الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Synthèse

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrotechnique

Spécialité : énergie solaire et éolien

Thème

Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaique/thermique

Proposé et dirigé par :

Dr. HASSANI Djamel

Préparé et présenté par :

M. BENATTALLAH Baya

M.CHERATI Yamna

Remerciement

Tout d'abord, merci pour le grand **DIEU** qui m'a donné la volonté et la patience de mener à terme ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à mon encadreur, Monsieur **HASSANI Djamel,** Maître à la faculté de genie electrique de l'Université des Sciences et de la Technologie yahia fares, pour son soutien, pour l'attention qu'il a porté à mon travail et pour m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce travail. Ses précieux conseils m'ont été d'une grande utilité.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur **MORSSLI Abd el kader** ,

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **SLIMANI Amine**,

Dédicace

Dieu merci, pour cette occasion qui

m'a été offerte pour m'adresse à

Tous ceux que j'aime

Je dédie ce mémoire

A ma chère mère qui a guidé mes premiers pas

et m'a toujours soutenu,

A mon cher père auquel j'aurais voulu présenté ce travail,

A mes chers frères Abd el Kader et Abd el basset

pour son appui

A mes chères sœurs Nour el houda

et Rokia.

A toutes les familles Benattallah et Rahmoune

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Et mes amies chouaib,youcef ,yamna .noura.khadodja.hadjira et razika.

Baya

Dédicase

Je dédie ce modeste travail à :
À mes très chers parents que les mots ne suffisent pour les décrire, ils m'ont toujours
guidé, toute ma gratitude pour eux.
À mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines et toute la famille
CHERATI.
À mes frères et mes sœurs.
À mon promoteur Mr HASSANI. D, toute ma gratitude pour lui.
À tous mes amis sans exception.
À toute la promotion 2016 du MASTER ESE.
À toutes les personnes qui ont participé, de prés ou de loin, à ce travail.

A' mon binome Baya

Yamna

Résumé

ملخص :

يتضمن عملنا دراسة جيل جديد من الالواح الشمسية الهجينة ذات أنظمة توليد مشتركة للطاقة, حيث تسمح لنا بإنتاج طاقة كهربائية وحرارية في نفس الوقت .

ولكن في الواقع, واحدة من عيوب الخلايا الكهروضوئية هو أن الكفاءة الكهربائية تنخفض بتسخين هذا الأخير وللتحكم في درجة حرارة الالواح نستعمل نظام التبريد لموازنة الكفاءة الكهروضوئية والأداء الحراري ,وباستخدام هذا المبدأ نحصل على كفاءة كهربائية أعلى وما يكفي من الحرارة لتسخين المياه أو الفضاء المحيط.

الكلمات المفتاحية *:* كفاءة كهر وضوئية , لاقط حراري ,خلية كهر وضوئية , ألواح شمسية هجينة .

Résumé :

Notre travail est une étude de la nouvelle génération de capteurs solaires hybrides PVT qui sont un véritable système de cogénération, permettant ainsi la production simultanée de l'énergie électrique et de l'énergie calorifique.

En effet, un des inconvénients des cellules photovoltaïques est le fait que le rendement électrique diminue lorsque ces dernières s'échauffent. En régulant la température de panneau grâce à un système de refroidissement, un équilibre peut être créé, harmonisant ainsi l'efficacité PV et le rendement thermique. En utilisant ce principe il est possible d'obtenir un plus grand rendement électrique et assez de chaleur pour chauffer de l'eau ou l'espace environnant.

Mots clés : rendement photovoltaïque**,** cellule photovoltaïque, module thermique, capteurs solaires hybrides PVT.

Abstract:

Our work is a study of the new generation of hybrid solar PVT which are a real cogeneration system, enabling the simultaneous production of electricity and heat energy.

Indeed, one of the disadvantages of photovoltaic cells is the fact that the electrical efficiency decreases when these cells are heated. By controlling the panel temperature with a cooling system, a balance can be created, thus harmonizing the PV efficiency and thermal performance. Using this principle it is possible to obtain more electrical efficiency and enough heat to heat water or the surrounding space.

Keywords: photovoltaic efficiency, photovoltaic cell, thermal module, hybrid solar PVT.

Nomenclature

Nomenclature

Φ: La latitude

λ: La longitude

δ: La déclinaison

ω: L'angle horaire du soleil

ψ: L'azimut

h: La hauteur angulaire

α: L'orientation

β: L'inclinaison

θ: L'angle d'incidence

E: énergie cinétique (eV : électron Volt)

h : constante de Planck ($6{,}626.10^{-34}$ J.s)

v: fréquence du rayonnement liée à la longueur d'onde (Hz)

C: célérité de la lumière dans le vide (3.10^{8} m/s)

λ : longueur d'onde de la lumière (μm)

$\mathbf{V_T}$ **:** représente le potentiel thermodynamique

$\mathbf{I_{sat}}$ **:** le courant de saturation de la jonction

K: la constante de Boltzman ($1.381\ 10^{-23}$ Joules/Kelvin)

T: la température de la cellule en Kelvin

e : la charge d'un electron

n: le facteur de non idéalité de la junction

$\boldsymbol{I_{CELL}}$ **:** le courant fourni par la cellule

$\mathbf{V_{CELL}}$ **:** la tension aux bornes de la cellule

$\mathbf{I_{CC}}$ **:** le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit

$\mathbf{R_{shunt}}$ **:** la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement

$\mathbf{R_{serie}}$ **:** la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions

FF : le facteur de remplissage ou facteur de forme

$\mathbf{P_{max}}$**:**la puissance maximale

$\mathbf{T_c}$**:** température de la cellule (°C)

$\mathbf{T_a}$ **:**température ambiante (°C)

$\mathbf{E_m}$ **:** éclairement moyen (W/m2)

TUC : température d'utilisation de la cellule (°C).

ΔT : augmentation de température par rapport aux conditions STC (Standard Test Conditions)

***a* :**coefficient de température (mV/K), valeur fournie par le fabriquant

η : rendement énergétique

E : éclairement (W/m^2)

S: surface active de la cellule (m^2)

Pc: puissance crete

List des figures

List des figures

Figure 1.1 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel…… 03
Figure 1.2 : Potentiel Solaire du Sahara algérien……... 03
Figure 1.3 : Le mouvement de la terre……... 04
Figure 1.4 : Structure du soleil……... 05
Figure 1 .5 : Composantes du rayonnement solaire au sol…… 06
Figure 1.6 : Définition de l'air mass AMx……. 07
Figure 1.7 : Coordonnées angulaire de soleil……. 09
Figure 1.8 : Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné……. 09
Figure 1.9 : Schéma simplifié d'un système PV……..... 10
Figure 2.1 : cellule photovoltaïque……. 12
Figure 2.2 : Types des cellules photovoltaïques……. 14
Figure 2.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque…….. 15
Figure 2.4 : Représentation d'une photopile en silicium…… 15
Figure 2.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin…….. 16
Figure 2.6 : Courbe électrique courant-tension…….. 17
Figure 2.7 : Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire ensoleillée et dans l'obscurité…….. 17
Figure 2.8 : Notion de facteur de forme FF pour une cellule photoélectrique……... 18
Figure 2.9 : l'allure de la caractéristique puissance tension d'une cellule PV…… 18
Figure 2.10 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.19
Figure 2.11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température..20
Figure 2.12. Les courbes P-V pour différentes valeurs de Température…… 20
Figure 2.13 : Module photovoltaïque……. 22
Figure 2.14: Caractéristique I (v) d'un groupement des cellules en série…….. 22
Figure 2.15 : Caractéristique I (v) d'un groupement des cellules en parallèle……... 23
Figure 2.16 : Câblage série / parallèle de module PV avec leurs diodes de protection. 23
Figure 3.1 : Coupe transversale d'un capteur solaire à air……. 26
Figure 3.2 : Effet du traitement antireflet sur la transmission du rayonnement……. 28
Figure 3.3 : Le système de circulation par thermosiphon……... 30
Figure 3.4 : Le système de circulation force…….. 31
Figure 3.5 : Un capteur non vitré…… 32

Figure 3.6 : Schème pompe à chaleur de piscine…….. 32
Figure 3.7 : Différents constituants d'un capteur plan vitré……..... 33
Figure 3.8 : Absorbeur…… 33
Figure 3.9 : Le capteur plan vitré pour des habitations…….. 34
Figure 3.10 : Capteur solaire thermique sous vide……. 35
Figure 3.11 : Capteur solaire thermique à concentration…….. 36
Figure 3.12 : Centrale solaire thermodynamique……... 36
Figure 4.1. Représentation schématique du capteur hybride…….. 40
Figure 4.2 Différents constituants d'un capteur solaire hybride……... 40
Figure 4.3. Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air……. 42
Figure 4.4. Photo du capteur hybride étudié par TOUAFEK et al…… 43
Figure 4.5. Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor…… 46
Figure 4.6 Capteurs PVT de concentration…… 46
Figure 4.7. Représentation schématique D'un système solaire PVT……. 47

List des tableaux

List des tableaux

Tableau 1.1 : caractéristiques principales du soleil **……...…….. 5**

Tableau 3.1 : Propriétés thermo physique de quelques matériaux isolants**…….27**

Tableau 3.2 : Les coefficients d'isolation de gaz utilisé**……..……28**

Sommaire

Sommaire

Introduction générale …… 01

chapitre 01 : énergie solaire

1.1. Introduction…… 02

1.2. Energie solaire en Algérie …… 03

1.3. Mouvement de la terre ……..... 04

1.4. Soleil ……..... 04

1.4.1. Rayonnement solaire…….. 06

1.4.2. Paramétrage de la course du soleil……. 08

1.5. Conversion de l'énergie solaire…… 09

1.5.1. Thermo solaire…… 10

1.5.2. Energie solaire photovoltaïque…… 10

1.6. Conclusion……. 10

chapitre 02 : énergie solaire photovoltaïque

2.1. Introduction……..... 11

2.2. Historique de l'énergie solaire photovoltaïque……. 11

2.3. Cellule photovoltaïque……... 12

2.3.1. Technologie utilisée…… 13

2.3.1.1. Silicium polycristallin…….. 13

2.3.1.2. Silicium monocristallin……... 13

2.3.1.3. Silicium amorphe en couche mince……. 13

2.3.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque…….. 14

2.3.3. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque…… 16

2.3.4. Courbe caractéristique électrique……... 17

2.3.5. Caractéristique puissance / tension…… 18

2.3.6. Influence de l'éclairement…….. 18

2.3.7. Influence de la température…… 19

2.3.8. Rendement de la cellule photovoltaïque…… 20

2.4. Module photovoltaïque……. 21

2.4.1. Association en série…… 21

2.4.2. Association en parallèle……. 22

2.4.3. Diodes de by-pass…….. 22

2.4.4. Caractéristiques d'un module photovoltaïque…… 23
2.4.5. Orientation des modules……. 23
2.5. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque…….. 24
2.6. Conclusion……. 24

chapitre 03 : énergie solaire thermique

3.1. Introduction……... 25
3.2. Capteurs solaires thermiques…… 25
3.2.1. Principe de fonctionnement……. 26
3.2.2. Eléments constitutifs et leurs caractéristiques……..... 26
3.2.2.1. Vitrage (couverture)……..... 26
3.2.2.2. Absorbeur…… 27
3.2.2.3. Isolant…… 27
3.2.2.4. Fluide caloporteur……... 28
3.2.2.4.1. propriétés d'un fluide caloporteur……. 28
3.2.2.4.2. Circulation du fluide caloporteur……. 29
3.2.2.5. Boitier…….. 30
3.2.2. Différents types de capteurs solaires thermiques……... 30
3.2.2.1. Les capteurs non vitres…… 30
3.2.2.2. Les capteurs plans…… 31
3.2.2.3. Les capteurs sous vide……. 33
3.2.2.4. Les capteurs a concentration…… 34
3.3. Centrales solaires thermiques…… 35
3.4. Avantages et inconvénients des panneaux solaires thermiques…… 36
3.5. Conclusion……. 36

chapitre 04 : capteur solaire hybride

4.1. Introduction……... 38
4.2. Historique et état de l'art sur les capteurs hybrides…….. 38
4.3. Capteur solaire hybride…… 39
4.4. Comment est conçu un panneau solaire hybride ?..... 39
4.5. Eléments de constructions……. 40
4.6. synthèse bibliographique des capteurs solaires pvt à air……... 41
4.6.1. Travaux effectues en Algérie……. 42
4.7. synthèse bibliographique des capteurs solaires pvt à eau……. 44

4.8. Capteurs pvt de concentration……... 46
4.9. principe de fonctionnement d'un système pvt……... 47
4.10. Avantages et Inconvénients des capteur solaires pv/t……. 48
4.13. Conclusion……... 48
Conclusion generale……... 49
Références bibliographiques……. 50

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le monde évolue et avec lui des caractéristiques comme l'augmentation de la population, de l'activité industrielle et le changement du style de vie. La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse et rien ne laisse présager un ralentissement de cette croissance, surtout dans les pays émergents. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Les ressources énergétiques de la planète se présentent sous deux formes différentes : énergies renouvelables et énergies épuisables.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, notamment l'énergie solaire, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIXème siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses et plus économiques. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables sous ses deux formes, thermique et photovoltaïque, en utilisant directement les rayons du soleil pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

Les enjeux scientifiques sont notamment liés à l'optimisation des performances énergétiques et du coût global. Il sera nécessaire d'envisager toutes les solutions technologiques permettant d'intensifier la conversion solaire tout au long de la chaîne énergétique allant de la source (flux solaire) aux consommations de l'utilisateur en exploitant l'effet thermique et photovoltaïque du soleil.

En effet, le rendement de conversion des modules photovoltaïques, dans le meilleur des cas, ne dépasse pas les 18 %. Avec les recherches en cours de développement, il peut augmenter de 2 à 3 % dans les prochaines années, mais avec un coût considérablement plus élevé. En plus, ce rendement dépend en grande partie de la température de fonctionnement, typiquement la perte peut atteindre 15 – 20 % si aucun refroidissement du module n'est prévu. [04].

Notre projet de fin d'études entre dans cette optique et se caractérise par l'étude de la nouvelle génération de capteur solaire qui permet d'exploiter les deux forme d'énergie solaire au même temps, c'est les capteurs hybride PV/T. Son principe consiste à minimiser la température de fonctionnement du module photovoltaïque en prélevant un maximum de chaleur et ensuite l'utiliser pour chauffer de l'eau par exemple.

Chapitre 01 :
Energie solaire

ENERGIE SOLAIRE

1.1. INTRODUCTION

Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies conventionnelles d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont la conséquence de la photosynthèse, que pour les énergies non conventionnelles dites renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, et l'énergie géothermique. En effet parmi les énergies renouvelables trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (l'éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,…) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies nous avons l'énergie en provenance du soleil qui est transformée ensuite par l'environnement terrestre :

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire de la chaleur ou de l'électricité.
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- L'éolien a une origine plus complexe, l'énergie du vent, qui est utilisée d'une manière mécanique.
- L'hydroélectrique provient de la transformation de l'énergie solaire en énergie potentielle de gravitation par évaporation de l'eau, puis par transformation en électricité.
- La géothermie est l'utilisation directe du gradient de température terrestre (énergie renouvelable) ou des sources chaudes (énergie non renouvelable).

