'un panneau photovoltaïque :**

Le courant produit par le panneau PV en fonction de tous les paramètres qui influent sur ce dernier (éclairement, température, résistance shunt, résistance série). [61]

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_S}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (III.7)$$

Où :

$I_{ph}$  : Photo courant du panneau PV

$I_0$  : Courant de saturation (A)

$I_D$  : Courant de charge (A)

$V$  : Tension de sortie (V)

$R_S$  : résistance série ( $\Omega$ )

$\alpha$  : facteur de température.

Le photo-courant  $I_L$  peut être calculé par l'équation suivante [61] :

$$I_{ph} = \frac{\phi}{\phi_{ref}} \left[ I_{ph,ref} + \mu_{I,cc} (T_C - T_{C,ref}) \right] \quad (III.8)$$

Où :

$\phi$  : Éclairement solaire ( $W/m^2$ )

$\phi_{ref}$  : Éclairement solaire de référence ( $1000 W/m^2$ )

$I_{ph,ref}$  : Photo courant dans les conditions de référence (1000 W/m<sup>2</sup> et 25°C)

$T_C$  : Température de la cellule

$T_{C,ref}$  : Température de référence (25°C)

$\mu_{I,cc}$  : Coefficient de température du courant de court-circuit (A/°C)

Les valeurs  $I_{ph,ref}$  et  $\mu_{I,cc}$  sont donnée par le constructeur.

Le courant de saturation  $I_0$  est donné par l'équation suivante dans les conditions de références :

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T_{C,ref}+273}{T_C+273} \right)^3 \exp \left[ \frac{e_{gap} N_S}{q \alpha_{ref}} \left( 1 - \frac{T_{C,ref}+273}{T_C+273} \right) \right] \quad (III.9)$$

Où :

$I_{0,ref}$  : Courant de saturation à la condition de référence (A)

$e_{gap}$  : Gap du matériau (1,17 eV pour le silicium)

$N_S$  : Nombre de cellules en série du panneau PV

$q$  : Charge de l'électron ( $1.60217733 \times 10^{-19}$  C)

$\alpha_{ref}$  : Valeur de  $\alpha$  dans les conditions de références

$I_{0,ref}$  Peut-être calculer par la relation :

$$I_{0,ref} = I_{L,ref} \exp \left( - \frac{V_{co,ref}}{\alpha_{ref}} \right) \quad (III.10)$$

Où :  $V_{co,ref}$  est la tension en circuit ouvert du panneau PV dans les conditions de références, cette valeur est donnée par le constructeur.

$\alpha_{ref}$  Peut-être calculer par :

$$\alpha_{ref} = \frac{2V_{mp,ref} - V_{oc,ref}}{\frac{I_{cc,ref}}{I_{cc,ref} - I_{mp,ref}} + \ln \left( 1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{cc,ref}} \right)} \quad (III.11)$$

Où :

$V_{mp,ref}$  : La tension au point de puissance maximal aux conditions de références (V)

$I_{mp,ref}$  : Le courant au point de puissance maximal aux conditions de références (A)

$I_{cc,ref}$  : Le courant de court-circuit aux conditions de références (A)

$\alpha$  est en fonction de la température et donné par l'expression :

$$\alpha = \frac{T_c + 273}{T_{c,ref} + 273} \alpha_{ref} \quad (\text{III.12})$$

$R_s$  est fournie par le constructeur, mais elle peut être calculée par la relation :

$$R_s = \frac{\alpha_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{cc,ref}}\right) + V_{oc,ref} - V_{mp,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (\text{III.13})$$

### III.6 Modélisation du capteur hybride PV/T :

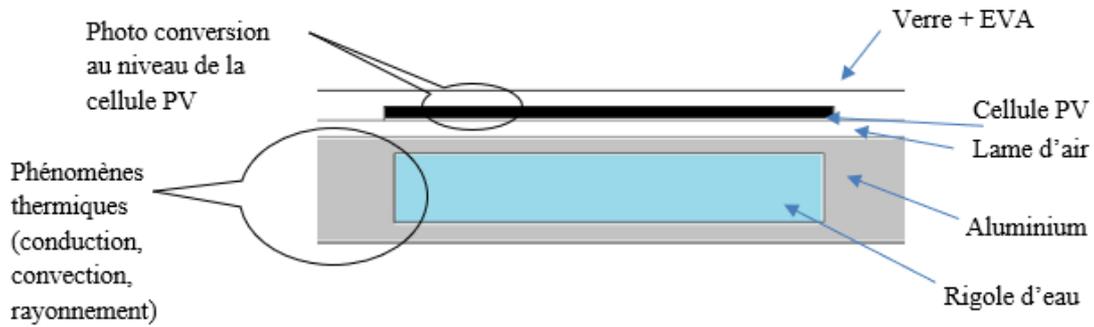
#### III.6.1. Présentation du système étudié :

Le système étudié est composé de :

- Un capteur thermique couplé à un panneau photovoltaïque.
- Un régulateur de charge.
- Un convertisseur DC/AC.
- Un circulateur d'eau.
- Une cuve de stockage avec échangeur.

Une coupe transversale du capteur hybride PV/T est présentée dans la figure III.8 pour illustrer les différents phénomènes physiques qui se produisent au niveau de ce dernier, et qui sont :

- Une photo conversion au niveau de la cellule photovoltaïque.
- Des phénomènes thermiques (transfert par conduction, par convection et par rayonnement).



**Figure III.8 :** Section du prototype PV/T et localisation des phénomènes interdépendants. [3]

Les hypothèses suivantes sont utilisées pour présenter la modélisation physique basée sur le bilan énergétique du capteur hybride PV/T [3] :

- En raison de la faible épaisseur du verre stratifié, on pense que le panneau photovoltaïque a la même température que les cellules ; cette hypothèse est raisonnable.
- En raison de la courte longueur des tuyaux, les pertes thermiques dans les tuyaux de raccordement sont négligées.
- Le capteur PV/T n'a pas pris en compte la conduction thermique dans sa direction longitudinale.
- Les cellules photovoltaïques sont considérées comme ayant une absorption isotrope.

### III.6.2. Bilan thermique des cellules photovoltaïques :

L'équation du bilan thermique des cellules photovoltaïques [61] relie l'énergie solaire transmise à travers le verre et absorbée par les cellules avec l'inertie du capteur thermique, l'énergie électrique produite, la chaleur transmise des cellules photovoltaïques vers l'eau, l'énergie perdue par le capteur thermique et l'énergie transmise par convection et par rayonnement du capteur photovoltaïque l'eau.

D'où :

- L'énergie solaire transmise à travers le verre et absorbée par les cellules :

$$I_t \times S_G \times \tau_G \times \alpha_{PV} \quad (III.14)$$

- L'inertie du capteur thermique :  $\rho_c \delta_c S_c C_c \frac{dT_{PV}}{dt}$  (III.15)

$$\text{➤ L'énergie électrique produite : } I_t \tau_G P S_c \frac{\eta_n k_\gamma k_\theta k_\lambda k_g}{\times \alpha_{PV}} \quad (\text{III.16})$$

$$\text{➤ La chaleur transmise des cellules PV vers l'eau : } h S_c (T_{PV} - T_m) \quad (\text{III.17})$$

$$\text{➤ L'énergie perdue par le capteur thermique : } U_F S_c (T_{PV} - T_e) \quad (\text{III.18})$$

$$\text{➤ L'énergie transmise par convection et radiation du capteur PV a l'eau : } h_{ePV} S_c (T_{PV} - T_e) \quad (\text{III.19})$$

L'équation est donnée par :

$$I_t S_G \tau_G \alpha_{PV} = \rho_c \delta_c S_c C_c \frac{dT_{PV}}{dt} + \left( I_t \tau_G P S_c \frac{\eta_n k_\gamma k_\theta k_\lambda k_g}{\tau_G \times \alpha_{PV}} \right) + h S_c (T_{PV} - T_m) + U_F S_c (T_{PV} - T_e) + h_{ePV} S_c (T_{PV} - T_e) \quad (\text{III.20})$$

### III.6.3. Bilan thermique du fluide caloporteur (l'eau) :

L'énergie transférée du module photovoltaïque-thermique au fluide caloporteur est considérée comme égale à la quantité d'énergie absorbée par le capteur thermique et accumulée dans le fluide. [60]

$$h S_c (T_{PV} - T_m) = m C_w (T_{out} - T_{in}) + \rho_w S_S \ln \frac{dT_m}{dt} \quad (\text{III.21})$$

La température moyenne d'écoulement d'eau est égale à la valeur moyenne entre la température d'entrée et la température de sortie du capteur hybride.

$$T_{\text{moy}} = \frac{T_{\text{out}} + T_{\text{in}}}{2} \quad (\text{III.22})$$

#### **III.6.4. Bilan thermique sur la cuve de stockage :**

La cuve de stockage permet de stocker une importante quantité d'eau chaude que peut être utilisé pendant les périodes non ensoleillées.

Selon l'équation du bilan thermique du réservoir de stockage, toute l'énergie stockée est égale à l'énergie reçue du réservoir plus les pertes d'énergie à l'extérieur.

$$M_w \times C_w \times \frac{dT_{\text{tk}}}{dt} = m \times C_w \times (T_{\text{tk,i}} - T_{\text{tk,o}}) - U_{\text{tk}} \times S_{\text{tk}} \times (T_e - T_{\text{tk}}) \quad (\text{III.23})$$

#### **III.7. Conclusion :**

Grâce aux équations du bilan thermique du capteur thermique et du bilan thermique du PV/T, ainsi que l'équation de caractérisation du panneau photovoltaïque qui prédit le courant produit pour un éclairement donné et ainsi l'énergie électrique produite, cette modélisation permettra de prédire le comportement électrique et thermique du panneau photovoltaïque thermique.

