

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المركز الجامعي لعين تموشنت

Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent

Institut de Technologie

Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : ENERGETIQUE

Thème :

**Panneau photovoltaïque / hybride**

Présenté Par :

- 1) BELHADEF DJILLALI ACHRAF
- 2) MIH MOHAMED

Devant les jurées :

- Mr GENDOUZ bouhelal
- Dr BENZENINE Hamidou
- Pr BENSaad Bourassia

Année universitaire 2019/2020

---

## REMERCIEMENT

---

*Un grand merci au **Allah** qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.*

*Nous tenons à remercier vivement tout d'abord notre corps professoral et administratif de l'institut de technologie, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.*

*Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur « **Pr Bensaad Bourassia** » qui en tant que Directeur de mémoire, elle a toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.*

*Nous exprimons nos reconnaissances à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires pour cette mémoire.*

*Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce travail. Merci à tous et à toute*

---

---

## Dédicace

---

---

*Avec un énorme plaisir je dédie ce travail à mes très chers parents votre courage, vos sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours.*

*A mes chers frères et ma sœur.*

*A mon encadreur **Pr.Bensaad.Bourassia***

*A mes très très chers amis (Bilal Bouhadjeb-Madouri Mohamed-nait Chalaal Hichem-Ouannane Hichem-Abdelmoula Ilyes-Bellakhder Toufik-benremdan Djallel-Koridek Mohamed-Beneddif Amira...) et mes collègues de génie mécanique, spécialité énergétique.*

*A tous mes professeurs qui m'ont encadré tous ou long de mon cursus universitaire.*

**Djillali Achraf.**

---

## Dédicace

---

*Avec un énorme plaisir je dédie ce travail à mes très chers parents votre courage, vos sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours.*

*A mes chers frères.*

*A mon encadreur **Pr.Bensaad.Bourassia***

*A mes très chers amis et mes collègues de de génie mécanique, spécialité énergétique.*

**Mohamed.**

---

---

## Résumé :

---

---

La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement.

Donc, il est devenu impératif de développer d'autres alternatives d'énergie renouvelables propres, amies de l'environnement comme l'énergie solaire.

Le but de ce travail est de dimensionner un système photovoltaïque hybride pour couvrir le besoin en énergie thermique ( eau chaud et chauffage et climatisation) et énergie électrique.

---

---

## Abstract:

---

---

Much of the energy consumed comes from fossil fuels, the massive use of which can lead to the depletion of these reserves and really threatens the environment.

So it has become imperative to develop other clean, environmentally friendly renewable energy alternatives such as solar power.

The goal of this work is to size a hybrid photovoltaic system to cover the thermal energy needs (hot water and heating and air conditioning) and electrical energy.

---

---

## ملخص:

---

---

يأتي الكثير من الطاقة المستهلكة من الوقود الأحفوري ، والذي يمكن أن يؤدي استخدامه المكثف إلى استنفاد هذه الاحتياطيات ويهدد البيئة حقًا.

لذلك أصبح من الضروري تطوير بدائل أخرى للطاقة المتجددة النظيفة والصديقة للبيئة مثل الطاقة الشمسية؛ و الطاقة الشمسية الهجينة.

الهدف من هذا العمل هو تحديد حجم النظام الكهروضوئي الهجين لتغطية احتياجات الطاقة الحرارية (الماء الساخن و التدفئة و تكييف الهواء) و الطاقة الكهربائية.

---

---

# SOMMAIRE

---

---

REMERCIEMENT .....	I
DEDICACE.....	II
DEDICACE.....	III
RESUME :.....	IV
ABSTRACT:.....	IV
ملخص:.....	IV
SOMMAIRE .....	V
TABLE DES FIGURES : .....	VIII
LISTE DES TABLEAUX .....	IX
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE I :.....	2
1. INTRODUCTION :.....	3
2. GENERALITE :.....	3
2.1. HISTORIQUE : .....	3
2.2. RAYONNEMENT SOLAIRE : .....	4
2.3. SPECTRE DU RAYONNEMENT : .....	4
2.4. DUREE D'INSOLATION : .....	5
2.5. PRINCIPE : .....	6
2.6. GENERATEUR MONO-USAGE OU MULTIPLE USAGES : .....	7
2.7. SYSTEME AUTONOME OU AVEC APPOINT : .....	7
2.8. SYSTEME AVEC APPOINT EOLIENNE : .....	7
2.9. RECEPTEUR CC OU CA : .....	7
3. TECHNOLOGIES ET DOMAINES D'UTILISATIONS DES GENERATEURS SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES :.....	8
3.1. GENERATEUR AUTONOME OU « STAND-ALONE » : .....	8
3.2. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : .....	9
3.3. TECHNOLOGIES DES CELLULES SOLAIRES : .....	9
3.3.1. Cellules monocristallines : .....	10
3.3.2. Cellules multi cristallines ou poly cristallines : .....	10
3.3.3. Cellules amorphes : .....	10
3.3.4. Fabrication d'une cellule classique à base de silicium : .....	10
3.4. LE MODULE PHOTOVOLTAÏQUE : .....	11
3.4.1. Caractéristiques d'un module [8] : .....	13
3.5. LE PANNEAU SOLAIRE : .....	13
3.6. SYSTEME DE STOCKAGE : .....	15
3.7. TYPES D'ACCUMULATEURS :.....	16
3.7.1. Composition d'une batterie solaire plomb-Acide : .....	16
3.7.2. Principe de fonctionnement : .....	18
3.7.3. Les Accumulateurs au Nickel- cadmium : .....	18
3.8. SYSTEME DE REGULATION : .....	19
3.8.1. Régulation de la décharge : .....	19
3.8.2. Régulation de la charge : .....	20
3.8.3. Régulation de la charge série : .....	20
3.8.4. Régulateur de charge de coupure : .....	20
3.8.5. Régulateur de charge à découpage : .....	20
3.8.6. Régulateur de charge série à coupure partielle : .....	20

3.8.7.	<i>Régulateur de charge parallèle :</i>	21
3.9.	<b>SYSTEME DE CONVERSION :</b>	21
3.9.1.	<i>Le convertisseur continu-continu :</i>	22
3.9.2.	<i>Le convertisseur continu-alternatif :</i>	22
3.10.	<b>LA CHARGE :</b>	23
3.11.	<b>INSTALLATION DES PANNEAUX :</b>	23
3.11.1.	<i>Disposition des panneaux :</i>	23
3.11.2.	<i>Fixation des panneaux :</i>	24
3.11.3.	<i>L'orientation des panneaux :</i>	24
3.11.4.	<i>Câblage électrique :</i>	24
3.11.5.	<i>Câblage de liaison :</i>	24
4.	<b>DIFFERENTS DOMAINES D'APPLICATION :</b>	24
4.1.	<b>INDUSTRIE ISOLEE :</b>	25
4.2.	<b>RESIDENCE URBAINE :</b>	25
4.3.	<b>BIENS DE CONSOMMATION :</b>	25
4.4.	<b>AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION PV :</b>	25
5.	<b>CONCLUSION :</b>	26
<b>CHAPITRE II :</b>		27
1.	<b>INTRODUCTION :</b>	28
2.	<b>GENERALITES :</b>	28
2.1.	<b>GAMMES DE TEMPERATURES PAR UTILISATION :</b>	29
2.2.	<b>PRINCIPE DE CAPTEUR THERMIQUE :</b>	29
2.3.	<b>BILAN THERMIQUE DU CAPTEUR :</b>	30
2.4.	<b>RENDEMENT :</b>	31
2.5.	<b>RENDEMENT OPTIQUE :</b>	31
3.	<b>TECHNOLOGIE ET DOMAINES D'UTILISATIONS DES PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES :</b>	31
3.1.	<b>SCHEMA GENERAL D'INSTALLATION THERMIQUE :</b>	31
3.2.	<b>LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN :</b>	32
3.2.1.	<i>L'absorbeur :</i>	32
3.2.2.	<i>Le fluide caloporteur :</i>	34
3.2.3.	<i>La couverture transparente :</i>	34
3.2.4.	<i>L'isolation thermique :</i>	35
3.2.5.	<i>Le coffre :</i>	35
3.2.6.	<i>Classification des capteurs :</i>	35
3.2.7.	<i>L'orientation des capteurs :</i>	36
3.2.8.	<i>Les types des composants :</i>	36
3.3.	<b>LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERTS THERMIQUES DANS UN CAPTEUR SOLAIRE :</b>	37
3.3.1.	<i>La conduction :</i>	37
3.3.2.	<i>La convection :</i>	38
3.3.3.	<i>Le rayonnement :</i>	39
3.4.	<b>LES DIFFERENTS PARAMETRES INFLUANT SUR LE RENDEMENT DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN :</b>	40
3.4.1.	<i>Les paramètres externes :</i>	40
3.4.2.	<i>Les paramètres internes :</i>	40
3.4.3.	<i>Performances d'un capteur solaire plan :</i>	40
3.4.4.	<i>Étude du capteur plan à air :</i>	41
4.	<b>EXEMPLE D'APPLICATION : CAPTEUR PLAN A EAU :</b>	44
4.1.	<b>ÉTUDE DES CAPTEURS SOLAIRES PLANS A EAU :</b>	44
4.2.	<b>DOMAIN D'UTILISATION :</b>	45

4.2.1. Différents types de capteurs et leur domaine d'utilisation :	45
4.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CAPTEURS PLANS :	46
5. CONCLUSION :	47
CHAPITRE III :	49
1. INTRODUCTION :	50
2. GENERALITE :	50
2.1. HISTORIQUE :	50
2.2. DESCRIPTION TECHNIQUE DU SYSTEME PV/T :	51
2.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :	51
3. TECHNOLOGIE DES PANNEAUX SOLAIRES HYBRIDE :	52
3.1. LES COMPOSANTS DE CAPTEUR :	52
4. LES TYPES DE CAPTEURS PV-T :	55
4.1. LES CAPTEURS SOLAIRES PV-T A AIR :	55
4.2. LES CAPTEURS SOLAIRES PV-T A EAU :	59
5. DOMAINES D'UTILISATIONS :	62
5.1. LES AVANTAGES :	62
5.2. LES INCONVENIENTS :[72]	63
6. CONCLUSION :	63
CHAPITRE IV :	65
1. REGION DE AIN TEMOUCHENT :	65
2. PRESENTATION DE L'HABITAT A ETUDIE :	65
2.1. ESTIMATION JOURNALIERE :	66
2.2. LES BESOINS ENERGETIQUES D'UNE HABITATION :	66
3. DIMENSIONNEMENTS D'UN SYSTEME PV PAR LA METHODE SIMPLIFIEE :	67
4. PRESENTATION DE LOGICIEL DE SIMULATION PVSYSY :	69
5. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME PV :	70
5.1. DONNEES METEOROLOGIQUES DU SITE :	70
5.2. TRAJECTOIRE DU SOLEIL :	71
5.3. ORIENTATION DES MODULES PV :	71
5.4. SCHEMA DE L'INSTALLATION PV :	72
6. RESULTATS DE SIMULATION :	73
6.1. BESOINS ELECTRIQUES :	73
6.2. SIMULATION DES EQUIPEMENTS ENERGETIQUES :	74
6.3. RAPPORT DE SIMULATION :	76
7. COMPARAISON ENTRE LA METHODE UTILISEE ET LA SIMULATION :	79
8. CONCLUSION :	80
CONCLUSION GENERALE :	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	82

## TABLE DES FIGURES :

FIGURE 1 : SPECTRE SOLAIRE HORS ATMOSPHERE [4] .....	5
FIGURE 2 : MOYENNE ANNUELLE DE L'IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE REÇUE SUR UN PLAN INCLINE A LA LATITUDE DU LIEU[4] ..	6
FIGURE 3 : INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME[6] .....	6
FIGURE 4 : GENERATEUR AUTONOME OU (STAND ALONE)[7] .....	8
FIGURE 5 : SCHEMA ELEMENTAIRE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE[9] .....	9
FIGURE 6 : COUPE TRANSVERSALE D'UNE CELLULE SOLAIRE CLASSIQUE[11] .....	11
FIGURE 7 : MODULE PHOTOVOLTAÏQUE[12] .....	12
FIGURE 8 : BOITE DE JONCTION [14] .....	12
FIGURE 9 : PANNEAU SOLAIRE [16] .....	14
FIGURE 10 : BOITE DE DERIVATION [17] .....	14
FIGURE 11 : CONSTRUCTION D'UNE BATTERIE MONOBLOC [22] .....	17
FIGURE 12 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REGULATEUR DE CHARGE SERIE [23] .....	20
FIGURE 13 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REGULATEUR DE CHARGE PARALLELE .....	21
FIGURE 14 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REGULATEUR DE CHARGE A DECOUPAGE[23] .....	21
FIGURE 15 : SCHEMA DE L'ONDULEUR [25] .....	23
FIGURE 16 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN[35] .....	29
FIGURE 17 : SCHEMA D'UN CAPTEUR PLAN VITRE[37] .....	30
FIGURE 18 : SCHEMA D'UN CAPTEUR PLAN NON VITRE [37] .....	30
FIGURE 19 : SCHEMA GENERAL D'INSTALLATION THERMIQUE [38] .....	32
FIGURE 20 : COMPOSANTS D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN[39] .....	32
FIGURE 21 : LES DIFFERENTS ECHANGES THERMIQUES DANS UN CAPTEUR PLAN[44] .....	37
FIGURE 22 : DISPOSITION DES OBSTACLES OCL[54] .....	41
FIGURE 23 : DISPOSITION DES OBSTACLES DC[54] .....	41
FIGURE 24 : INSERTION D'UN AEROGEL DE SILICE .....	42
FIGURE 25 : CONFIGURATION 1 .....	42
FIGURE 26 : CONFIGURATION 2 .....	43
FIGURE 27 : CONFIGURATION 3 .....	43
FIGURE 28 : DISPOSITION EXPERIMENTALE .....	44
FIGURE 29 : FORMES GEOMETRIQUES DES PLAQUES ABSORBANTES .....	45
FIGURE 30 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PANNEAU HYBRIDE .....	52
FIGURE 31 : SCHEMA DETAILLE D'UN CAPTEUR HYBRIDE[68] .....	53
FIGURE 32 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN CAPTEUR PV-T THERMIQUE PLAN ET VITRE .....	53
FIGURE 33 : SCHEMA DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR [77] .....	55
FIGURE 34 : LES PROTOTYPES I, II, III ET IV DE CAPTEUR SOLAIRE PV-T A AIR [78] .....	56
FIGURE 35 : CAPTEURS SOLAIRES COMBINES INTEGRES A LA TOITURE .....	57
FIGURE 36 : BANC D'ESSAI DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR [83] .....	57
FIGURE 37 : COUPE DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR ET A AILETTES [87] .....	58
FIGURE 38 : EXEMPLES DE MODIFICATIONS DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR [88] .....	58
FIGURE 39 : COUPE TRANSVERSALE DU COMPOSANT HYBRIDE A EAU [91] .....	59
FIGURE 40 : SCHEMA DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A EAU SOLARNOR [92] .....	60
FIGURE 41 : COUPE DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A EAU [94] .....	60
FIGURE 42 : CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A EAU [93] .....	61
FIGURE 43 : PREMIER ET SECOND PROTOTYPES CONSTRUITS [97] .....	61
FIGURE 44 : SECTIONS DU CAPTEUR SOLAIRE HYBRIDE A EAU [100] .....	62
FIGURE 45 : LOCALISATION DE LA WILAYA DE AIN TEMOUCHENT .....	65
FIGURE 46 : METHODE DE CALCUL LE RAYONNEMENT SOLAIRE DE AIN TEMOUCHENT .....	67
FIGURE 47 : INTERFACE DE LOGICIEL PVSYST .....	69
FIGURE 48 : ETAPES DE SIMULATION AVEC PVSYST .....	69
FIGURE 49 : CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU SITE DE AIN TEMOUCHENT .....	70
FIGURE 50 : TRAJECTOIRE DU SOLEIL A AIN TEMOUCHENT .....	71
FIGURE 51 : ORIENTATION ET INCLINAISON DU SYSTEME PV .....	72
FIGURE 52 : SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE INSTALLATION PV AUTONOME .....	72
FIGURE 53 : BESOINS D'UTILISATEUR .....	73
FIGURE 54 : DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES .....	74
FIGURE 55 : BRANCHEMENT DES BATTERIES POUR LA MAISON .....	74
FIGURE 56 : DIMENSIONNEMENT DE MODULE ET ONDULEUR .....	75
FIGURE 58 : PARAMETRES DE SIMULATION DE LA MAISON .....	76
FIGURE 57 : DIMENSIONNEMENT DE MODULE ET ONDULEUR .....	76

FIGURE 59 : ENERGIE INCIDENTE DE REFERENCE SUR LE PLAN DES PANNEAUX .....	77
FIGURE 60 : DISTRIBUTION ANNUELLE DE RAYONNEMENT INCIDENTE.....	77
FIGURE 61 : DISTRIBUTION ANNUELLE DE LA PUISSANCE EN SORTIE DU CHAMP PV.....	77
FIGURE 62 : DIAGRAMME D'ENTREE/SORTIE JOURNALIER DU SYSTEME PV.....	78

---



---

## LISTE DES TABLEAUX

---



---

TABEAU 1 : RENDEMENTS DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES.....	10
TABEAU 2 : DESCRIPTION D'UNE MAISONS.....	65
TABEAU 3 : BESOINS ENERGETIQUES JOURNALIERS POUR LA MAISON .....	66
TABEAU 4 : LES RESULTATS PAR CALCUL ET SIMULATION DE PVSYST.....	79

---

---

## Introduction générale

---

---

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant une année.

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité (solaire photovoltaïque.). Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution, elle peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme.

Le capteur hybride photovoltaïque / thermique (PV-T), convertit l'énergie solaire à la fois en chaleur et en électricité. Les avantages de combiner un collecteur thermique et un module PV dans un seul capteur sont l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale. Dans le cas d'utilisation sur le toit les coûts seraient également réduits, comparés aux deux systèmes photovoltaïques et thermiques.

Nous présenterons dans ce mémoire une étude comparative entre deux installations la première comportant deux systèmes distincts panneau PV et capteur plan thermique, la deuxième installation comporte un système de PV-T.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude des générateurs photovoltaïques autonomes avec quelques notions et définitions utilisées dans le domaine du solaire.
- Un état de l'art des capteurs solaires plans (à air et à eau), ses différents composants, ses classifications, son fonctionnement et les différentes équations relatives au fonctionnement du système, et enfin les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur feront l'objet du deuxième chapitre.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons un état de l'art des capteurs solaire hybride à air et à eau et les différents éléments du système
- Les principaux calculs, leurs résultats comparatifs et leurs interprétations feront l'objet du quatrième chapitre.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale.

---

Chapitre I :

État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

## 1. Introduction :

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique. En général, on distingue deux types d'installations [1].

Non autonomes ou « grid connected » i.e. rattachées au réseau de distribution électrique.

Dans les systèmes reliés aux réseaux, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC), parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public et les demandes de puissance sont attachées sur le réseau en fonction de la capacité de production du générateur.

Autonomes ou « stand-alone », auquel on s'intéresse dans cette étude. Ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande énergétique en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments :

1. un ou plusieurs modules PV.
2. le système de régulation.
3. une ou plusieurs batteries.
4. l'onduleur.

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque «stand-alone», et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

## 2. Généralité :

Les générateurs photovoltaïques sont constitués de module photovoltaïques et d'un onduleur. Le générateur produit de l'électricité sous forme de courant continu transformé en courant alternatif par l'onduleur.

Les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. Ils peuvent comporter des accumulateurs servant à restituer l'énergie emmagasinée la nuit où lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant.

### 2.1. Historique :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839. Ce phénomène physique correspond à l'apparition d'une tension entre deux électrodes séparées par un solide ou un liquide lorsqu'il est éclairé par une lumière incidente. Einstein expliqua en 1912 les mécanismes à l'origine de ce phénomène, mais il faudra attendre l'année 1954 pour voir apparaître la première cellule photovoltaïque (Bell Laboratoires) fabriquée à partir de silicium cristallin avec un rendement de 6 %, pour être appliquée dans les années 1970 dans le domaine spatial.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

Aujourd'hui, la technologie photovoltaïque trouve ses applications dans différents domaines de l'alimentation d'une calculatrice jusqu'à la centrale électrique.[2]

## 2.2. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée qu'il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance. Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium ; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.[3]

Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, La température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [4] :

$$Q_{cdai} = \frac{T_{ab} - T_{il}}{\varphi_1} + \frac{T_{ab} - T_{il}}{\varphi_2}$$

- Diamètre de soleil  $D = 1392000 \text{ km}$
- Diamètre de la terre  $D_t = 1.27 * 10^7 \text{ m}$
- Distance moyenne soleil-terre  $L_{ts} = 1.5 * 10^{11} \text{ m}$  .

## 2.3. Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$ . Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie selon la figure 2 :

- Ultraviolet UV :  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ nm}$ , 6.4% .
- Visible :  $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ nm}$ , 48.0% .
- Infrarouge IR :  $0.78 < \lambda < 10 \text{ nm}$ , 45.6% .

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

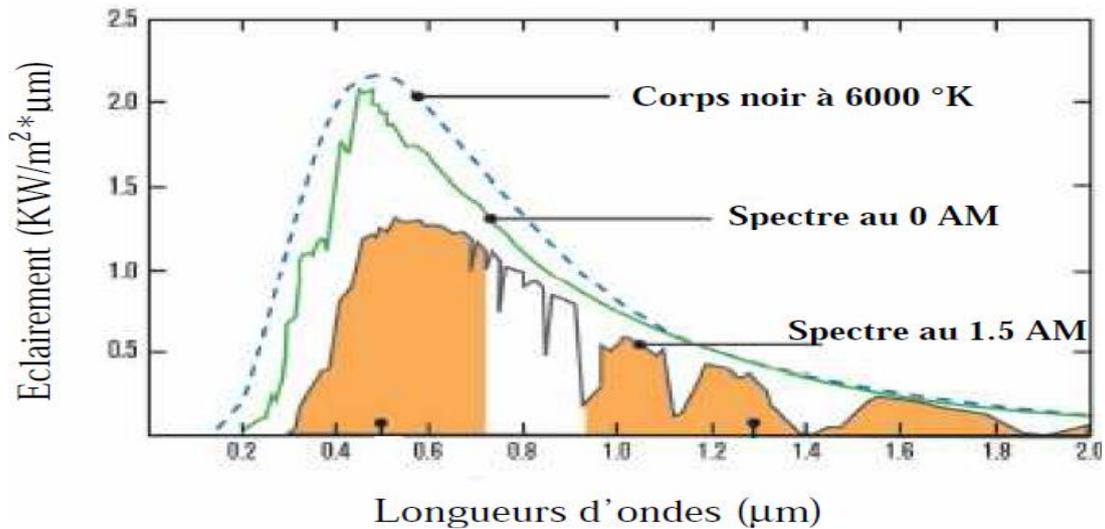


FIGURE 1 : SPECTRE SOLAIRE HORS ATMOSPHERE [4]

## 2.4. Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qui elle même dépend de la période de l'année considérée.

la durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an, la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j.