Pour l'exploitation de l'énergie solaire il est donc nécessaire, la connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

1.2. ENERGIE SOLAIRE EN ALGERIE

Les réalisations algériennes dans le domaine de l'énergie propre dite renouvelable sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc énergie renouvelable mondial qui a atteint des objectifs très avancés.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie, n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant quatre décennies d'indépendance, malgré la situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire parmi les plus élevés au monde (figure 1.1).

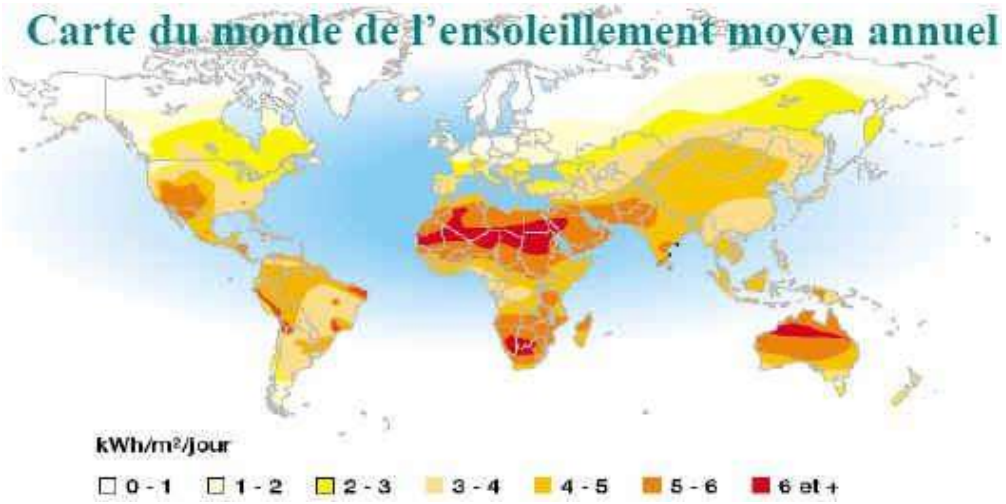


Figure 1.1 : *Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.*

La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national (figure 1.2), soit prés de $1700KWh/m^2$/an au Nord et 2263 kWh/m^2/an au Sud [03]. Le recours aux énergies renouvelables au Sud algérien est indispensable et prioritaire dans tout développement durable de la région : les distances entre les localités et la dispersion de la population dans le Sahara rendent le raccordement au réseau électrique très coûteux.

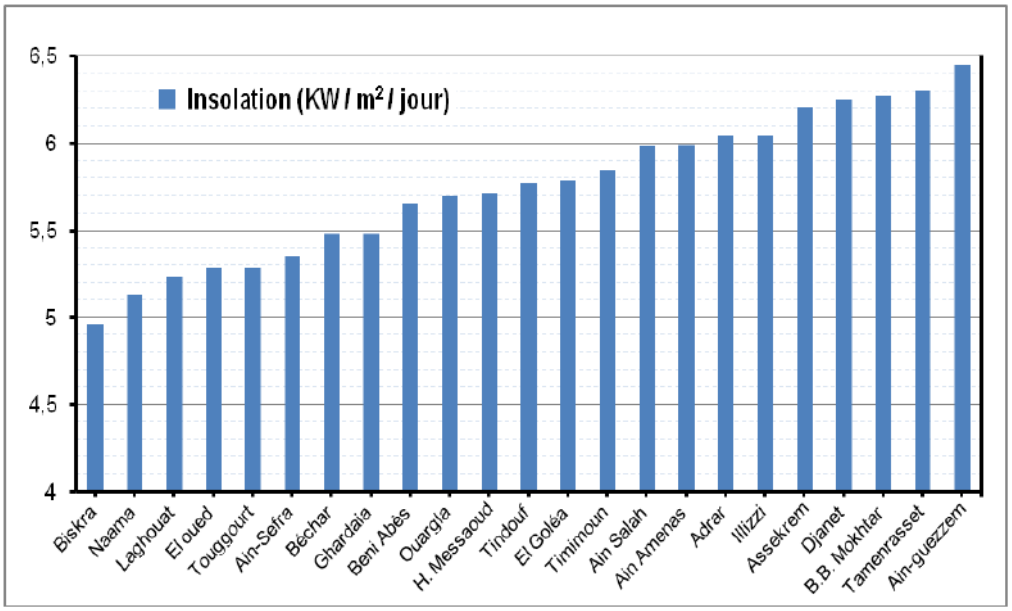


Figure 1.2 : *Potentiel Solaire du Sahara algérien* [01].

1.3. MOUVEMENT DE LA TERRE

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un des foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux [09].

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à 23°27.

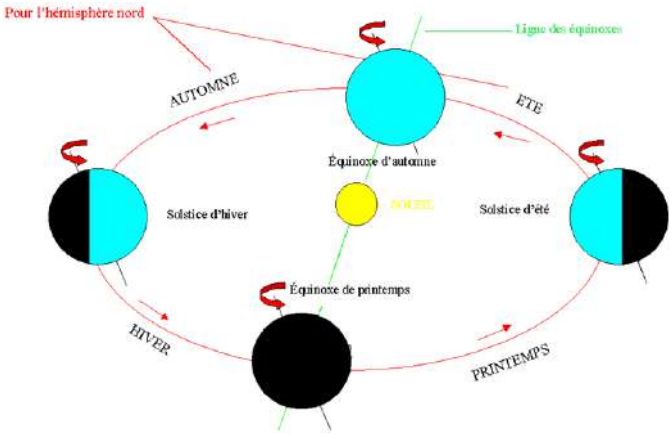


Figure 1.3 : *Le mouvement de la terre.*

1.4. SOLEIL

L'énergie solaire est produite par les réactions de fusion thermonucléaires : les noyaux d'hydrogène s'assemblent en noyaux d'hélium. Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du Soleil. Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur la terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion.

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de $14x10^5$ km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2.10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km, sa luminosité totale, c'est à dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu prés égale à 4.10^{26} W. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7.10^{17}$ W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques, 30% de cette puissance est réfléchie vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle

d'évaporation-précipitation de l'atmosphère. Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous :[6]

Diamètre (km)	14x
Masse (kg)	2x
Surface (km2)	6.09x
Volume (km3)	1.41x
Masse volumique moyenne (kg /m3)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5x

Tableau 1.1 : *caractéristiques principales du soleil [6].*

Le soleil n'est pas une sphère homogène. On peut y distinguer trois régions principales (figure 1.4) :

a. l'intérieur contient 40% de la masse du soleil, c'est là ou se crée l'énergie par réaction thermonucléaire, cette région s'étend sur une épaisseur de 25104km. Cette couche est divisée en trois zones. Le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.

b. la photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300km, elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500 K.

c. la chromosphère et la couronne solaire, sont des régions à faible densité ou la matière est très diluée, elles constituent l'atmosphère du soleil, cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température y très élevée (un million de degrés) [9][6].

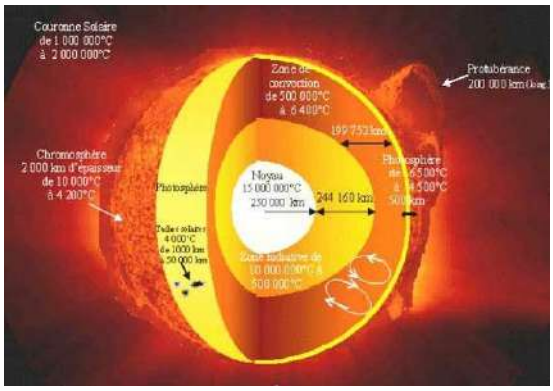


Figure 1.4 : *Structure du soleil*

1.4.1. RAYONNEMENT SOLAIRE

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m^2). L'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire. L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé.

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

- ***Le rayonnement direct*** est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par les miroirs.
- ***Le rayonnement diffus*** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans l'atmosphère, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du Soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire que l'on reçoit un rayonnement identique dans toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du Soleil (composante appelée circum-solaire) et souvent un renforcement sur l'horizon ou la bande horizon.
- ***L'albédo*** est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de la topographie du site et de son environnement. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure 1.5.

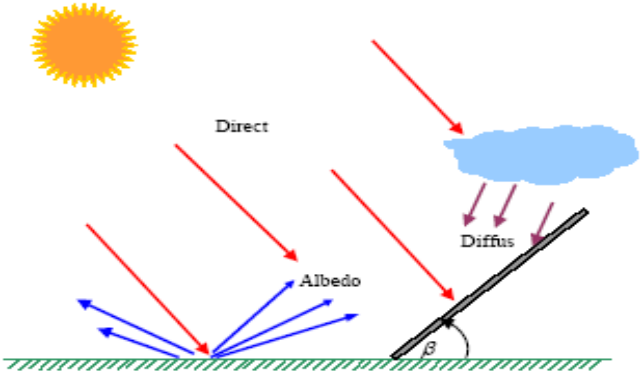


Figure 1 .5 : *Composantes du rayonnement solaire au sol.*

Le spectre diffère donc entre l'espace et la surface du globe; il diffère également a la surface de la terre en fonction du lieu. On le caractérise de façon globale par le nombre de masse d'air.

On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure 1.6). Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil h. [02]

À l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la figure 1.6, on écrit la longueur du trajet du Soleil a travers l'atmosphère [02] :

$$\sinh = \frac{OA}{OM} \Leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sinh} \tag{1.1}$$

Donc l'Air Mass (AM) est :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sinh} \tag{1.2}$$

La notation conventionnelle du ce concept est donnée par un nombre sans dimension AMx, x étant [02]:

$$x = \frac{1}{\sinh} \tag{1.3}$$

Citons, à titre d'exemple :

- AM1 : position du Soleil au zénith; h=90°, (au niveau de la mer).
- AM2 : le Soleil à 30°.
- AM1,5 : le Soleil à 41.8°.

Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales).

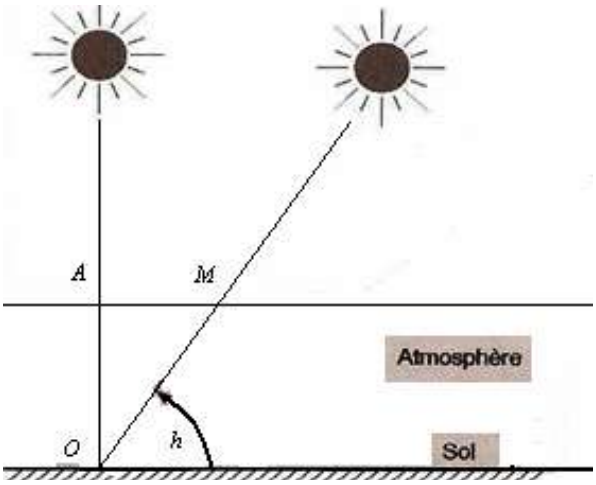


Figure 1.6 : *Définition de l'air mass AMx.*

1.4.2. PARAMETRAGE DE LA COURSE DU SOLEIL

Angle solaire : Les angles solaires sont des facteurs intéressants pour le calcul de rayonnement solaire.

La latitude (φ) : est l'ange formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu Considère, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif.

La longitude (λ) : représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour Longitude 0. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives.

La déclinaison (δ) **:** est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial, elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre -23°07 (au solstice d'hiver) et +23°07, (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne [7] .

L'angle horaire du soleil (ω **) :** repère la position du soleil dans sa rotation journalière sur le cône d'ouverture δ'. C'est l'angle entre le plan méridien passant par l'observateur et le plan méridien contenant le soleil. En principe, un jour solaire (δ variant de-180° à+180^{0}) correspond à 24h.

L'azimut ψ **:** qui est l'angle formé par projection de la direction du soleil et la direction du Sud. Il est comté positif à l'Ouest (le matin) et négatif à l'Est (le soir). Sa valeur est obtenue lorsque le soleil se couche (suivant la hauteur angulaire du solaire, et l'inclinaison du panneau).

La hauteur angulaire (γ **)** : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 0^{0} (au lever et au coucher) et maximum γ_m au zénith (midi en temps solaire vrai).

Afin d'obtenir l'angle d'incidence des rayons sur le capteur, une représentation schématique (figure 1.6) nous permet de visualiser clairement les différents angles pris en compteur dans l'étude du rayonnement arrivant dans le plan d'un capteur. Le angle (γ), hauteur angulaire dans l'étude et (ψ , azimut) que nous venons de définir dans le positionnement horaire et spatial de soleil, son liés directement relative du soleil par rapport à l'emplacement géographique du capteur

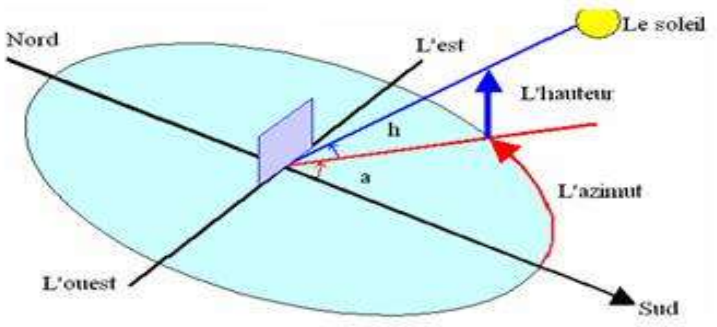


Figure 1.7 : *Coordonnées angulaire de soleil*

Les autres anges sont liée directement au positionnement du capteur (figure 1.8), et permettent de corriger les pertes liées au trajet optique des rayons lors de la traversée de l'atmosphère, ils correspondent à :

L'orientation (α) : du capteur par apport au sud, (0° au sud, 180° au nord,+ 90° à l'ouest et -90° à l'est.

L'inclinaison (β) : du capteur par rapport au sol ($0°<\beta<90°$). Elle est nulle pour ce qui est du plan horizontal dans le calcul du premier angle d'incidence puis de 45° pour le second.

L'angle d'incidence (θ) : des rayons solaires par rapport à la normal au capteur. Une relation trigonométrique permet de déterminer sa valeur en fonction des autres angles :

$$\cos(\theta) = \cos(\gamma).\sin(\beta).\cos(\psi - \alpha) + \sin(\gamma).\cos(\beta) \qquad (1.4)$$

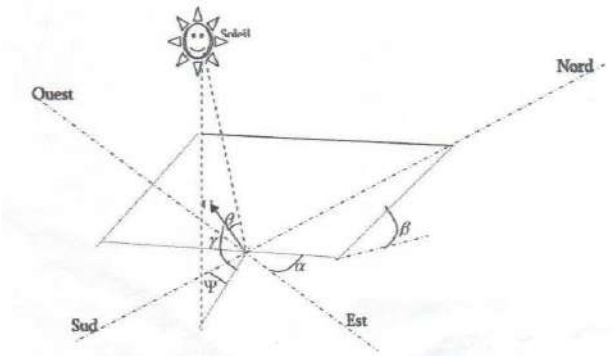


Figure 1.8 *: Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné*

1.5. CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE

La captation ou la conversion de l'énergie solaire diffère suivant que l'on souhaite produire de la chaleur ou de l'électricité. On distingue les toits bleus (photovoltaïque) et des toits noire (solaire thermique). En effet, les deux technologies de conversion solaire thermique et photovoltaïque font appel à des approches techniques totalement déférentes, ce sont deux filières d'énergie renouvelable distinctes. La nouvelle tendance de conversion consiste à

conjuguais les deux formes de l'énergie solaire en développant le capteur solaire hybride PVT qui fait l'objet de notre travail.