---

## **CHAPITRE IV**

### **Validation Expérimentale.**

---

### **IV.1. Introduction :**

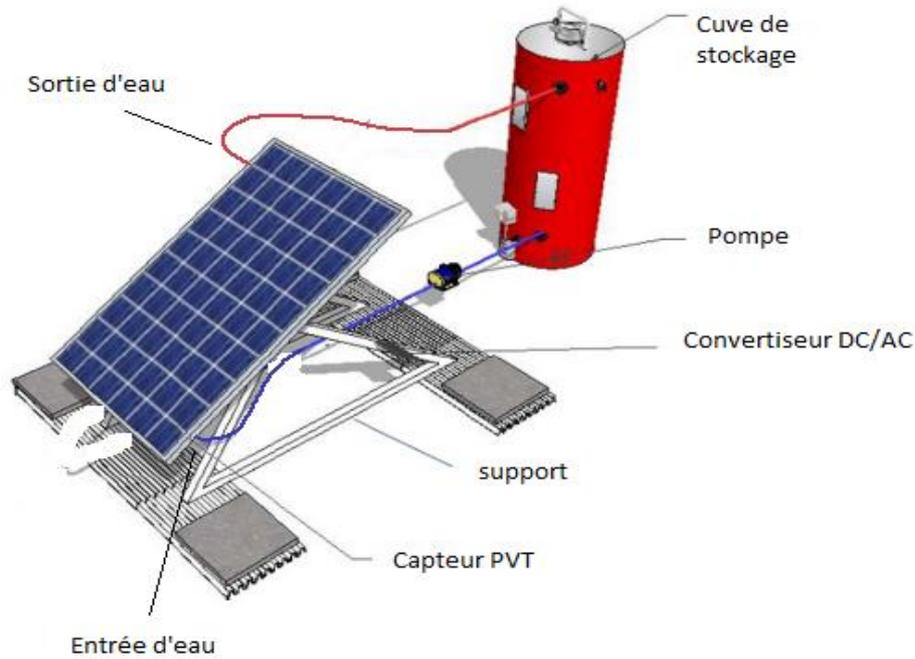
Le projet est basé sur l'expérimentation. Les différents composants et la boucle de test sont définis en premier. Les conditions de test et d'expérimentation sont abordées après la présentation des détails de la construction et de la réalisation des différents composants du capteur hybride photovoltaïque.

### **IV.2.PVT à eau :**

#### **IV.2.1. Description du banc d'essai :**

- Le glacéol circule dans le capteur thermique et récupère la chaleur dégagée par la face arrière du panneau photovoltaïque, refroidissant ainsi les cellules photovoltaïques.
- L'eau de la cuve de stockage est chauffée par la suite à l'aide du glacéol.
- La partie électrique est composée d'un convertisseur DC/AC avec régulateur de charge qui charge la batterie pendant la journée et convertit le courant continue de la batterie en courant alternative pour alimenter le circulateur en permanence.
- Après avoir traversé un convertisseur DC/AC, le panneau photovoltaïque fournit l'électricité nécessaire pour alimenter le circulateur.
- Grâce à l'intégration de la batterie, le système est autonome et peut continuer à fonctionner en cas de périodes non ensoleillées.

La figure IV.1 schématise le système hybride photovoltaïque-thermique :



**Figure IV.1:** Configuration du système PVT. [61]

### **IV.3. Réalisation du capteur hybride PVT :**

La réalisation du capteur hybride photovoltaïque thermique a eu lieu au département des énergies renouvelables pendant plus de trois mois, et les étapes suivantes ont été suivies :

- la création d'un schéma pour le capteur thermique.
- la réalisation du capteur thermique.
- l'ajustement du panneau photovoltaïque.
- la réalisation de la cuve de stockage avec un échangeur (serpentin).

#### **IV.3.1. Le panneau photovoltaïque :**

Le panneau solaire photovoltaïque utilisé est fabriqué par "Condor" d'Algérie (Figure IV.2), qui a une puissance crête de 160 W. Le choix de ce modèle découle de la disponibilité locale et d'un compromis entre cout, dimension, puissance et rendement.



**Figure IV.2:** Photo du module PV Condor de 160Wc [62]

Le tableau suivant montre les différentes caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé dans notre réalisation :

**Tableau IV.1** : caractéristiques électrique et mécanique du panneau PV [62]

<b>Caractéristiques mécanique</b>	
Type de cellules	Monocristalline avec antireflet
Nombres de cellules	36 (4×9)
Dimension de la cellule (mm)	156×156
Dimension du module (mm)	1482×674×45
Poids du module (Kg)	12
Cadre	Alliage en aluminium anodisé
Type de verre	Trempé 3,2 mm d'épaisseur
Température d'utilisation	-40°C à 85°C
<b>Caractéristiques électrique</b>	
Puissance nominale (Wc)	160
Voltage circuit ouvert (V)	22,5
Courant de court-circuit (A)	9,08
Tension maximale produite (V)	19,03
Courant maximale produit (A)	8,5
Système voltage maximale (V)	1000
Charge maximale du fusible (A)	15
Température nominale de fonctionnement (°C)	45±2
Coefficient de température de puissance (%/°C)	-0,41
Coefficient de température de courant (%/°C)	+0,03
Coefficient de température de tension (%/°C)	-0,32

#### **IV.3.2. Le capteur thermique :**

La face avant du capteur thermique peinte en noir et la face arrière avec l'entrée et la sortie d'eau sont représentés dans la figure IV.3. Le capteur solaire thermique a été conçu pour que le glaciol parcourt toute la surface pour absorber la plus grande quantité de chaleur et refroidir le panneau photovoltaïque. Pour cela, l'épaisseur de la couche de circulation de fluide a été choisie très faible.



a) - Face avant du capteur PV peinte en noir.



b) - Face arrière du capteur PV.

**Figure IV.3 :** capteur thermique (vue de la face avant et de la face arrière).

Le tableau suivant donne les caractéristiques de capteur solaire thermique :

**Tableau IV.2 :** caractéristiques du capteur thermique :

Dimension du capteur	1270×640 mm
Epaisseur totale du capteur	9 mm
Epaisseur plaque de face intérieur	2 mm
Epaisseur plaque de face extérieur	4 mm
Nombre de rigoles	4
Espacement entre rigoles	65 mm
Largeur des rigoles	100 mm
Diamètre orifice entrée/sortie eau	22 mm
Poids	35 kg
Matériau	Aluminium

**Première réalisation :**

-La première réalisation a eu lieu au sein du département des énergies renouvelables.

-Le panneau est constitué d'un joint métallique en Aluminium (Al) de 3 mm d'épaisseur pris en sandwich entre deux plaques d'Aluminium d'où la face intérieure est de 2 mm et la face

extérieure est de 4 mm d'épaisseur, et d'une dimension de 1270×640mm comme la figure IV.4 montre.

-Le découpage des tôles en aluminium a été réalisé dans l'atelier de la société Seffal Métal.



**Figure IV.4** : Les tôles en aluminium (face arrière du capteur, le joint métallique, la face avant du capteur).

-Les deux tôles et le joint métallique ont été percé avec un diamètre de 20mm tout au long du latéral.

-Deux pipes sont soudées dans la partie supérieure et inférieure de la face arrière du capteur qui permettrons l'entrée et la sortie du fluide caloporteur (glacéol).

-Les deux tôles et le joint métallique sont collés avec la colle silicone Sika (elle garantie une parfaite étanchéité contre les remontées d'eau en surface) au niveau des chicanes et avec de la colle silicone 360 au niveau de la latéral des tôles voir (Figure IV.5).



a) Silicone Sika.                      b) Silicone 360 moteur.                      c) collage des chicanes.

**Figure IV.5 :** les deux types de silicone utilisés pour le collage.



**Figure IV.6:** La mise en sandwich des deux tôles et de joint métallique.

Une fois les tôles sont collées, en même temps et à l'aide d'une riveteuse, les rivets de 5mm d'épaisseur sont placés (Figure IV.7). On a laissé pendant 48 heures pour maintenir la rigidité de la colle.



**Figure IV.7 :** a) une riveteuse.



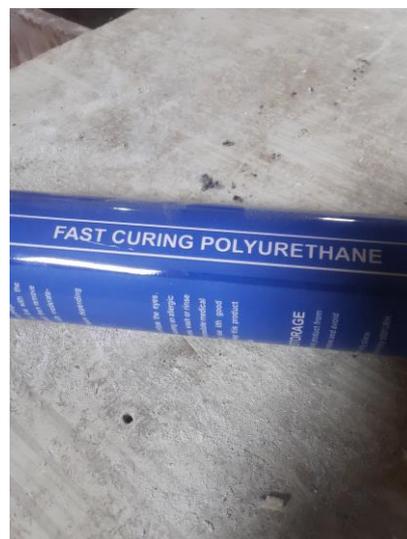
b) les rivets.

Des tests d'étanchéité du capteur thermique ont été faite au département des énergies renouvelables en mois d'Avril 2023, (figure III.16) pour assurer le bon fonctionnement du dispositif expérimental.

Dans le malheur, après avoir effectué le test d'étanchéité, nous avons remarqué une fuite d'eau au niveau des rivets et autour du périmètre du capteur. Ce qui nous a amené à séparer les tôles et à les recollé.

#### **Deuxième réalisation :**

La deuxième réalisation a eu lieu à l'atelier KdPVC, d'où ils ont séparé les tôles d'Al, ils ont refait les mêmes étapes que la première réalisation sauf que cette fois ci ils ont utilisé du goudron en couvrant toute l'épaisseur du capteur pour éviter les fuites d'eau et un autre type de colle c'est PU-1800 HARDENER (voir figure IV.8, Figure IV.9, Figure IV.10).



**Figure IV.8 :** La colle PU-1800 HARDENER.



**Figure IV.9 :** Collage et mise du goudron dans les bordures du capteur (TH).



**Figure IV.10 :** rivetage du capteur (TH).

### IV.3.3. Le circulateur d'eau :

Le tableau suivant donne les caractéristiques du circulateur (Figure IV.11).

**Tableau IV.3:** caractéristiques du circulateur.

Tension de fonctionnement	230 V AC
Puissance	40 W
Débit	4L/min



Figure IV.11 : Le circulateur d'eau.

#### IV.3.4 La cuve de stockage avec échangeur :

- L'échangeur de chaleur est sous forme d'un serpentín, d'une longueur de mètres de cuivre comme la figure III-11 montre. Son rôle comme son nom indique est de transférer la chaleur du fluide de l'intérieur vers l'extérieur c'est-à-dire échanger la chaleur d'un fluide chaud vers un autre froid.



Figure IV.12 : Échangeur de chaleur.

- La cuve de stockage a été réalisée à partir d'un jerrycan de 160L (voir Figure IV.13), qui a été munie de deux orifices d'entrée et de sortie d'eau relié à un échangeur, avec une vanne à sa base pour contrôler le débit d'eau sortant.



**Figure IV.13:** cuve de stockage avec échangeur sans isolation.

On a couvert la cuve de stockage par la suite avec de la laine de verre (Figure IV.14). Ce dernier est un isolant thermique possédant des qualités isolantes particulièrement élevées. Ce qui permet de garder la température d'eau dans la cuve constante.