Elle correspond à une puissance estimée de l'ordre de  $7,2 \text{ Kwh/m}^2$ [5]. Dans notre étude nous avons une puissance journalière de  $5,4 \text{ K Wh/m}^2$ . pour une ville de Beni Saf wilaya Ain temouchent selon la Figure 2.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

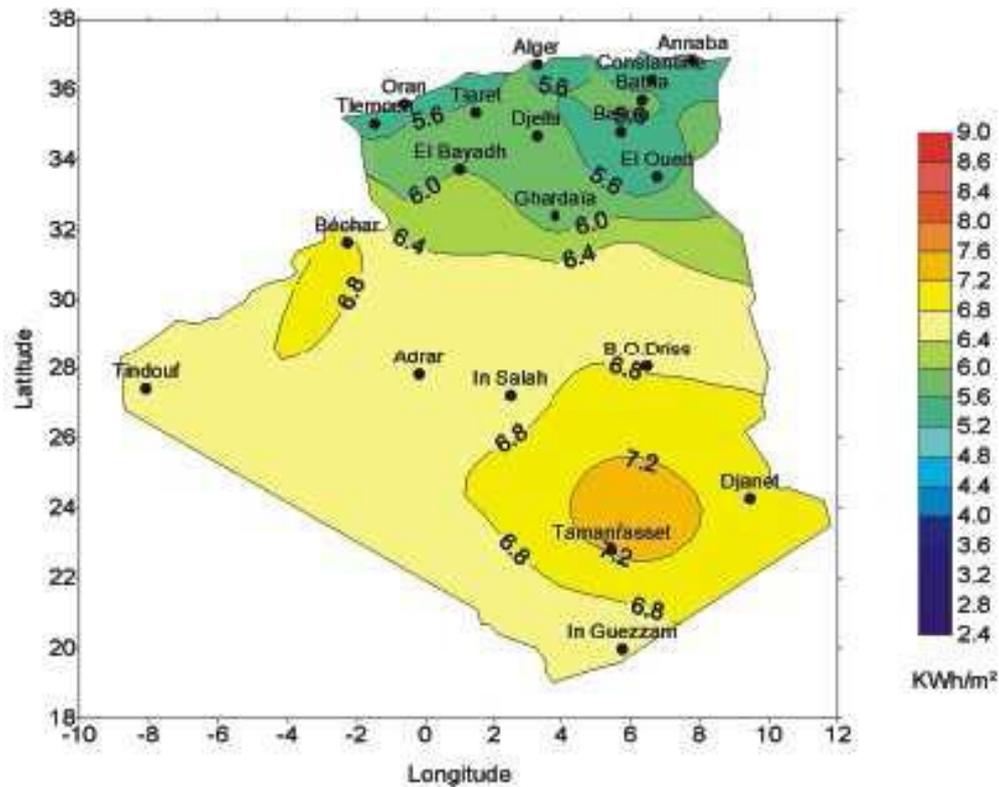


FIGURE 2 : MOYENNE ANNUELLE DE L'IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE REÇUE SUR UN PLAN INCLINE A LA LATITUDE DU LIEU[4]

## 2.5. Principe :

Le système photovoltaïque est un ensemble composé de générateur photovoltaïque (panneau solaire, batterie, régulateur de charge décharge, câblage) et des équipements destinataires. Un panneau solaire photovoltaïque produit du courant continu (DC) que les batteries peuvent stocker et restituer sous cette forme. Pour transformer le courant continu en courant alternatif, il est nécessaire d'utiliser un onduleur. Les équipements destinataires sont eux les appareils électriques adaptés à la technique photovoltaïque soit très économes en énergie selon Figure 3, présent un schéma général d'une installation PV autonome.

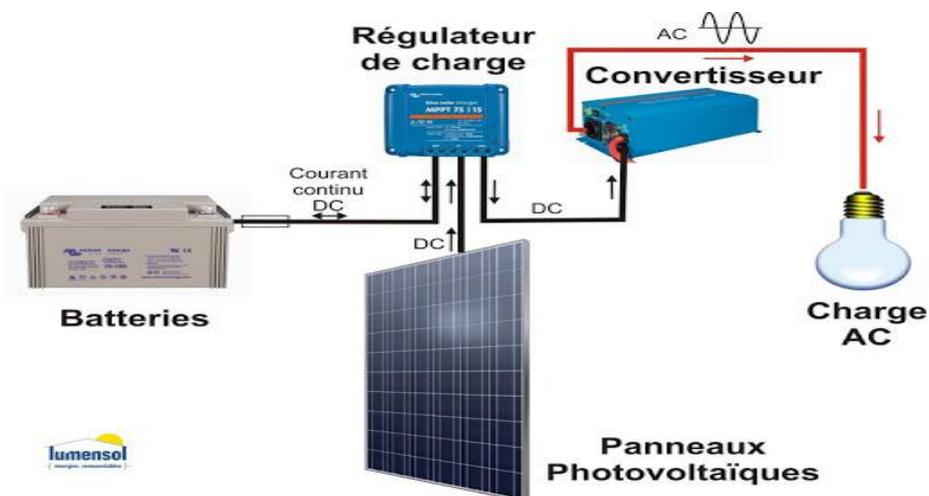


FIGURE 3 : INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME[6]

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

## 2.6. Générateur mono-usage ou multiple usages :

### Générateur mono-usage :

En utilisation collective (ex : pompe de village) ou individuelle (ex : pompe maraichage).

- Avantage : maîtrise de la consommation et utilisation plus facile.
- Inconvénient : pas de valorisation direct des surplus sauf dispositions particulières.

### Générateur multi-usage avec un seul propriétaire et usager à privilège :

- Avantage (énorme) : l'usager « s'approprie » le générateur et règle ses consommations sur le productible.
- Inconvénient (mineur) : plusieurs installations nécessaires dans le village.

**Générateur multi-usage avec plusieurs propriétaires et usagers :** « propriétaire » et usagers (ex : centrale villageoise) : à éviter.

- Avantage : foisonnement des consommations et problème de la distribution équitable de l'énergie (tarification).
- Inconvénient : le libre choix des récepteurs s'oriente vers les récepteurs à forte consommation car moins cher, d'où l'augmentation rapide des consommations et problème de la distribution équitable de l'énergie (tarification).

## 2.7. Système autonome ou avec appoint :

### Système autonome :

- Avantage : simplicité

### Système avec appoint diesel :

- Avantages : puissance momentanée importante, fiabilité du diesel, économie globale dans le cas d'effet saisonnier marqué.
- Inconvénients : approvisionnement en carburant, entretien important, bruit.

## 2.8. Système avec appoint éolienne :

- **Avantage** : théoriquement complémentaire des gisements.
- **Inconvénient** : fiabilité inférieure, nécessite une maintenance mécanique.

## 2.9. Récepteur CC ou CA :

### Récepteur en courant continu :

- Avantages : ne nécessite pas d'onduleur, très faible consommation par rapport au photovoltaïque, coût global du système moins élevé.
- Inconvénients : coût individuel plus élevé, disponibilité moins importante.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

## Récepteur en courant alternatif :

- Avantages : coût individuel peu élevé, système très répandu.
- Inconvénients : nécessite un /des onduleurs, coût global du système beaucoup plus élevé.

L'expérience a montré que la meilleure solution correspond au besoin en courant continu et à l'utilisation d'onduleur divisionnaire de faible puissance pour le petit électroménager, (éclairage, froid, télévision).

## 3. Technologies et domaines d'utilisations des générateurs solaires photovoltaïques autonomes :

### 3.1. Générateur Autonome ou « stand-alone » :

L'installation photovoltaïque autonome est composée des éléments présentés sur la figure4

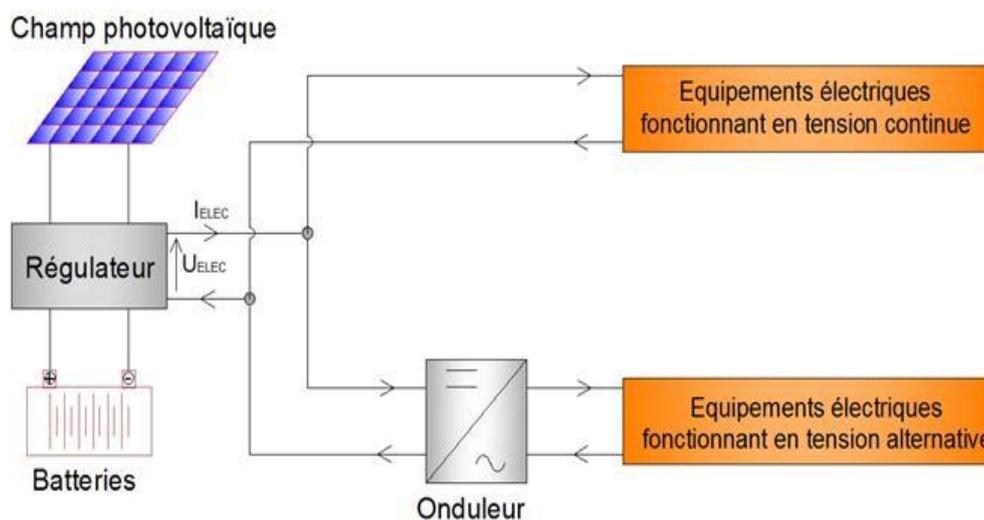


FIGURE 4 : GENERATEUR AUTONOME OU (STAND ALONE)[7]

Le générateur photovoltaïque autonome comprend 5 sous-ensembles (dont 2 optionnels) :

- Le champ de modules PV produit l'énergie.
- L'armoire de régulation gère le système.
- Le parc de batteries stocke l'énergie (absent sur les systèmes au fil du soleil).
- L'onduleur transforme l'énergie.
- Le chargeur (optionnel) permet de recharger la batterie à partir d'un groupe électrogène d'appoint.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

## 3.2. La cellule photovoltaïque :

L'électricité créée, par un processus appelé « effet photovoltaïque » a été découverte par E. Becquerel en 1839 [8]. Composants optoélectroniques, ils transforment la lumière solaire en électricité, permettant ainsi de convertir l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Ceci s'effectue par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. En pratique les cellules solaires ne sont rien d'autres que des jonctions PN fabriquées à partir des semi-conducteurs avec des caractéristiques, notamment électriques, modulées selon des dopages en utilisant des éléments chimiques bien choisis selon nous montre la Figure 5.

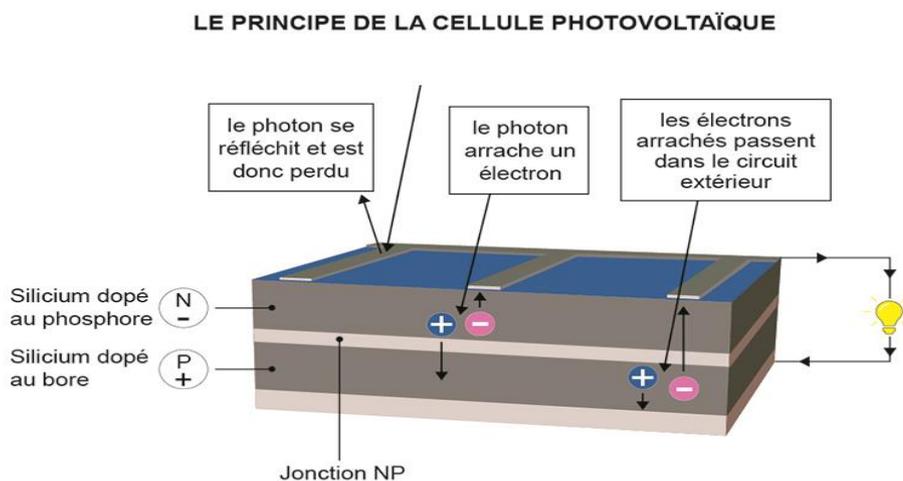


FIGURE 5 : SCHEMA ELEMENTAIRE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE[9]

## 3.3. Technologies des cellules solaires :

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium, semi-conducteur de type IV. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature. On utilise également l'arséniure de gallium et des couches minces comme le CdTe (tellure de cadmium) et le CIS (cuivre-indium-di sélénium) [10]. Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- Les cellules monocristallines
- Les cellules poly cristallines
- Les cellules amorphes

Le tableau suivant présente les rendements typiques et théoriques que l'on peut obtenir avec ces différentes technologies.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

Technologie	Rendement typique (%)	Rendement théorique (%)
Monocristallin	12-16	24
Polycristallin	11-13	18.6
amorphe	5-10	12.7

TABLEAU 1 : RENDEMENTS DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES

### 3.3.1. Cellules monocristallines :

Ce sont les premières photopiles élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées. Leur rendement est de 12 à 16% (Tableau 1). Néanmoins, elles présentent un coût de production très élevé[10].

### 3.3.2. Cellules multi cristallines ou poly cristallines :

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes. Leur rendement est de l'ordre de 11 à 13% (Tableau 1). Mais elles engendrent un coût de production moins élevé que les cellules monocristallines.

### 3.3.3. Cellules amorphes :

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10% (Tableau 1), plus bas que celui des cellules cristallines mais le courant produit est relativement bon marché. Elles sont appliquées dans les petits produits de consommations telles que les montres et calculatrices, mais peu utilisées dans le cadre des installations solaires. Cependant, elles ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et à la lumière fluorescente et donc, elles sont plus performantes à une température élevée .

### 3.3.4. Fabrication d'une cellule classique à base de silicium :

Classiquement, on part d'un substrat (une tranche de silicium cristallin) pour fabriquer une cellule solaire. Le coût de fabrication des substrats représente 40 à 50% des coûts finaux de production des modules. La fabrication des cellules représente pour sa part 15 à 20% de ces coûts finaux. Elle nécessite une succession de plusieurs opérations avant d'arriver à une cellule ayant la structure comme on le voit sur présentés sur la Figure6.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

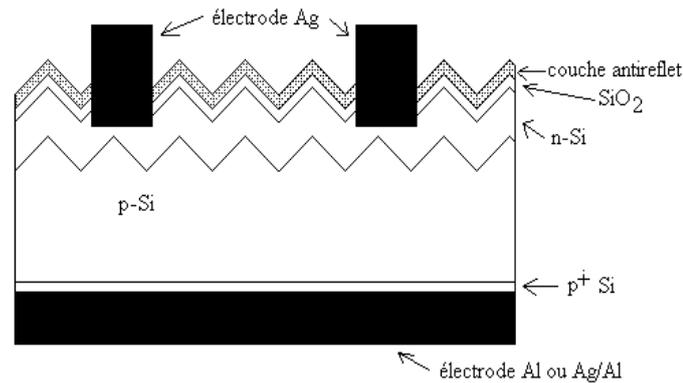


FIGURE 6 : COUPE TRANSVERSALE D'UNE CELLULE SOLAIRE CLASSIQUE[11]

Dans une production courante, les étapes suivantes sont normalement effectuées :

- Élimination des dégâts de découpe.
- Texturation.
- Diffusion de l'émetteur.
- Passivation de la surface de l'émetteur.
- Dépôt d'une couche antireflet.
- Création d'une jonction P-P+ à l'arrière.
- Pose des contacts métalliques.

D'autres opérations peuvent être effectuées pour les applications où le coût de production est moins critique (spatial). Nous nous contenterons ici des opérations courantes. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi conducteurs capable de convertir directement la lumière en électricité, ces cellules sont des unités de base d'un système photovoltaïque.

## 3.4. Le module photovoltaïque :

Les modules photovoltaïques sont plutôt appelées « panneaux Photovoltaïques ».pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module selon la Figure7.

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière de polyéthylène.la figure 7 présente une coupe dans une cellule PV.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

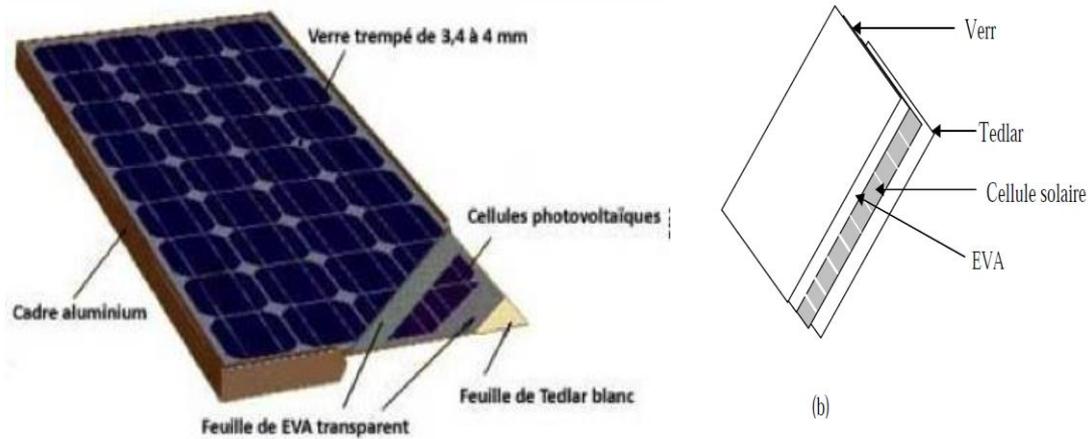


FIGURE 7 : MODULE PHOTOVOLTAÏQUE[12]

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles, ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au Soleil ne se décharge Figure8[13].

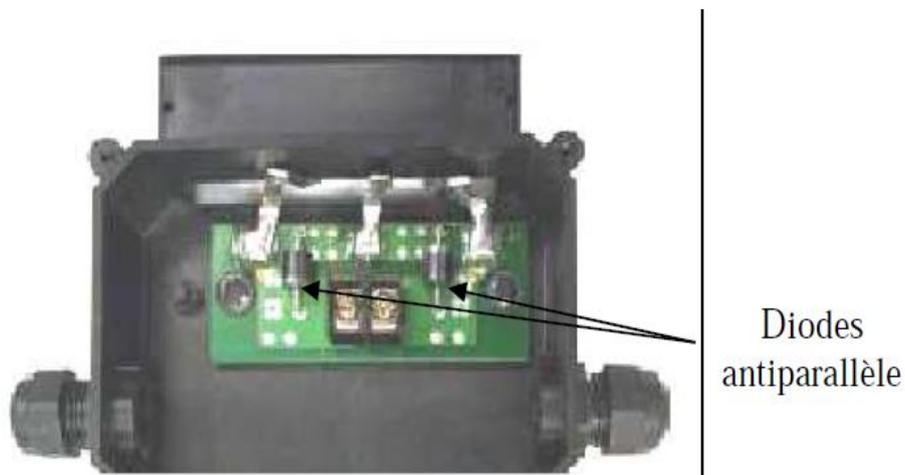


FIGURE 8 : BOITE DE JONCTION [14]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium mono cristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin ou multi cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24, ou 48V) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt-crête :

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal)[14]. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [15].

## 3.4.1. Caractéristiques d'un module [8] :

- La puissance crête  $P_c$ : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Diodes antiparallèles
- Tension à vide,  $V_{c0}$  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant pour un éclairement «plein soleil».
- Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement «plein soleil».
- Point de fonctionnement optimum, ( $U_m$ ,  $I_m$ ), lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil :

$$P_m = U_m * I_m \dots\dots\dots(1)$$

- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :

$$V_{c0} * I_{cc} \dots\dots\dots(2)$$

## 3.5. Le panneau solaire :

Le module est appelé « une branche » tandis que l'ensemble des branches connectées entre-elles est appelée « champ photovoltaïque ». Les panneaux solaires ou (champ solaire) se composent de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. Comme l'illustre Figure 9.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque



**FIGURE 9 : PANNEAU SOLAIRE [16]**

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tout, comme l'illustre la Figure10. Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



**FIGURE 10 : BOITE DE DERIVATION [17]**

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes Schottky séries, placées sur un radiateur sur chaque entrée qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses en parallèle sur chaque fusible de protection.
- Ces diodes permettent de contrôler individuellement chaque branche de modules.

Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules. Elles sont équipées de deux à douze entrées selon les tensions de sortie. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- Des besoins en électricité.
- De la taille du panneau.
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- De la saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage.

## 3.6. Système de stockage :

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales[18]:

Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple).

Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV. Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :

Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

La durée de vie : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y a une durée de vie totale exprimée en année ( ou en nombre de cycles)[19].

Profondeur de décharge : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries sont de type "cycle profond".

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

Fabriquées pour les applications photovoltaïques, elles sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucun dommage.

La profondeur de décharge affecte même les batteries de type cycle profond. En effet, plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite. La tension d'utilisation est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

Le rendement est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur, Le taux d'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

## 3.7. Types d'accumulateurs :

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, étant donné que les puissances rencontrées sont inférieures au MW, l'unique stockage d'énergie électrique possible actuel est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont [20] les accumulateurs au plomb acide. La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [21].

### 3.7.1. Composition d'une batterie solaire plomb-Acide :

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique, la plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille, la solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte. Comme l'illustre Figure 11.

- |                     |                      |                       |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| (1) Grille          | (4) Plaque négative  | (7) Élément complet   |
| (2) Séparateur      | (5) Barrette         | (8) Pont              |
| (3) Plaque positive | (6) Faisceau négatif | (9) Rampe de bouchons |

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

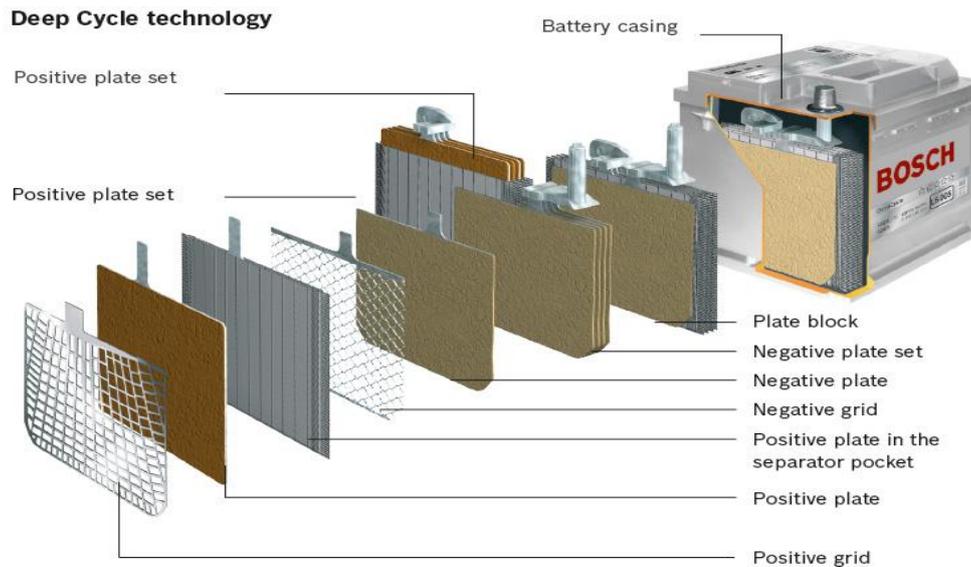


FIGURE 11 : CONSTRUCTION D'UNE BATTERIE MONOBLOC [22]

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie. . Normalement l'alliage est en plomb avec 2-6% d'antimoine. Moins la contenance en antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge. D'une part, une petite quantité d'antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb-Antimoine sont de type "cycle profond".

Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, et réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation. Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée à partir de 25%. Les batteries de plomb-Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux permettant le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs et peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées. Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes". Les enveloppes sont

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

des manchons ouverts par en haut qui sont uniquement placés sur les plaques positives. Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément".

Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une cellule» de batterie. Des plaques plus grandes ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir. Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1 et 7V. A partir de 2 volts l'état de charge en conduction est nominale, et avec un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%. (pour plomb- Acide) Une batterie est constituée de plusieurs cellules ou d'éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie. Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire d'un support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage du niveau de l'électrolyte.

Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnées de manière à avoir une chute de tension très faible quelque soit le régime[5].

## **3.7.2. Principe de fonctionnement :**

Une réaction chimique se produit lorsque la batterie alimente une charge connectée à ses deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation de la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et une réduction de la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes.

## **3.7.3. Les Accumulateurs au Nickel- cadmium :**

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb- Acide. Au lieu du Plomb elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts par élément suivant l'état de charge.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanation toxique à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas le gel.

## **3.8. Système de régulation :**

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit. Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-régler : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs.

### **3.8.1. Régulation de la décharge :**

Régulation de la décharge s'effectue par un comparateur qui comme son nom l'indique compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-régler bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête la décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil bas.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

## 3.8.2. Régulation de la charge :

La régulation de la charge s'effectue lors d'une réduction du courant de la batterie chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge. Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb.

## 3.8.3. Régulation de la charge série :

Le principe consiste à intercaler entre le panneau PV et la batterie un dispositif qui module le courant. Le dispositif fonctionne de la manière suivante :

Tant que la tension  $U_{bat}$  aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener  $U_Z$ , le courant délivré par le panneau de charge à la batterie à travers un transistor se bloque, et le courant ne passe qu'à travers la résistance.

## 3.8.4. Régulateur de charge de coupure :

Ce régulateur comporte un relais qui connecte et déconnecte le générateur PV à deux seuils différents et qui sont commandés par une unité de contrôle. Ils mesurent en permanence la tension aux bornes de la batterie. Comme l'illustre la Figure 12.

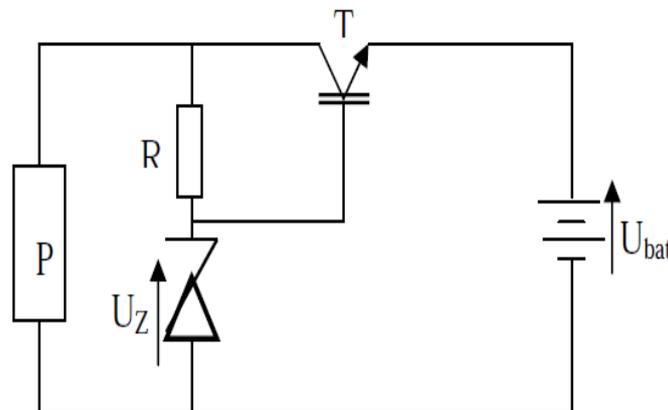


FIGURE 12 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REGULATEUR DE CHARGE SERIE [23]

## 3.8.5. Régulateur de charge à découpage :

Ce type de régulateur utilise un convertisseur continu-continu qui délivre à la batterie sa tension de floating chaque fois que la tension de la batterie atteint le seuil haut.

## 3.8.6. Régulateur de charge série à coupure partielle :

Ce type de régulateur permet de fractionner le panneau PV en deux parties. Chacune délivre une même tension selon le principe suivant, une partie du panneau charge la batterie à travers un régulateur de charge série à coupure tant que l'autre partie est branchée directement pour la charge de la batterie en permanence.

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

## 3.8.7. Régulateur de charge parallèle :

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire. Il permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissances selon le principe suivant[23]. Lorsque la tension de la batterie est faible, le transistor T est bloqué, le courant et la tension aux bornes de la résistance est faible alors tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente brusquement, le transistor T devient passant et il délivre une partie du courant de charge. Comme l'illustrent les Figures[13,14].

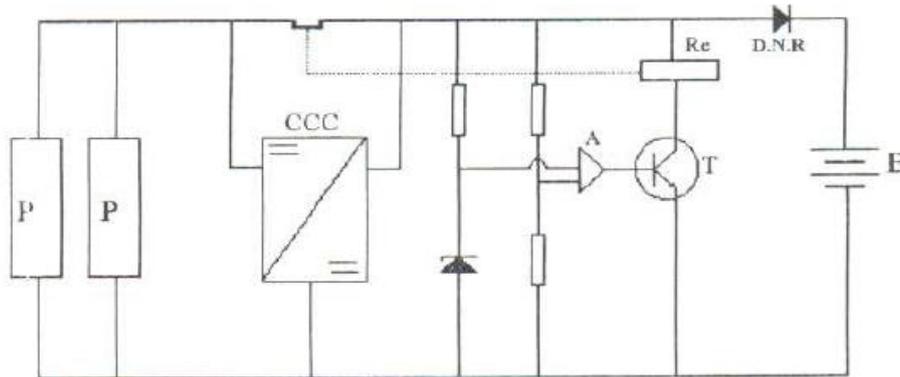


FIGURE 13 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REGULATEUR DE CHARGE PARALLELE

du courant de charge.

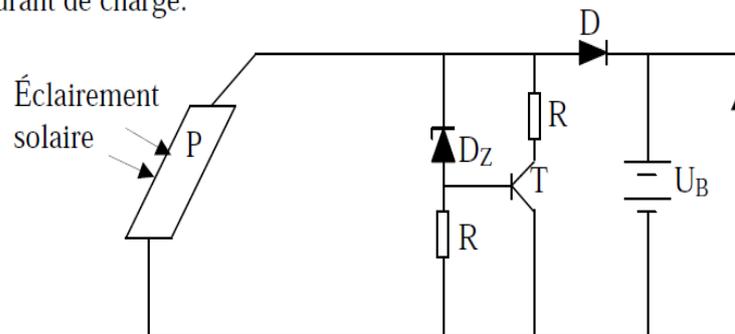


FIGURE 14 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REGULATEUR DE CHARGE A DECOUPAGE[23]

## 3.9. Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement :

Soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continue),

Soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter l'installation en continu en cas de longue période sans soleil[23].

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

## 3.9.1. Le convertisseur continu–continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%. Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

## 3.9.2. Le convertisseur continu-alternatif :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

Rotatif : c'est un moteur à courant continu.

Couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont la simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont la cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

Statique : on le désigne sous le nom d'onduleur.

C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale [24]. Avec ce système, on obtient un rendement élevé sur une plage du taux de charge, de faibles pertes à vide.

La Figure 16 suivante illustre un onduleur triphasé autonome à fréquence variable à commutation forcée de type MLI (modélisation, de largeur d'impulsion) opéré en source de tension. Il est alimenté à partir de la tension continue générée conjointement par le redresseur et le hacheur série, il est réalisé à base de transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Le choix de ce type de composant relève, d'une part de sa particularité à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de KHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tous les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors. Comme l'illustre la Figure 15.



# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

## 3.11.2. Fixation des panneaux :

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes :

- Maintient de l'orientation.
- Résistance contre le vent et les autres intempéries.
- Résistance contre les agressions mécaniques.
- Protection contre les salissures, et agressions venant du sol.
- Ventilation des panneaux afin de limiter leur échauffement.

## 3.11.3. L'orientation des panneaux :

L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). L'inclinaison des panneaux n'est pas critique. On la prend en général égale à la latitude, avec une tolérance de  $15^\circ$ . La hauteur maximale du soleil variant au cours de l'année, on choisira une inclinaison supérieure ou inférieure à la latitude suivant que les besoins sont les plus importants lorsque la course du soleil est basse (éclairage, besoins importants en hiver dans l'hémisphère nord) ou haute (irrigation) [27]. Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à  $10^\circ$  pour assurer une auto nettoyage lors de pluies [28].

Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, la présence des pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques à concentration où seul le rayonnement direct est concentré sur la surface active. Il arrive cependant qu'il soit impossible d'installer le panneau exactement face au sud.

## 3.11.4. Câblage électrique :

Ils seront à l'extérieur, exposés au vent, au gel, au soleil et autres agressions. Il est strictement nécessaire d'utiliser des câbles adaptés à des sections (diamètre) suffisantes. [29]

Nous allons d'abord effectuer un branchement par un câble électrique qui sera un câble de qualité par exemple, il devra subir les agressions du vent, de la pluie, du soleil, du gel, croissance marines et autres. La section sera d'au moins  $1.5 \text{ mm}^2$ ,  $2.5 \text{ mm}^2$  dès que la longueur excède 25m ou que la puissance du module soit supérieure à 100W [30].

## 3.11.5. Câblage de liaison :

Il se trouve entre les modules et le régulateur, il doit être d'une section d'au moins  $2.5 \text{ mm}^2$  ou plus si la longueur excède 15cm. Pour une intensité inférieure à 4A, sa section sera calculée de façon à ne pas avoir plus de 6% de chute de tension.

## 4. Différents domaines d'application :

Domaine spatial, l'habitation isolée, l'industrie isolée, la résidence urbaine et les biens de consommation. C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

Le spectre du rayonnement solaire étant différent en dehors de l'atmosphère, on utilise pour les cellules et les modules spatiaux d'autres matériaux plus sensibles dans les ultra violets et plus résistants aux rayonnements et aux bombardements divers (UV, électrons, protons, ions).

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que :

- Le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation,
- La réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,
- L'éclairage (lampe portable, éclairage public, électrification villageoise, ...).

## 4.1. Industrie isolée :

La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication, ...). Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible.

## 4.2. Résidence urbaine :

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

## 4.3. Biens de consommation :

L'électronique moderne requiert de très petites puissances, du milliwatt à la dizaine de Watt, de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc, sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative. [23]

## 4.4. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

### **Avantage :**

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt. Le coût de

# Chapitre I : État de l'art des capteurs photovoltaïque

---

fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu naturel, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable

## **Inconvénients :**

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel, elles le sont que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées. Tributaire des conditions météorologiques. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur. Le moindre obstacle sur votre installation (amas de poussière, neige, branches d'arbre, ombre, etc.) provoque l'arrêt total de la production d'énergie de votre installation. C'est d'ailleurs un des plus gros problèmes qui existe à l'heure actuelle. Le système administratif pour recevoir les aides est très lourd[23].

## **5. Conclusion :**

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire devient inéluctable pour les années à venir. La technologie actuelle apporte des solutions viables et opérationnelles mais elle nécessite une amélioration considérable afin de concurrencer à même échelle les énergies fossiles, voire primaires. C'est pourquoi le générateur photovoltaïque de part ses caractéristiques technologiques et son potentiel technique montre que ce système a un avenir certain.

Afin de mettre en lumière cette technologie, nous avons abordé l'état de l'art du générateur photovoltaïque autonome, ses caractérisations et sa technologie actuelle. Le choix de l'emplacement dans la mise en œuvre de la production d'énergie solaire est l'élément déterminant pour sa réussite, c'est pourquoi l'étude de l'ensoleillement pour le choix géographique influera automatiquement sur le coût de réalisation.

L'étude des panneaux solaires, son implantation, sa réalisation et son assemblage ont montré une multitude d'inconvénients, en premier lieu le rendement. En effet, plus le rendement est faible et plus le système devient peu concurrentiel de part l'augmentation de sa taille, du nombre de panneaux pour une production équivalente.

---

Chapitre II :  
État de l'art des capteurs thermiques

---

# Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

## 1. Introduction :

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques : les effets de serre et du corps noir. La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour[31] :

- Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.
- Activer la croissance des végétaux.
- Sécher les grains et les fourrages.
- Faire fonctionner des moteurs thermiques.
- Alimenter des machines de réfrigération.

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 . Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur sur la périphérie du capteur.[32] Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système thermique « d'un capteur plan » et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant. [33]

## 2. Généralités :

Les capteurs solaires thermiques permettent la production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Ils sont composés d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant, d'un système de refroidissement à l'aide d'un fluide caloporteur (air ou liquide), d'un isolant thermique latéralement et en sous-face, le plus souvent d'une couverture transparente (en face avant et exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre, et éventuellement d'un coffrage étanche à l'eau et d'un système de support mécanique de l'ensemble[32].

L'énergie solaire récupérée par le capteur solaire est transformée en énergie thermique et est cédée au fluide caloporteur (air ou eau). Cette énergie thermique peut être transférée vers un réservoir de stockage d'énergie ou utilisée directement. Ce transfert se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée du fluide. Les principaux types de capteurs solaires indépendamment du fluide caloporteur sont les capteurs solaires à concentration, qui ne sont pas pris en compte dans le cadre de ce travail, et les capteurs solaires thermiques plans. Ces capteurs solaires plans se distinguent par leur fonction, leur forme géométrique ou leur température d'application (Figure 17).

Il existe ainsi les capteurs solaires plans vitrés convenant mieux à des applications à température modérée (comprises entre 30 et 70 °C) tels que le chauffage de l'eau sanitaire, des piscines d'intérieur et le chauffage des bâtiments.

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

### 2.1. Gammes de températures par utilisation :

- Température très basse : 10 à 20°C :
- Cette gamme est utilisée pour le chauffage de l'eau des piscines et la climatisation.
- Basse température : 40 à 50°C :
- Elle est utilisée pour le chauffage de l'eau domestique, la climatisation, la distillation, la production d'eau douce et le séchage.
- Moyenne température : 80 à 120°C :

C'est une gamme utilisée dans la distillation pour procédé flash, la réfrigération par Absorption, production d'énergie mécanique et la production de chaleur industrielle

### 2.2. Principe de capteur thermique :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la Figure 17.

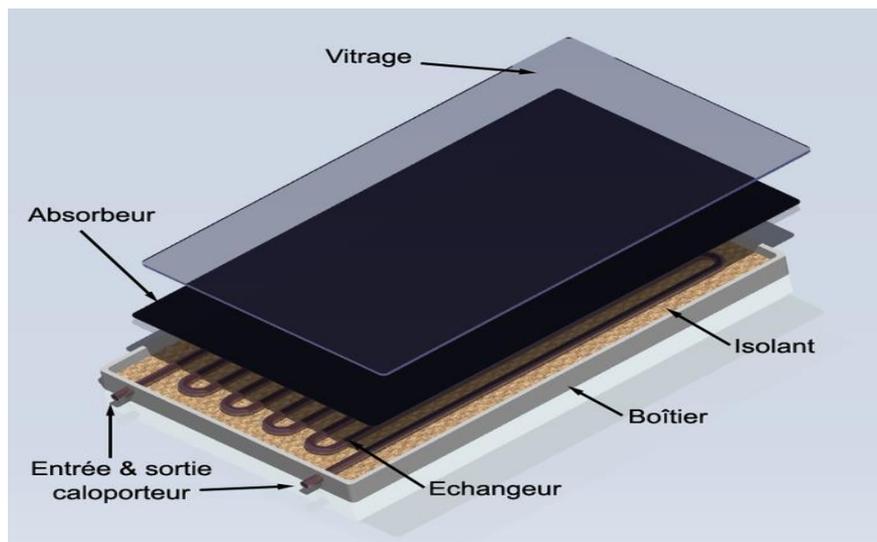


FIGURE 16 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN[35]

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur. [36]

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

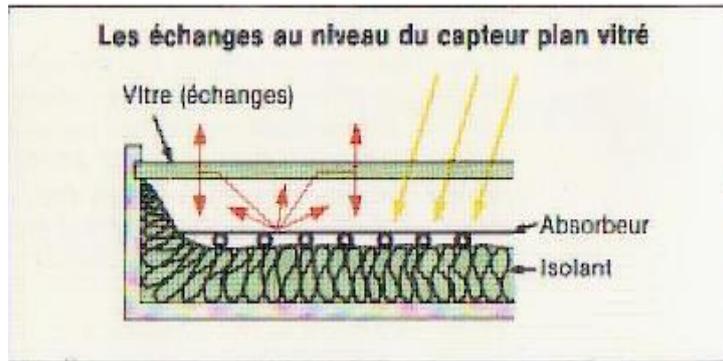


FIGURE 17 : SCHEMA D'UN CAPTEUR PLAN VITRE [37]



FIGURE 18 : SCHEMA D'UN CAPTEUR PLAN NON VITRE [37]

Légende :

- Rayonnement solaire incident
- Rayonnement réfléchi par le vitrage (couverture transparente)
- Rayonnement thermique émis par l'absorbeur
- Rayonnement thermique réfléchi par le vitrage
- Rayonnement thermique absorbé par le vitrage
- Rayonnement thermique émis par le vitrage
- Pertes thermiques latérales et inférieures par l'isolation et le cadre

### 2.3. Bilan thermique du capteur :

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$\theta_u = \theta_{sa} - \theta_p - \theta_{st} \dots \dots \dots (3)$$

Avec :

$\theta_{sa}$ : Flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur

$\theta_u$ : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

$\theta_p$ : Puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur.

$\theta_{st}$ : Puissance stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

### 2.4. Rendement :

Le rendement de surface du capteur s'écrit :

$$\eta = \frac{\theta_u}{\theta_{sa}} \dots\dots\dots (4)$$

**Remarque :** Pour un capteur à inertie thermique négligeable (faible masse des composants, faible chaleur spécifique), ou dans le cas de régime thermique permanent,  $\phi_{st} = 0$  et le rendement devient :

$$\eta = 1 - \frac{\theta_p}{\theta_{sa}} \dots\dots\dots (5)$$

Cette simple relation montre que dans la conception d'un capteur, on aura toujours intérêt à diminuer la puissance perdue et à augmenter la puissance absorbée  $\phi_{sa}$ .

### 2.5. Rendement optique :

Le rendement défini par l'équation suivante :

$$\eta_0 = \frac{\theta_{sa}}{\theta_c}$$

Où  $\theta_{sa}$  est le flux absorbé à la surface de l'absorbeur et  $\theta_c$  est le flux sur le plan du capteur.

## 3. Technologie et domaines d'utilisations des panneaux solaires thermiques :

### 3.1. Schéma général d'installation thermique :

Le capteur solaire absorbe la chaleur du soleil, un liquide caloporteur s'échauffe en passant dans le capteur puis cède ses calories à l'eau stockée dans le ballon, grâce à l'échangeur, l'eau du ballon se réchauffe.

Le liquide caloporteur ainsi refroidi remonte vers le capteur via le circulateur. L'eau chaude soutirée est remplacée immédiatement par la même quantité d'eau froide du réseau et est réchauffée à son tour par l'échangeur.

Le solaire thermique ne permettant pas de couvrir la totalité des besoins en eau chaude, un dispositif d'appoint est indispensable (résistance électrique, pompe à chaleur, chaudière existante). un régulateur pilote le bon fonctionnement thermique de l'installation.

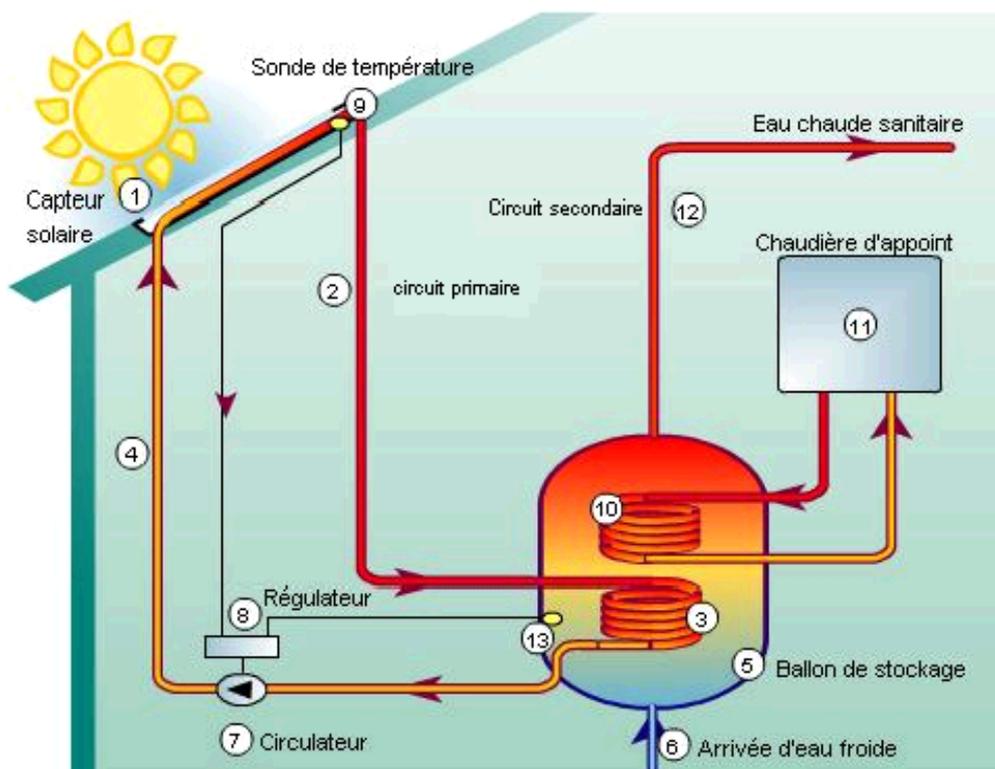


FIGURE 19 : SCHEMA GENERAL D'INSTALLATION THERMIQUE [38]

### 3.2. Les différents composants d'un capteur solaire PLAN :

Comme on peut le voir sur la figure 20, Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre.

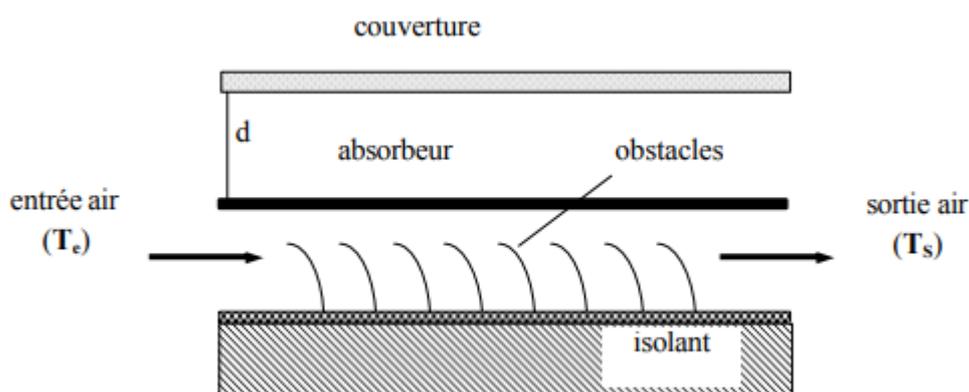


FIGURE 20 : COMPOSANTS D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN[39]

#### 3.2.1. L'absorbeur :

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur. Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le caloporteur. Le matériau

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine. L'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux[36] :

Les avantages sont :

- La légèreté.
- La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures.
- La faible sensibilité des plastiques à la corrosion.