1.5.1. THERMO SOLAIRE

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. Ce système est totalement écologique, économique et la durée de vie des capteurs très élevée [8].

1.5.2. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique (figure 1.9). Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet Photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries
- L'onduleur.

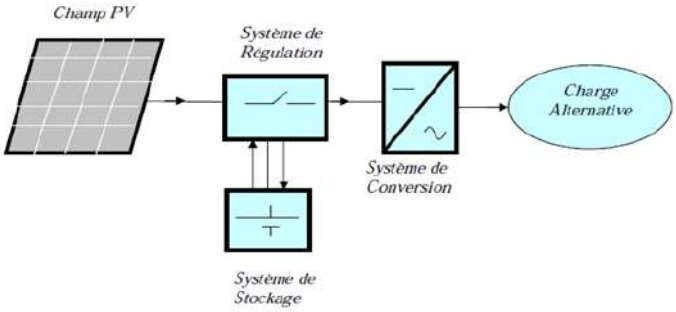


***Figure 1.9** : schéma simplifie d'un système PV.*

1.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement. L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considère et de son orientation par rapport au soleil. Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu. Par exemple les capteurs installés à Médéa sont inclinés 36.27°.

Chapitre 02 : Energie Solaire Photovoltaïque

ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. INTRODUCTION

Énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet Photovoltaïque (découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.

La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technologie photovoltaïque, notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le soleil n'est pas visible en un point de la terre 24 heures sur 24, cette application nécessite l'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement. En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries
- L'onduleur.

2.2. HISTORIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Parmi les dates marquantes des découvertes sur l'énergie photovoltaïque, citons les suivantes :

- **1839 :** Le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- **1875 :** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique.
- **1954 :** Trois chercheurs américains : Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule Photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des nouvelles solutions pour alimenter ses satellites.
- **1958 :** Une cellule avec un rendement de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973 :** La première maison alimentée par des cellules photovoltaïque est construite à l'Université de Delaware.

- **1983 :** La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.
- **1995 :** Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne, et se généralisent [4].

2.3. CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les cellules photovoltaïques (figure 2.1) sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par l'effet photovoltaïque. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

Dès que la lumière percute un matériau comme le silicium, la conversion d'énergie fait intervenir trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés :

- l'absorption de la lumière dans le matériau ;
- le transfert d'énergie des photons aux champs électriques ;
- la collecte des charges.

Le silicium constitue un matériau photovoltaïque performant : il présente des propriétés optiques et électriques spécifiques pour assurer la conversion photovoltaïque. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la jonction, c'est de créer un champ électrique interne. Ce champ électrique va ainsi contribuer à collecter les électrons détachés par l'énergie des photons. La collecte du courant se fait par des contacts métalliques en forme de grilles sur chaque face. Si les électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant peut circuler[22].



Figure 2.1 : cellule photovoltaïque.

La méthode utilisée pour créer ce champ électrique est celle du « dopage » au moyen d'impuretés ; le dopage d'un matériau pur permet d'amener des charges électriques excédentaires qui améliorent sa conductivité.

Il existe deux types de dopage :

1. le dopage de type N (négatif) consiste à introduire dans la matrice de silicium des atomes d'impuretés pentavalentes tels que le phosphore P, qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative) libre de se mouvoir dans le cristal. Le matériau est donc potentiellement «donneur» d'électron disponible pour la conduction : le silicium est appelé silicium de type N ;
2. le dopage de type P (positif) utilise des atomes d'impuretés trivalentes tels que le bore B, dont l'insertion dans la structure cristalline du silicium donne un excédent de trous (charge positive). À l'inverse du précédent, le matériau est «accepteur» d'électron : le silicium est appelé silicium de type P.

Dès que les deux semi-conducteurs sont en contact, une jonction P-N se crée, au voisinage de laquelle apparaît un champ électrique interne provoqué par le déséquilibre des charges.

2.3.1. TECHNOLOGIE UTILISEE

Plusieurs technologies (figure 2.2) sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents. Les principales technologies industrialisées en série à ce jour sont le silicium mono ou polycristallin et le silicium en couche mince.

2.3.1.1. SILICIUM POLYCRISTALLIN

Les panneaux PV avec des cellules polycristallines (figure 2.2.b) sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Il est constitué de plusieurs monocristaux juxtaposés dans différentes orientations donnant à la cellule un aspect mosaïque. Le silicium polycristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial en raison de son bon rendement (11 à 15 %) pour des coûts de fabrication maîtrisés. Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix.

2.3.1.2. SILICIUM MONOCRISTALLIN

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines (figure 2.2.a) sont les photopiles de la première génération. Il est constitué d'un seul cristal offrant à la cellule un arrangement parfait des atomes. Il présente un rendement légèrement supérieur au silicium polycristallin (12 à 18%); néanmoins, il reste assez onéreux en raison de son exigence de grande pureté et de l'importante quantité d'énergie nécessaire à sa fabrication.

2.3.1.3. SILICIUM AMORPHE EN COUCHE MINCE

Le silicium est déposé en couche mince (*spray*) sur une plaque de verre ou un autre support ; ce support peut être souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère, en

partie, une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes (figure 2.2.c) sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron; par contre, son rendement de conversion est faible (de 5 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. L'avantage de cette technique est la possibilité d'empiler différents types de couches de divers matériaux pour former des structures multijonctions de type Cellule tandem (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin). Ces dernières augmentent davantage la tension de la cellule et diminuent les effets de la stabilisation.

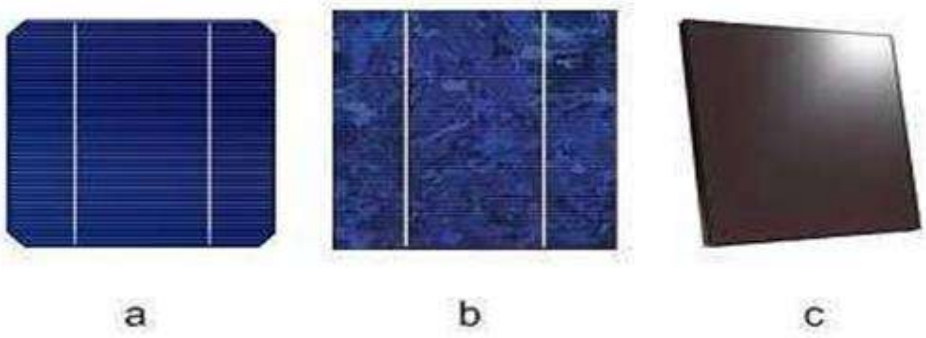


Figure 2.2 : *Types des cellules photovoltaïques*
a. *monocristallin,* ***b.*** *polycristallin,* ***c.*** *amorphe*

2.3.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Caractérisée par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique, le silicium présente toutes les propriétés électriques d'un semi-conducteur permettant de convertir la lumière absorbée en électricité. Ce transfert d'énergie des photons aux charges électriques s'appelle la photoconductivité : il s'explique par la propriété que présente le silicium à contenir quatre électrons relativement mobiles dotés d'une faible énergie de liaison.

Dans l'obscurité, les électrons sont peu mobiles ; à la lumière, les photons absorbés par le silicium apportent une telle énergie que la mobilité des électrons du matériau s'en trouve fortement accrue, ce qui se traduit par une augmentation de la conductivité du matériau.

Le principe de ce photocourant est le suivant : les électrons tournent autour du noyau sous l'effet de la lumière ; les électrons de la couche périphérique des atomes sont «arrachés» sous l'action du choc d'un photon. Lorsqu'un photon vient frapper la zone de transition, il arrache un électron à l'atome de silicium qui va se déplacer du coté N. tandis que le « trou » ainsi crée par cet arrachement va se déplacer du coté P (figure 2.3). Il apparaît ainsi aux bornes du dispositif, une différence de potentiel. Si on ferme la cellule photovoltaïque sur un circuit extérieur, un courant continu circule (figure 2.4). La cellule qui se comporte comme une pile sensible aux photons (la lumière) s'appelle des photopiles.

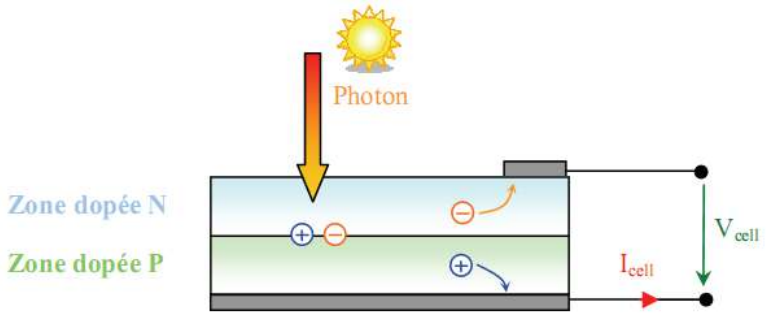


Figure 2.3 : *Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque*

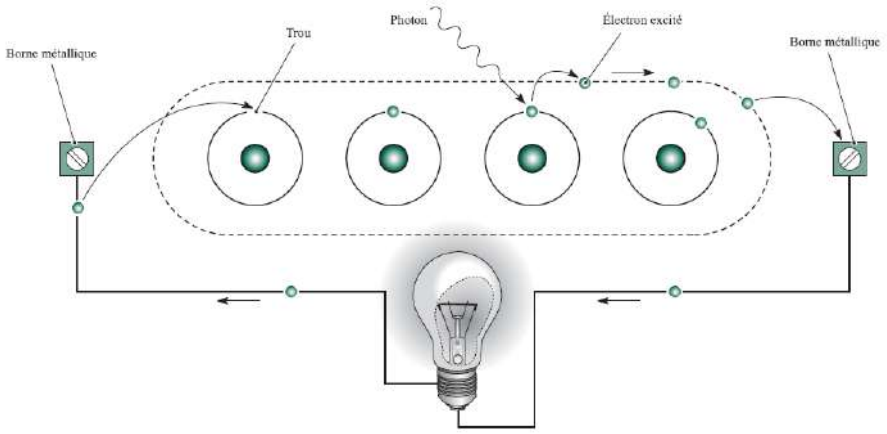


Figure 2.4 : *Représentation d'une photopile en silicium.*

Pour arracher un électron, il faut que le photon ait suffisamment d'énergie. Le photon possède une énergie cinétique (E) qu'il est possible de déterminé comme suit :

$$E = h.\nu \quad \text{avec} \quad \nu = C/\lambda \; ; \tag{2.1}$$

avec :

E : énergie cinétique (eV : électron Volt) ;
h : constante de Planck ($6{,}626.10^{-34}$ J.s) ;
ν : fréquence du rayonnement liée à la longueur d'onde (Hz) ;
C : célérité de la lumière dans le vide (3.10^{8} m/s) ;
λ : longueur d'onde de la lumière (μm).

Donc : $$E = \frac{hC}{\lambda} \tag{2.2}$$

L'énergie cinétique ***E*** nécessaire à l'arrachage des électrons est donc inversement proportionnelle à la longueur d'onde du photon **λ**. Le photon ne cède sous forme électrique qu'une fraction de son énergie cinétique, à savoir l'énergie nécessaire à la libération d'un électron, le reste étant dissipé sous forme de chaleur. Ainsi, une part importante de l'énergie des photons de courte longueur est perdue en chaleur dans la cellule photovoltaïque.

2.3.3. MODELISATION ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairement est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (PN) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{oc}. Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit I_{cc}. Ces valeurs peuvent changer fortement en fonction du matériau utilisé, de la température et de l'ensoleillement.

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure 2.5 illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{cc} - I_{Sat}\left[\exp\left(\frac{V_{CELL} + (I_{CELL} \times R_{serie})}{nV_T}\right) - 1\right] - \frac{V_{CELL} + (I_{CELL} \times R_{serie})}{R_{shunt}} \quad (2.3)$$

Avec :

$$V_T = \frac{KT}{e} \quad (2.4)$$

V_T représente le potentiel thermodynamique, I_{sat} le courant de saturation de la jonction, K la constante de Boltzman ($1.381\ 10^{-23}$ Joules/Kelvin), T la température de la cellule en Kelvin, e la charge d'un électron, n le facteur de non idéalité de la jonction, I_{CELL} le courant fourni par la cellule, V_{CELL} la tension aux bornes de la cellule, I_{CC} le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit, R_{shunt} la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement R_{serie} la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

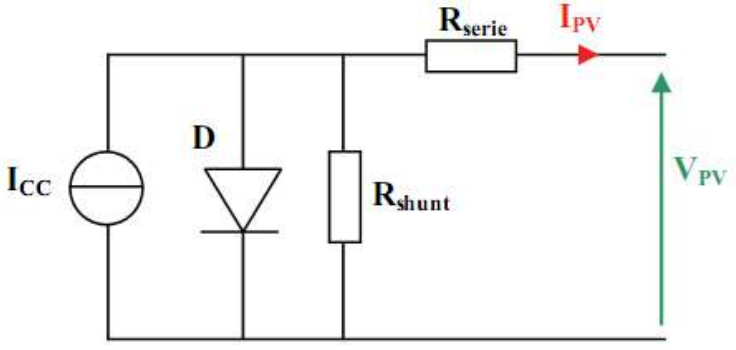


Figure 2.5 : *Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin.*

2.3.4. COURBE CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE

La Figure 2.6 représente les caractéristiques typiques mesurables $\boldsymbol{I_{cell} = f(V_{cell})}$ d'une jonction PN soumise à de fonctionnement données (ensoleillement, température à la surface de la cellule, etc.). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court circuit (Le point de fonctionnement en court circuit : $\boldsymbol{I_{cc}}$ pour $\boldsymbol{V}$**=0V**) jusqu'au circuit ouvert (Le point de fonctionnement à vide : $\boldsymbol{V_{CO}}$ pour $\boldsymbol{I}$=0A).

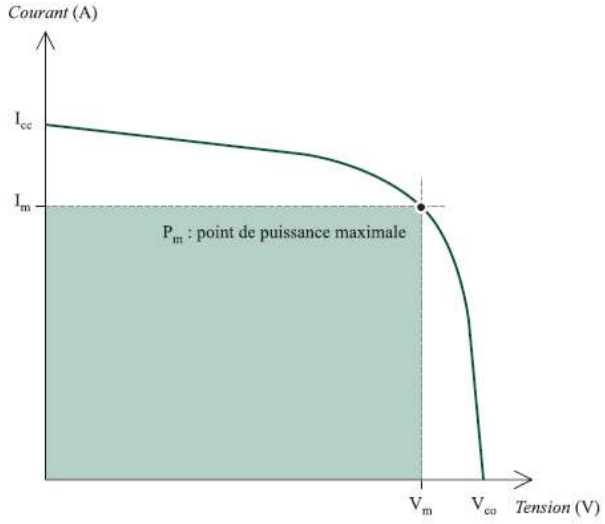


Figure 2.6 : *Courbe électrique courant-tension.*

Quand la cellule est dans l'obscurité elle se comporter comme une cellule réceptrice, une batterie pourrait se décharger à travers la cellule si nous ne disposons pas d'une diode de blocage.