- Avantage : présentée sous formes de matelas ou de panneaux, la laine de verre est très facile à poser.
- Inconvénient : une poussière fibreuse se dégage lors de l'installation, pouvant irriter les yeux et les voies respiratoires. Il est fortement conseillé de porter lunettes, gants et masque.



**Figure IV.14:** cuve de stockage avec échangeur avec isolation (laine de verre).

### **IV.3. Instruments de mesure :**

Les instruments de mesure sont des appareils destinés à obtenir expérimentalement des valeurs qu'on puisse attribuer à une grandeur. Ils sont utilisés dans les tests appartiennent au département des énergies renouvelables pour l'instrumentation électrique et thermique.

#### **IV.3.1.IV.1. Agilent 34970A :**

Le système d'acquisition de données Agilent 34970A représente l'interface entre le capteur et l'ordinateur (Figure IV.15). Ce système, composé de circuit imprimé et de logiciel, ce dernier est un logiciel Agilent BenchLink Data Logger 3 qui permet de configurer et contrôler les tests, afficher les résultats et collecter des données, des informations analogiques ou numériques provenant du capteur pour une analyse plus approfondie et de les enregistrer sous forme de fichier Excel facilement exploitable.



**Figure IV.15 :** Le système d'acquisition de données Agilent 34970A.

Le circuit d'acquisition de la figure IV.16 contient 20 voies d'entrée de température, prenant en charge tous les types de thermocouples.



**Figure IV.16:** Un circuit d'acquisition de 20 voies.



**Figure IV.17 :** Un thermocouple Type J.

Dans ce cas un thermocouple type K et 3 thermocouples type J.

- Le thermocouple Type k a été placé sur la face avant du capteur thermique.
- Deux thermocouples Type J ont été disposés dans des doigts de gant pour la mesure de la température à l'entrée et à la sortie d'eau du capteur thermique.
- Un thermocouple Type J a été placé dans la cuve de stockage (Figure IV.20).



**Figure IV.18 :** Emplacements des thermocouples dans le capteur et le panneau.



**Figure IV.19:** Emplacement des thermocouples dans les doigts de gants.



**Figure IV.20 :** Emplacement du thermocouple dans la cuve de stockage.

#### **IV.4. Tests expérimentaux :**

##### **IV.4.1. Test préliminaire d'étanchéité :**

Un test d'étanchéité a été effectué au niveau du département des énergies renouvelables en mois d'Avril 2023 (voir Figure IV.21). Ce test permet de détecter les fuites et d'assurer un bon fonctionnement du capteur.



Figure IV.21 : Test d'étanchéité sur la terrasse du département des EnR.

La figure IV.22 représente l'interface du logiciel d'acquisitions Agilent BenchLink Data Logger 3.

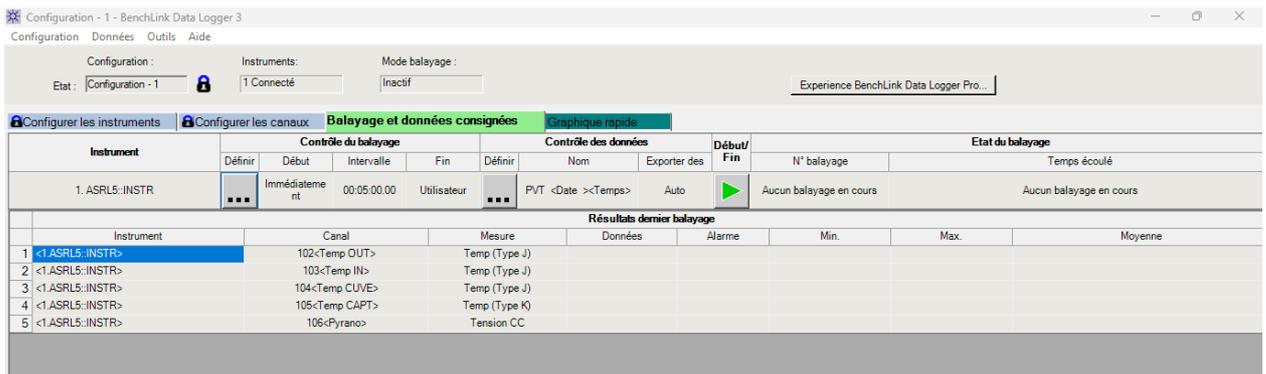


Figure IV.22: interface Agilent BenchLink Data Logger 3.

L'intervalle d'enregistrement a été réglé pour balayer les 5 voix toutes les 5 min, les données ainsi recueillies sont enregistrées dans un fichier Excel représenter sur la figure.

Temps	101 (VDC)	102 (C)	103 (C)	104 (C)	105 (C)
2023-06-26 15:37	-0,01050666	41,456	32,705	56,008	111,608
2023-06-26 15:42	0,004179637	40,851	32,839	106,186	100,436
2023-06-26 15:47	0,004265218	40,704	32,942	150,304	111,243
2023-06-26 15:52	0,004353763	40,288	32,905	161,005	112,238
2023-06-26 15:57	0,004354752	39,919	33,229	127,848	113,995
2023-06-26 16:02	0,004398915	39,834	33,145	101,527	113,053
2023-06-26 16:07	0,004351566	39,541	32,945	90,017	108,972
2023-06-26 16:12	0,0041692	39,664	33,104	93,362	101,623
2023-06-26 16:17	0,003949156	39,47	33,177	92,588	100,829
2023-06-26 16:22	0,003994087	38,824	33,219	91,68	98,278
2023-06-26 16:27	0,003950144	38,466	33,216	123,642	111,386
2023-06-26 16:32	0,004396498	38,486	33,334	52,347	112,162
2023-06-26 16:37	0,004351566	38,535	33,479	155,974	113,733
2023-06-26 16:42	0,004306085	38,132	33,568	60,848	107,325
2023-06-26 16:47	0,004127674	37,626	33,556	98,988	98,986
2023-06-26 16:52	0,004036273	37,522	33,608	153,537	116,987

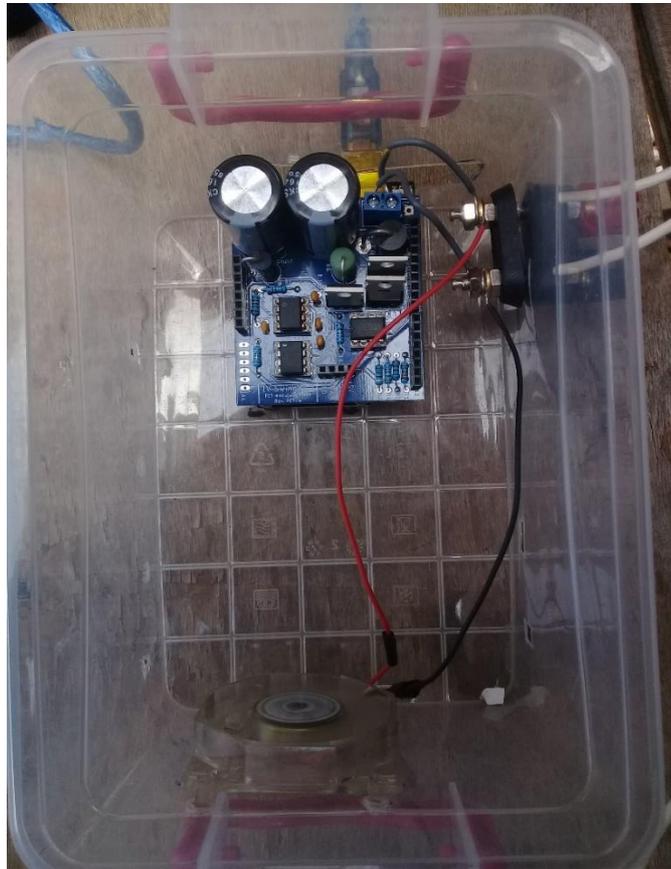
Figure IV.23 : données enregistrées dans un fichier Excel.

Le panneau solaire photovoltaïque a été testé au département des énergies renouvelables. Le test consistait à caractériser le panneau photovoltaïque pendant une journée claire et à rechercher le point de puissance maximale pendant qu'il fonctionnait.



Figure IV.24 : le panneau photovoltaïque sur la terrasse du département des EnR.

La caractérisation du panneau PV a été faite à l'aide d'un traceur I-V (Figure IV.25) réalisé au département des EnR par mon collègue Mr. ATBA Alaa.



**Figure IV.25 :** Le traceur I-V.

Les mesures sont enregistrées grâce au logiciel IV\_Swinger2 montrées dans la Figure IV.26.



**Figure IV.26:** le traceur I-V connecté avec pc.

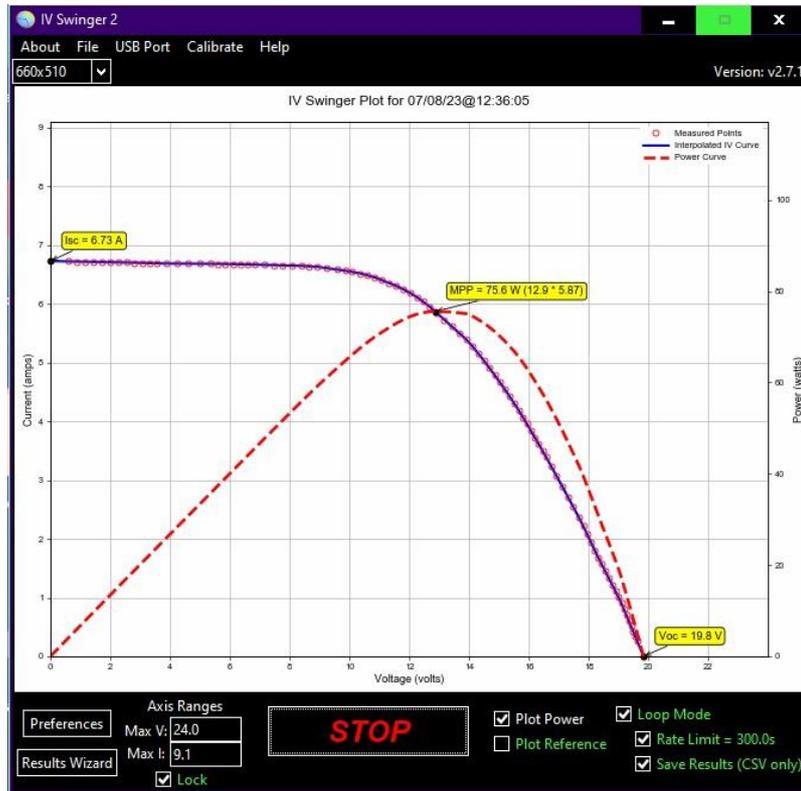


Figure IV.27: Interface du logiciel IV\_Swinger2.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "iv\_swinger2\_230708\_10\_27\_45 - Microsoft Excel". The spreadsheet contains 25 rows of data with the following columns: Volts, Amps, Watts, and Ohms. The data is as follows:

	Volts	Amps	Watts	Ohms
1	0.00000	5.371156	0.000000	0.000000
2	0.486874	5.366347	2.612735	0.090727
3	0.824740	5.363006	4.423084	0.153783
4	1.162631	5.359663	6.231310	0.216922
5	1.500522	5.356321	8.037278	0.280140
6	1.838952	5.352970	9.843852	0.343539
7	2.194519	5.349415	11.739390	0.410235
8	2.559920	5.345726	13.684631	0.478872
9	2.925428	5.342035	15.627741	0.547624
10	3.290937	5.338345	17.568153	0.616471
11	3.656551	5.334653	19.506431	0.685434
12	4.043097	5.330891	21.565440	0.758001
13	4.429643	5.327033	23.632295	0.830293
14	4.816189	5.323176	25.700033	0.902554
15	5.222063	5.319357	27.867833	0.978545
16	5.627936	5.315472	30.020940	1.055052
17	6.033809	5.311587	32.172192	1.131625
18	6.426798	5.307636	34.243944	1.206162
19	6.819786	5.303625	36.312802	1.280801
20	7.212774	5.299544	38.378767	1.355544
21	7.612205	5.295374	40.469331	1.431842
22	7.985866	5.291177	42.591992	1.504389
23	8.359528	5.286938	44.308676	1.577156
24	8.756525	5.282658	46.322787	1.655270

Figure IV.28 : Données enregistrées dans le fichier Excel.

#### IV.4.2. Tests finaux :

Les tests finaux sur le capteur hybride photovoltaïque thermique se sont déroulés du 3 Juillet au 8 Juillet 2023 au département des EnR pendant des journées à ciel clair.

Les thermocouples placés sur le système hybride PV/T ont été raccordés au Agilent 34970A pour mesurer les températures.

Les deux systèmes ont été synchronisés pour prendre des mesures toutes les dix minutes.

Le débit de l'eau dans le PV/T a été fixé à 4L/min.

Le capteur hybride est fixé sur une structure métallique spécialement conçue pour cet objectif et orienté vers le sud avec une inclinaison de 36°.



a- Vue de face avant du PVT

b- Vue de face arrière du PVT

**Figure IV.29** : Le panneau PVT installé sur la terrasse du département des EnR.

Les tests ont été répartis comme suit :

- Le 3 et 4 Juillet 2023 : test sur le capteur thermique.
- Le 5 Juillet 2023 : test sur le panneau c'est-à-dire la caractérisation I-V du panneau photovoltaïque.
- Le 8 Juillet 2023 : test sur le panneau hybride photovoltaïque-thermique.

#### **IV.5. Chauffe air :**

A la suite du conseil du Dr. **OUZZAN Djamel** et au dernier moment nous avons réalisé un chauffe air que l'on va coller à notre panneau PV et faire la mesure de la température d'entrée et de sortie.

- 1- Nous avons choisi de mettre 8 chicanes en bois espacées de 10cm pour éviter l'effet d'aspiration (voir Figure IV.31).
- 2- Nous avons pris la hauteur des chicanes à 3.4cm pour ne pas avoir une lame d'air importante et donc tomber dans la limite de la couche limite et donc une grande partie de l'air va sortir sans perdre assez de quantité de chaleur.



**Figure IV.30 :** Vue de la face avant du capteur thermique à air.



**Figure IV.31 :** vue de la face arrière du capteur thermique à air.



**Figure IV.32:** Vue en perspective du chauffe air.

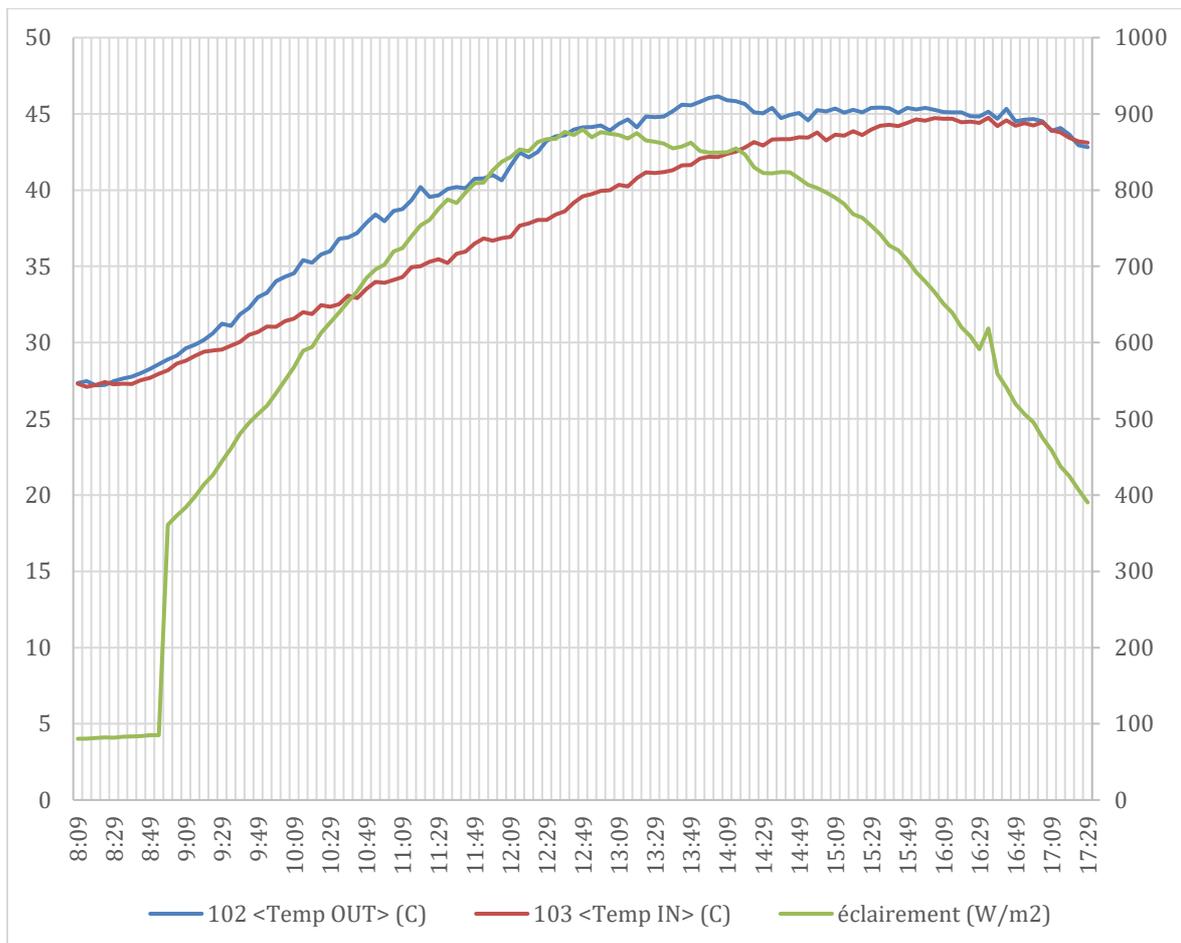
- Le manque de temps va nous permettre de faire l'expérience de la température d'entrée, de sortie et la température de panneau PV à l'arrière.
- Une étude complète nécessite un autre master, néanmoins, ce travail nous donnera une première idée sur la différence des deux capteurs à eau et à air.
- Une étude possible des paramètres d'espacement et de la hauteur de la lame d'air.

## **IV.6. Résultats et discussions :**

### **IV.6.1.PVT à eau :**

#### **IV.6.1.1. Résultats des tests préliminaires sur le capteur thermique :**

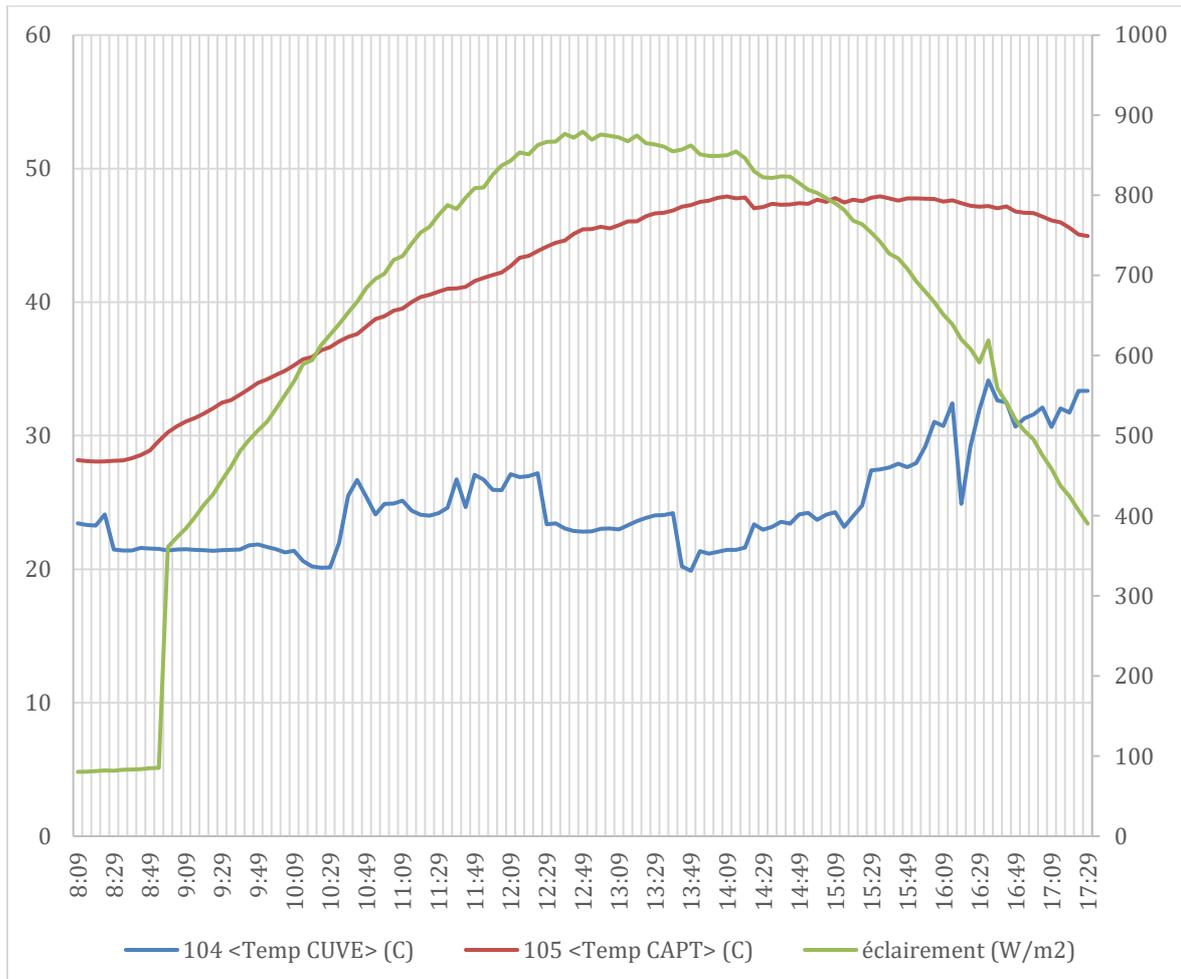
Les résultats des tests réalisés le 3 et le 4 Juillet au département des EnR par beau temps et ciel dégagé, en raccordant le capteur thermique à la cuve de stockage et puis en laissant le capteur sans refroidissement.