Les inconvénients sont :

- Une mauvaise conductibilité thermique.
- Un vieillissement dû au rayonnement U.V.
- Une tenue médiocre aux températures élevées.

Dans le cas des métaux on utilise le cuivre, l'acier inoxydable, ou bien l'aluminium qui ont de bonnes conductibilités thermiques. L'absorbeur ne doit pas être trop mince, en pratique on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm. Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes, cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas.

Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact.[36]

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi qu'une faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du rayonnement I.R ( $\epsilon < 0.15$ ,  $\alpha > 0.9$ ). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir.[33]

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

### 3.2.2. Le fluide caloporteur :

Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a ces avantages suivants [33]:

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.
- Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :
- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ( $\rho C_p=1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ ) pour l'air contre  $4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$  pour l'eau.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

### 3.2.3. La couverture transparente :

C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R, permettant de réaliser un effet de serre. Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre simple ou traité qui laisse passer jusqu'à 95% de la lumière grâce à leur faible teneur en oxyde de fer.

L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de  $70^\circ\text{C}$ [40], en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur. En effet, soit un capteur exposé au rayonnement solaire, sa couverture est transparente au rayonnement visible mais opaque aux rayonnements U.V et I.R. A la surface de la terre, le rayonnement solaire est composé de 42% de rayonnement visible qui va être transmis à l'absorbeur, lequel en chauffant va réémettre du rayonnement I.R pour lequel la transmissivité de la vitre est faible ne pouvant ainsi s'échapper et qui sera en partie absorbé par la vitre qui s'échauffe et en partie réfléchi vers la plaque qui

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

elle-même s'échauffe [33][36].L'utilisation de la couverture transparente évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent.

### 3.2.4. L'isolation thermique :

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes :

- Partie avant de l'absorbeur

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [33].

- Partie arrière et latérale

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, sinon il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction[33], [41], [42].

### 3.2.5. Le coffre :

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques. Un coffre ou le boîtier constitue l'enveloppe arrière et latérale du capteur, ses fonctions sont multiples :

- la cohésion de l'ensemble ;
- la protection mécanique ;
- la fixation et l'étanchéité.

### 3.2.6. Classification des capteurs :

On peut classer les capteurs selon le fluide de travail utilisé[43]:

- Des capteurs solaires à air
- Ce type de capteurs s'adapte aux appareils de chauffage à air pour le séchage des produits agro-alimentaires et le chauffage des locaux.
- Des capteurs solaires à eau

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

Ils s'adaptent aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage (la production de l'eau chaude sanitaire). Les capteurs à eau peuvent être classés en capteurs à faible pression de circulation, tel est le cas du chauffage des piscines, à haute pression de circulation où le circuit d'eau est généralement constitué de tubes de cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.

L'eau et l'air sont les principaux fluides de travail utilisés pour les capteurs solaires plans, mais il en existe d'autres tels que les hydrocarbures qui sont utilisés pour la réfrigération et la génération d'électricité.

### 3.2.7. L'orientation des capteurs :

Les capteurs solaires peuvent être fixe ou à guidage :

- Des capteurs fixes

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, ils présentent les propriétés suivantes :

- La simplicité et la fiabilité.
- Un faible entretien.
- Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).
- L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas fixe. Son efficacité varie de jour à l'autre (à guidage).
- Des capteurs à poursuite

Le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.

### 3.2.8. Les types des composants :

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivant la couverture et l'absorbeur :

- Les capteurs solaires plans non vitrés

Ils sont constitués d'un réseau de tubes peints en noir en plastique résistant aux rayons U.V, sans couverture transparente. Ils sont essentiellement utilisés pour le chauffage de l'eau des piscines extérieures en été et assurent des températures relativement basses de l'ordre de 30 à 35°C.

- Les capteurs solaires plans vitrés

Le vitrage crée un effet de serre qui permet d'atteindre des températures de 70°C à 90°C et augmente ainsi le rendement. Le capteur solaire peut avoir une ou plusieurs couvertures transparentes.

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

L'absorbeur peut être classé suivant sa forme. On trouve :

- Les capteurs plans.
- Les capteurs à cavités.

### 3.3. Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire :

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement ces trois modes de transfert sont présentes sur la Figure 21.

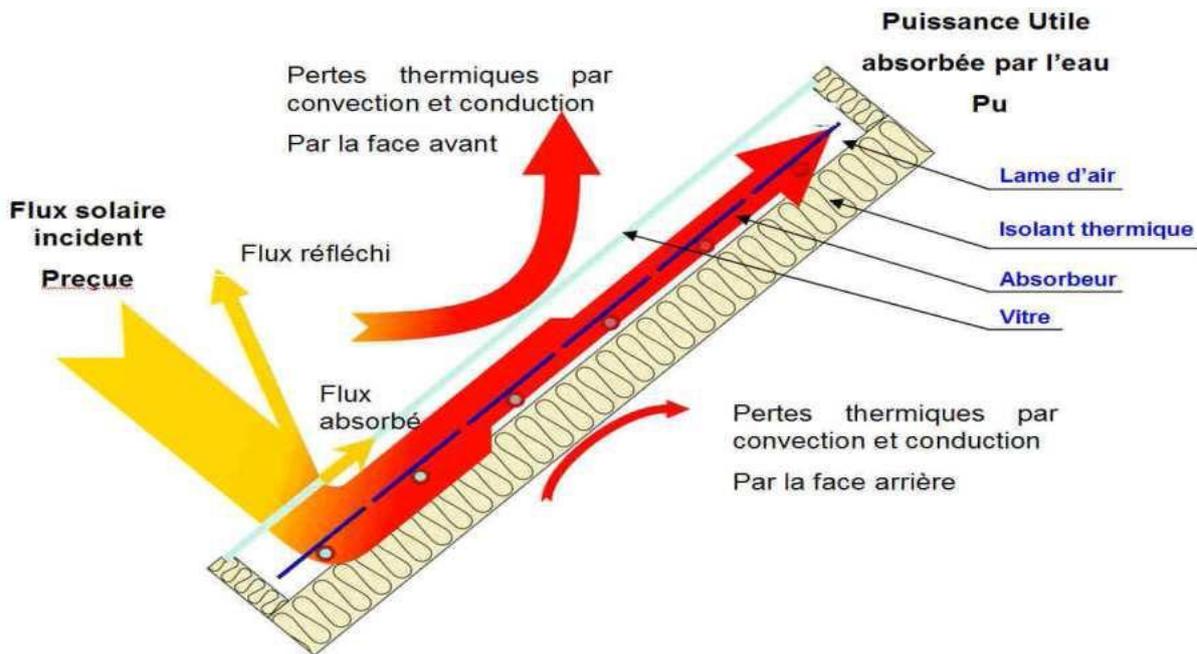


FIGURE 21 : LES DIFFERENTS ECHANGES THERMIQUES DANS UN CAPTEUR PLAN[44]

#### 3.3.1. La conduction :

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière. La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation [45]:

$$Q = -k * A * gradT \dots\dots\dots (7)$$

Q : flux de chaleur.

k : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange.

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

- Les faces supérieures et inférieure de la vitre hcv.
- Les faces supérieures et inférieure de l'isolant his.

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

- L'absorbeur et l'isolant hevai.

Le flux de chaleur par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par[46]:

$$Q_{cdai} = \frac{T_{ab} - T_{il}}{R_1} + \frac{T_{ab} - T_{il}}{R_2} \dots\dots\dots (8)$$

Avec  $R_1$  et  $R_2$  sont exprimés par :

$$R_1 = \frac{e_{ab}}{S_{abi} * k_i} + \frac{e_i}{S_{abi} * k_{ab}}$$

$$R_2 = \frac{e_{ab}}{S_{abi} * k_{il}} + \frac{e_{il}}{S_{absL} * k_{ab}} \quad (9)$$

$q_{cdai}$ : Quantité de chaleur échangée par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.

$T_{ab}$  : Température de l'absorbeur.

$T_{ii}$  : Température de la face intérieure de l'isolant.

$T_{il}$ : Température de l'isolant latéral.

$e_{ab}$ : Épaisseur de l'absorbeur.

$S_{abLi}$  : Surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

$k_i$  : Conductivité thermique de l'isolant horizontal.

$e_i$ : Épaisseur de l'isolant horizontal.

$e_{il}$ : Épaisseur de l'isolant latéral.

$k_{ab}$ : Conductivité thermique de l'absorbeur.

$k_{il}$ : Conductivité thermique de l'isolant latéral.

### 3.3.2. La convection :

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques[47]. On distingue deux types de convection :

- La convection forcée : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc.).
- La convection naturelle : Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation.
- Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton :

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

$$q = h * S * (T_p - T_f) \dots\dots\dots (10)$$

q : le flux échangé par convection.

h : coefficient de convection.

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

$T_p$  : Température de la paroi solide.

$T_f$  : Température du fluide.

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

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

### 3.3.3. Le rayonnement :

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

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [48]:

$$q = \varepsilon * \sigma * T^4 \dots\dots\dots (11)$$

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

$\varepsilon$  : Émissivité thermique du matériau, constante de Stefan-Boltzmann évaluée à  $5,6.10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>.

T : température absolue du corps.

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

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

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

### 3.4. Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan :

Le rendement d'un capteur solaire plan est influencé par différents paramètres[49].

#### 3.4.1. Les paramètres externes :

1. Les paramètres d'ensoleillement

Éclairement énergétique dû au rayonnement global. Position du soleil et durée d'insolation. L'heure de la journée et la saison. La position géographique du lieu considéré (latitude).

2. Température ambiante.

3. Vitesse du vent.

#### 3.4.2. Les paramètres internes :

Les paramètres de position :

Orientation, inclinaison et emplacement du capteur. Capteur fixe ou suiveur du soleil.

Les paramètres de construction :

Parmi lesquels nous citons, l'absorbeur, les propriétés thermo physiques et optiques. Les dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes. Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective. Épaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre. Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire). Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur. Température de l'absorbeur. La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

- La surface sélective

Propriétés optiques.

- Couverture transparente

Propriétés optiques et thermo physiques. Épaisseur. Le nombre de vitrage et la forme.

- L'isolant

Propriétés thermo physiques et optiques. Épaisseur.

- Fluide caloporteur

Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit. Température d'entrée. Propriétés thermo physiques.

#### 3.4.3. Performances d'un capteur solaire plan :

Selon[52], la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané défini par :

$$\eta_i = \frac{P_u}{A_c * G} \dots\dots\dots (12)$$

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

$P_u$ : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

$A_c$ : Surface du capteur.

G : flux solaire global incident.

### 3.4.4. Étude du capteur plan à air :

Dans le but de favoriser le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide de travail dans un capteur à air, A.Amed Zaid et Al[53] ont introduit des chicanes dans la vanne dynamique du capteur, lesquelles vont augmenter la section de passage de l'air, d'où l'augmentation du nombre de Reynolds et la création de la turbulence.



FIGURE 22 : DISPOSITION DES OBSTACLES OCL[54]



FIGURE 23 : DISPOSITION DES OBSTACLES DC[54]

Leurs résultats expérimentaux ont montré que les chicanes (TL) présentent un rendement meilleur par rapport aux chicanes (DCL), (OCL). Dans le but de minimiser les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, (Feyza Benyelles) et Al[55] ont proposé de placer un isolant " aérogel de silice " au dessus de l'absorbeur comme le montre la Figure 25.D-3.

Les auteurs ont choisi l'aérogel de silice pour ses propriétés. C'est un matériau solide à basse densité variant de 80 à 270 kg/m<sup>3</sup>, transparent, poreux (porosité de 35% à 90%). Son indice de réfraction est compris entre 1.2 à 1.05. Pour une épaisseur de l'ordre de 20mm, la

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

transmittance solaire normale est de 90%. Sa conductivité thermique est de l'ordre de 0.02W/m. K.

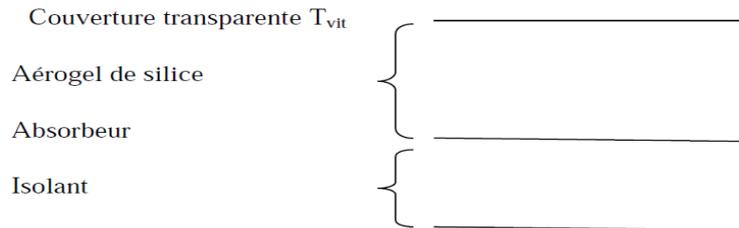


FIGURE 24 : INSERTION D'UN AEROGEL DE SILICE

Plusieurs capteurs dans les mêmes conditions expérimentales ont été comparés :

- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur sélectif.
- Capteur double vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif muni d'un isolant à aérogel de silice.

Les auteurs ont trouvé que la température de la vitre d'un capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif peut atteindre 50°C, alors qu'elle n'atteint que 20 °C pour un absorbeur muni d'un isolant aérogel de silice. En outre, le coefficient de pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, dans ce cas est minime. Ils ont déduit que l'aérogel de silice est un super isolant transparent de la face avant du capteur, et contribue ainsi à l'amélioration du rendement du capteur solaire. Vu que le coefficient d'échange thermique de l'absorbeur pour les capteurs solaires à air est plus faible que celui des capteurs à l'eau. F.Mokhtari et Al ont mené une étude expérimentale dans le but d'améliorer le contact plaque chauffante-air. Les auteurs ont étudié trois configurations différentes [56] du capteur solaire à air :

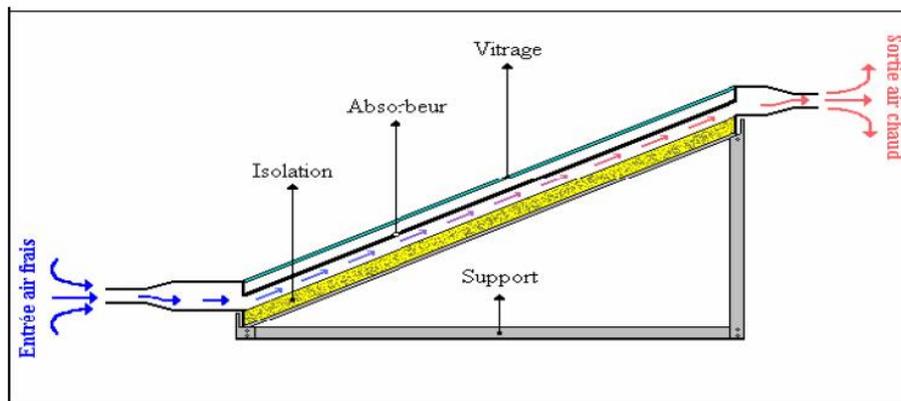


FIGURE 25 : CONFIGURATION 1

**Configuration 1** : l'air à chauffer passe sous l'absorbeur

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

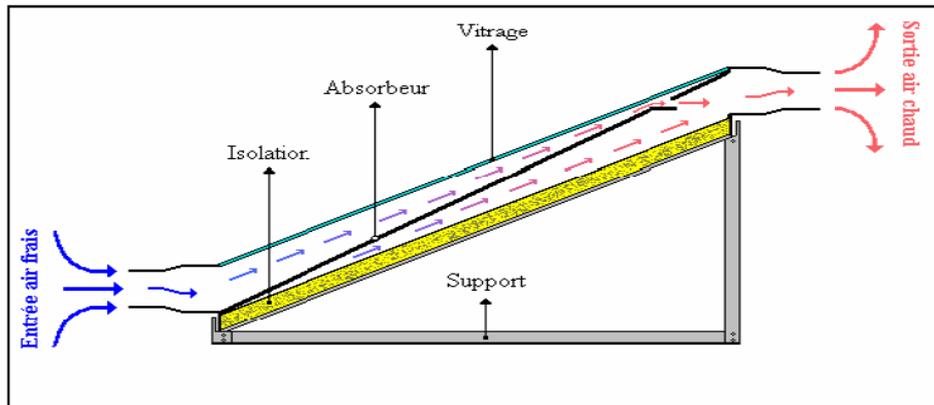


FIGURE 26 : CONFIGURATION 2

**Configuration 2** : la plaque absorbante est placée sur la diagonale du capteur entre la couverture et l'isolant, l'entrée de l'air se trouve au dessus de l'absorbeur tandis que la sortie est située sous l'absorbeur. Elle est munie d'un orifice de section rectangulaire pour permettre l'évacuation de l'air chaud.

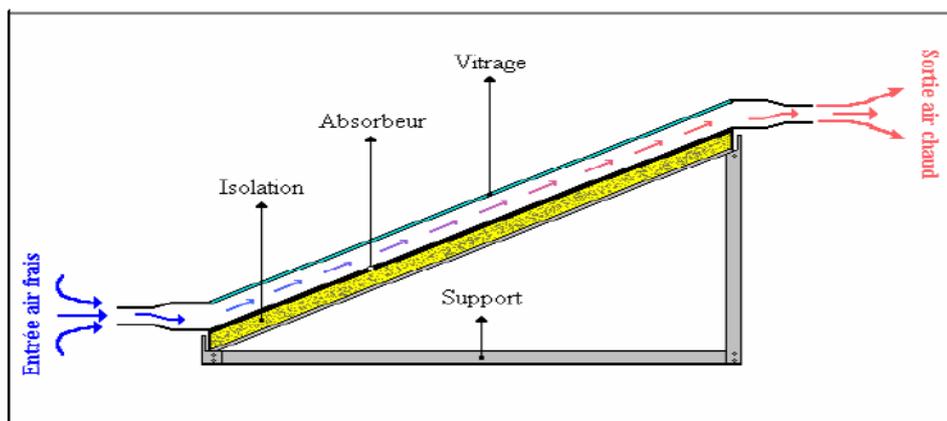


FIGURE 27 : CONFIGURATION 3

**Configuration 3** : le passage de l'air se trouve entre la vitre et la plaque absorbante au dessus de celle-ci.

D'après les résultats expérimentaux trouvés, le transfert thermique est important quand il y a contact direct entre la plaque et l'air couplé à une double circulation de l'air, c'est donc la deuxième configuration qui a donné les meilleurs résultats.[56]

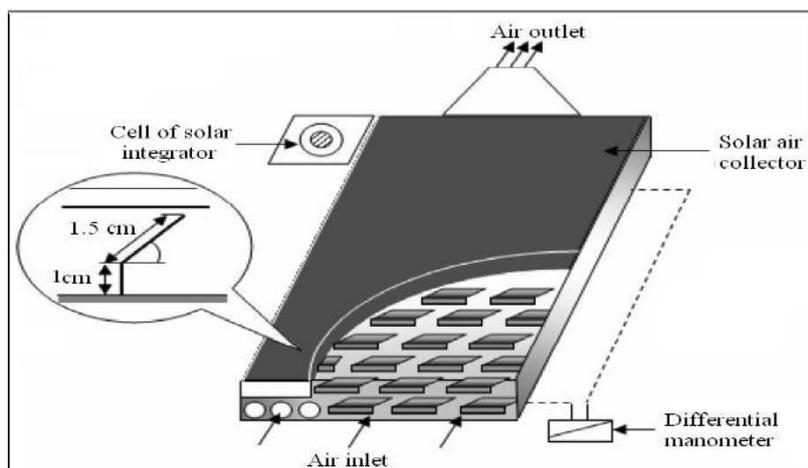


FIGURE 28 : DISPOSITION EXPERIMENTALE

Dans le but d'améliorer les performances des capteurs solaires à air, K. Aoues et al [57] ont introduit dans la veine d'air mobile des chicaneuses qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur. Elles permettent de rendre turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chaude. Elles prolongent le parcours du fluide caloporteur. Le dispositif expérimental est illustré par la (figure 28).

#### 4. Exemple d'application : capteur plan à eau :

De nombreux auteurs ont porté un intérêt particulier aux paramètres opérationnels mis en jeu afin d'améliorer les performances thermiques du capteur solaire plan.

##### 4.1. Étude des capteurs solaires plans à eau :

N.Bellel et al [58] ont étudié théoriquement un capteur solaire plan à eau simple pour comparer deux configurations du réseau du fluide caloporteur, il s'agit d'un réseau en forme d'un serpentin et un autre en série. Les auteurs ont validé les résultats obtenus théoriquement par un travail expérimental, et ont trouvé un écart de 10% estimé satisfaisant. Après une étude comparative entre les deux configurations, les auteurs ont déduit que le capteur muni d'un réseau en serpentin est plus performant que celui muni d'un réseau de tubes en série.

H.Abdi et Al ont mené des travaux expérimental et théorique afin d'étudier l'effet de la forme géométrique du passage du fluide sur l'efficacité des capteurs dans le cas d'un contact direct eau-plaque absorbante. Les auteurs ont utilisé deux configurations [59] de la plaque absorbante illustré par la Figure 29 l'une concave et l'autre convexe. Les dimensions du passage du fluide sont choisies de façon à avoir le même diamètre hydraulique par les deux configurations.

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

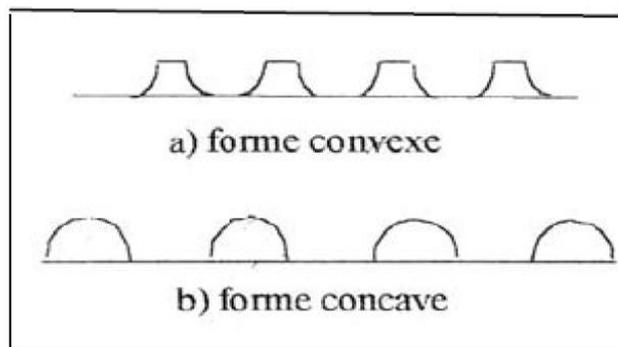


FIGURE 29 : FORMES GEOMETRIQUES DES PLAQUES ABSORBANTES

Ce travail a permis de conclure que le rendement du capteur dépend en plus des paramètres habituels (conditions extérieures, caractéristiques thermiques), des formes géométriques des plaques absorbantes. Le capteur muni d'une plaque absorbante de forme convexe donne un meilleur rendement.

### 4.2. Domain D'utilisation :

Il existe actuellement en Europe un grand nombre de systèmes thermiques solaires, leur utilisation a commencé en 1993, leur taux de croissance annuelle est de 15% par an. Les applications les plus courantes sont le chauffe-eau solaire (des hôtels, des hôpitaux,...), le chauffage se fait, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère), le chauffage des piscines, le refroidissement de l'air ou de système remplaçant le chauffage (au lieu de l'air conditionné), le dessalement de l'eau de mer dans les endroits où l'eau potable est rare.

#### 4.2.1. Différents types de capteurs et leur domaine d'utilisation :

**Capteurs à tubes sous vide :** fournissant un fluide (frigorigène en général) à d'assez hautes températures, capteurs surtout destinés à des installations spécifiques.

Gamme de températures :  $30^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$

Applications : Chauffage d'eau sanitaire, chauffage des locaux, climatisation solaire.