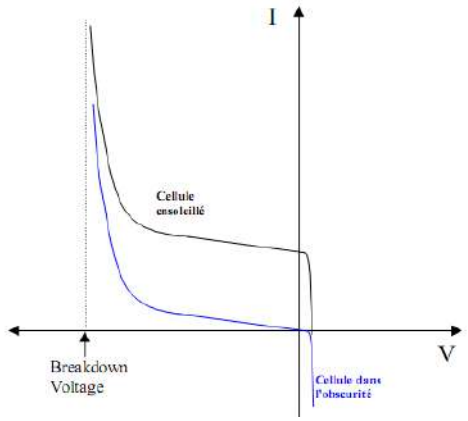
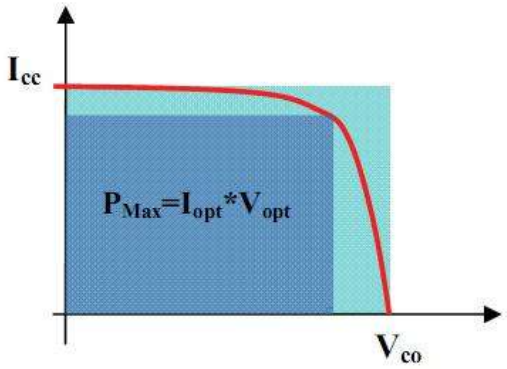


Figure 2.7 : *Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire ensoleillée et dans l'obscurité.*

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique courant-tension pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou facteur de forme (***FF***). Il est illustré sur la Figure 2.8. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale $\boldsymbol{P_{max}}$ que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le

rectangle $I_{cc}V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.



$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}}$$

Figure 2.8 : *Notion de facteur de forme FF pour une cellule photoélectrique*

2.3.5. CARACTERISTIQUE PUISSANCE / TENSION

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$ Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$. Cette courbe a l'allure suivante :

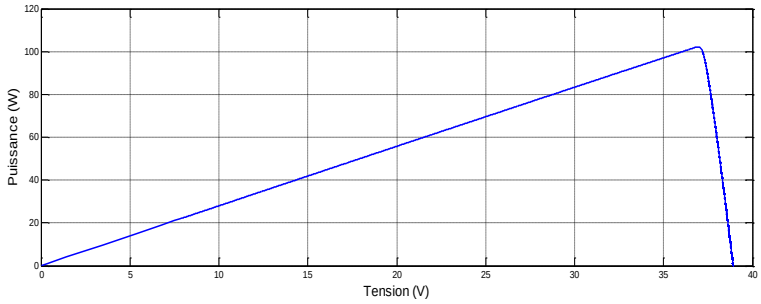


Figure 2.9 : *l'allure de la caractéristique puissance tension d'une cellule PV.*

2.3.6. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure 2.10 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes : le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

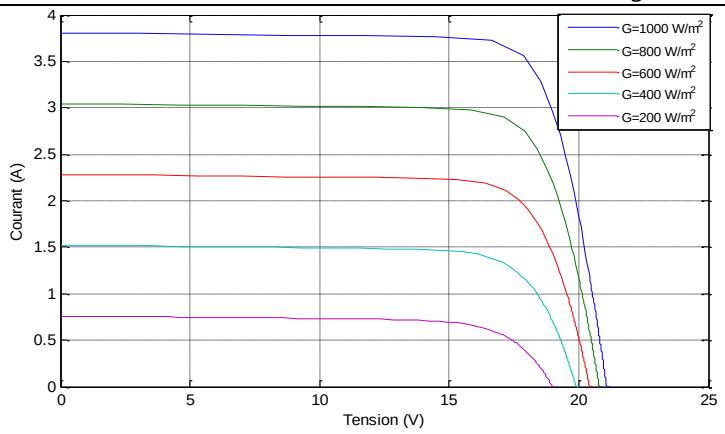


Figure 2.10 : *Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.*

Pour augmenter l'éclairage des cellules, il est conseillé de les orienter de sorte que les rayons solaires frappent perpendiculairement la surface de la cellule : il est possible d'utiliser des panneaux à orientation et inclinaison fixes, ou des panneaux à inclinaison variable présentant un rendement bien meilleur.

2.3.7. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant). La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule T_c est toujours plus élevée que la température ambiante T_a.

$$\mathrm{Tc} = \mathrm{Ta} + \frac{E_m}{800}\ (\mathrm{TUC} - 20) \qquad (2.5)$$

La perte de tension d'un module ou d'une cellule peut être estimée par la formule suivante :

$$U(T) = U_{25°C} + a\,.\,\Delta T \qquad (2.6)$$

avec :

T_c : température de la cellule (°C) ;

T_a : température ambiante (°C) ;

E_m : éclairement moyen (W/m2) ;

TUC : température d'utilisation de la cellule (°C).

ΔT : augmentation de température par rapport aux conditions STC (Standard Test Conditions)

a : coefficient de température (mV/K), valeur fournie par le fabriquant

Le graphe de la figure 2.11 montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale [02].

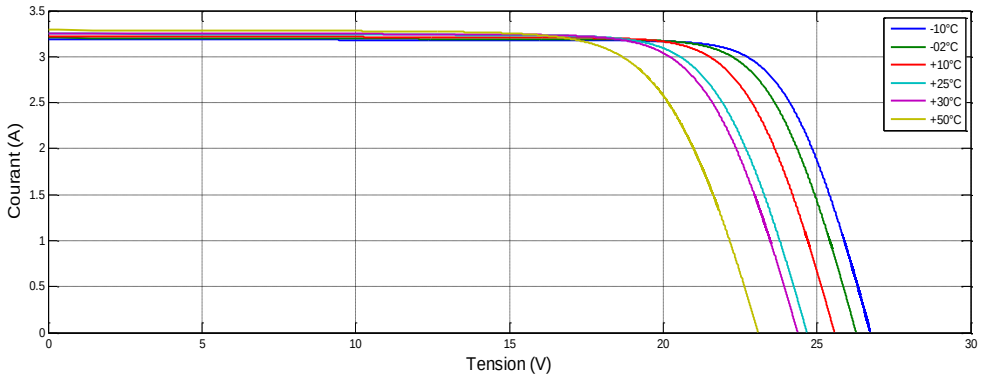


Figure 2.11 : *Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température*

Le graphe dans figure 2.12 donne la caractéristique puissance-tension à un flux solaire de **1000 W/m²** pour plusieurs valeurs de Température :

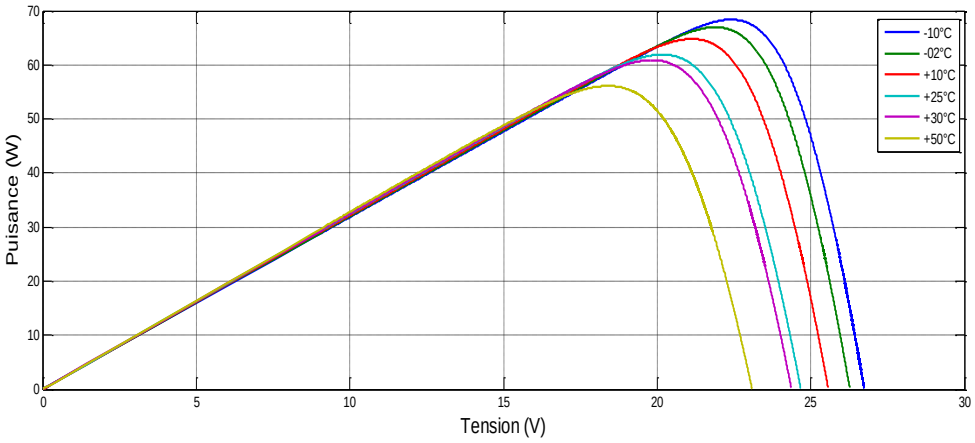


Figure 2.12. *Les courbes P-V pour différentes valeurs de Température.*

Comme il est montré sur la figure 2.12, la puissance électrique chute rapidement avec l'augmentation de la température de panneau.

2.3.8. RENDEMENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Le rendement énergétique η d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance maximale P_m et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \qquad (2.7)$$

avec :

η : rendement énergétique ;
E : éclairement (W/m^2) ;
S : surface active de la cellule (m^2) ;
$\mathbf{P_m}$: puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : *Standard Test Condition*), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1 000 W/m^2, à la température de 25° C sous un spectre AM 1,5.

La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 correspond lui à une même lumière arrivant à la surface terrestre. L'appellation AM1,5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à 48.2° sur la surface de la Terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande. De manière générale, l'indice m associée à la masse d'air (AMx) est calculé comme suit : $x \approx 1/\sin(h)$, h étant l'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la Terre.

L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque dépend des caractéristiques du type de rayonnement : répartition spectrale (réponse spectrale), quantité d'énergie, température, surface de la cellule et de ses caractéristiques dimensionnelles, forme de la cellule et conditions ambiantes de fonctionnement de la cellule (température extérieure, vitesse du vent, etc.).

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est généralement assez faible (10 à 20%). De meilleurs rendements peuvent être obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (arséniure de gallium donne des rendements supérieurs à 25% en laboratoire) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches) souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium qui représente une solution économique : son rendement énergétique ne dépasse pas les 15%.

2.4. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module (figure 2.13). Ces modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés [23] .



Figure 2.13 : *Module photovoltaïque*

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.

2.4.1. ASSOCIATION EN SERIE

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

Figure 2.14: *Caractéristique I (v) d'un groupement des cellules en série*

2.4.2. ASSOCIATION EN PARALLELE

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

Figure 2.15 : *Caractéristique I (v) d'un groupement des cellules en parallèle.*

2.4.3. DIODES DE BY-PASS

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dues par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement,…). Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante.

Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série. La Figure 2.16 montre le câblage typique d'un réseau de cellules ou de modules photovoltaïques munis de ces diodes protections.

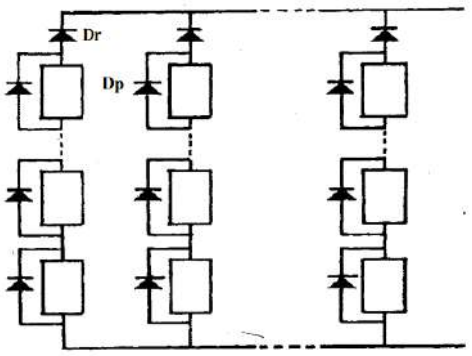


Figure 2.16 : *Câblage série / parallèle de module PV avec leurs diodes de protection*

2.4.4. CARACTERISTIQUES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

- ***La puissance de crête, Pc :*** Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- ***La caractéristique I/V :*** Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ***Tension à vide, V_{CO} :*** Tension aux bornes du module en 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, $P_m = U_m * I_m$
- ***Rendement :*** Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ***Facteur de forme :*** Rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} * I_{cc}$ [21].

2.4.4. ORIENTATION DES MODULES

L'orientation et l'inclinaison des modules PV déterminent en grande partie la quantité de rayonnement reçue par la surface. Elles influent sur la quantité d'énergie produite au final et il est très important de les prendre en compte. Si les modules ne sont pas montés sur un trackeur (ou suiveur) solaire, qui suit la position du soleil, afin d'obtenir un rayonnement élevé, ils doivent alors faire face au Sud (dans l'hémisphère nord) et au Nord (dans l'hémisphère sud).Cela permet de garantir le niveau de rayonnement maximum d'un champ pendant l'année. Dans les régions proches de l'équateur, l'orientation n'est pas importante, mais un minimum de 10° d'inclinaison est nécessaire pour évacuer l'eau de pluie.

2.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

1. **Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont :**
   - Pas de pollution.
   - fiabilité et la longue vie de l'installation.
   - Sa structure fixe.
   - Son coup de maintenance bas.
   - Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
   - L'installation ne produit aucun bruit.

2. **Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :**
   - Le coût élevé de l'installation.
   - Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
   - La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

2.6. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément. En effet nous avons décrit les convertisseurs photovoltaïques, leur caractéristique I-V, leurs principales grandeurs caractéristiques, le mécanisme de la conversion photovoltaïque ainsi que l'étude de l'influence des divers paramètres sur leur caractéristique puis nous avons aborde l'association des cellules en série, en parallèle et en série-parallèle, et les déséquilibres dans les groupements de modules puis nous avons cité les différents types de cellules solaires.

Chapitre 03 : Energie Solaire Thermique

ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

3.1. INTRODUCTION

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est de produire la chaleur. On utilise pour cela plusieurs types de capteurs thermiques, qu'ils ont le même principe de fonctionnement : Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide caloporteur qui la transporte vers un réservoir de stockage de chaleur. Ce système est totalement écologique, économique et la durée de vie des capteurs très élevée.

Son domaine d'applications est vaste et varié. Il est utilisé principalement pour le chauffage de l'eau sanitaire, le séchage des produits agro-alimentaires et la production d'électricité thermodynamique.

3.2. CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES

Les capteurs solaires thermiques permettent la production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Ils sont composés d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire, d'un système de refroidissement à l'aide d'un fluide caloporteur (air ou liquide), d'un isolant thermique, le plus souvent d'une couverture transparente 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. L'énergie solaire récupérée par le capteur solaire et transformée en énergie thermique est cédée au fluide caloporteur (figure 3.1). Cette énergie thermique peut être transférée vers un réservoir de stockage d'énergie ou utilisée directement[11].

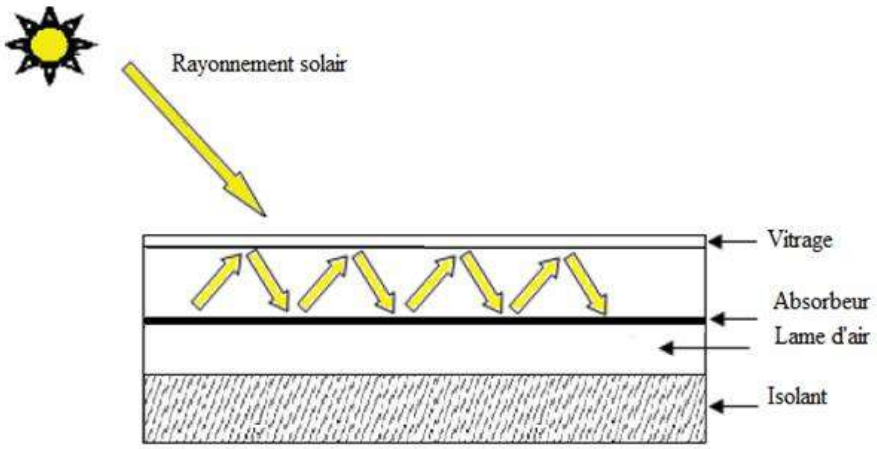


Figure 3.1 : *Coupe transversale d'un capteur solaire à air[11].*

3.2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire est basé sur l'effet de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire. Ce dernier arrive au niveau de la couverture vitrée et la traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noire, appelé absorbeur.