**Figure IV.33 :** Variation de la température d'entrée, de sortie et de l'éclairement.

La figure représente la variation de la température d'entrée, de sortie et de l'éclairement pendant la journée.

On remarque sur la figure que les courbes des températures d'entrée et de sortie suivent parfaitement l'allure de la courbe d'éclairement mesurée pendant la journée. Alors que, la courbe de la température de sortie a des valeurs supérieures a celle de la température d'entrée, ce qui signifie un transfert de chaleur, ce qui provoque que l'eau absorbe la chaleur du capteur.



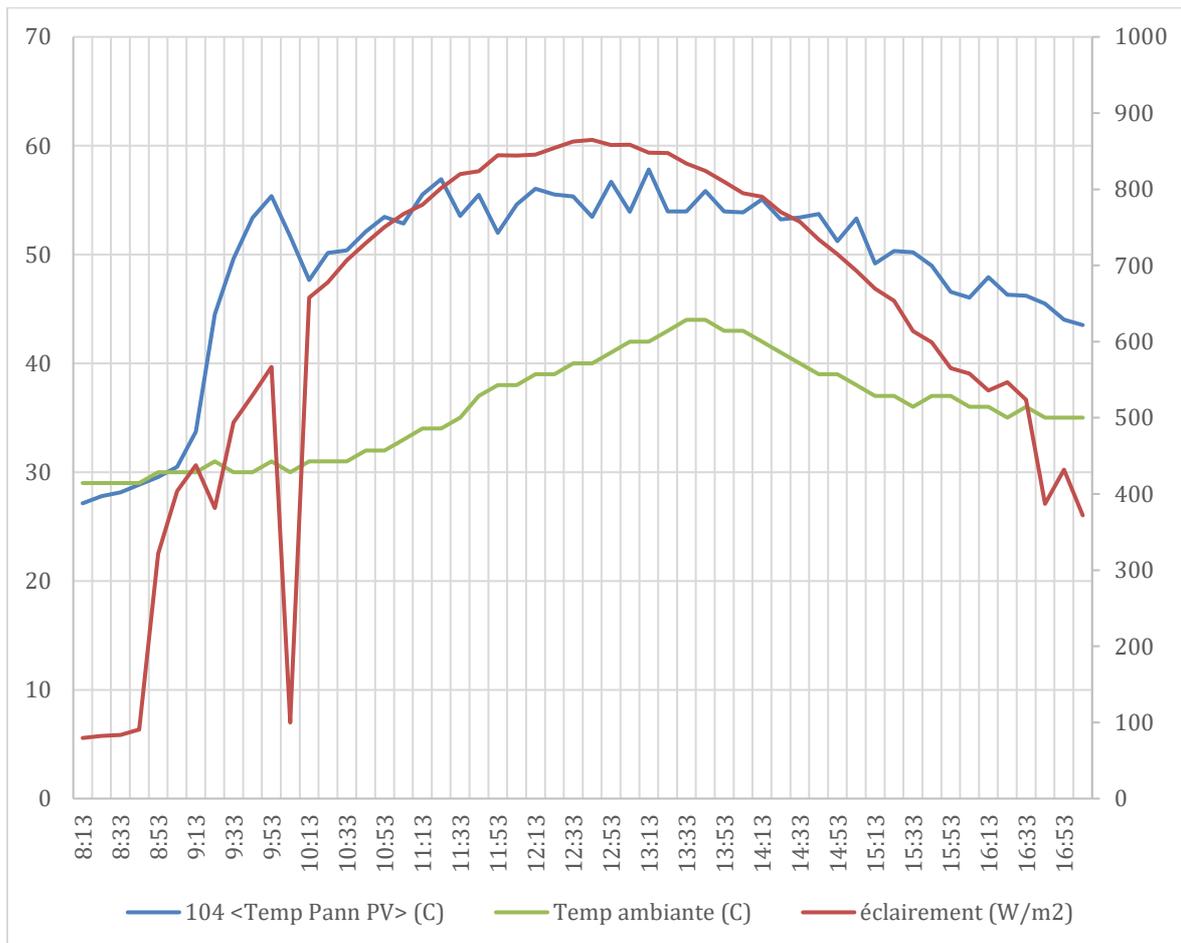
**Figure IV.34 :** Variation de la température de la cuve, du capteur et de l'éclairement.

La figure représente la variation de la T de la cuve de stockage, la T du capteur thermique et l'éclairement.

On remarque que l'allure de la courbe de la T du capteur suit l'allure de l'éclairement. Mais, celle de la cuve n'a pas marqué une importante variation de température durant la journée à cause de la non-isolation de la cuve de stockage.

**IV.6.1.2. Résultats des tests préliminaires sur le panneau PV :**

La figure IV.35 représente respectivement la variation de l'éclairement solaire et de la température du panneau PV pendant la journée, la courbe caractéristique I(V) et P(V) du panneau solaire photovoltaïque et l'influence de la température du panneau PV sur son rendement journalier. Les courbes suivantes concernent les tests obtenus le 05 Juillet 2023 par un ciel clair.



**Figure IV.35 :** variation de la température du panneau et la température ambiante.

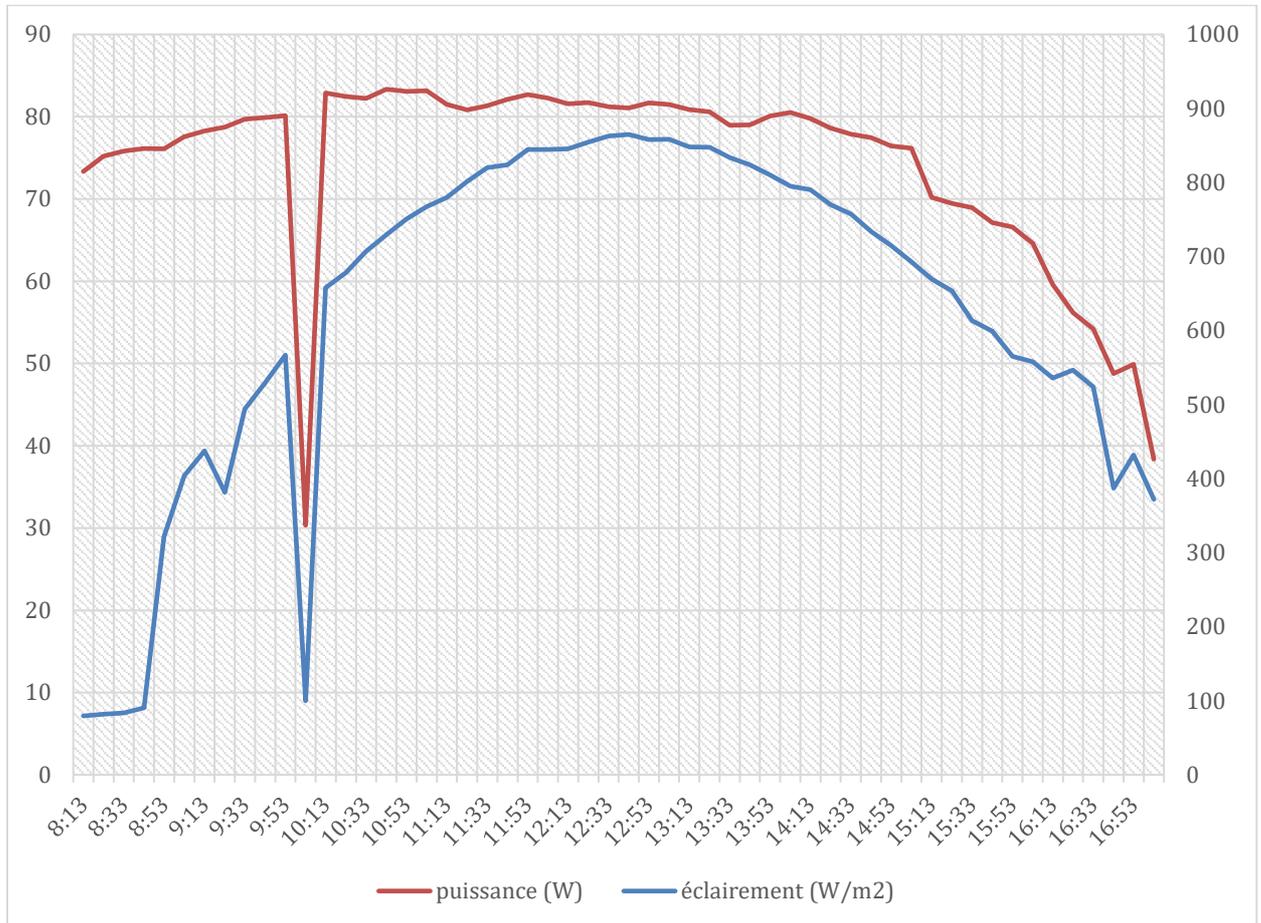
La figure représente la variation de la température de panneau PV, la température ambiante et l'éclairement solaire.

On remarque que la courbe de la température ambiante varie durant la journée est atteint un seuil de 44°C à 13h43.