Capteurs sans vitrage :

Gamme de températures :  $T < 30^{\circ}\text{C}$

Applications : Chauffage piscines, préchauffage de l'eau sanitaire.

Capteur solaire plan :

Gamme de températures  $30^{\circ}\text{C} < T < 75^{\circ}\text{C}$

Applications : Chauffage d'eau sanitaire, chauffage des locaux.

**Capteurs plans à eau :** les plus courants, utilisés surtout dans les services d'eau chaude, plus rarement en chauffage à eau chaude.

**Capteurs plans à air :** servant à réchauffer l'air dans les systèmes de chauffage à air chaud .

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

### 4.3. Avantages et inconvénients des capteurs plans :

#### Avantage :

- Du fait de leur relative simplicité, les panneaux solaires thermiques plans ont un prix relativement abordable.
- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions. Ils peuvent
- même être construits par des personnes un peu "bricoleuses", ce qui permet d'en réduire encore le coût.
- Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières.
- La main d'œuvre ne nécessite qu'une formation complémentaire aisément maîtrisable.
- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.
- Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles.
- Le soleil fournit une alimentation quasi illimitée en énergie solaire.
- L'utilisation de l'énergie solaire supplante l'énergie classique. Cela permet de diminuer de façon significative les émissions des gaz à effet de serre.
- Les capteurs à tubes sont moins sensibles à une exposition imparfaite, et réagissent mieux à un ensoleillement diffus ; ainsi ont-ils un bon rendement même en hiver, période où on a le plus besoin de chauffage.[60]

#### Inconvénients :

- L'énergie solaire est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons.
- Les panneaux solaires ne sont pas auto-suffisants : ils ne permettent en général de couvrir qu'une partie des besoins d'une famille en eau et chauffage ; en complément, il faut donc prévoir un autre moyen de chauffage.
- C'est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée ; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).
- Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...),
- Les entreprises ont tendance à surfacturer le matériel dans bien des cas.

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

- L'essor de cette technologie est très dépendant des subventions et des aides diverses.
- Les panneaux solaires thermiques à tubes restent cher (mais plus performants).
- Les panneaux thermiques ne permettent pas de produire d'électricité : ils ne peuvent être utilisés que pour l'eau chaude et le chauffage.
- Comme pour le photovoltaïque, les panneaux noirs des panneaux thermiques ne sont pas toujours esthétiques, notamment sur des bâtiments non modernes.[60]

### 5. Conclusion :

L'étude des capteurs solaires thermiques met en avant l'existence de deux technologies principales qui s'opposent, les capteurs solaires plans et les capteurs solaires à tubes sous vide. Elles s'opposent de part leurs structures mais elles se rejoignent dans leur fonctionnalité et la course incessante dans l'amélioration de leurs performances respectives.

Les domaines d'application sont variés mais sa principale utilisation concerne le chauffe eau solaire, du fait de sa rentabilité et sa faible évolution en besoin saisonnier. En effet, la redistribution passive des apports solaires permettent de recouvrir autour de 50% des besoins en chauffage et 75% en eau sanitaire. Il existe également comme nouvelles applications, le plancher solaire, la climatisation solaire, etc.

Les évolutions techniques sont nécessaires afin d'améliorer leurs performances (rendement), plusieurs pistes de recherche sont actuellement à l'étude telles que :

- L'utilisation d'absorbeurs traités au chrome afin de réduire le rayonnement infrarouge et ainsi réduire les déperditions de nuit.
- Le traitement des vitres pour améliorer sa transparence, la mise en place d'un antireflet pour augmenter la transmission solaire.
- Introduction d'isolation thermique à l'arrière des capteurs pour réduire les déperditions.
- L'amélioration des caractéristiques techniques des capteurs.
- L'augmentation du rendement optique
- La diminution des pertes par convection et conduction
- La diminution des pertes de rayonnement
- L'amélioration de la géométrie des lamelles entre l'absorbeur et la vitre.
- Choix du matériau pour l'absorbeur afin d'accroître la conductivité et réduire le coefficient de dilatation.

## Chapitre II : État de l'art des capteurs thermiques

---

- L'utilisation de revêtement sélectif afin d'augmenter l'absorption.

Il est à noter que les capteurs à air ont une inertie importante ce qui influe directement sur le rendement, notamment le débit d'air dans le capteur. Cela amène à mettre en évidence l'intérêt des absorbeurs sélectifs qui permettent une amélioration du rendement lorsque la température à l'entrée de l'air est élevée.

Selon la plage de température de fonctionnement le choix du capteur solaire est prépondérant. En effet, les résultats montrent que le choix du capteur se fera selon la courbe de rendement. Pour les basses températures, le choix se fera sur les capteurs non vitrés. Pour les moyennes températures, le choix se fera sur le capteur plan. Et pour les hautes températures, le choix se fera sur les tubes sous-vides.

Nous avons vu également que l'orientation et l'inclinaison ont une incidence directe sur les résultats en fonction de la période de l'année, de même la différence de température entre le milieu extérieur et le capteur.

Contrairement aux panneaux photovoltaïques, les capteurs thermiques ont un avantage considérable du fait de leur meilleur rendement. Cet avantage imposera les capteurs thermiques comme la norme pour les maisons basses consommations.

---

Chapitre III :  
État de l'art des capteurs hybrides

---

# Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

---

## 1. Introduction :

Le concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique consiste à superposer les deux systèmes classiques énergétiques électriques et thermiques dans une seule configuration simple. Elle est caractérisée par une combinaison séparant air et eau. [61]

Ils convertissent la radiation solaire incidente en puissance électrique et en énergie calorifique.

Le capteur PV-T est une alternative, par rapport aux modules photovoltaïques et aux capteurs thermiques plans,

On peut distinguer deux types de technologies qui sont :

- Les capteurs PV-T à air
- Les capteurs PV-T à eau

Ces capteurs ont la particularité d'améliorer le rendement de conversion solaire du système par l'utilisation d'air ou d'eau. L'installation de capteurs PV-T est identique à celle des capteurs traditionnels, ils diffèrent uniquement par le fluide qui circule dans celui-ci.

Dans ce chapitre nous décrivons le principe de fonctionnement, l'objectif de cette technologie, la conception des capteurs et leurs performances. Nous aborderons également les domaines d'applications et leurs avantages et inconvénients.

## 2. Généralité :

Les températures de service des capteurs photovoltaïques influencent directement le rendement et donc le retour sur l'investissement d'une installation. Pour améliorer le rendement il devient évident que le refroidissement des capteurs est l'une des solutions permettant cette amélioration.

C'est en partant de cette réalité que les capteurs PV-T ont vu le jour, pour tirer pleinement profit de l'installation. Le panneau solaire hybride ou capteur solaire mixte permet de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur.

Le capteur PV-T permet ainsi d'augmenter la performance effective de la partie photovoltaïque grâce au refroidissement des modules, comparé à un capteur PV traditionnel.

Les capteurs PV-T sont définis comme des capteurs à la fois photovoltaïques et thermiques. Ils convertissent la radiation solaire incidente en puissance électrique et en énergie calorifique. Ces deux énergies sont produites au travers d'un même équipement. On peut considérer pour des capteurs hybrides, un rendement total de conversion, qui est la somme du rendement thermique et du rendement électrique.

### 2.1. Historique :

Notons que la recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. En 2005, Zondag[62] propose un état de l'art sur les capteurs solaires PV/T hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV-Catapult[62]. Parmi

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

---

les premières études recensées par Zondag, certaines mettent l'accent sur l'évolution de la configuration géométrique des composants et d'autres sur les méthodes de modélisation.

Ainsi, Wolf [62] en 1976, effectue l'analyse d'un capteur solaire thermique comportant des modules PV à base de silicium et couplé à un système de stockage de chaleur.

Par la suite, l'étude réalisée par Kern et Russel en 1978 donne les principes de base des capteurs solaires employant de l'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. Hendrie, en 1982 [63] développe un modèle théorique de système PV/T hybride en se basant sur des corrélations liées à des capteurs solaires standards. En 1981, Raghuraman [62] présente des méthodes numériques permettant la prévision des performances des capteurs solaires plans PV/T à eau ou à air. Plus tard, en 1985, Cox et Raghuraman [64] développent des logiciels de simulation permettant l'étude des performances des systèmes PV/T hybrides à air, et mettent l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur les rendements thermique et électrique de ces composants solaires. En 1986, Lalovic et al [65] proposent un nouveau type de cellules amorphes a-Si transparentes comme solution économique pour la construction de modules PV.

### 2.2. Description technique du système PV/T :

- Panneau photovoltaïque « Isophoton I-75/12 ».
- Boite de jonction qui contient les deux pôles (+ et le -).
- Une plaque de verre est collée dans le cadre (en acier) du panneau par la silicone.
- Circuit hydraulique qui assure l'entrée et la sortie du fluide caloporteur entre la face arrière du Panneau photovoltaïque et la vitre au-dessous du module.

### 2.3. Principe de fonctionnement :

Les panneaux solaires hybrides sont à la fois des panneaux photovoltaïques et des panneaux solaires thermiques. C'est pour cela qu'on les appelle aussi « panneaux PV/T ». Ils produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur hydraulique, qui peut être utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire, pour chauffer une piscine et même pour le chauffage par plancher chauffant (ou radiateurs) basse température. Il s'agit donc d'une cogénération : production simultanée d'électricité et de chaleur.

Le fonctionnement d'un panneau solaire mixte photovoltaïque/thermique s'apparente à celui d'un capteur solaire thermique classique, dont le vitrage est remplacé par des cellules photovoltaïques. C'est-à-dire que le panneau est composé de petits tuyaux dans lesquels circule un antigel qui est chauffé par l'énergie solaire.

Dans un capteur solaire thermique, un isolant en sous-face permet d'éviter que cette chaleur soit dissipée, mais il n'est pas systématiquement présent dans un capteur hybride. Par ailleurs, certains fabricants optimisent le transfert de chaleur entre la face avant photovoltaïque et la circulation d'eau antigel, grâce à un échangeur thermique complètement intégré dans le panneau.[66]



## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

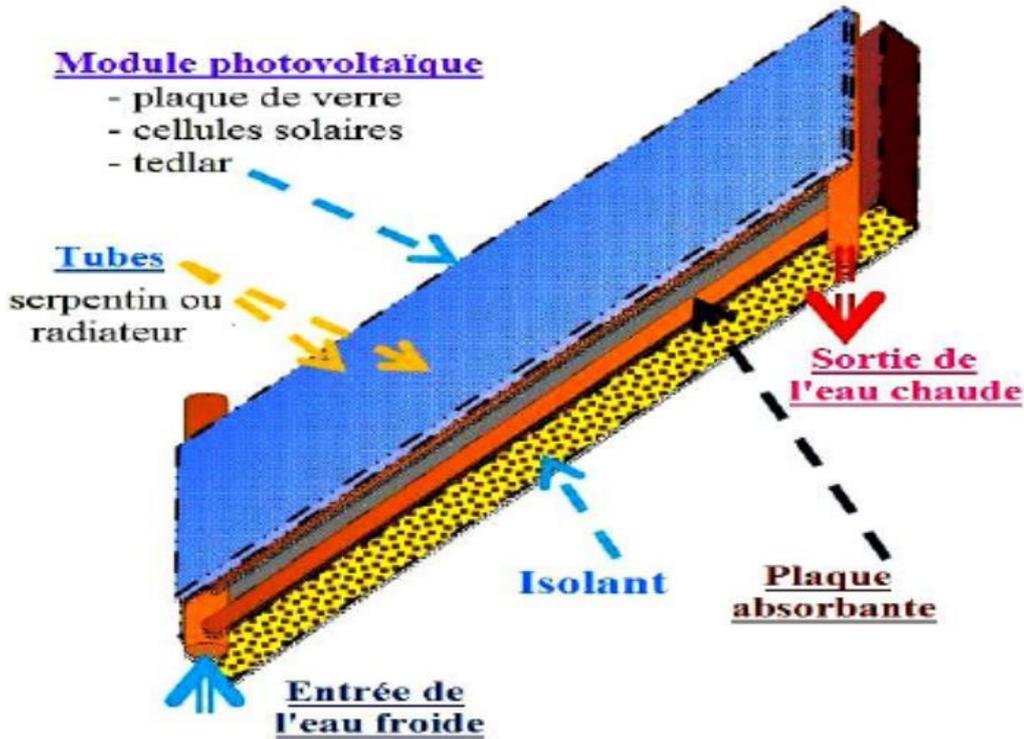


FIGURE 31 : SCHEMA DETAILLE D'UN CAPTEUR HYBRIDE[68]

Le Capteur hybride photovoltaïque-thermique se compose de verre trempé hautement transmissif, module monocristallin encapsulé un support transmissif à la lumière, et résine de jonction des modules sur l'absorbeur thermique, absorbeur thermique et collecteurs en cuivre, isolation du fond, et périmètre cadre et fond aluminium .

La mise en œuvre repose sur le même principe que les capteurs photovoltaïques traditionnels. Les capteurs sont reliés aux onduleurs de la même façon. La différence est le liquide qui circule dans le capteur permettant le refroidissement.

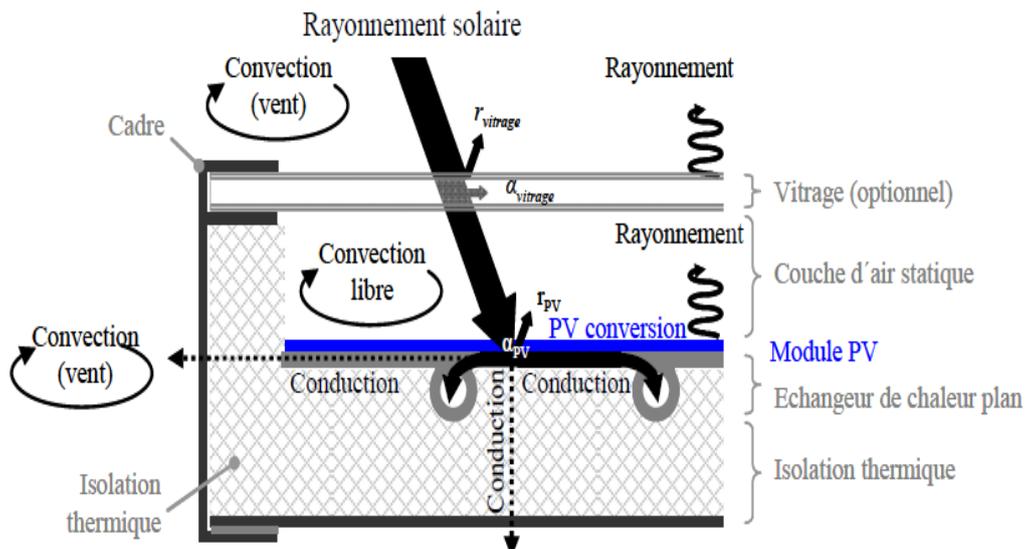


FIGURE 32 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN CAPTEUR PV-T THERMIQUE PLAN ET VITRE

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

---

L'une des applications les plus prometteuses concerne le développement de capteurs PV-T spécifiques pour le couplage avec un système d'eau chaude sanitaire [69]. En effet, bien qu'en relatif les besoins énergétiques pour l'eau chaude sanitaire soient relativement faibles pour des habitations standards (15 à 20% des besoins en chaleur) ils ne vont qu'augmenter dans les prochaines années avec l'amélioration de l'isolation thermique et de l'étanchéité à l'air des bâtiments limitant les besoins en chauffage. Les besoins en eau chaude sanitaire représentent environ 65% des besoins en chaleur d'une habitation de type passivas [70]. Pour ce type de système, le capteur PV-T doit pouvoir fournir un niveau de température d'eau chaude suffisant nécessitant la présence du vitrage entre le module et l'extérieur pour réduire les pertes thermiques. Ainsi le rendement thermique et donc le rendement global est augmenté.

Cependant, la présence de la couverture engendre une diminution sensible des performances électriques du capteur en raison du coefficient de transmission du vitrage et des plus hautes températures de fonctionnement des cellules. Un capteur non-vitré peut conduire à un meilleur rendement électrique que des modules PV standards (température de fonctionnement plus basse). Cependant, la faible température de sortie de l'eau dans le collecteur permet difficilement son utilisation directe comme eau chaude sanitaire.

Comme il a été présenté précédemment [71], les performances des capteurs PV-T sont bien en deçà des performances de capteurs thermiques standards. Ces différences sont principalement liées à des verrous technologiques soulevant des problématiques scientifiques en lien avec les propriétés des matériaux et des transferts énergétiques.

L'origine de ces différences de rendement est reliée :

- au coefficient d'absorption des cellules PV cristallines ( $\alpha \sim 0,8$  à  $0,9$ ), plus faible que celui des revêtements hautement absorbants utilisés pour les capteurs solaires thermiques ( $\alpha \sim 0,95$ ).
- à l'émissivité des modules PV ( $\varepsilon \sim 0,9$ ) plus importante que celle de la surface sélective ( $\varepsilon \sim 0,05$ ), générant des pertes thermiques plus importantes.
- à la résistance thermique additionnelle entre la partie absorbante (cellules PV) et le fluide due aux matériaux encapsulant et aux adhésifs utilisés pour la connexion mécanique du module PV et de l'échangeur de chaleur.
- et bien entendu au fait qu'une partie du rayonnement incident est convertie en électricité par les cellules PV et n'est donc pas disponible pour la production de chaleur.

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

### 4. Les types de capteurs PV-T :

Dans la pratique les capteurs PV-T peuvent être classés selon deux critères différents :

- Le type du fluide caloporteur à eau ou à air.
- La présence ou l'absence de la couverture en verre (la vitre).

En général, deux types de capteurs PV-T peuvent être distingués :

- Les collecteurs PV-T avec verre en couverts qui produisent la chaleur de haute température mais ont un rendement électrique légèrement inférieur,
- Les capteurs PV-T sans vitre qui produisent de la chaleur relativement basse température mais possèdent de hautes performances électriques [55, 56].
- Les capteurs hybrides sans vitre supplémentaire délivrent relativement de faibles températures, et doivent être combinés avec des pompes à chaleur pour chauffer l'espace environnant ou de l'eau sanitaire [57, 58]. H.A. Zondag et al. [59] ont étudié l'effet de la résistance thermique sur le rendement du capteur hybride.

#### 4.1. Les capteurs solaires PV-T à air :

Des études théoriques et expérimentales ont été menées afin de montrer l'existence de phénomènes thermiques et aérauliques au sein d'une lame d'air. D'autres études ont montré que les dimensions et la position des modules PV le long de la lame, ont une forte influence sur le comportement thermique et aéraulique du système. De ces études en est ressorti un programme de modélisation du capteur PV-T hybride afin de prédire les productivités thermique et électrique et son rendement.

Ce capteur solaire est composé d'une couverture transparente, d'un absorbeur peint en noir et d'un support arrière bien isolé, la Figure 33 représente les cellules PV collées sur l'absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive choisie pour ses bonnes propriétés de conduction thermique et d'isolation électrique.

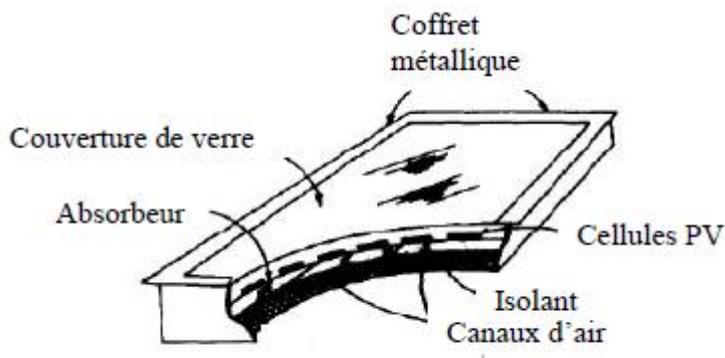


FIGURE 33 : SCHEMA DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR [77]

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

Plusieurs travaux ont été réalisés afin de déterminer les performances thermiques et électriques en fonction du type de refroidissement mécanique. Illustré par la figure 34.

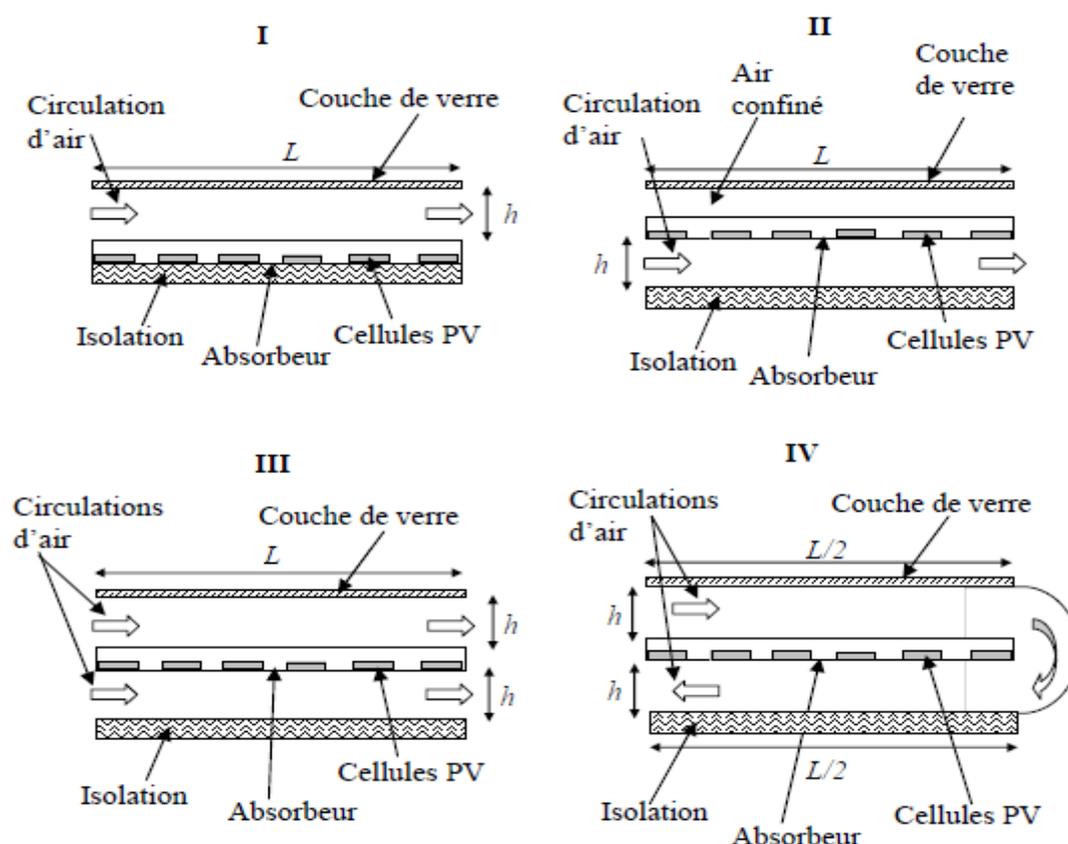


FIGURE 34: LES PROTOTYPES I, II, III ET IV DE CAPTEUR SOLAIRE PV-T A AIR [78]

Les performances du capteur solaire PV-T hybride à air dépendent de la température. L'accroissement du débit massique de ventilation améliore donc le rendement thermique.