L'absorbeur peut être recouvert d'une couche sélective pour réduire les pertes par rayonnement, qui va absorber une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température. Le rayonnement émis par l'absorbeur (c'est comme un corps noir) arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque à certains rayonnements, le rayonnement est ainsi piégé. La couverture transparente peut être généralement constituée soit d'un simple vitrage soit d'un double vitrage. Le double vitrage entraîne une diminution des pertes thermiques par rapport à un simple vitrage.

La circulation d'un fluide caloporteur en dessous de l'absorbeur entraine un phénomène de transfert thermique convectif entre ce dernier et le fluide caloporteur, ce qui permet d'augmenter la température du fluide. Ce transfert se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée du fluide.

3.2.2. ELEMENTS CONSTITUTIFS ET LEURS CARACTERISTIQUES

Un capteur solaire thermique à air ou à eau est constitué principalement d'une couverture. Transparente, d'un absorbeur, d'une conduite permettant au fluide de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, d'un isolant et d'un boitier.

3.2.2.1. VITRAGE (COUVERTURE)

Les capteurs de bonne qualité utilisent tous le verre comme couverture transparente pour permettre au rayonnement solaire d'arriver à l'absorbeur, on peut toutefois utiliser d'autre matériaux transparents tels que les matériaux plastiques (polycarbonate, méthacrylate). L'inconvénient principal des matériaux plastiques reste néanmoins la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains ou le prix élevé pour d'autres.

Le verre constitue donc le matériau de prédilection pour la couverture des capteurs. Il peut cependant subir des transformations afin d'améliorer ses qualités. On retiendra notamment :

- Le traitement à haute température du verre pour améliorer ses caractéristiques mécanique et obtenir un verre trempé en mesure de résister aux chocs (chute de grêle).
- Le traitement antireflet du verre pour diminuer son coefficient de réflexion et permettre une meilleure récupération du rayonnement solaire par le capteur (figure 3.2).
- L'ajout de couches d'oxydes métalliques réfléchissantes sur la face intérieure afin de créer des verres sélectifs qui retiennent d'autant mieux les infrarouges pour réaliser l'effet de serre.

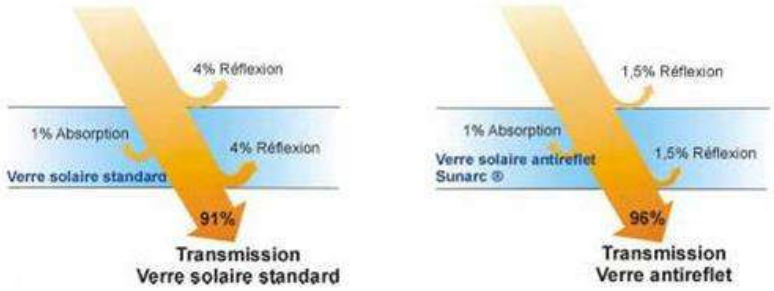


Figure 3.2 : *Effet du traitement antireflet sur la transmission du rayonnement [10].*

3.2.2.2. ABSORBEUR

Dans tout capteur, l'absorbeur joue le rôle principal. Le choix du matériau et le mode de construction ont une grande influence sur la performance du capteur. Les premiers absorbeurs étaient peints en noir afin de capter un maximum d'énergie rayonnée du soleil. Mais cette couleur a l'inconvénient d'avoir un rayonnement important, ce qui finit par échauffer la vitre et provoquer des pertes à travers celle-ci par une forte réémission. C'est pourquoi on préfère utiliser des absorbeurs traités, ce qui donne un corps noir dont le rayonnement est beaucoup plus faible. On parle de surfaces sélectives. Un des éléments clefs dans le développement de ces différentes technologies. D'autre part il doit absorber la plus grande partie du rayonnement solaire et transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec le minimum de perte. Il doit être le plus léger possible pour éviter l'inertie de mise en régime et construit avec un matériau bon conducteur et fiable dans le temps [11].

3.2.2.3. ISOLANT

L'isolant thermique permet de limiter les déperditions thermiques, sa caractéristique est le coefficient de conductivité; plus il est faible meilleur est l'isolant. Les principaux matériaux utilisés pour les capteurs thermiques sont la laine de roche et de verre, des mousses de polyuréthane ou encore de la résine de mélamine. Quelques isolants utilisés pour les capteurs thermiques :

Matériaux	**Conductivité thermique**
Laine de roche	0.032 - 0.040 W/m.K
Laine de verre	0.030 - 0.040 W/m.K
Mousses de polyuréthane	0.022 - 0.030 W/m.K

Tableau 3.1 *: Propriétés thermo physique de quelques matériaux isolants [12].*

Dans le cas des capteurs thermiques vitrés, il est aussi intéressant de remplacer l'isolation entre la vitre et l'absorbeur par de l'air. En effet, l'air a un grand pouvoir d'isolation, il est ainsi utilisé dans le double vitrage. Toujours dans l'objectif d'obtenir de meilleurs

rendements, certains fabricants utilisent d'autres gaz comme l'argon ou le xénon. Voici les coefficients d'isolation de gaz utilisés comme isolants :

gaz	Conductivité thermique à 283 K et 1 bar
air	0.0253 W/m.K
argon	0.01684 W/m.K
xénon	0.00540 W/m.K

***Tableau 3.2** : Les coefficients d'isolation de gaz utilisé [13].*

3.2.2.4. FLUIDE CALOPORTEUR

Le fluide caloporteur est le fluide qui permet de transférer la chaleur collectée par l'absorbeur pour être utilisée. On retrouve les fluides caloporteurs dans beaucoup de système échangeurs de chaleur, que cela soit en refroidissement ou en chauffage, et dans des systèmes de toute taille (d'une installation thermique chez un particulier comme dans une centrale électrique). En fonction de l'utilisation, le choix du fluide caloporteur va dépendre de ses propriétés physiques et chimiques.

3.2.2.4.1. PROPRIETES D'UN FLUIDE CALOPORTEUR

Le liquide caloporteur a des caractéristiques propres, qui déterminent son efficacité dans son rôle de "transporteur de chaleur". Voici les principales qualités que l'on va demander à un bon fluide caloporteur :

- être peu corrosif, afin de garder en bon état les tuyauteries en cuivre pour la plupart,
- avoir une bonne résistance aux températures élevées et au gel, pour éviter les problèmes de dilatation qui pourraient créer des dégâts importants,
- avoir une faible viscosité pour que la circulation soit facilitée,
- une bonne capacité calorifique pour diminuer les pertes thermiques.

Il existe un tas de fluides caloporteurs, qui répondent à toutes ces exigences. Il faut aussi signaler qu'il arrive que le fluide caloporteur se mélange à l'eau chaude sanitaire en cas de fuites au niveau de l'échangeur. Pour palier à tout risque sanitaire, il est conseillé d'utiliser un fluide de qualité alimentaire. Les fluides caloporteurs les plus utilisés sont notamment :

- L'air qui est disponible partout, mais qui possède une faible capacité calorifique comparativement à celle de l'eau.
- L'eau qui possède une grande chaleur massique. Dans la plupart des cas, le fluide caloporteur est un mélange d'eau et de mono propylène glycol. L'eau apporte la bonne capacité thermique ainsi qu'une bonne fluidité et l'antigel permet de résister aux températures très basses.

3.2.2.4.2. CIRCULATION DU FLUIDE CALOPORTEUR

Pour transporter la chaleur du lieu de captage vers le lieu de stockage, il faut faire circuler le fluide caloporteur dans le circuit primaire. Techniquement, il existe 2 façons de faire :

- circulation par thermosiphon
- circulation forcée

1. Circulation par thermosiphon

Le système de circulation par thermosiphon utilise une propriété physique naturelle de l'eau : l'eau chaude est plus légère que l'eau froide. Ainsi, en plaçant le ballon de stockage d'eau chaude plus haut que les capteurs solaires, l'eau chauffée monte naturellement dans le circuit jusqu'à lui et l'eau froide reste dans la partie basse des capteurs (figure 3.3).

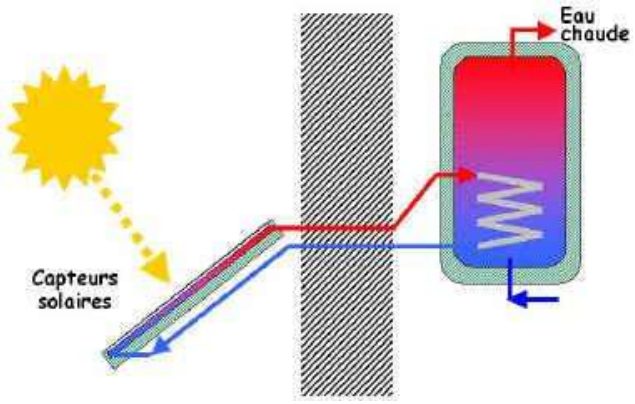


***Figure 3.3** : Le système de circulation par thermosiphon[25].*

a. Avantages de la circulation par thermosiphon

- on peut parler de solaire passif puisqu'aucune énergie annexe n'est nécessaire,
- moins de maintenance et de risque de pannes.

b. Inconvénients de la circulation par thermosiphon

Cela peut poser des problèmes de mise en place, le ballon de stockage devant être impérativement placé au dessus, et si possible à proximité des capteurs.

2. Circulation forcée

La circulation se fait à l'aide d'un circulateur, qui n'est autre qu'une pompe ou un ventilateur poussant le fluide caloporteur dans les capteurs. Les circulateurs sont placés sur la partie fluide froide et ils refoulent le liquide (figure 3.4).

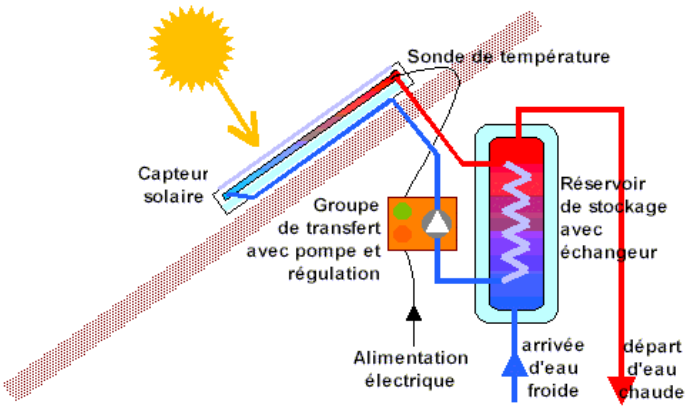


***Figure 3.4** : Le système de circulation forcée[25].*

a. Avantage de la circulation forcée

Plus aucune contrainte d'architecture et de mise en place de composants.

b. Inconvénients de la circulation forcée

- Utilisation d'une énergie annexe, généralement l'électricité,
- possibilité de pannes du circulateur.

3.2.2.5. BOITIER

Le boîtier contient les trois éléments cités précédemment. Ses parois sont généralement tapissées d'une couche isolante destinée à réduire les pertes de chaleur vers l'arrière et les côtés du capteur. Le boîtier doit être solide et résistant à la corrosion.

3.2.2. DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES

Les principaux types de capteurs solaires indépendamment du fluide caloporteur, sont les capteurs non-vitrés, les capteurs plans, les capteurs sous vide, les capteurs à concentration. Ces types diffèrent considérablement en forme géométrique, en température d'application, en rendement, en conception et en coût.

3.2.2.1. LES CAPTEURS NON VITRES

Un capteur solaire non vitré, aussi appelé capteur "moquette", est composé :

- d'un absorbeur (métallique ou synthétique) revêtu d'une peinture sombre,
- d'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés, résistants aux rayonnements ultraviolets et aux variations de température.

Les tubes sont parcourus par de l'eau (fluide caloporteur). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes. Ces capteurs solaires ne sont généralement pas isolés. De ce fait, en sortie du capteur, l'eau n'excède pas 20°C.



***Figure 3.5** : Un capteur non vitré.*

Compte-tenu des faibles températures de l'eau obtenues en sortie des capteurs non-vitrés, ces capteurs n'ont pas d'application directe dans la production d'eau chaude sanitaire. Il est néanmoins possible d'utiliser les capteurs non vitrés pour un préchauffage de l'eau, dans les grosses installations.

Ils peuvent être utilisés aussi pour chauffer l'eau de la piscine : l'eau de la piscine est pompée jusqu'aux capteurs. En circulant dans les faisceaux de tubes, l'eau est chauffée, puis ramenée dans la piscine.

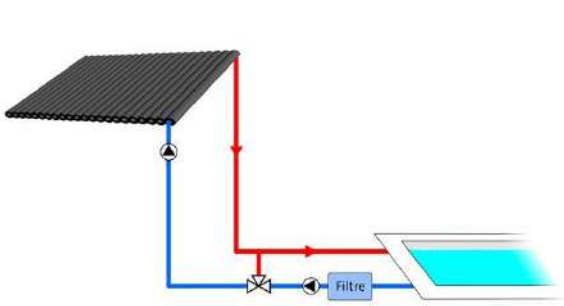




***Figure 3.6** : Schème pompe à chaleur de piscine.*

3.2.2.2. LES CAPTEURS PLANS

Un capteur plan vitré est composé :

- d'un boitier,
- d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords,

- d'un film réfléchissant,
- d'un faisceau de tubes cylindriques,
- une surface absorbante placée à l'intérieur du coffre,
- un vitrage fixé sur le caisson.