Alors qu'on voit que la température du panneau PV suit parfaitement celle de l'éclairement, ce dernier a eu diminution jusqu'une valeur égale a 99.91W/m<sup>2</sup> à 10h03 à cause d'un passage nuageux.

La surface du panneau :  
 $S = 0.8761 \text{ m}^2$ .

Le rendement électrique :  
 $\eta = 0.109 = 10.9 \%$



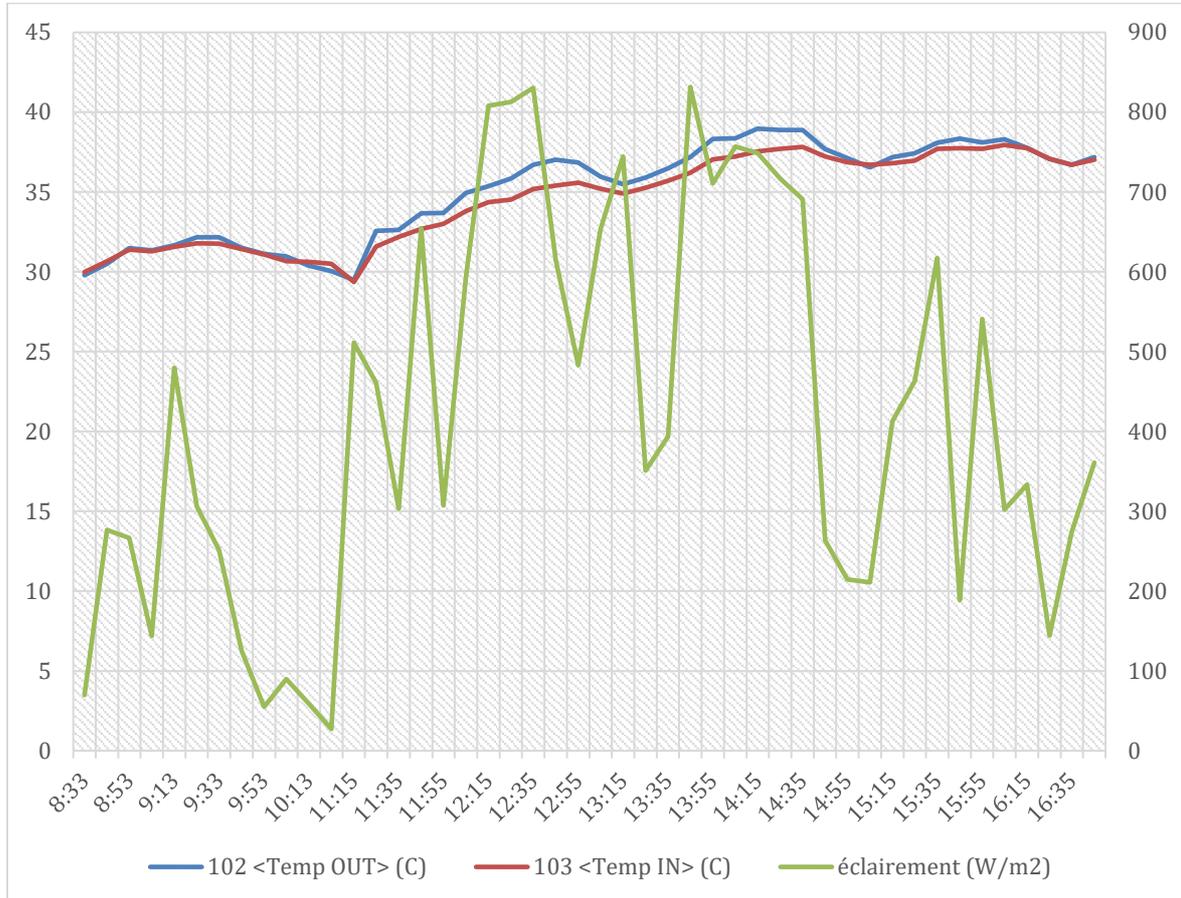
**Figure IV.36 :** influence de l'éclairement sur la puissance du panneau PV.

On voit d'après la figure (IV.36) que l'allure de la courbe de puissance fournie par le panneau photovoltaïque suit parfaitement l'allure de la courbe d'éclairement mesuré pendant la journée, quand l'éclairement augmente la puissance aussi augmente et le contraire d'où on remarque qu'à 10h03, l'éclairement chute jusqu'à 99.91W/m<sup>2</sup>, lui correspondant une chute de puissance à une valeur égale à 30.34W à cause d'un passage nuageux.

Ce suivi prouve que le panneau converti très bien l'éclairement solaire reçu en électricité.

**IV.6.1.3. Résultats des tests sur le panneau hybride photovoltaïque-thermique :**

La figure IV.37 représente respectivement la variation des températures d'entrée et de sortie du glacéol et l'éclairement solaire pendant la journée. Les courbes suivantes concernent les tests obtenus le 08 Juillet 2023 par un ciel nuageux.

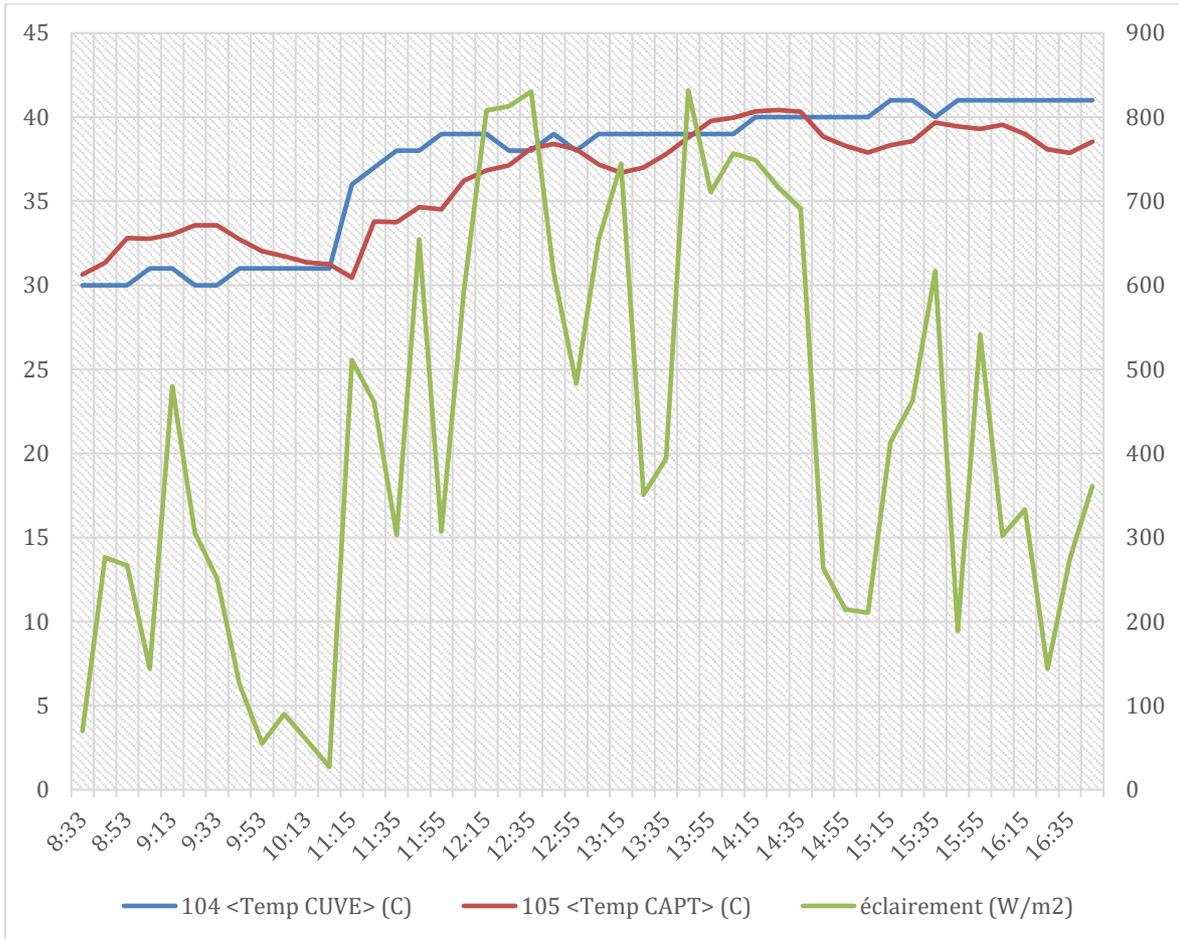


**Figure IV.37:** variation de la température d'entrée, la température de sortie et l'éclairement.

On remarque que la courbe de l'éclairement varie aléatoirement durant la journée, cela due au passage nuageux.

On voit que la température d'entrée et de sortie augmentent légèrement durant la journée et ne dépassent pas les 39°C.

On remarque aussi un écart pas très important qui est égale à 2°C.



**Figure IV.38:** variation de la température de la cuve, la température du capteur TH et l'éclairement solaire.

La figure représente la variation de la température de la cuve de stockage, la température et l'éclairement par un ciel nuageux.

On voit que la température de la cuve de stockage est supérieure à celle du capteur ce qui signifie que le gazoil contenue dans le capteur et qui circule dans l'échangeur thermique a absorbé une quantité de chaleur du capteur qui a fait chauffer l'eau de la cuve par la suite et qui atteint une température égale à 42°C à partir de 11h.