Le prototype Ia le plus faible rendement global alors que le prototype III semble donner les meilleures performances pour un fort ensoleillement et peut être aisément assemble en usine. Les résultats obtenus ont montre de plus, que pour de faibles débits massiques de ventilation, l'utilisation d'un absorbeur sélectif est inappropriée pour ce type de capteur solaire car elle réduit la production d'énergie électrique.

Le capteur solaire a air comporte une lame d'air isolée et un absorbeur noir muni d'ailettes afin d'accroître les transferts thermiques par convection entre l'absorbeur et l'air. L'air circule mécaniquement tout d'abord à l'intérieur du capteur solaire PV entre un isolant arrière et le panneau PV, puis dans le capteur solaire à air avant d'être injecte dans le local.

Dans le cas ou les besoins en chauffage du bâtiment sont nuls, cet air est dirige vers un échangeur de chaleur en vue d'une production d'eau chaude sanitaire.

Il est constaté que ce système couvre 64.4 % des besoins en eau chaude sanitaire du bâtiment (contre 26.5 % avec le capteur solaire thermique à eau) et 35 % des besoins en chauffage pendant la période froide, illustré par la Figure 35

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides



**FIGURE 35 : CAPTEURS SOLAIRES COMBINES INTEGRES A LA TOITURE**

Les interactions entre les capteurs solaires et le bâtiment sont négligeables compte tenu de l'épaisse couche d'isolant les séparant.

Le capteur solaire à air ventilé est constitué de deux modules PV chacun, connectés en série et montés sur une couche isolante non-corrosive de Tedlar. Le module PV est composé de cellules photovoltaïques collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'EVA et protégées par une couche de verre. L'énergie électrique produite est stockée dans une batterie électrique. Cette analyse a montré que la récupération complémentaire de l'énergie thermique produite permet une amélioration du rendement global du système PV-T à air d'environ 18 %.



**FIGURE 36 : BANC D'ESSAI DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR [83]**

Une autre étude comparative de quatre types de capteurs solaires à air proches du système présenté précédemment, a montré que la présence d'un vitrage sans Tedlar influe très fortement sur le rendement (thermique et électrique). Ce système vitré peut être utilisé pour diverses applications telles que le chauffage des locaux et l'éclairage.

L'étude des rendements énergétique et exégétique du capteur solaire hybride PV-T à air sans vitrage et comportant une couche de Tedlar indique que le rendement énergétique du capteur solaire varie de 55 à 65 %. Le rendement électrique de ce capteur solaire est compris entre 14 % et 15 %.

Plus tard l'étude théorique d'un capteur solaire PV-T hybride à air; en mettant l'accent sur ses performances thermiques a montré que le capteur solaire PV-T hybride à air a un

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

rendement thermique inférieur de 9 % à celui du capteur solaire thermique standard pour une température équivalente.

Enfin, une autre étude paramétrique montre que comme attendu, la localisation géographique ainsi que la surface de captation ont une forte influence sur la productivité du composant hybride.

L'étude théorique et expérimentale des productivités thermique et électrique d'un capteur solaire PV-T hybride à air à double circulation d'air, a montré l'influence des ailettes sur les transferts thermiques convectifs entre l'air et les modules PV, illustré par la Figure 37.

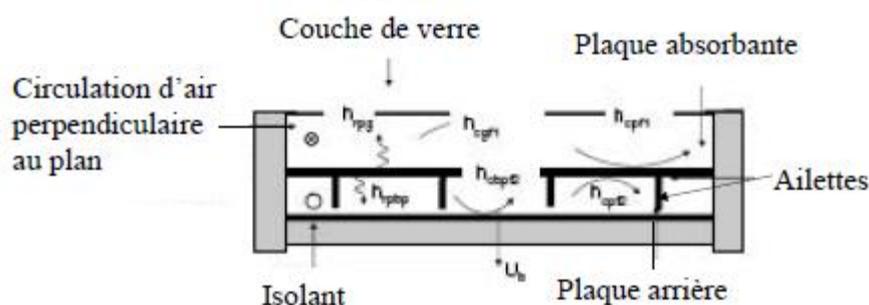


FIGURE 37 : COUPE DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR ET A AILETTES [87]

Un modèle thermique unidirectionnel en régime permanent de ce composant hybride a été développé. Il montre que l'emploi des ailettes permet d'améliorer à la fois le rendement thermique et les performances électriques du composant hybride.

Par la suite une autre étude a été menée afin de réduire la température de fonctionnement des modules PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous-face du composant. Les résultats ont montré qu'une faible épaisseur de lame d'air améliore les transferts thermiques mais réduit le débit massique de ventilation de la lame, d'où une réduction du rendement thermique du système. Pour pallier ce problème il a fallu accroître la surface d'échange entre l'air et les modules PV, d'où la présence de plaques nervurées ou planes, des tubes soudés à l'absorbeur ou des ailettes au sein de la lame.

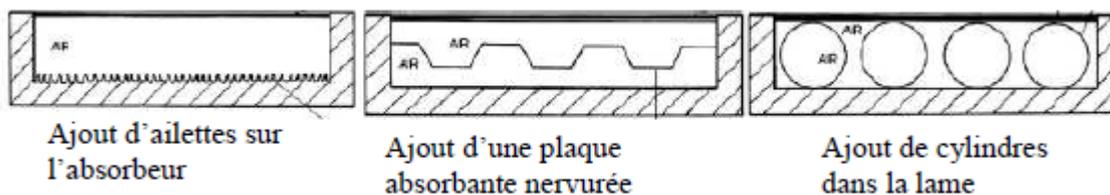


FIGURE 38: EXEMPLES DE MODIFICATIONS DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A AIR [88]

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

Ce domaine étant vaste, la liste de composants que nous avons présentée est réduite mais, elle permet de définir les principales caractéristiques des composants solaires PV-T à air et PV intégrés rencontrés dans la littérature. Dans le cas des capteurs solaires PV-T hybrides à eau, la même démarche a été appliquée, ajout d'ailettes sur l'absorbeur, ajout d'une plaque absorbante nervurée, ajout de cylindres dans la lame. Illustré par la Figure 38

### 4.2. Les capteurs solaires PV-T à eau :

Les premières analyses ont été réalisées dans l'étude de capteur solaire PV-T hybride vitré à liquide caloporteur, d'un absorbeur plan en aluminium non sélectif et de modules PV en silicium monocristallin. Une évaluation des performances énergétiques donne un rendement électrique de 13%. Illustré par la figure 39.

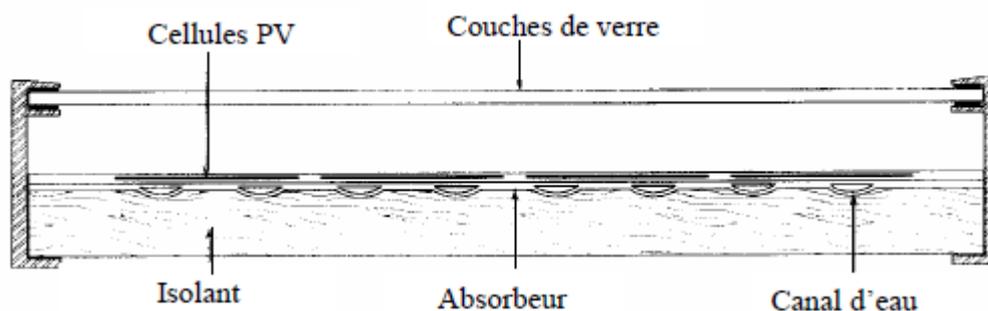


FIGURE 39: COUPE TRANSVERSALE DU COMPOSANT HYBRIDE A EAU [91]

Il est noté que le capteur solaire hybride vitré produit autant d'énergie que le capteur solaire thermique. Le capteur solaire hybride non vitré produit le moins d'énergie thermique mais offre la plus grande quantité d'énergie électrique.

La production d'énergie électrique du capteur solaire hybride non vitré est supérieure de 8 % à celle du capteur solaire PV. L'absence de vitrage permet la réduction des pertes thermiques par réflexion et une baisse du niveau de température de fonctionnement des modules PV [93]. De plus, la ventilation des modules PV en face arrière au niveau du composant PV-T hybride non vitre permet une réduction de la température de fonctionnement des modules PV par rapport au capteur solaire PV isolé. Quant au capteur solaire PV-T hybride vitre, il produit presque autant d'énergies thermique et électrique que le capteur solaire PV et le capteur solaire thermique plan réunis.

Des cellules PV en silicium poly-cristallin ont été utilisées car assurant un bon rendement et ayant un coût plus réduit que les cellules PV en silicium monocristallin.

Une étude expérimentale en vue d'évaluer ses performances thermique et électrique, et les interactions entre la production thermique en eau et la production électrique, indique que la température de l'absorbeur croît dans la direction d'écoulement du fluide caloporteur, soit du haut vers le bas du capteur solaire. Illustré par la figure 40.

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

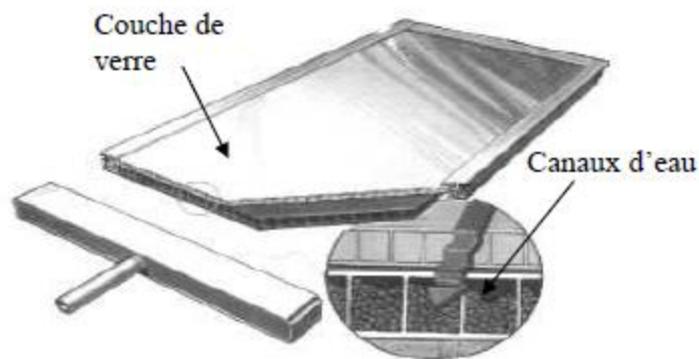


FIGURE 40 : SCHEMA DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A EAU SOLARNOR [92]

Les résultats de la simulation ont montré que ce capteur solaire hybride vitré a une production électrique journalière de 339,3Wh. La présence d'une couche de verre afin de réduire les pertes thermiques réduit la production électrique journalière à 296,2 Wh.

L'étude des couches du PV pour l'amélioration du comportement thermique et l'amélioration des rendements a montré que le contact physique entre le tube et l'absorbeur avait un lien direct sur le rendement. Ce rendement atteint 70% pour un coefficient de transfert thermique optimal. Illustré par la figure 41.

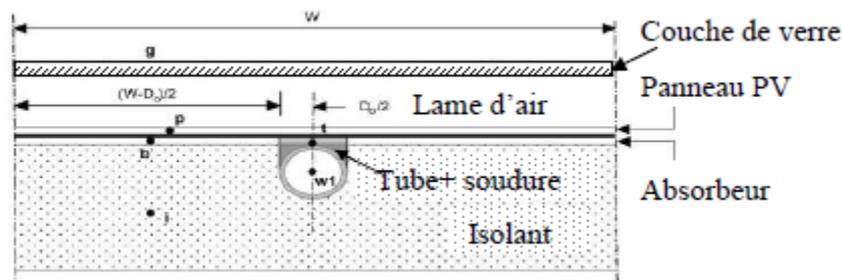


FIGURE 41 : COUPE DU CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A EAU [94]

Le modèle thermique dynamique réalisé indique qu'une conception adaptée de la lame d'air permet de réduire la température de fonctionnement des panneaux PV de 15 °C. De plus, ils ont montré que l'augmentation du débit de circulation de l'eau améliore le refroidissement des modules PV.

Un système combinant un capteur solaire hybride à eau et un plancher solaire a été développé et illustré par la figure 42. Afin de faire ressortir l'influence du vitrage sur le rendement électrique. En effet, la baisse de celui-ci est liée à l'accroissement de la température de fonctionnement.

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

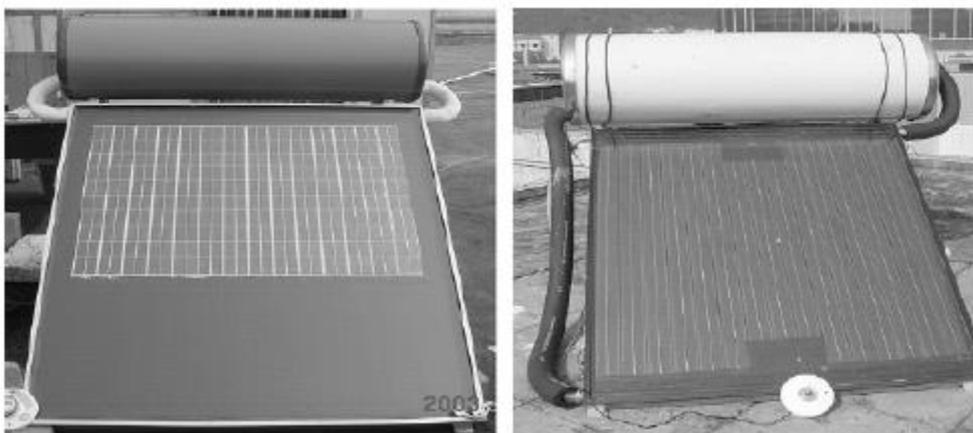
---



**FIGURE 42 : CAPTEUR SOLAIRE PV-T HYBRIDE A EAU [93]**

La forte augmentation de la température des modules PV en été, empêche l'utilisation de l'EVA comme adhésif des panneaux PV dans un composant vitré. L'utilisation de cellules amorphes est la plus adaptée car elles sont moins sensibles aux variations de température mais elles ont un rendement électrique très faible.

La modélisation et l'étude comparative des performances d'un capteur solaire PV-T hybride à eau, d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire à eau montre que le capteur solaire à eau a un meilleur rendement, de plus la présence d'eau comme fluide caloporteur réduit la température des modules PV. Illustré par la Figure 43.



**FIGURE 43 : PREMIER ET SECOND PROTOTYPES CONSTRUITS [97]**

Une nouvelle étude menée sur les capteurs solaires PV-T hybrides indique que la production électrique d'un capteur solaire PV est supérieure de 25% à celle du composant hybride. Mais, le système hybride permet de couvrir une grande partie des besoins en énergie thermique.

L'évaluation de l'aspect économique de ces systèmes a montré qu'ils sont avantageux en particulier pour les sites bien ensoleillés. Le constat a été fait que les systèmes hybrides à eau constitués de modules PV sans protection thermique en face avant, ont d'importantes pertes thermiques entraînant ainsi un faible niveau de température de fonctionnement du système. Une couverture de verre peut ainsi être ajoutée en face avant pour y remédier, bien que les absorptions et réflexions supplémentaires inhérentes du rayonnement solaire entraînent une

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

baisse du rendement électrique. La recherche sur les capteurs solaires hybrides à liquide caloporteur est en constante évolution, ainsi la liste de systèmes proposée précédemment n'est pas exhaustive illustré par la figure 44.

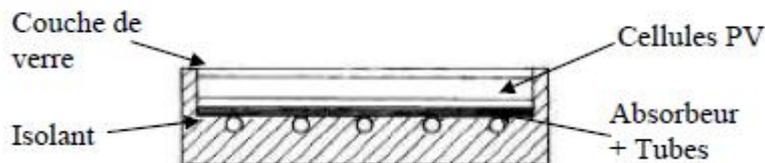


FIGURE 44 : SECTIONS DU CAPTEUR SOLAIRE HYBRIDE A EAU [100]

Les capteurs solaires photovoltaïques et thermiques hybrides présentés contribue imaginer des voies d'évolution en vue de la conception d'un prototype initial de capteur solaire PV-T hybride sa modification en vue d'obtenir un second prototype. Ainsi, l'absorbeur métallique réalisé est nervuré afin d'accroître la surface de captation et donc les transferts thermiques par convection avec l'air circulant en sous-face. L'acier possédant un fort coefficient d'absorption a été retenu, donnant ainsi un système proche du panneau Solarwall [100] mais sans perforation. Concernant le capteur solaire PV, il est composé de cellules PV en silicium poly cristallin afin d'obtenir un bon rendement électrique à un coût relativement réduit. Enfin, la configuration du capteur solaire à eau a été définie de manière à se rapprocher de celle d'un four solaire muni de réflecteurs solaires de part et d'autre de l'absorbeur afin d'accroître éventuellement l'efficacité thermique en eau chaude sanitaire du système.

### 5. Domaines d'utilisations :

La technologie des capteurs solaire hybride est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification et chauffage rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, hôpitaux, les sociétés, ...). Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité et de chauffage hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible.

#### 5.1. Les avantages :

- Économie d'espace : la superficie du toit est utilisée de manière optimale.
- Un panneau solaire hybride fournit un meilleur rendement électrique qu'un panneau standard (5 à 10 % en moyenne), grâce au refroidissement de la partie photovoltaïque.
- Le rendement énergétique total d'un panneau hybride est environ 40 % plus élevé qu'un panneau standard, comme il produit à la fois de l'électricité et de la chaleur.

### 5.2. Les inconvénients :[72]

- Il s'agit d'une technologie très récente, qui doit encore faire ses preuves.
- Le coût d'investissement est assez élevé.
- C'est une solution qui est surtout adaptée aux petites surfaces de toit.
- De plus, il lui faut trois ans pour produire l'énergie qui a été utilisée pour sa construction.
- Les panneaux solaires ne sont pas auto-suffisants, ils ne permettent en général de couvrir qu'une partie des besoins.
- La stabilisation de la température du système engendre une production solaire thermique non optimale.
- Le matériel est très fragile et la production d'énergie est irrégulière du fait du temps.

### 6. Conclusion :

Les capteurs PV-T sont très prometteurs et devraient se montrer compétitifs face à des installations solaires standards, du fait de leur possible optimisation des performances. Sa production simultanée d'énergie thermique et électrique lui procure un avantage technique et une solution économique, l'augmentation du rendement du système permettra donc la réduction du retour sur investissement. Les études actuelles montrent la nécessité de poursuivre les recherches afin d'améliorer le rapport entre le refroidissement et le rendement électrique.

Étant donné la particularité du capteur à améliorer le rendement par le refroidissement des cellules électriques, il en découle plusieurs domaines d'application tels que l'eau chaude sanitaire pour les basses températures, les planchers chauffant et le réchauffement des piscines.

L'étude théorique a montré l'existence de deux technologies concurrentielles, l'une concernant les collecteurs PV-T avec vitre pour la production de température élevée et l'autre concernant les capteurs sans vitre pour la production électrique élevée.

La présence du liquide dans le capteur à une incidence directe sur l'accroissement du rendement et le refroidissement des panneaux, cela permet de produire deux énergies en diminuant la superficie d'utilisation.

## Chapitre III : État de l'art des capteurs hybrides

---

Le souci majeur étant le climat, celui-ci pourrait devenir l'élément essentiel d'un choix d'investissement et par conséquent la survie de cette technologie dans les pays où l'ensoleillement est insuffisant.

---

Chapitre IV :

Dimensionnement d'un système  
photovoltaïque hybride pour couvrir des  
besoins énergétiques d'une maison à ain  
temouchent

---

# Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

## 1. Région de Ain Temouchent :

La wilaya d'Aïn Témouchent (en arabe: ولاية عين تموشنت);située à l'ouest de l'Algérie entre les wilayas d'Oran, Tlemcen et Sidi-Bel-Abbès, est une collectivité publique territoriale et une circonscription administrative de l'état algérien dont le chef-lieu est la ville d'Aïn Témouchent. Elle est créée par une loi du 4 février 1984. La superficie de la wilaya est d'environ 2 377 km<sup>2</sup>.



FIGURE 45 : LOCALISATION DE LA WILAYA DE AIN TEMOUCHENT

## 2. Présentation de l'habitat a étudié :

- On a pris une maison située dans la ville de Ain Temouchent en Algérie, en décrivant dans le tableau (2) :

	<b>La maison</b>
<b>Nombre de personnes</b>	<b>6 personnes</b>
<b>Nombre de pièces</b>	<b>6 chambres, un salon, 2 halls, une cuisine, un garage, 2 salles de bain, 2 couloirs et une cour.</b>

TABLEAU 2 : DESCRIPTION D'UNE MAISONS

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

### 2.1. Estimation journalière :

Pour estimer la consommation journalière d'une maison, on applique la relation suivante :

$$E_j = P_j \times t_j \times N_j$$

### 2.2. Les besoins énergétiques d'une habitation :

- On a résumé les besoins énergétiques de la maison dans le tableau suivant:

Equipements	Puissance unitaire (W)	Temps de fonctionnement (heure)	Nombre	Puissance (W)	Consommation journalière (Wh/j)
Lampes	15	6	21	315	<b>1890</b>
TV+Démo	55+25	8	1	80	<b>640</b>
Pompe à eau	550	1	1	550	<b>550</b>
Réfrigérateur	185 ×3	6	1	555	<b>3330</b>
PC portable	45	2	1	45	<b>90</b>
Mobile	5	2	8	40	<b>80</b>
Autres utilisations	124 4	1	1	1500	<b>1500</b>
				<b><math>P_{tot}</math> =3085W</b>	<b><math>E_{cj}</math> =8080Wh/j</b>

**TABLEAU 3 : BESOINS ENERGETIQUES JOURNALIERS POUR LA MAISON**

#### a) Energie totale consommée :

$$E_{cj} = \sum E_j = 8080 \text{ Wh/j}$$

#### b) La puissance totale :

Le réfrigérateur nécessite une puissance de démarrage=3fois la puissance de fonctionnement Donc la puissance de réfrigérateur est :  $3 \times 185w=555w$   
 Puissance totale =Lampes ( $15W \times 21$ ) +TV et Démo ( $80W \times 1$ ) +  
 Pompe à eau ( $550W \times 1$ ) + Réfrigérateur ( $555W \times 1$ ) +PC ( $45W \times 1$ )  
 + Mobile ( $5W \times 8$ ) + Autres utilisation ( $1500W \times 1$ )  
 $\rightarrow P_{tot} : (315 \text{ W} + 80W + 550W + 555W + 45W + 40W + 1500W) = 3085 \text{ W.}$

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

### 3. Dimensionnements d'un système PV par la méthode simplifiée :

#### a) Calcul du nombre des panneaux photovoltaïque :

On prend un panneau photovoltaïque mono cristallin **265W /30V**, il développe 265w pour un rayonnement de 1000 w/m<sup>2</sup>, nous devons calculer sa puissance pour la région de Ain Temouchent où les PPV vont être installés.