Les tubes sont parcourus par un fluide caloporteur. Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

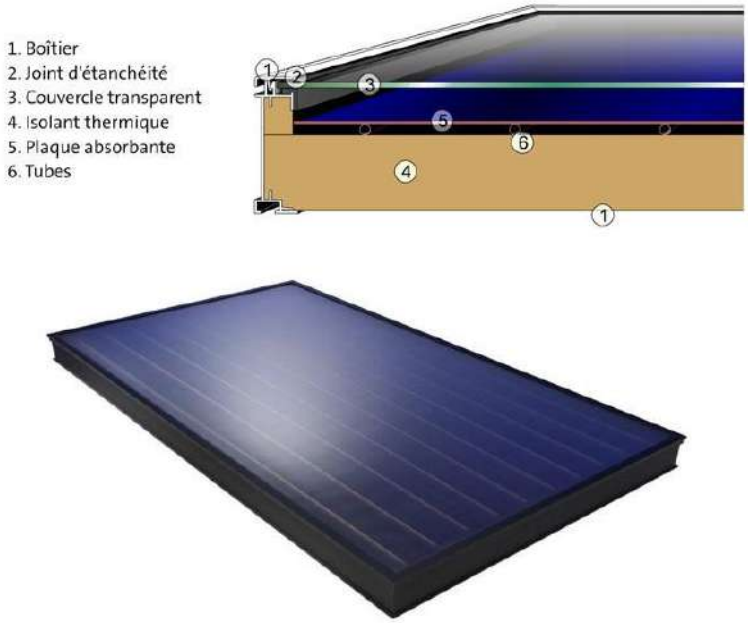


Figure 3.7 *: Différents constituants d'un capteur plan vitré.*

L'absorbeur est en générale une plaque métallique (en cuivre, en aluminium ou en acier), caractérisé par ses propriétés d'absorbation, d'émission et de conduction. La conversion rayonnement-chaleur s'effectue en surface de l'absorbeur. Les photons qui le frappent sont absorbés par la matière et augmentent l'agitation des molécules, et donc la température du matériau exposé au rayonnement (c'est-à-dire l'absorbeur) :

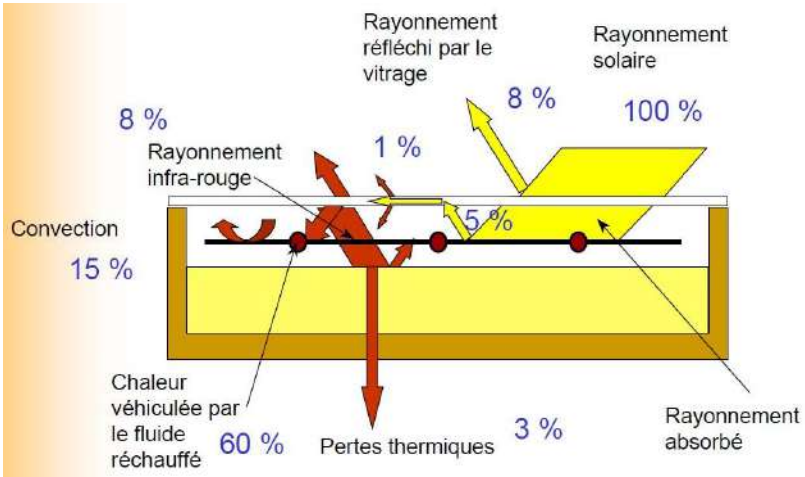


Figure 3.8 : *Absorbeur [11].*

La chaleur absorbée est ensuite distribuée vers les conduits d'eau ou d'air fixés sur la plaque absorbante. La capacité d'absorbation varie en fonction du revêtement de la surface extérieure de l'absorbeur. Des couches sélectives sont généralement utilisées. Elles ont l'avantage d'avoir une émissivité considérablement réduite dans le champ des longueurs d'onde du rayonnement thermique, ce qui diminue les déperditions thermiques.

La performance du capteur plan dépend fortement des qualités optiques des matériaux, ainsi qu'illustré par la figure 3.8. Environ 60 % du rayonnement est transmis au fluide caloporteur sous forme de chaleur.

Le capteur plan vitré est bien adapté aux besoins des habitations (figure 3.9). Ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire.



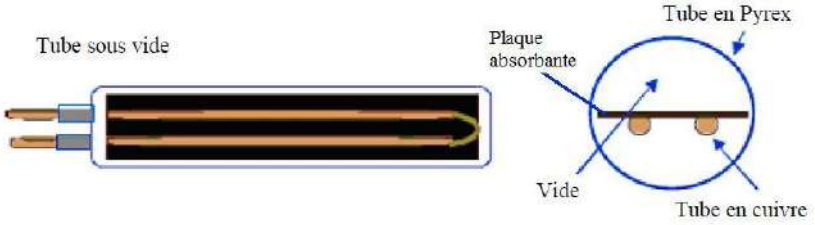
Figure 3.9 : *Le capteur plan vitré pour des habitations*

3.2.2.3. LES CAPTEURS SOUS VIDE

Un capteur solaire sous vide est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

- d'une série de tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air),
- d'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre,
- d'un tube en cuivre à l'intérieur du tube de verre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.



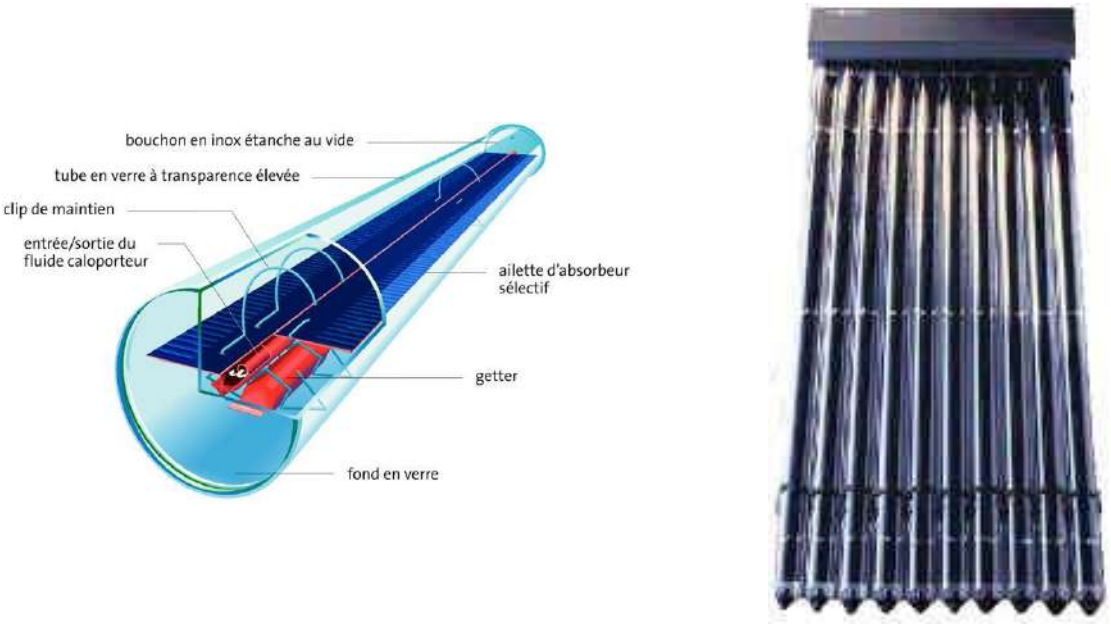


Figure 3.10 : C*apteur solaire thermique sous vide[24].*

Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleur par convection sont fortement réduites. Ceci permet de chauffer l'eau à une température comprise entre 85°C et 100°C.

Les capteurs à tubes sous vide sont en principe utilisés pour l'appoint au chauffage ou pour la génération de « chaleur de processus » exigeant des températures entre 80 et 100°C. De telles températures élevées sont requises pour des applications industrielles utilisant de l'eau très chaude ou de la vapeur, par exemple les processus de lavage, de séchage ou le refroidissement solaire.

3.2.2.4. LES CAPTEURS A CONCENTRATION

Un capteur solaire thermique à concentration est composé :

- d'un châssis,
- d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords,
- d'un système de réflexion de la lumière,
- d'un absorbeur,
- d'un réseau de tubes en cuivre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes

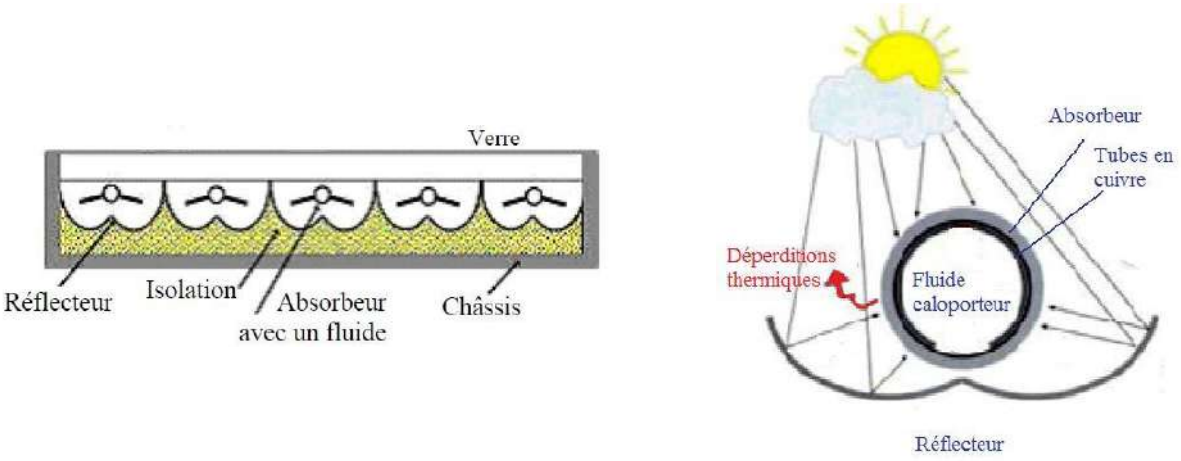


Figure 3.11 : C*apteur solaire thermique à concentration[24].*

Les capteurs à concentration sont des capteurs solaires muni d'un système optique (réflecteur, lentilles, etc.) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture.

Au lieu de frapper directement la surface absorbante, les rayons solaires arrivent sur les miroirs qui les renvoient sur la surface absorbante qui convertit le rayonnement en chaleur. La chaleur est ensuite transmise au fluide caloporteur. A l'intérieur des tubes de cuivre circule le fluide caloporteur qui peut être de l'eau ou de l'air. En général, les capteurs à concentration sont utilisés pour des applications à haute température.

3.3. CENTRALES SOLAIRES THERMIQUES

Les centrales solaires thermiques (ou thermodynamique) permettent de produire de l'électricité en transformant l'énergie solaire en énergie mécanique puis en énergie électrique (turbine).



La centrale solaire Thémis se trouve dans les Pyrénées-Orientales. La tour fait 101 mètres de haut. Le site se compose également de plus de 200 réflecteurs au sol, appelés héliostats. Sa production électrique quotidienne est actuellement d'environ 115 kWh.

Figure 3.12 : *Centrale solaire thermodynamique.*

Seul le rayonnement direct peut faire l'objet d'une concentration. Les centrales thermiques solaires utilisent des miroirs afin de diriger le rayonnement solaire direct sur un récepteur et de produire ainsi des températures suffisamment élevées pour la production de vapeur. Cette vapeur actionne des turbines générant l'énergie électrique.

3.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES

1. **Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont :**
    - L'orientation et l'inclinaison des panneaux sont plus libres (par rapport à un panneau photovoltaïque). On peut en effet choisir la configuration selon ce que l'on veut comme taux de couverture des besoins.
    - Peu d'entretien

2. **Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :**
    - Investissement qui reste assez lourd
    - Difficile à mettre en place en rénovation car nécessite souvent un ballon spécial (car il faut un échangeur + un système d'appoint à l'intérieur du ballon)
    - Doivent être placés dans des zones géographiques où l'ensoleillement est plutôt élevé, pour avoir une rentabilité importante
    - La configuration doit être optimale : les panneaux doivent être inclinés au minimum de 30° (idéalement 45°, exposés au sud) et il doit y avoir le moins de masques solaires possible (c'est-à-dire un élément du paysage ou de la maison qui ferait de l'ombre sur les panneaux)
    - Si les panneaux sont incrustés au toit, une attention particulière doit être donnée à l'étanchéité.

3.5. CONCLUSION

L'installation de panneaux solaires thermiques se généralise puisque cette solution fait partie des solutions d'énergies renouvelables possibles. Ils sont d'ailleurs capables, certes de produire l'eau chaude sanitaire, mais aussi du chauffage. Malgré un investissement assez lourd, c'est une solution rentable surtout quand on connaît le poids important de la production d'eau chaude sanitaire dans les maisons thermiquement performantes. De nombreuses configurations sont possibles et l'orientation et l'inclinaison des panneaux est moins contraignantes que celles des panneaux solaires photovoltaïques.

Chapitre 04 : capteur solaire hybride

CAPTEUR SOLAIRE HYBRIDE

4.1. INTRODUCTION

Le capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT) est un module qui produit non seulement de l'électricité mais également de l'énergie thermique. Puisque la demande de la chaleur solaire et l'électricité solaire se complètent souvent, cela semble une idée logique de développer un dispositif qui peut être conforme aux deux demandes. La combinaison d'un capteur thermique et d'un panneau photovoltaïque dans un seul module permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire. Un effet de synergie peut être obtenu dans une structure associant ces deux dispositifs de façon judicieuse à ceux du système photovoltaïque et thermique séparément installés. La production de l'énergie totale (électrique et thermique) du capteur PVT hybride dépend de l'entrée (c'est-à-dire l'énergie du rayonnement solaire, la température ambiante et de la vitesse du vent) et de la sortie qui est la température de fonctionnement du système. Cette production dépend aussi du mode de l'extraction de la chaleur. Il existe principalement deux types de capteurs hybrides PVT. Le type liquide et le type air, la différence entre les deux étant le caloporteur qui peut être du liquide ou de l'air.

Au cours des années précédentes, une grande quantité de travaux de recherches sur les capteurs PVT ont été menés. Provenant de plusieurs développements indépendants qui ont tous eu comme conséquence l'idée d'intégrer le photovoltaïque et le flux de chaleur produit dans un seul capteur.

4.2. HISTORIQUE ET ETAT DE L'ART SUR LES CAPTEURS HYBRIDES

Les capteurs solaires thermiques appelés capteurs plans ont une longue histoire et ont été dans la phase de production commerciale depuis le 19ème siècle, tandis que la commercialisation des cellules photovoltaïques date des années 50. Pendant les années 1960 des cellules solaires étaient toujours très chères et les travaux de recherches étaient concentrés sur l'industrie spatiale. L'idée de combiner la production thermique et électrique dans un seul capteur avait germé dans les années soixante-dix.

La recherche sur les capteurs PVT a commencé pendant le milieu des années 70, avec comme principal but l'augmentation du rendement. L'application domestique a été considérée comme le marché principal. Au commencement l'effort était concentré sur les capteurs recouverts d'une vitre supplémentaire, de type air et liquide, mais bientôt l'idée d'un capteur PVT non vitré combiné avec une pompe à chaleur a également suscité l'attention.[11]

Dans le début des années 90, les grandes façades de modules photovoltaïques ont commencés à attirer l'attention et la question d'aérer ces derniers afin de réduire la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques, mène rapidement à l'idée que cette chaleur pourrait également être employée, par exemple pour le chauffage de pièces.

4.3. CAPTEUR SOLAIRE HYBRIDE

Un capteur photovoltaïque thermique PVT est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l´énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue sous forme de chaleur. En effet la technologie solaire hybride est issue d'un double constat sur les panneaux photovoltaïques : les panneaux photovoltaïques produisent beaucoup plus de chaleur (85%) que d'électricité (15%) quand ils sont exposés au soleil. Le rendement des panneaux photovoltaïques diminue lorsque leur température augmente.

Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Un tel système permet donc d'améliorer le rendement du module PV (le refroidissement réduit l'effet néfaste de la température) tout en extrayant des calories thermiques utiles au chauffage. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV sont connectées à un échangeur de chaleur dans lequel circule un fluide caloporteur.

Plusieurs types sont actuellement développés pour réaliser les capteurs solaires hybrides. Les principales technologies à ce jour sont les capteurs solaires PVT à air et les capteurs solaires PV/T hybrides à eau ainsi que les PVT à concentrateurs.

4.4. COMMENT EST CONÇU UN PANNEAU SOLAIRE HYBRIDE ?

Les capteurs photovoltaïques sont placés sur la couche supérieure du module. Ils sont reliés au réseau électrique par différents équipements de régulation et de sécurité.