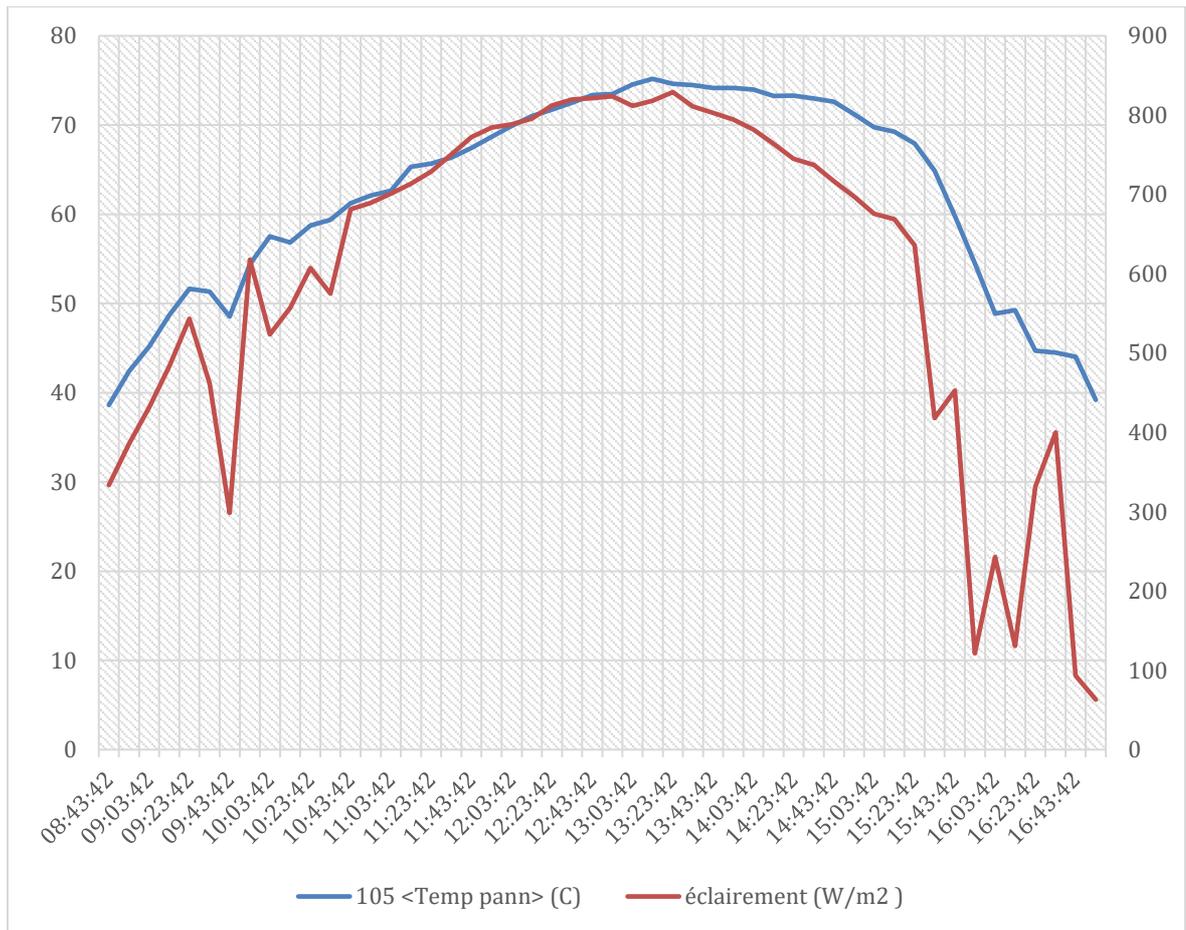
Le rendement électrique :

$$\eta = 0.124 = 12.4 \%$$

**IV.6.2.PVT à air :**

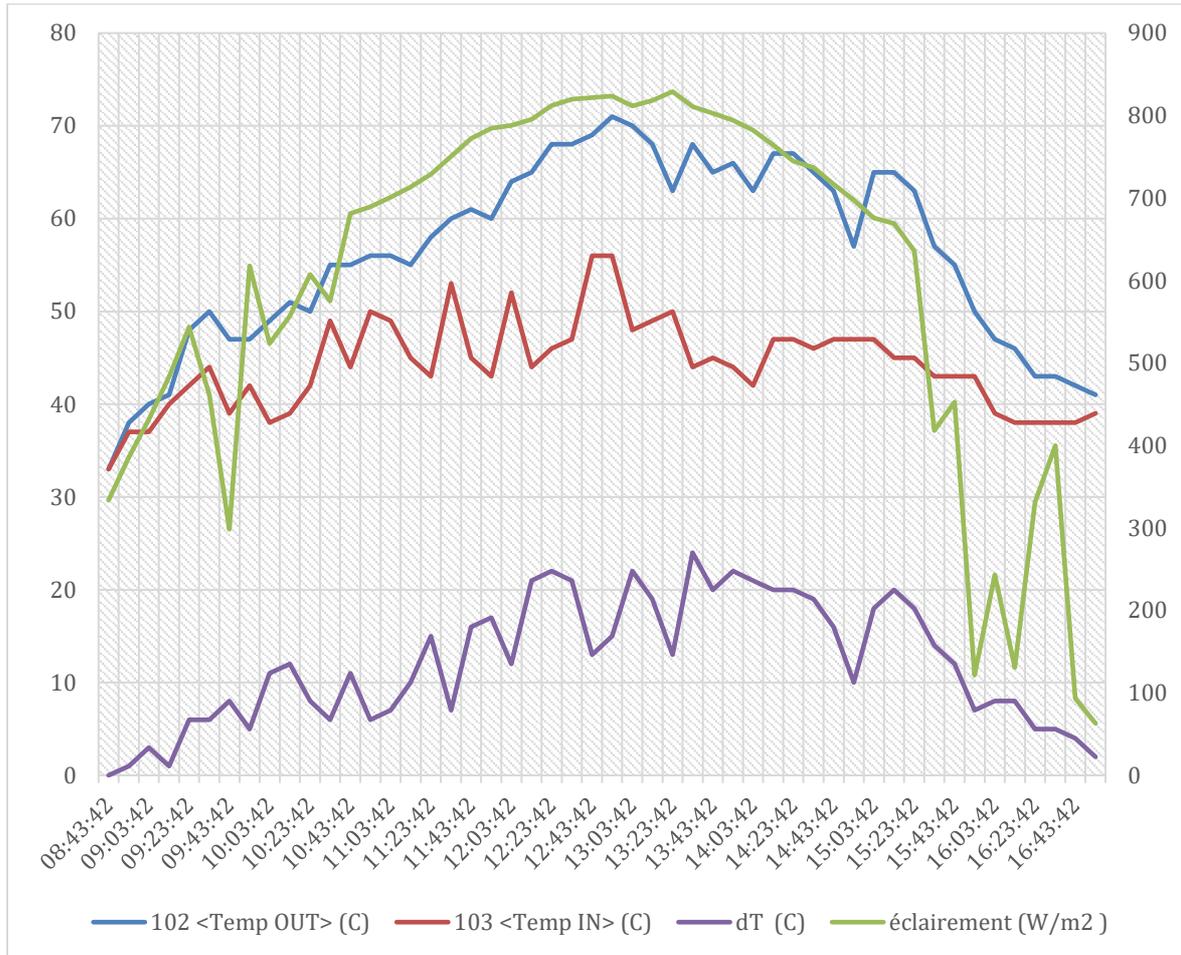
**IV.6.2.1. Résultats des tests du le PVT à air :**

La figure IV.39 représente la variation de température du panneau photovoltaïque et l'éclairement solaire pendant une journée par un ciel clair. Les courbes suivantes concernent les tests obtenus le 09 Juillet 2023.



**Figure IV.39** : variation de la température du panneau PV et l'éclairement.

On remarque que l'allure de la courbe de la variation de la température du panneau suit parfaitement celle de l'éclairement est atteint un seuil de 75°C à 13h13min.



**Figure IV.40** : Variation de la température d’entrée du capteur, de sortie, la différence de température et l’éclairement.

La figure représente la variation de la température d’entrée et de sortie du capteur thermique à air, la différence de température ainsi que l’éclairement solaire durant la journée de 09 Juillet 2023.

On voit que les allures des courbes de température d’entrée et de sortie suivent parfaitement celui de l’éclairement solaire.

On remarque aussi qu’il y ‘a une variation importante qui arrive jusqu’à 20 degrés entre la température d’entrée et la température de sortie ce que montre l’efficacité d’un capteur à air.

- Le tableau suivant donne une comparaison entre le système thermique à eau et le système thermique à air :

**Tableau IV.4:** comparatif entre le système thermique à eau et le système à air :

Système thermique à eau	Système thermique à air
Circulation forcée (a pompe)	Circulation naturelle
Boucle fermée	Boucle ouverte
Système compliqué	Système simple
Puissance évacuée importante	Puissance produite non-importante
Utilisation de cette énergie (ECD) : possibilité d'un chauffage thermique (petit débit), refroidissement du panneau PV (grand débit)	Chaleur évacuée : séchage solaire, production d'électricité par mini-turbine

#### **IV.7. Conclusion :**

On peut conclure à travers les tests préliminaires sur le panneau thermique et le panneau photovoltaïque que leur parfait état de fonctionnement permet de les assembler pour réaliser le panneau solaire hybride PVT.

On peut aussi conclure des mesures sur le PVT à eau, que la partie thermique été très concluante en ayant un bon refroidissement du PV le gardant dans un intervalle de température entre 38 et 40°C pour le circuit avec cuve de stockage. Par contre le gain du coté thermique du PVT à air est très important, d'une part parce que la différence de température arrive jusqu'à 20 degrés, mais aussi la courte durée des mesures effectuées sur seulement en une journée. Le rendement du panneau photovoltaïque est égale à 10.9%, alors que celui du capteur PVT à eau est égale à 12.4%.

---

## **Conclusion Générale**

---

Le rendement photovoltaïque est un paramètre très important dans le domaine de l'énergie solaire et surtout les panneaux photovoltaïques, alors qu'il est influencé par la température. L'augmentation de cette dernière cause une chute de rendement.

Ce mémoire nous a permis de réaliser la conception, l'étude expérimentale d'un prototype de capteur solaire hybride photovoltaïque /thermique. Il est couplé par la suite à une cuve de stockage avec échangeur. Le capteur thermique permet de faire circuler un fluide tout au long et de le faire passer dans l'échangeur contenu dans la cuve de stockage.

- Le chapitre I constituant une synthèse bibliographique sur les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques.
- Le chapitre II porte des généralités sur l'énergie photovoltaïque.
- Le chapitre III porte sur la modélisation des capteurs hybrides PVT.
- Le chapitre IV traite la validation expérimentale, d'où la 1ere partie est la réalisation du capteur solaire hybride PVT, qui a été un vrai défi de réalisation. Il a nécessité beaucoup de temps et de patience face aux difficultés rencontrées pour maintenir l'étanchéité du capteur solaire thermique, mais finalement, tout s'est bien passé. La deuxième section comprend les résultats des mesures et leurs discussions démontrent clairement que la réalisation a été un succès avec un bon refroidissement et un gain de température pour l'eau, ainsi qu'une puissance électrique pour le panneau PV.

Les résultats montrent que notre configuration répond largement aux objectifs définis. D'abord, on est arrivé à faire fonctionner le système avec zéro fuite. Ensuite, les températures d'eau dans la cuve de stockage ont été très importantes. Enfin, l'augmentation de la puissance était un défi pour nous, cela permet par la suite de calculer le rendement qui augmente avec l'augmentation de la puissance est qui égale à 10.9% pour le panneau photovoltaïque et de 12.4% pour le capteur PVT à eau.