- Calcul le rayonnement solaire de ain temouchent :

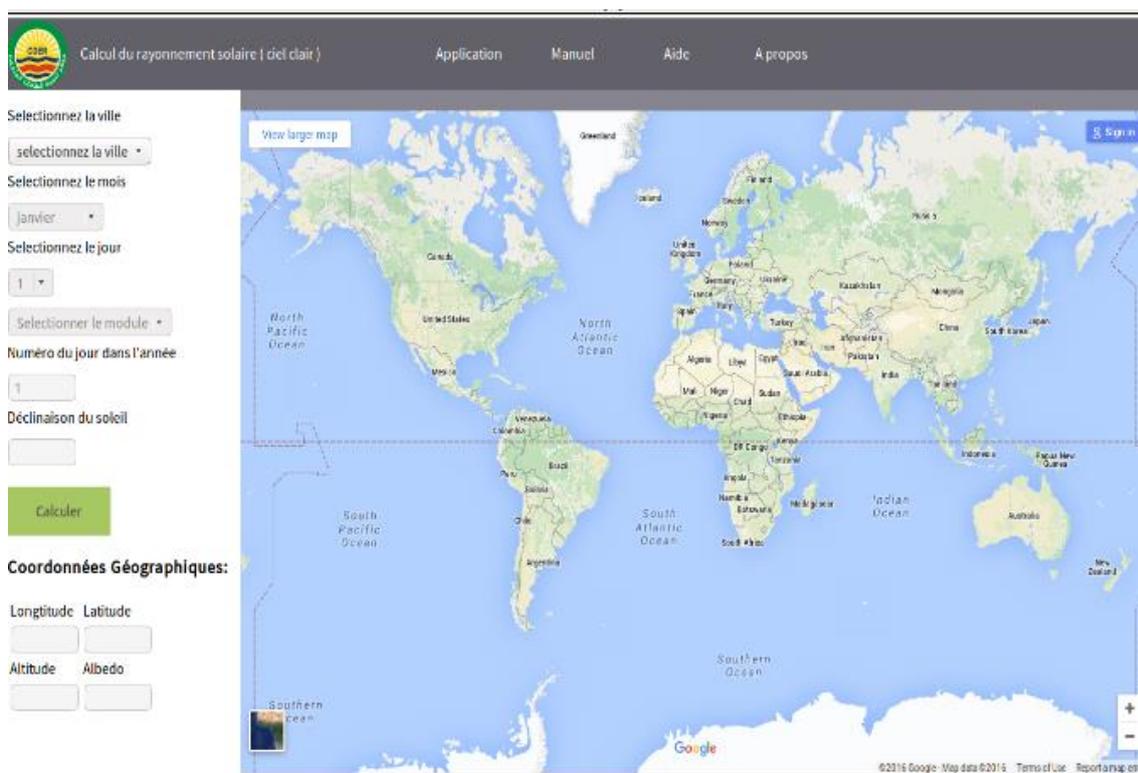


FIGURE 46 : METHODE DE CALCUL LE RAYONNEMENT SOLAIRE DE AIN TEMOUCHENT

Le rayonnement solaire de Ain Temouchent est 224W/m<sup>2</sup>.

- En hiver → environ 11h d'ensoleillement /jour ≈ (7h38-18h05)  
 $59.36W \times 11h = 652.96Wh/j$
- En été → environ 14h d'ensoleillement/jour ≈ (5h37-20h08)  
 $59.36W \times 15h = 890.4Wh/j$
- Le nombre de modules connectés en série sera :  $N_{m,s} = 02$  modules en série.
- Le nombre de modules connectés en parallèles les sera:

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

---

$N_{m,p} = 6$  modules en parallèles.

### b) Calcul du nombre des Batteries :

On suppose une autonomie de 2 jours → la puissance globale stockée dans les batteries doit être égale à la consommation journalière×2

$$P_g = E_{cj} \times 2$$

Puissance globale =  $8080 \times 2 \rightarrow P_g = 16160$  Wh.

On prend une batterie 12v/150 Ah →  $P_{batterie} = 12v \times 150 \text{ Ah} = 1800$ Wh

$$N_{batterie} = P_g / P_{batterie}$$

AN :

→  $16160 / 1800 = 9$  batteries → besoin de 9 batteries de 12v/150Ah

- 01 batterie en série.
- 09 batteries en parallèles.

### c) Choix d'onduleur :

La puissance à développer par l'onduleur ( $P_{ond}=?$ )

On a  $P_{tot} = 3085$  W

et l'onduleur ne développe que **80%** de sa puissance nominal, alors:

$$P_{ond} = P_{tot} / 0.8$$

$$\rightarrow P_{ond} = 3085 / 0.8 = 3856.25 \text{ W}$$

→  $P_{ond} = 3856.25$  → on choisit un onduleur de **12V / 40000 W**

# Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

## 4. Présentation de logiciel de simulation PVSYSY :

Le programme PVSYSY est un logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques, développé initialement par le Groupe de Physique Appliquée (GAP) de l'Université de Genève. Ce logiciel est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche économique avec guide dans le développement d'un projet.

PVSYSY permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.

On lance le logiciel PVSYSY, l'interface suivante s'affiche :



FIGURE 47 : INTERFACE DE LOGICIEL PVSYSY

La simulation à base du logiciel PVSYSY suit l'organigramme suivant :

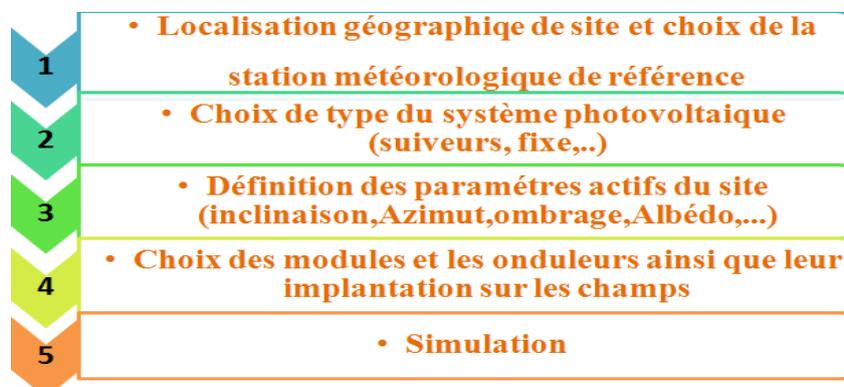


FIGURE 48 : ETAPES DE SIMULATION AVEC PVSYSY

# Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

## 5. Conception et dimensionnement d'un système PV :

La conception de système est basée sur une procédure rapide et simple :

- ✓ Spécifier la puissance désirée ou la surface disponible,
- ✓ Choisir les modules PV dans la base de données interne,
- ✓ Choisir l'onduleur dans la base de données interne.

### I.1.A.a Principaux résultats :

#### 5.1. Données météorologiques du site :

Après avoir localisé le site, on clique sur le bouton « importer » pour importer les données météorologiques du site dans PVSYST, ces données mensuelles représentent l'irradiation, la température moyenne et la vitesse du vent :

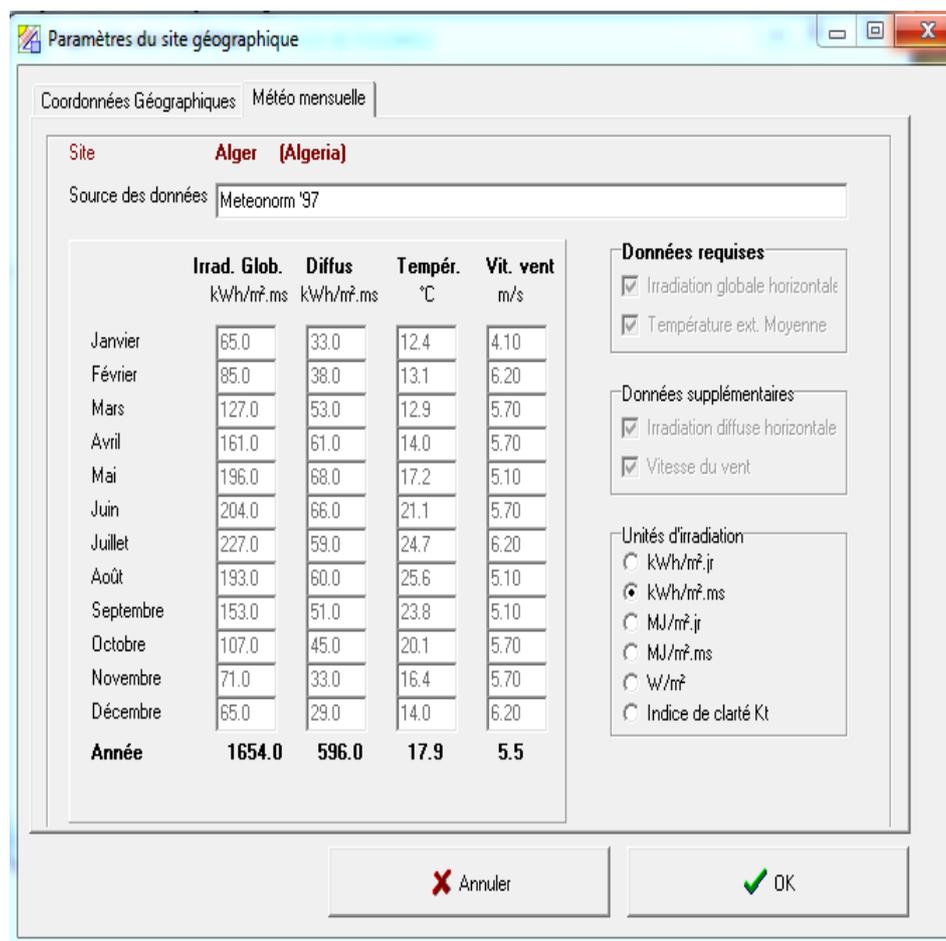


FIGURE 49 : CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU SITE DE AIN TEMOUCHENT

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

### 5.2. Trajectoire du soleil :

La connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre est nécessaire pour toute application solaire. La position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur HS (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu) et son Azimut AZ (angle avec la direction du Sud, compté négativement vers l'Est).

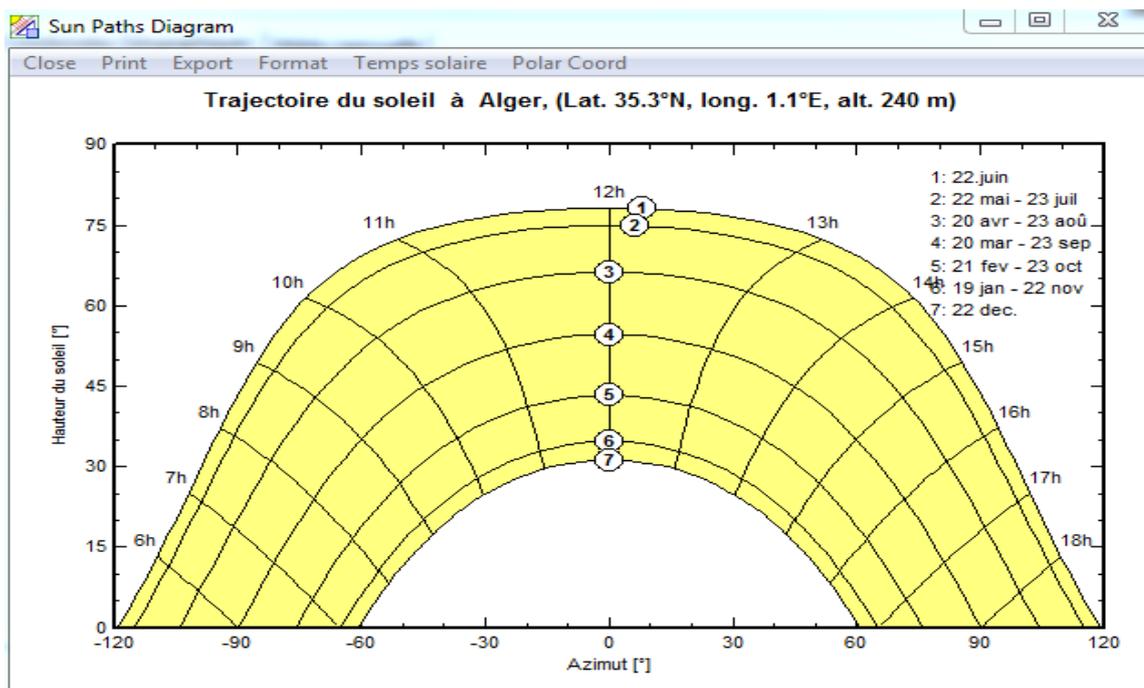


FIGURE 50 : TRAJECTOIRE DU SOLEIL A AIN TEMOUCHENT

### 5.3. Orientation des modules PV :

Vu le prix élevé des modules PV, il est nécessaire de choisir des orientations et inclinaisons favorables à la production d'énergie.

Nous avons choisi un plan Incliné fixe par rapport à l'horizontale comme illustre la figure (51) c'est l'inclinaison optimale donnée par le logiciel PVSYST.

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

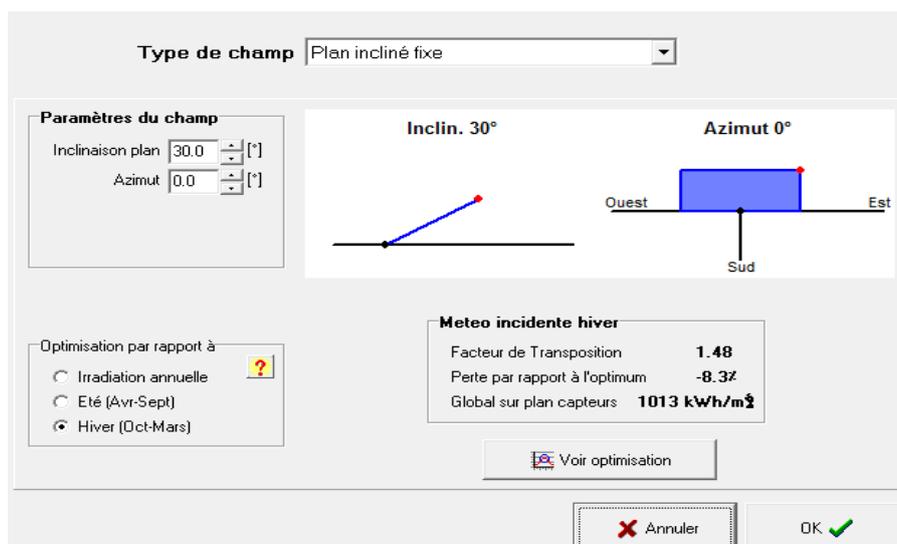


FIGURE 51 : ORIENTATION ET INCLINAISON DU SYSTEME PV

### 5.4. Schéma de l'installation PV :

La figure (52) représente le schéma de l'installation PV autonome prise en compte dans la simulation.

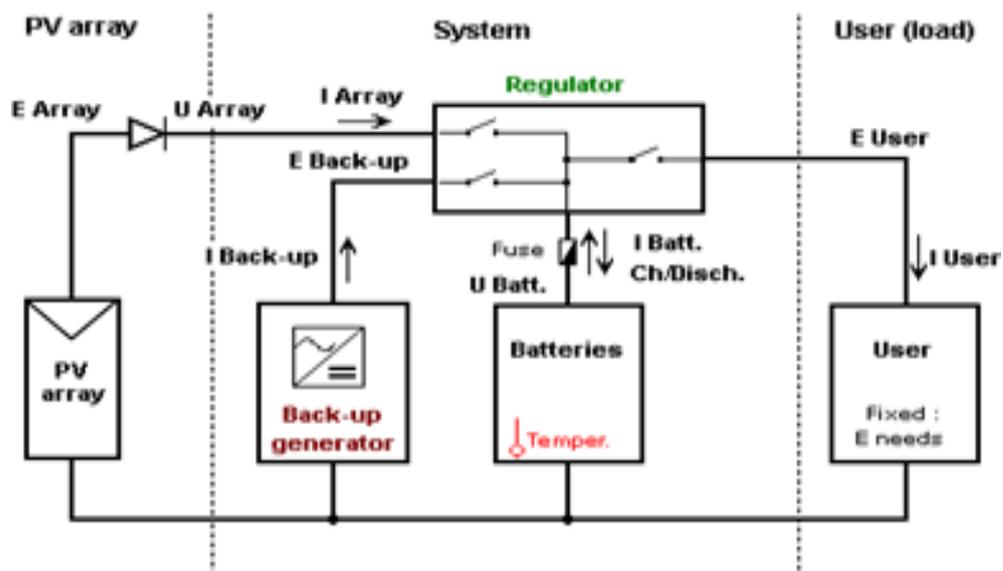


FIGURE 52 : SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE INSTALLATION PV AUTONOME

# Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

## 6. Résultats de simulation :

### 6.1. Besoins électriques :

La figure (53), montre les besoins d'utilisateur de deux maisons par le PVSYST :

Number		Power		Mean Daily use		Daily energy
21	Fluorescent lamps	15	W/lamp	6.0	h/day	1890 Wh
1	TV / Magnetoscope / PC	80	W/app.	8.0	h/day	640 Wh
3	Domestic appliances	600	W/app.	2.0	h/day	3600 Wh
1	Fridge / Deep-freeze			0.60	kWh/day	600 Wh
1	Dish-washer, Cloth-washer			1.20	kWh/day	1200 Wh
	Other uses	15	W tot	10.0	h/day	150 Wh
	Stand-by consumers	0	W tot	24h/day		0 Wh
<b>Total daily energy</b>						<b>8080 Wh/day</b>
<b>Total monthly energy</b>						<b>242.4 kWh/month</b>

FIGURE 53 : BESOINS D'UTILISATEUR

# Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

## 6.2. Simulation des équipements énergétiques :

### a. Batteries :

On a choisi une batterie Electrona de type Pb-acide 12V/150Ah sous une température fixe 20C° pour la maisons.

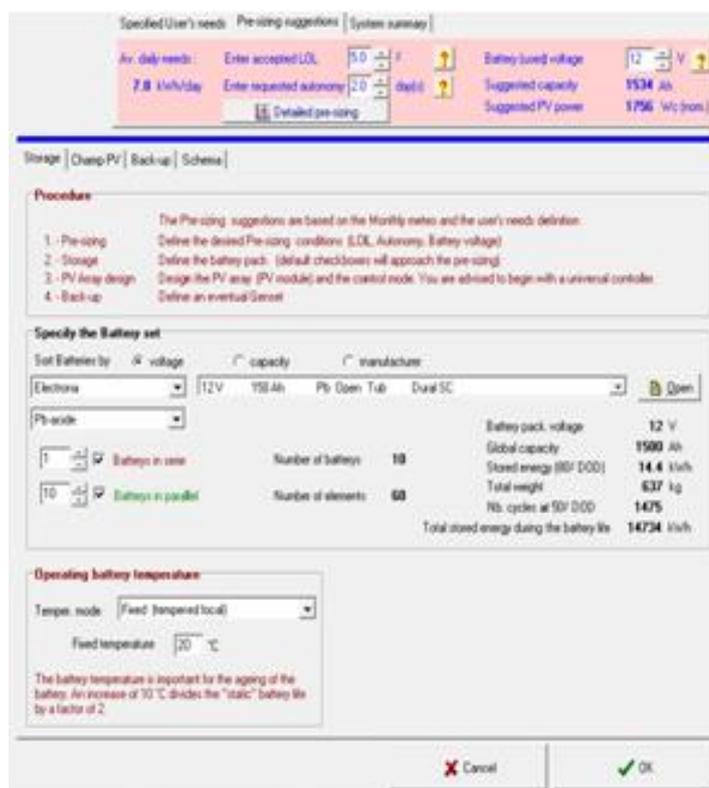


FIGURE 54 : DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES

### - Branchement des batteries pour la maison :

01 batterie en série.

10 batteries en parallèle.

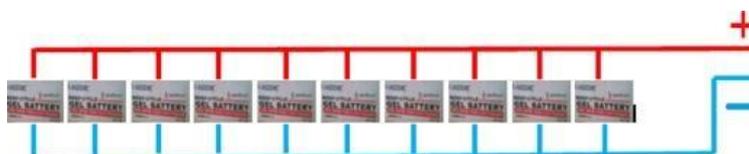


FIGURE 55 : BRANCHEMENT DES BATTERIES POUR LA MAISON

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

### b. Modules et onduleurs :

Comme illustré sur la figure (56) : Dans la maison, le champ PV sera constitué de 6 de modules V de 265W/30V (technologie mono cristallin) répartis sur une surface de 12m<sup>2</sup>, comme suit :

- 01 module en série.
- 06 modules en parallèle.

On choisit un onduleur MPPT 300W/12V/139A.

The screenshot shows a software interface for PV system design. The top section, 'Specified User's needs', includes 'Av. daily needs' (7.8 kWh/day) and 'Enter requested autonomy' (2.0 days). The 'Storage' section shows 'Charg PV' with 'Plan incliné fixe' and 'Azimut 0°'. The 'Select the PV module' section shows 'Sun Earth Solar Power' with '265 Wp 30V' and 'Mono' technology. The 'Select the control mode and the controller' section shows 'MPPT power converter' with 'MPPT 360 W 12V' and '1.39 A 27 A'. The 'PV Array design' section shows 'Number of modules and strings' with 'Max in serie 1' and 'No strings 6', resulting in 'No modules 6' and 'Area 12 m²'. The 'Operating conditions' section shows 'Vmp (60°C) 29 V', 'Vmp (30°C) 35 V', 'Voc (10°C) 50 V', 'Plane irradiance 1000 W/m²', 'Imp (STC) 45.2 A', 'Isc (STC) 48.5 A', 'Isc (at STC) 48.3 A', 'Max. operating power 1.4 kW à 1000 W/m² et 50°C', and 'Array's nom. power (STC) 1.6 Wp'. The interface includes 'Cancel' and 'OK' buttons at the bottom.