Les capteurs thermiques sont placés en sous-couche, afin de capter la chaleur générée par le fonctionnement des capteurs photovoltaïques. Un fluide caloporteur les parcourt et transmet la chaleur accumulée au ballon d'eau chaude.

Le capteur hybride est généralement une simple juxtaposition de ces deux technologies (photovoltaïque et solaire thermique). Toutefois, les panneaux les plus récents sont plus complexes : ils optimisent l'usage des rayonnements solaires grâce au fluide caloporteur qui circule dans l'échangeur et refroidit les cellules photovoltaïques en augmentant ainsi leur rendement tout en récupérant leur chaleur pour alimenter un système de chauffage.

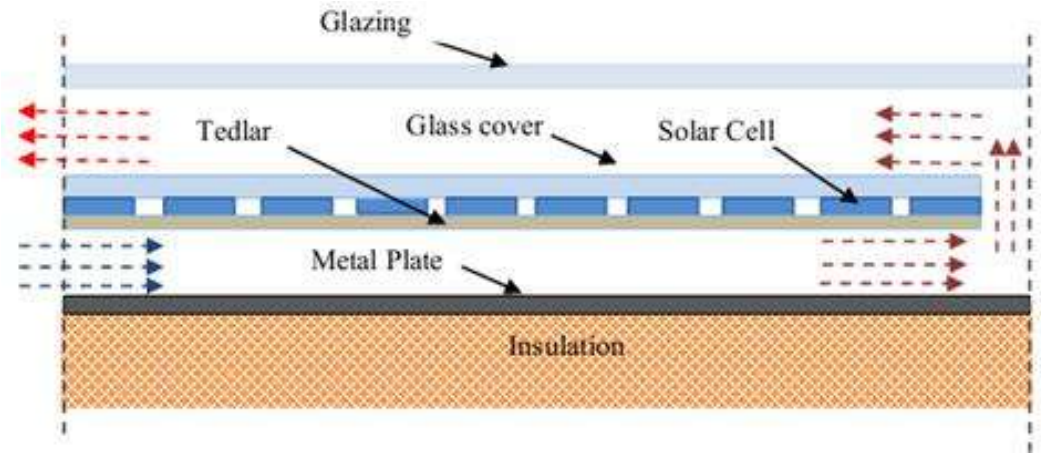


Figure 4.1. *Représentation schématique du capteur hybride.*

4.5. ÉLEMENTS DE CONSTRUCTIONS

Les éléments essentiels d'un capteur hybride sont représentés sur la figure 4.2 Il se compose de :

- Un vitrage avec une couche de verre trempé hautement transmissif ;
- Un module photovoltaïque encapsulé dans un support transmissif à la lumière ;
- Une fine couche de résine de jonction des modules sur l'absorbeur ;
- Une plaque absorbante en aluminium ou cuivre combinée avec une conduite de fluide caloporteur ;
- Un isolant thermique ;
- Un cadre (boitier) en bois ou en aluminium pour protéger le capteur hybride.

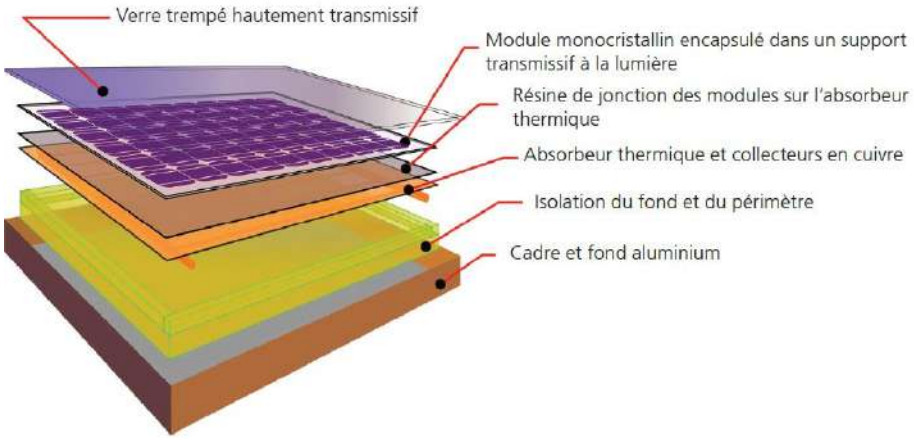


Figure 4.2 *Différents constituants d'un capteur solaire hybride.* ***[14]***

4.6. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES CAPTEURS SOLAIRES PVT A AIR

Ce type de capteur relativement simple, est constitué d'une couche absorbante à dos isolé, refroidi par un courant d'air circulant entre l'absorbeur et un couvercle de verre. On peut augmenter sa surface d'échange de chaleur en donnant à l'absorbeur soit un pouvoir émissif élevé, soit surface striée ou rainurée.

Une des premières applications des capteurs hybrides PVT à air était dans la maison solaire pilote appelé « Solar One », construite dans 1973/1974 à l'université du Delaware par le professeur Boer, qui à ce moment-là avait effectué des travaux sur le module photovoltaïque. Dans les façades et sur le toit de cette maison, des capteurs à air ont été intégrés. Après le travail pilote du professeur Boer, vers la fin des années 70 et du début des années 80, les principaux travaux de recherches sur les capteurs PVT à air ont été effectués par l'équipe de Hendrie et également à Sandia et à l'université de Brown. À Sandia, la recherche a été effectuée dans l'effet de la température sur les performances électriques. En 1982 à l'université de Brown, un bâtiment a été réalisé avec un capteur de PVT à air. À partir du début des années 90, les recherches sur les capteurs hybrides PVT à air ont commencé à reprendre à travers le monde. Au Japon, Ito et Miura ont fait des mesures sur des modules photovoltaïques partiellement transparents comme couverture supérieure d'un capteur à air non vitré. Des rendements thermiques ont été trouvés dans l'ordre de 40%, fortement dépendant de la vitesse du vent. En 1994, un capteur photovoltaïque-air, a été développé par la compagnie française Cythelia.

La compagnie allemande Grammer Solar solaire et la compagnie danoise Aidt Miljo ont développé un capteur hybride PVT à air avec une petite partie de cellules photovoltaïques. Dans ce type de capteurs, seulement une petite partie de l'absorbeur est couverte de cellules photovoltaïques, afin d'alimenter le ventilateur. Au Canada, la société Conserval Engineering a développé le système PV-SOLARWALL avec Bechtel et CANMET. La recherche expérimentale sur des prototypes PV-Solarwall a été effectuée, y compris la détermination des performances thermiques et électriques. Dans une coopération avec la société KIER, une évaluation du capteur perforé avec des cellules photovoltaïques est présentée par Naveed et al.. En Italie, un programme de recherche et développement portant sur l'étude théorique expérimentale d'un capteur hybride PVT à air a été effectué par Aste et al.

À l'université de Patras, la recherche a été faite sur un capteur PVT de type liquide et air. Les performances optimales se sont avérées avec la configuration dans laquelle le module photovoltaïque est en contact direct avec l'absorbeur qui est en feuille et tube. L'optimisation des performances thermiques d'un capteur PVT à air en insérant une feuille mince dans le canal d'air a été étudiée expérimentalement et numériquement. L'étude de plusieurs configurations de capteurs à air a été faite par Tonui et al. Ces études portent sur les aspects modélisation numérique et réalisations expérimentales.

Aux Etats-Unis, à l'université de Miami, un projet de recherche de PhD sur les capteurs PVT à air à double passe a été effectué par Sopian, qui a continué ce travail à l'Université de Kebangsaan en Malaisie. En plus, il a étudié un capteur à concentration à double passe PV-air. En Egypte, une étude de simulation comparant plusieurs configurations de capteurs PVT à air a été effectuée par Hegazy. En Inde, la recherche a été effectuée à l'institut de technologie indien sur les capteurs PVT à air pour le séchage solaire. Une étude

paramétrique sur les capteurs PVT à air vitrés et non vitrés a été effectuée par Tiwari et Sodha, qui ont constaté que l'ajout de la vitre supplémentaire a presque doublé le rendement thermique utile, alors que le rendement électrique a chuté de 10% à 9% dû à la vitre supplémentaire, alors que Prakash faisait une étude numérique paramétrique sur l'épaisseur des tuyaux et sur le débit massique dans un capteur hybride PVT. Plusieurs configurations de capteurs hybrides à air pour différents régimes d'utilisation (chaud et froid) ont été étudiées par l'équipe de Tiwari. Dubev et al. ont étudié deux types de modules photovoltaïques appliqués au climat de New Delhi.

À l'université de Cardiff, des travaux de recherches sur la modélisation d'espace d'air ont été effectué par Brinkworth et son équipe. En France, dans le cadre du programme national de recherche Energie du CNRS, le capteur solaire hybride PVT intégré dans le bâtiment a été démarré avec la participation de GENEC, l'Ecole de Mines de Paris, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan et les universités de Lyon, de Savoie et de Cergy. Un outil de TRNSYS pour la simulation de capteurs hybrides PVT a été développé. Dans les Pays Bas, ECN a fait une étude expérimentale et numérique sur un toit. Au Japon, Takashima et al. ont effectué une étude théorique sur un module photovoltaïque placé sur un toit refroidi par convection naturelle. Une étude sur des éléments de capteurs hybride PVT intégré dans des façades a été effectuée à l'université du Hokkaido, ayant pour résultat des rendements thermiques de 20-22% pour les capteurs non recouverts et de 29-37% pour les capteurs recouverts.[15]



Figure 4.3. *Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air*

4.6.1. TRAVAUX EFFECTUES EN ALGERIE

En 2006, K. TOUAFEK et al [17] présentent une Étude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique. L'objectif est de mettre en œuvre un prototype de capteur hybride pour évaluer ses performances électriques et thermiques. Les résultats obtenus

permettent de penser que ce type de capteur constitue une bonne alternative aux modules photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques installés séparément.

K. TOUAFEK et al [18] présentent en 2008 une simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique, elle est suivie en 2009, d'une étude thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique PVT à air recouvert destiné au chauffage d'habitation. L'étude porte sur la détermination de la cartographie thermique du capteur hybride photovoltaïque thermique à air recouvert d'une vitre supplémentaire au dessus du module classique. Ils ont déterminé la distribution de la température au niveau de chaque point du capteur hybride à air pour différents débits de l'air. On remarque donc que le fait d'augmenter le débit d'air fait chuter le niveau de température à la sortie du capteur hybride à air recouvert.

En 2013, TOUAFEK K. et al [16], présentent une nouvelle conception d'un collecteur hybride où le capteur possède deux plaques absorbantes, l'une en dessous du module photovoltaïque et l'autre au dessus de la couche isolante afin d'augmenter les performances globales du capteur hybride (figure 4.4). Une étude de modélisation et simulation numérique a été faite pour évaluer les performances électriques et thermiques de ce type de capteur. Cette étude est argumentée par des tests expérimentaux pour la validation du modèle numérique développé. Le modèle mathématique est basé sur un système d'équations de bilan énergétique de chaque composant du capteur hybride, les résultats donnent un rendement thermique qui varie entre 22% et 68% de 8h00 à midi avec une puissance thermique maximale de 290 W et une puissance électrique maximale de 46 W. Notons que l'air circule avec un débit massique de 0,022 kg/s et la température de l'air en sortie atteint 35 °C. L'application de cette nouvelle conception donne donc un bon rendement thermique et électrique par rapport aux collecteurs hybrides traditionnels.



Figure 4.4. Photo du capteur hybride étudié par TOUAFEK et al. [**16**]

4.7. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES CAPTEURS SOLAIRES PVT A EAU

Comme indiqué par Hendrie, le premier travail sur le capteur hybride PVT type liquide semble avoir été celui du Martin Wolf, qui a étudié une surface en cellules solaires au silicium montée à l'intérieur d'un capteur thermique. Il a conclu que le système était techniquement faisable et rentable. La recherche sur le capteur PVT à liquide a été poursuivie par divers groupes. Un projet de démonstration a été réalisé par le Professeur Boer, qui a appliqué 13 capteurs PVT type liquide à sa propre maison solaire en 1978. En 1978, trois prototypes de capteurs hybrides PVT ont été acquis par le laboratoire de MIT Lincoln et Sandia. Ces capteurs ont été fabriqués par ARCO et ils avaient 6,5% comme rendement électrique et 40% comme rendement thermique.

Par conséquent, une deuxième génération de capteurs hybrides PVT a été développée par le MIT et le PV-manufacturer Spire Corporation (un concept pour monter sur un toit existant) et l'autre par Solar Design Associates. Les résultats du travail ont été publiés dans un certain nombre de journaux. En outre des recherches sur les systèmes à base de capteurs PVT ont été effectuées au MIT. Chez Sandia, la recherche a été effectuée pour déterminer l'effet du gradient de température sur les performances électriques. En 1980 des recherches sur les capteurs PVT ont commencés dans les laboratoires de JPL et de Brookhaven.

Considérant que la majeure partie de la recherche continuait aux Etats-Unis, quelques activités ont été également effectuées au Japon, où Sharp a réalisé deux prototypes de capteurs PVT, alors que des travaux sur concentrateur PVT étaient déjà menés par Nakata et al. à Sharp Corporation. En l'Allemagne, Karl développe et teste un prototype de capteur recouvert. En France, des études sur les concentrateurs à PVT ont été effectuées.

Dans les années 90, il y avait encore un intérêt croissant pour le développement des énergies renouvelables dans le monde. Dans les Pays Bas, la recherche sur les capteurs hybrides PVT a commencé en 1989 à TNO, en coopération avec HES, où également l'objectif était accentué sur les capteurs hybrides PVT non recouverts pour les applications utilisant les pompes à chaleur. Après, l'université de technologie d'Eindhoven (EUT) a lancé un projet de PhD pendant 1994-1998, qui s'est concentré sur les capteurs PVT recouverts pour des applications de chauffage de l'eau. En 1999, la recherche sur les capteurs PVT à l'EUT a été transférée au centre de recherche en matière d'énergie des Pays Bas (ECN). ECN a effectué des études sur plusieurs configurations de capteurs hybrides et sur des systèmes basés sur les capteurs PVT.

En Allemagne, Solarwerk a réalisé des prototypes de capteurs PVT et Solarwatt a développé des capteurs PVT pendant les années 90, mais ceci n'a pas mené au stade des capteurs commerciaux. Stefan Krauter avait travaillé sur les systèmes à base de PVT, dans lesquels il utilise un réservoir de stockage d'eau triangulaire.

Au Danemark, un des projets de recherche sur les capteurs hybrides PVT a été réalisé avec la participation des fabricants des capteurs solaires Batec, PV-compagny Racell et Esbensen Consulting engineers. En 2000, des capteurs PVT ont été étudiés et installés. D'autres études ont été effectuées pour déterminer le potentiel des capteurs PVT au Danemark. Plusieurs configurations de capteurs hybrides PVT ont été effectuées à l'université de Patras, impliquant des études expérimentales comparatives sur les capteurs PVT recouverts et non recouverts, avec et sans réflecteurs. Aussi une étude économique a été effectuée. Le

logiciel de simulation TRNSYS a été utilisé par Kalogirou pour modéliser les capteurs hybrides PVT puis dans la simulation d'un système à thermosiphon.