Plusieurs perspectives peuvent être pris en compte dans le cadre de ce travail soit sur le capteur en lui-même ou bien sur la compagne de mesure, sur ce on peut :

- Réduire la charge du capteur thermique.
- Refaire un capteur thermique avec d'autre configuration.
- Effectuer des mesures annuelles pour évaluer son comportement pendant les périodes très chaudes.
- Développer une industrie autour de ce système et l'intégrer dans l'habitat ou l'industrie.

Les résultats peuvent être utilisés pour valider une simulation numérique établie à partir de la modélisation présentée dans le 3eme chapitre afin d'optimiser les composants et facteurs de construction et de réalisation du capteur PVT.

Du fait que ces capteurs produisent simultanément de l'électricité et de l'eau chaude, l'installation de tels systèmes pourrait être avantageuse.

### **Bibliographie et Webographie**

- [1] M.Y. Othman, S.A, Hamid, M.A.S. Tabook, K. Sopian, M.H. Roslan, Z. Ibrahim, Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study, *Renewable Energy*, 2016, vol. 86, pp. 716-722.
- [2] Michael, Jee Joe, and Iniyar Selvarasan. "Experimental investigation of a copper sheet-laminated solar photovoltaic thermal water collector." *Energy Efficiency* 10, no. 1 (2017) : 117-128.
- [3] **BOURAI. Azzedine.** Réalisation et étude des performances d'un panneau solaire hybride photovoltaïque/thermique. Mémoire de master. Université Saad DAHLAB: Blida, 2017, N° 76.
- [4] E. YANDRI, The effect of Joule heating to thermal performance of PVT collector during electricity generation, *Renewable Energy*, 2017, vol.111, pp. 344-352.
- [5] N. Dimri, A. Tiwari, G.N. Tiwari, Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector, *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 146, pp. 68-77.
- [6] Cen, Jiajun, Roan du Feu, Matus E. Diveky, Catriona McGill, Oliver Andraos, and William Janssen. "Experimental study on a direct water heating PV-T technology." *Solar Energy* 176 (2018) : 604-614.
- [7] Zhou, Jicheng, Haoyun Ke, and Xiaoqing Deng. "Experimental and CFD investigation on temperature distribution of a serpentine tube type photovoltaic/thermal collector." *Solar Energy* 174 (2018) : 735-742.
- [8] Dembeck-Kerekes, T., Jamie P. Fine, J. Friedman, S. B. Dworkin, and J. J. McArthur. "Performance of variable flow rates for photovoltaic-thermal collectors and the determination of optimal flow rates." *Solar Energy* 182 (2019) : 148-160.
- [9] B. BOUMAARAF, K. TOUAFEK, M.S. AIT-CHEIKH, M.A. SLIMANI, Comparison of electrical and thermal performance evaluation of a water glazed hybrid photovoltaic thermal collector and a classic PV generator, *Mathematics and computer in simulation*, 2020, vol. 167, pp. 176-193.

- [10] B. BOUMAARAF, Conception, étude et réalisation d'une nouvelle configuration de capteur solaire hybride photovoltaïque thermique, thèse de Doctorat, École National Polytechnique, 2021, N° 166.
- [11] **H. ZHONGHE, L. KAIXIN, Liu. GUIQIANGLi, Xudong ZHAO, Samson SHITTU.** Electrical and thermal performance comparison between PVT-ST and PV-ST systems. Energy. Volume 237, 15 December 2021.
- [12] **Hussein A. KAZEM, Miqdam T. CHAICHAN, Ali H.A. Al-WAELI, Reem Al-BADI, Mohammed A. FAYAD, Aslan GHOLAMI.** Dust impact on photovoltaic/thermal system in harsh weather conditions. Solar Energy. Volume 245, October 2022, Pages 308-321.
- [13] Ezzeddine **TOUTI, Majed MASMALI, Mohamed FTERICH, Houssam CHOUIK HI.** Experimental and numerical study of the PVT design impact on the electrical and thermal performances. Case Studies in Thermal Engineering. Volume 43, March 2023.
- [14] **Algérie, ministère des énergies et des mines.** Guide des énergies renouvelables. 2007.
- [15] LAFLEUR Alexandre. Energie renouvelable : Les cellules photovoltaïques. Rapport. ENSTA- École Energie renouvelable.
- [16] Notes de cours, AZOUI, Master Énergies renouvelables 2019-2020.
- [17] M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabeche. Production d'Électricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel). Énergies Renouvelables : Zones Arides, 2002, pages 49-54.
- [18] S. ARAB, D. TOUDERT, Étude d'un Système Photovoltaïque. Mémoire de Master. Université MOULOUD MAMMERI : TIZI-OUZOU, 25 Septembre 2017, N° 49.
- [19] FERRAH BILLEL, Étude d'un système Hybride photovoltaïque –éolien. Mémoire de Master. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR : Annaba. 2015, N° 83.
- [20] <https://www.dsnsolar.com/info/solar-pv-and-diesel-hybrid-system-49612815.html>.

[21] <https://www.techno-science.net/definition/5118.html>.

[22] H. ABDERRAOUF, « Évaluation de performance d'un système photovoltaïque à injection, » UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI - OUM EL BOUAGHI –, AINBAIDAOEB, 2017.

[23] Othmane Benseddik, Fathi Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de master, université Kasdi Marbah- Ouargala, 2012.

[24] MEGHELLET Hanine, HOCINE Lynda. Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque. Mémoire de master. Université Colonel Akli Mohand-Oulhadj : Bouira, 30 Septembre 2018, N° 56.

[25] Becquerel, A. E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. Comptes Rendus 9 : 561–567.

[26] A. T. R. AILI, « Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt, » TIZIOUZOU, TIZIOUZOU, 2014.

[27] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.

[28] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

[29] Said Chikha, « Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques », thèse de Magister option Commande, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 2011-2012.

[30] A. MAOUCHA, Étude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique, Université de Batna, 2011.

[31] M. HARAOUIBA, « étude et simulation d'un générateur de panneau, » FACULTE DE SCIENCE DE L'INGENIORT, ANNABA, 2019.

- [32] A. T. R. AILI, « Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt, » TIZIOUZOU, TIZIOUZOU, 2014.
- [33] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative », Mémoire de magister, UMMTO, 2012.
- [34] KOUADRI BOUDJELTHIA El Amin, Les technologies photovoltaïques : Entre la recherche scientifique et la réalité économique. Bulletin des énergies Renouvelables, 2016, N° 40, pages 4-5.
- [35] Belkis MAHLOUS, Latifa ZAHRI, Youcef TERCHA, ÉTUDE DE L'EFFET DES CHANGEMENTS DE CONDITIONS OPERATIONNELLES SUR LES PERFORMANCES DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES. Mémoire de Master. Université Echahid Hamma Lakhdar : El-Oued, 2022, N° 56.
- [36] H. KAMELIA, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque, » FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE, TIZIOUZOU, 2012.
- [37] L. BAIYOU, A. BOUSSAG, Effet de la Température ambiante sur l'efficacité d'un Panneau solaire photovoltaïque. Mémoire de Master. Université Mohamed BOUDIAF : M'SILA, 2020, N° 65.
- [38] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [39] A. M. E. H. OMAR, « Étude comparative entre différents modèles électriques photovoltaïques, » UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOIAGHI, OUM EL BOUGHI, 2012.
- [40] Z. SORIA et M. CHEYMAA, « Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique, » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF -MSILA, MSILA, 2017.
- [41] K. Sobaihi, Étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) à contre réaction de tension. Thèse de Magister. École Nationale Polytechnique, (Décembre 2003).

- [42] K. TOUAFEK, Étude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique. Mémoire de Magister. École Nationale Polytechnique : El-Harrach, 02 Octobre 2005, N° 135.
- [43] H. Knopf, Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle. Master thesis, Portland State University (1999).
- [44] F. Lasnier and T.G. Ang, Photovoltaic Engineering Handbook. Adam Hilger, Bristol and New York, (1990).
- [45] B. LAMRI et B. AMMAR, « Effet de la température ambiante sur l'efficacité d'un panneau solaire photovoltaïque, » UNIVERSITE MOHAMED BOUDAIF-M'SILA, M'SILA, 2020.
- [46] B. HANANE, « Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, » UNIVERSITE DR MOULAY TAHAR DE SAIDA, SAIDA, 2016.
- [47] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [48] Mejdoub Amine Khodja. Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire. Thèse de magister en génie climatique, Constantine, (2004).
- [49] KALOJIROU S. A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, vol. 30, n° 3, pp. 231-295.
- [50] Edwards, D.K., Capteurs solaires, Edition SCM, paris, 1979
- [51] <http://www.climamaison.com/lexique/panneau-solaire.ht>.
- [52] A. ZAROUTA, Y. SEKKAI. Étude de performance d'un capteur solaire thermique plan. Mémoire de Master. Université Yahia Fares : Médéa, 2022, n° 47.
- [53] Mr. KACI. Support de cours, systemes solaires a basse température, master 2, énergies renouvelables, 2022.

[54] Mejdoub Amine Khodja. Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire. Thèse de magister en génie climatique, Constantine, (2004).

[55] Brian Norton, solar energy thermal technology, (1991).

[56] A.soteris, kalogirou, solar thermal collectors and applications, progress in energy and combustion science, (30) 231–295 (2004).

[57] Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank. **Ievers, Simon et Lin, Wenxian.** 12, 2009, Vol. 86, pp. 2604-2614.

[58] A. Fudholi et al., “Review of solar photovoltaic/thermal (PV/T) air collector,” Int. J. Electr. Comput. Eng., vol. 9, no. 1, p. 126, 2019

[59] Nadjat Kouki. Etude et Réalisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique destinée à usage domestique. Mémoire de Master. UNIVERSITE AHMED DRAIA : ADRAR. 2022, N° 78

[60] A. L. Abdullah, S. Misha, N. Tamaldin, M. A. M. Rosli, and F. A. Sachit, “Technology progress on photovoltaic thermal (PVT) systems with flat-plate water collector designs: A review,” J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci., vol. 59, no. 1, pp. 107–141, 2019.

[61] *Performance monitoring and modeling of an uncovered photovoltaic-thermal (PVT) water collector.* **Aste T., Pero C.D., Leonforte F., Manfren M.,** 2015, Solar Energy, Vol. 135, pp. 551–568.

[62] **Condor.** catalogue des kit photovoltaïques. 2014.