FIGURE 56 : DIMENSIONNEMENT DE MODULE ET ONDULEUR

# Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

## - Branchement de PPV pour la maison :

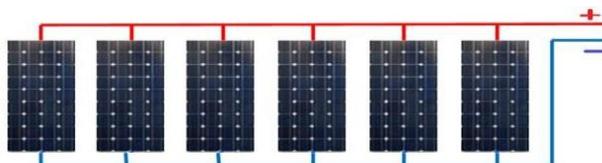


FIGURE 57 : DIMENSIONNEMENT DE MODULE ET ONDULEUR

### 6.3. Rapport de simulation :

Après la simulation par le PVSYSY de la consommation de la maison, on obtient un rapport (voir la figure (58)) :

PVSYSY V6.70		31/05/19 21h13		Page 1/5	
<b>Système isolé avec batteries; Paramètres de simulation</b>					
<b>Projet :</b> Bouras's house					
<b>Site géographique</b>		M'Sila	Pays Algérie		
<b>Situation</b>		Latitude 35.71° N	Longitude 4.54° E		
Temps défini comme		Fus. horaire TU+1	Altitude 494 m		
<b>Données météo:</b>		M'Sila	Meteonorm 7.1 (1991-2000), Sat=100% - Synthétique		
<b>Variante de simulation :</b> Simulation1					
Date de la simulation 31/05/19 à 21h12					
<b>Paramètres de simulation</b>		Type de système <b>Stand-alone system</b>			
<b>Orientation plan capteurs</b>		Inclinaison 30°	Azimut 0°		
<b>Modèles utilisés</b>		Transposition Perez	Diffus Perez, Meteonorm		
<b>Caractéristiques du champ de capteurs</b>					
<b>Module PV</b>		Si-mono	Modèle <b>TDB156X156-72-P 265W</b>		
Original Pvsyst database		Fabricant Sun Earth Solar Power Co Ltd			
Nombre de modules PV		En série 1 modules	En parallèle 6 chaînes		
Nombre total de modules PV		Nbre modules 6	Puissance unitaire 265 Wc		
Puissance globale du champ		Nominale (STC) <b>1590 Wc</b>	Aux cond. de fonct. 1401 Wc (50°C)		
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)		U mpp 31 V	I mpp 45 A		
Surface totale		Surface modules <b>11.7 m²</b>	Surface cellule 10.3 m²		
<b>Facteurs de perte du champ PV</b>					
Fact. de pertes thermiques		Uc (const) 20.0 W/m²K	Uv (vert) 0.0 W/m²K / m/s		
Perte ohmique de câblage		Rés. globale champ 12 mOhm	Frac. pertes 1.5 % aux STC		
Perte diode série		Chute de tension 0.7 V	Frac. pertes 2.0 % aux STC		
Perte de qualité module			Frac. pertes 1.5 %		
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes 1.0 % au MPPT		
Perte de "mismatch" strings			Frac. pertes 0.10 %		
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE		IAM = 1 - bo (1/cos i - 1)	Param. bo 0.05		
<b>Paramètres du système</b>		Type de système <b>Système isolé avec batteries</b>			
<b>Batterie</b>		Modèle <b>Dural SC</b>			
Caractéristiques du banc de batteries		Fabricant Electrona	Tension 12 V		
		Nombre d'unités 10 en parallèle	Capacité nominale 1500 Ah		
		Température Fixée (20°C)			
<b>Régulateur</b>		Modèle Universal controller with MPPT converter			
Convertisseur		Technologie MPPT converter	Coef. de temp. -5.0 mV/°C/lem.		
Efficacité maxi et EURO		97.0 / 95.0 %			
Seuils de régulation batterie		Seuils de commande selon SOC calculation			
		Charge SOC = 0.92 / 0.75	i.e. approx. 13.5 / 12.5 V		
		Décharge SOC = 0.20 / 0.45	i.e. approx. 11.8 / 12.2 V		
<b>Besoins de l'utilisateur :</b>		Consomm. domestique Constante sur l'année moyenne 7.8 kWh/Jour			

FIGURE 58 : PARAMETRES DE SIMULATION DE LA MAISON

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

Pour notre étude le résultat concernant l'énergie incidente de référence sur le plan des panneaux de la maisons est 6.274 KWh/jour pour un fonctionnement en mode normal.

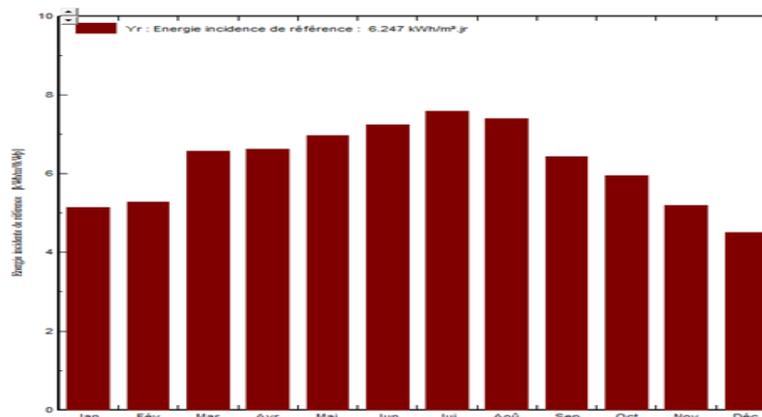


FIGURE 59 : ENERGIE INCIDENTE DE REFERENCE SUR LE PLAN DES PANNEAUX

La distribution de rayonnement incidente de cette même énergie le long de l'année est illustrée par la figure ci-après.

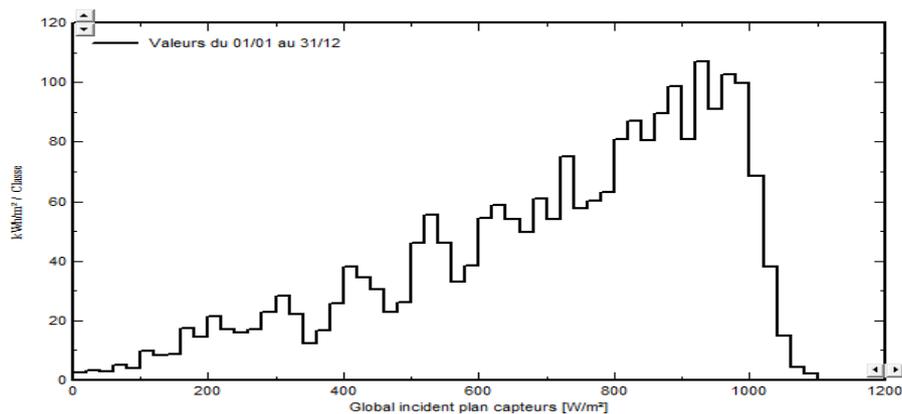


FIGURE 60 : DISTRIBUTION ANNUELLE DE RAYONNEMENT INCIDENTE

Nous remarquons que la distribution de la puissance en sortie du champ PV varie suivant la

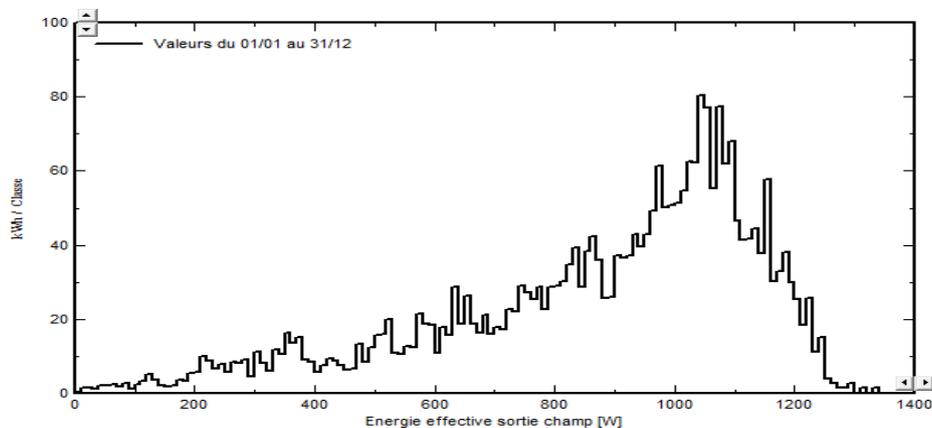


FIGURE 61 : DISTRIBUTION ANNUELLE DE LA PUISSANCE EN SORTIE DU CHAMP PV

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

même tendance que la distribution du rayonnement incident, à une échelle différente.

En plus des bilans mensuels et annuels, le résultat le plus signifiant est présenté sous forme de diagramme d'Entrée/Sortie reportant, l'énergie produite en fonction de l'énergie effectuée sortie champ (Figure (4.19)).

Les points de fonctionnement sont alignés sur une droite, dont la pente est directement liée à l'efficacité du système.

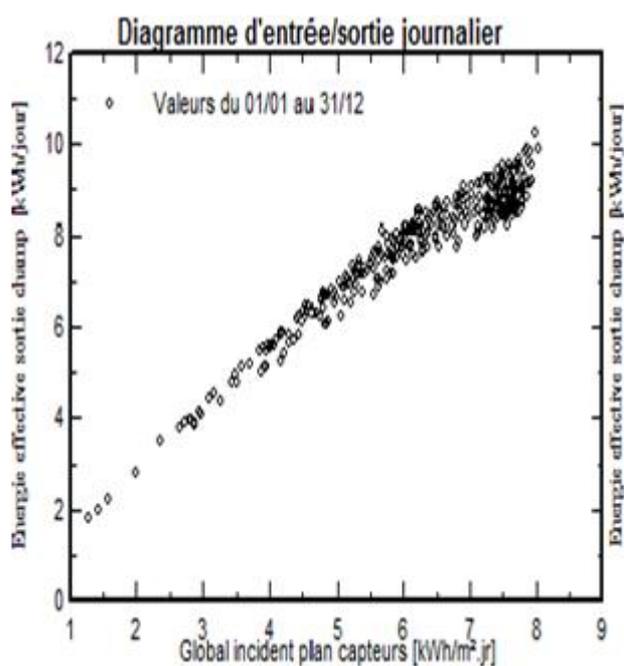


FIGURE 62 : DIAGRAMME D'ENTREE/SORTIE JOURNALIER DU SYSTEME PV

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

---

### 7. Comparaison entre la méthode utilisée et la simulation :

Suite aux résultats obtenus par calcul et simulation numérique de logiciel PVSYST, nous résumons dans le tableau ci-dessus :

La Maison		
	$N_{PP}$ V	$N_{batte}$ rie
Calcul	12	9
Simulation	6	10

**TABEAU 4 : LES RESULTATS PAR CALCUL ET SIMULATION DE PVSYST**

## Chapitre IV : Dimensionnement d'un système photovoltaïque hybride

---

### 8. Conclusion :

Le logiciel PVsyst permet de simuler un système photovoltaïque avec une prise en compte de tous les aspects: pertes, emplacement géographique,...etc. Ceci a permis de faire une meilleure estimation des pertes qui peuvent affecter le rendement global.

Les pertes dues au système de stockage et les jours d'autonomie est très importante pour le dimensionnement de ce système de stockage, d'où la nécessité d'opter pour une technologie de meilleure rendement possible de ce composant qui représente clé et le plus délicat d'une installation photovoltaïque autonome.

Le coût d'investissement pour la mise en œuvre d'un système photovoltaïque autonome est important, ce qui fait que le kWh produit grâce à ce système n'est pas compétitif face au prix du kWh produit par la connexion au réseau de Sonelgaz.

Il faut savoir que le kWh solaire est cher. L'utilisateur doit choisir des récepteurs de faible consommation comme nous le conseillons pour l'éclairage dans notre maison.

---

---

## Conclusion générale :

---

---

La technologie des capteurs hybride PV-T est une nouvelle technologie qui a créé un nouveau marché combinant la génération d'énergie électrique et thermique. Leurs caractéristiques électrique et thermique les ont destinés au marché "grand public". Ce système attrayant maximise le rendement d'une surface donnée et devient de surcroit la solution finement équilibrée pour concilier les aspects financement et rentabilité.

Les capteurs photovoltaïques thermiques permettent de valoriser l'énergie solaire captée. En effet le concept de celui-ci consiste à superposer deux fonctions énergétiques électrique et thermique, la récupération et le transfert de chaleur à nécessiter une remise à plat des matériaux et des procédés de fabrication dans le domaine du solaire.

La filière photovoltaïque connaît de grandes avancées significatives en matière de performance et de coût. Idéal pour compléter les besoins énergétiques, son point fort constitue le couplage électrique et thermique. Fiable et de qualité, elle connaît de grandes avancées significatives en matière de performance et de coût tout en préservant l'environnement, il reste néanmoins beaucoup d'améliorations possibles. La procédure de fabrication est actuellement maîtrisée et apporte une amélioration considérable dans le choix des matériaux en fonction de leur performance. Plusieurs axes de développement industriels sont en cours afin de réduire la consommation d'énergie fossile et des émissions de gaz à effet de serre.

L'utilisation d'un système P V- T permet d'augmenter le rendement des cellules PV et d'économiser l'espace, le cout reste cependant assez élevé.

---

---

## Références bibliographiques

---

---

- [1] Aminata. Sarr, «Simulation du système hybrides Photovoltaïque », mémoire de doctoral 1998, canada.
- [2] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre électromagnétique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_électromagnétique)
- [3] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [4] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001.ARTICLE PDF.
- [5] N.Oleskiy .thèse doctorat, institut National des sciences appliquées de Lyon (2005).
- [6] <http://www.lumensol.fr/sites-isoles-et-installation-photovoltaique-autonome.html>.
- [7] <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome/>.
- [8] Y.Véclitti thèse doctorat, Université louis pasteur Strasbourg (2005).
- [9] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche>.
- [10] M. Dahbi « Étude et optimisation d'une installation Hybride PV-Éolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [11] <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM13/S13P13.HTM>.
- [12] <https://www.dimension-solaire.ch/fr/solutions-solaires/panneau-photovoltaique>.
- [13] N.Oleskiy .thèse doctorat, institut National des sciences appliquées de Lyon (2005).
- [14] [https://www.researchgate.net/figure/Figure-I-4-Module-photovoltaique-Les-modules-sont-generalement-entoures-dun-cadre\\_fig4\\_320910795](https://www.researchgate.net/figure/Figure-I-4-Module-photovoltaique-Les-modules-sont-generalement-entoures-dun-cadre_fig4_320910795).
- [15] Guen, « contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles Alimentés par énergie solaire », thèse de magister, Université de Tlemcen, février 1992.
- [16] <http://www.solardisafri.com/comment-connaître-un-panneau-solaire-de-qualite/>.
- [17] <https://www.amazon.fr/VIKOCCELL-raccordement-solaire-diodes-180W-250W/dp/B07CKRP6D8>.

- [18] N. Achaibou, A Malek, N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [19] I. Tsuda, K. Kurokawa, K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic System with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35, pp 503 –508, 1994.
- [20] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin »Rev .Energ. Ren : physique Energétique.
- [21] D.Thévenard, and M.Ross « validation and Vérification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [22] [http://be.boschautomotive.com/fr/parts and accessories 5/specials 5/leisure 2/batteries 8/batteries leisure special parts](http://be.boschautomotive.com/fr/parts%20and%20accessories/5/specials/5/leisure/2/batteries/8/batteries%20leisure%20special%20parts).
- [23] Z.Bachi, S.Elfordil, « Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque », université de Blida.
- [24] D.Thévenard, and M.Ross « validation and Vérification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [25] [https://www.researchgate.net/figure/Onduleur-de-tension-MLI\\_fig1\\_267966832](https://www.researchgate.net/figure/Onduleur-de-tension-MLI_fig1_267966832).
- [26] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools» PV Horizon, Canada, 2001.ARTICLE PDF.
- [27] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [28] [www.solarelectripower.org](http://www.solarelectripower.org).
- [29] Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004.
- [30] C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger ».2006.
- [31] [http : // F.Wikipedia.org /fichier : isolat or métal-semi condu.fr](http://F.Wikipedia.org/fichier:isolator_metal-semiconducting.fr).
- [32] R, Bernard; G, menguy; M, Schwartz. Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).

- [33] J, Bernard. Énergie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [35] <http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Capteurplan.png>.
- [36] A, H, Khedim. Énergie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [37] <http://tpedurable.e-monsite.com/pages/les-differents-types-de-capteurs-thermiques.html>.
- [38] <http://energiesdurable.free.fr/blog/index.php/2008/07/19/18-thermique1>.
- [39] [https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v004\\_n2\\_texte\\_1.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v004_n2_texte_1.pdf).
- [40] J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [41] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [42] R.Maoudj « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique mémoire de Magister, université de Tlemcen (2005).
- [43] D, K, Edwards. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [44] <https://docplayer.fr/15590193-Conception-et-realisation-d-un-capteur-solaire-plan-a-air.html>.
- [45] A, Degionanni. Techniques de l'ingénieur, conduction, BE8200. (1981).
- [46] M, E, A, Bekkouche. Modélisation du comportement thermique de quelques [47] J, P, Petit. Techniques de l'ingénieur, notions de transferts thermiques par convection, A1540. (1979).
- [47] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [48] A, A, Zaid; A, Moulla; M, S, Hantala; J, Y, Demsons. Amélioration des performances des capteurs solaires plans à air : application au séchage de l'oignon jaune et du hareng, Revue des Énergies Renouvelables, vol 4, p 69-78. (2001).
- [49] D, K, Edwards. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).

- [50] N, Bellel. Étude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).
- [51] J, Desautel. Les capteurs héliothermiques, Edisud. (1979).
- [52] D.Thévenard, and M.Ross « validation and verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [53] A, A, Zaid; A, Moulla; M, S, Hantala; J, Y, Demsons. Amélioration des performances des capteurs solaires plans à air : application au séchage de l'oignon jaune et du hareng, Revue des Énergies Renouvelables, vol 4, p 69-78. (2001).
- [54] [https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v004\\_n2\\_texte\\_1.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v004_n2_texte_1.pdf).
- [55] F, Benyelles; B, Benabadjia; B, Benyoucef; Z, Ziani. Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d'autres capteurs plans, 13emes Journées Internationales de Thermique. (2007).
- [56] K, Aoues; N, Moummi; A, Moummi; M, Zellouf; A, Labed; E, Echouri. Étude de l'influence des rugosités artificielles sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air, Revue des Énergies Renouvelables, Vol 11, N°2, p219-227. (2008).
- [57] K, Aoues; N, Moummi; M, Zellouf; A, Moummi; A, Labed; E, Achouri ; A, Benchabane. Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air : étude expérimentale dans la région de Biskra, Revue des Énergies Renouvelables, vol 12, N°2, p 237-248. (2009).
- [58] N, Bellel. Étude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).
- [59] S, A, Hakem ; N, Kasbadji-Merzouk ; M, Merzouk. Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, Revue des Énergies Renouvelables, p 153-162. (2008).
- [60] [www.tpe-energie-solaire.e-monsite.com](http://www.tpe-energie-solaire.e-monsite.com).
- [61] <https://www.cder.dz/spip.php?article1945>.
- [62] ZONDAG H. A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005. Accepté pour publication.
- [63] HENDRIE S. D. Photovoltaic / thermal collector development program. Rapport final. Etats-Unis: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [64] COX C. H., RAGHURAMAN P. Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors. Solar Energy, 1985, vol. 35, n° 3, pp. 227-241.

- [65] LALOVIC B., KISS Z., WEAKLIEM H.A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. *Solar Cells*, 1986, vol. 19, n° 2, pp. 131-138.
- [66] <https://panneau-solaire.ooreka.fr/astuce/voir/644157/panneau-solaire-hybride#>
- [67] Y. Tripanagnostopoulos, ‘Low Concentration Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Energy Systems’, IP programme: ‘ICT Tools: PV Systems Teaching and Learning Patra’, 1st July-10th July 2004.
- [68] [https://www.researchgate.net/figure/Modele-dun-capteur-hybride-PVT\\_fig1\\_267365812](https://www.researchgate.net/figure/Modele-dun-capteur-hybride-PVT_fig1_267365812).
- [69] J.S. Coventry, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, *Solar Energy* 78 (2005), 211–222.
- [70] PVT Roadmap – a European guide for the development and market introduction of PV-thermal technology. PVT forum: [www.pvtforum.org](http://www.pvtforum.org)., 2006.
- [71] V. Quaschnig - Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hanser Verlag München, 2. Auflage 2009, ISBN 978-3-446-41961-2.
- [72] <https://www.panneausolaire-info.be/panneau-solaire-hybride>.
- [73] LALOVIC B., KISS Z., WEAKLIEM H. A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. *Solar Cells*, 1986, vol. 19, n° 2, pp. 131-138.
- [74] TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. TZAVELLAS D., et al. Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. In: *Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference*, 2001, Munich, Allemagne, pp. 2515-2518.
- [75] SANDBERG M., MOSHFEGH B. Ventilated-solar roof air flow and heat transfer investigation. *Renewable Energy*, 1998, vol. 15, n° 1-4, pp. 287-292
- [76] MOSHFEGH B., SANDBERG M. Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1998, vol. 2, n° 3, pp. 287-301.
- [77] GARG H. P., ADHIKARI R. S. System performance studies on a photovoltaic /thermal (PV/T) air heating collector. *Renewable Energy*, 1999, vol. 16, n° 1-4, pp. 725-730.

- [78] HEGAZY A. A. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and management*, 2000, vol. 41, n° 8, pp. 861-881.
- [79] MEI L., INFELD D., EICKER U., et al. Thermal modeling of a building with an integrated ventilated PV facade. *Energy and buildings*, 2003, vol. 35, pp. 605-617.
- [80] LLORET A., et al. Lessons learned in the electrical system design, installation and operation of the Mataro Public Library. In: *Proceedings of the 14th European PV Solar Energy Conference*, 1997, Barcelone, Espagne, pp. 1659-1664.
- [81] CARTMELL B.P., SHANKLAND N.J., FIALA D., et al. A multi-operational ventilated photovoltaic and solar air collector: application, simulation and initial monitoring feedback. *Solar Energy*, 2004, vol. 76, pp. 45-53.
- [82] TIWARI A., SODHA M. S., CHANDRA A., et al. Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, vol. 90, n° 2, pp. 175-189.
- [83] TIWARI A., SODHA M. S. Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, vol. 91, n° 1, pp. 17-28.
- [84] Tiwari JARAMILLO O. A., HUELSZ G., HERNANDEZ-LUNA G., et al. Solar oven for intertropical zones: Optogeometrical design. *Energy Conversion and Management*, 2007, vol. 48, n° 10, pp. 2649-2656.
- [85] VOKAS G., CHRISTANDONIS N., SKITTIDES F. Hybrid photovoltaic thermal systems for domestic heating and cooling-A theoretical approach. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, n° 5, pp. 607-615.
- [86] DUFFIE J.A., BECKMAN W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Ed. New York, Etats- Unis: Wiley Intersciences, 1991, 919 p.
- [87] OTHMAN M. Y., YATIM B., SOPIAN K., et al. Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. *Desalination*, 2007, vol. 209, n° 1-3, pp. 43-49.

- [88] TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic / thermal solar energy systems. *Solar energy*, 2007, vol. 81, n° 9, pp. 1117 -1131.
- [89] HOLLICK J. C. Solar cogeneration panels. *Renewable Energy*, 1998, vol 15, pp.195-200.
- [90] ARENE. Énergie Solaire [en ligne]. Disponible sur : <http://www.arenidf.org/energies/solaire.html> (consulté 18.10.2007).
- [91] FUJISAWA T., TANI T. Annual energy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997, vol. 47, n° 1-4, pp. 135-148.
- [92] SANDNES B., REKSTAD J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with polymer absorber plate experimental study and analytical model.
- [93] FRAISSE G., MENEZO C., JOHANNES K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, n° 11, pp. 1426-1438.
- [94] CHOW T. T. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 2003, vol. 75, pp. 143-152.
- [95] BERGENE T., LOVVIK O. M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*, 1995, vol. 55, n° 6, pp. 453-462.
- [96] INCROPERA F. P., DE WITT D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4<sup>ème</sup> Ed. New York, Etats Unis: John Wiley, 1996.
- [97] CHOW T.T., HE W., JI J., et al. Performance evaluation of photovoltaic-thermosyphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, pp. 123-130.
- [98] CHOW T.T., HE W., JI J. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Solar Energy*, vol. 80, n° 3, 2006, pp. 298-306.
- [99] CHOW T.T., HE W., JI J. An experimental study of façade-integrated photovoltaic/water-heating system. *Applied Thermal Engineering*, 2007b, vol. 27, n° 1, pp. 37-45

[100] KALOGIROU S. A., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. Industrial application of PV/T solar energy systems. Applied Thermal Engineering, 2007, vol. 27, n° 8-9, pp. 1259 - 1270.