À Chypre, une étude numérique a été effectuée sur des capteurs hybrides PVT inclus dans un système à thermosiphon PVT et une étude bibliographique était présentée. Un système hybride composé de modules photovoltaïques et de capteurs thermiques a été construit et testé par Erdil et al.

D'autres travaux sur la modélisation des capteurs hybrides PVT ont été effectués en coopération avec l'université de Patras. À l'université de Rome, des travaux sur LCA et PVT ont été menés par Frankl et Battisti . Ces études ont été poursuivies plus tard en coopération avec l'université de Patras. À l'université d'Oslo, une étude analytique a été effectuée et, ainsi qu'avec SolarNor pour une étude sur un capteur PVT en polymère. En Suisse, dans un projet avec l'université de Neuchâtel et d'Ernst Schweizer AG, des recherches ont été effectuées sur la caractérisation optique du module photovoltaïque pour des applications en PVT par Platz et dans un projet avec EPFL, Enecolo et Ernst Schweizer AG une vue d'ensemble sur la technologie des capteurs PVT et une étude optique ont été effectuées par Affolter. Pour la Corse, Mattei et al. ont étudié le capteur hybride PVT non vitré. En Hongrie, un PVT non vitré a été construit par l'université technique de Budapest et de SOLART systèmes Ltd, en utilisant des feuilles et des tubes en aluminium et une couche absorbante au-dessous du module photovoltaïque. Vokas et al. a conclu dans ces travaux que le capteur hybride PVT a un rendement thermique inférieur de 9% à celui du capteur thermique plan classique.

Au Japon, plusieurs études ont été effectuées, comme un projet de démonstration de PVT, une étude de capteurs PVT et des études sur les capteurs PVT associant à une pompe à chaleur. Huang et al. ont effectué une étude sur le capteur PVT non vitré à l'université nationale de Taiwan. À l'université de ville de Hong Kong, Chow ont établi un modèle dynamique pour un capteur PVT, qui a été utilisé pour calculer les performances d'un système à thermosiphon. À l'université des Sciences et de technologie de la Chine, en coopération avec Chow, Ji et al. ont effectué une étude de sensibilité pour ces systèmes. Les travaux de Chow et son équipe sur les capteurs hybrides se sont accentués durant les deux dernières années. Ils portent essentiellement sur l'étude de l'intégration des capteurs hybrides PVT dans les façades des immeubles et sur les systèmes énergétiques à thermosiphon pour le chauffage de l'eau. Jie JI et al. ont étudié la sensibilité d'un système de chauffage de l'eau sanitaire par des capteurs hybrides PVT.

En Inde, les efforts de recherches ont été accentués sur les applications autonomes des capteurs PVT dans des systèmes à thermosiphon, qui ont été en grande partie effectués au centre des études d'énergies de l'Institut de la technologie indien à New Delhi et à l'université de Delhi. En Thaïlande, l'Agence nationale de développement de la Science et de technologie a développé des capteurs PVT avec du silicium amorphe. Trois types de prototypes recouverts ont été testés. Au Brésil, Krauter a fait des mesures sur des modules photovoltaïques non vitrés intégrés dans une façade avec un système de refroidissement intégré de propylène, dans le but du refroidissement des modules photovoltaïques et du chauffage d'eau.

En Algérie, le premier prototype du capteur hybride PVT a été étudié et réalisé à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables à Ghardaïa par Touafek et al. Il s'agit de capteurs PVT de type eau avec un absorbeur en serpentin en cuivre. Les études

portaient sur la simulation numérique et des expérimentations sur site de plusieurs configurations (sans vitre et avec une, puis deux vitres supplémentaires).[19]

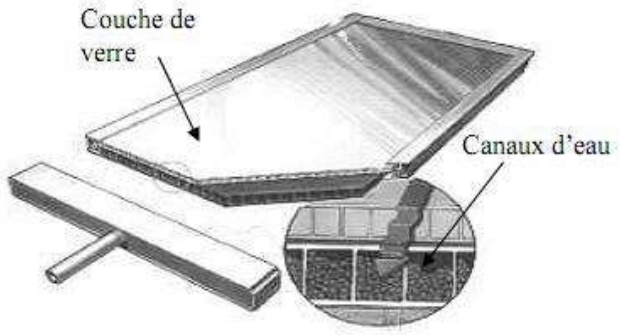


Figure 4.5. : *Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor[19].*

4.8. CAPTEURS PVT DE CONCENTRATION

Le capteur PVT à concentration veut dire la concentration du rayonnement solaire sur un capteur hybride PVT, Garg et Adhikari(1999) ont démontré l'utilisation de plusieurs CPCs (capteur de concentration parabolique) tronqués dans un module simple de PVT a eu comme conséquence de meilleures efficacités une fois intégré dans un système. Un système semblable a été également démontré par Othman et al (2005).Cependant, où Garg et Adhikari ont employé un passage simple pour chauffer l'air, ils ont utilisé un double passage avec une surface à ailettes arrière dans leur système. Le but de la surface à ailettes était d'améliorer le transfert thermique sur le visage arrière du module PV.

Le système de Trip Anagnostopoulos et al (2002) (un système de chauffage à air) est peut-être l'incarnation le plus simple d'un concentrateur de PVT. Comme mentionné, ceci a utilisé un réflecteur plat pour diriger le rayonnement solaire supplémentaire sur un capteur PVT. Cependant, la concentration du rayonnement solaire peut également être réalisée avec les objectifs paraboliques composés les réflecteurs des concentrateurs (CPC), linéaires ou circulaires de Fresnel ou avec des plaques paraboliques. Un arrangement typique d'un capteur PVT de CPC est montré sur le la figure 4.6.

Comme mentionné, la concentration par les réflecteurs linéaires de Fresnel est également possible. Rosell et al (2005) ont démontré un système basé sur cette méthode qui a eu un rapport de concentration de 11. Ils pouvaient obtenir une efficacité thermique maximum approximativement de 60% de leur système sans la charge électrique. [20]

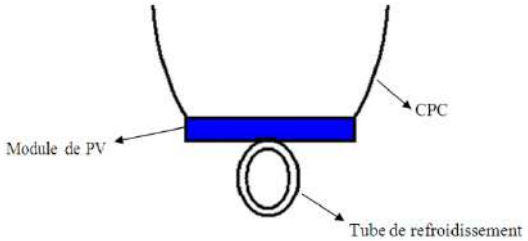


Figure 4.6 *Capteurs PVT de concentration [20]*

4.9. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME PVT

Le schéma de principe est donné par la figure 4.7, Pour augmenter la température de fluide caloporteur, un double vitrage est intercalé entre le module PV et le soleil.

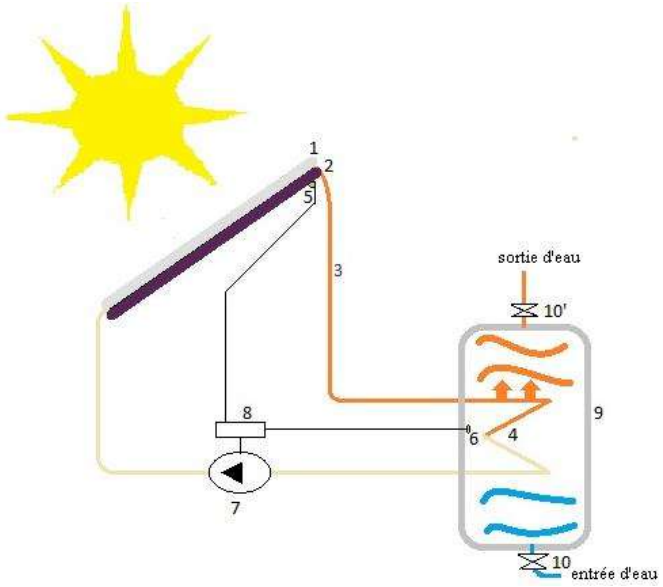


Figure 4.7. *Représentation schématique D'un système solaire PVT.*

1. double vitrage
2. module PV
3. canalisation
4. échangeur thermique (serpentin)
5. capteur de température (placé à la sortie de panneau)
6. capteur de température (placé dans le ballon)
7. circulateur
8. circuit électronique de commande
9. ballon
10 et **10'**. deux vannes (remplir et vidanger le ballon)

Le système complet est composé d'un module PV et d'un fluide caloporteur (l'eau/glycol) stockée dans double vitrage. La température du panneau doit être maintenue entre 25°C et une température T_{pmax} (à déterminer en fonction de rendement du panneau PV) sachant que le rendement du panneau PV est meilleur lorsque sa température est proche de 25°C (§ 2.3.7). Un capteur de température sera placé en sortie de panneau. Lorsque la température du panneau atteint une température élevée (> T_{pmax}), le fluide caloporteur sera évacué à l'aide d'un circulateur (pompe) dans la canalisation jusqu'à l'échangeur thermique (serpentin). Le fluide cède alors ses calories à l'eau dans le ballon. Le fluide, refroidi, repartira vers le capteur solaire, où il est chauffé à nouveau tant que l'ensoleillement reste efficace, c'est-à-dire tant que la température du caloporteur est plus élevée que celle donnée par la sonde placée dans le ballon. Le circulateur sera muni d'un dispositif électronique de commande. Deux vannes (10 et 10') permettent de remplir et de vidanger le ballon.

4.10. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CAPTEURS SOLAIRES PVT

1. **Les principaux avantages des capteurs PVT sont :**
    - Augmentation du rendement du capteur photovoltaïque en stabilisant la température du panneau
    - Production de l'électricité et de la chaleur sur une même surface
    - L'exploitation n'émet pas de pollution
    - Système silencieux, pas de mouvement
    - L'énergie solaire est gratuite et inépuisable
2. **Les inconvénients des capteurs PVT sont :**
    - La stabilisation de la température du système engendre une production solaire thermique non optimale
    - L'énergie solaire est présente par intermittence (ensoleillement / jour / nuit)
    - Le prix du matériel : étant encore une technologie récente, le prix des panneaux solaires hybrides est plus élevé que le prix des panneaux solaires classiques.

4.11. CONCLUSION

Ce système de cogénération présente de nombreux avantages. D'une part, l'utilisation de la surface disponible, sur le toit par exemple, est optimisée par la combinaison de la production électrique et thermique par le même panneau.

D'autre part, le rendement des cellules photovoltaïques est augmenté grâce à un abaissement de leur température. En effet, une cellule photovoltaïque voit son rendement baisser lorsque sa température augmente. Dans le cas d'un capteur hybride, une partie du rayonnement solaire non convertie en électricité est capté par le liquide caloporteur destiné à chauffer l'eau chaude sanitaire. En revanche, la production solaire thermique n'est pas optimisée par rapport à un capteur solaire thermique traditionnel de même taille.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Une grande partie du rayonnement solaire absorbé par le module photovoltaïque n'est pas convertie en courant électrique et se dissipe dans le module sous forme de chaleur, provocant une augmentation de sa température de fonctionnement et causant une chute de son rendement. La température du module photovoltaïque peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée d'un fluide caloporteur. Cette chaleur extraite peut aussi être utilisée pour chauffer de l'air ou l'eau. L'objectif de notre travail effectué dans le cadre de ce mémoire nous a permis d'étudier différents documents se rapportant aux capteurs solaires hybrides PVT et de dégager les avantages liés à l'utilisation de tels systèmes.

Les capteurs hybrides sont doc de véritables systèmes de cogénération permettant ainsi d'augmenter l'efficacité électrique du capteur, c'est-à-dire son rendement électrique en diminuant la température de fonctionnement et utiliser cette même chaleur pour chauffer de l'eau ou l'espace environnant.

Les avantages des capteurs solaires hybrides PVT sont la combinaison d'un collecteur thermique avec un module photovoltaïque, l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïques et thermiques) séparément installés.

Suite à l'étude effectué au cours de ce mémoire, diverses perspectives peuvent être envisagées du point de vue de la modélisation ainsi au niveau expérimental en vue d'améliorer ce type de capteurs.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

01. Boudries KR. et **A. Khellaf**, Estimation de la Production de l'Hydrogène Solaire au Sud Algérien, Rev. Energ. Ren. : ICPWE, (2003) pp. 73-77 .

02. Bensalem S, Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2011

03. MEM, Ministère de l'Énergie et des Mines, Algérie, (http://www.mem-algeria.org).

04. Touafek K, **Malek A**, et **Haddadi M**, Etude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique, Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) pp. 143.

05. P. Dupeyrat, H. Pabiou, G. Kwiatkowski, C. Mén ézo Optimisation de la conversion solaire grâce au concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique. Conférence SFT 2011.

06. Ahmed khedim, l'énergie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, tunis, 2003.

07. Sayigh .A, Characteristics of solar radiation, solar energy conversion, pergamon press, Ontario, 1979.

08. Bernard R, merguy G, schwartz M, le rayonnement solaire conversion ,technique et documentation ,paris ,1979.

09. Omari T, Modalisation numérique d'un capteur–stockeur solaire, mémoire de magister, Médéa, Algerie, 2009.

10. ELANIQUE A., « Capteur Solaires Thermiques », Licence professionnelle ERDD, 2009-2010.

11. SLIMANI M., étude d'un capteur de type « PV-THERM » pour un séchoir solaire indirect, USTHB, algerie ,2013.

12. http://www.renover-sans-se-tromper.com/isolation-thermique .

13. Christian Schittich, Didier Debord, Construire en verre, PPUR presses polytechniques, 2001 ISBN:2-88074-474-1, p. 119.

14. http://www.rivieracom.fr/web/website/webAGK/energie_solaire.html.

15. Touafek K, contribution a l'étude et a la conception d'un système énergétique utilisant des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques, thèse doctorat, école national polytechnique, 2010.

16. TOUAFEK K., HADDADI M., MALEK A. Design and modeling of a photovoltaic thermal collector for domestic air heating and electricity production", Energy and Buildings, vol 59, pp 21–28, 2013.

17. TOUAFEK K., **HADDADI M.**, **MALEK A.**, **BENDAIKHA-TOUAFEK W.**, Étude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

18. TOUAFEK K., **HADDADI M.**, **MALEK A.**, **BENDAIKHA-TOUAFEK W.**, étude thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T) à air recouvert destine au chauffage d'habitation. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°1, pp. 153 – 165, 2008.

19. Fatmi hakim , Système hybride thermique photovoltaïque pour la production de l'eau distillée , universite mentouri-constantine, mémoire magistere ,2012 .

20. Khelifa abdelkrim , etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PVT , mémoire de Magister., université de Batna, 2011.

21. belhadj mohammed , modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome mémoire de Magister, 2008.

22. AOUN N., Étude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales, mémoire de Magister, université Mentouri Constantine, 2011.

23. Michel Tissot, L'énergie solaire thermique et photovoltaïque, France, 2008.

24. http://www.solairethermique.guidenr.fr/I_capteur-solaire-thermique .

25. http://outilssolaires.com/installation/chauffe-eau-solaire/quel-systeme+a61.html.