

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Étude technico-économique d'un système
photovoltaïque en utilisant le logiciel RETscreen**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR :

BOUMAIZA ABDERRAOUF

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Dr. MECHIGHEL FARID

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : PR. MZAD HOCINE

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

EXAMINATEURS :

Dr. Adjabi Rachid

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

Dr. Haouam Abdalah

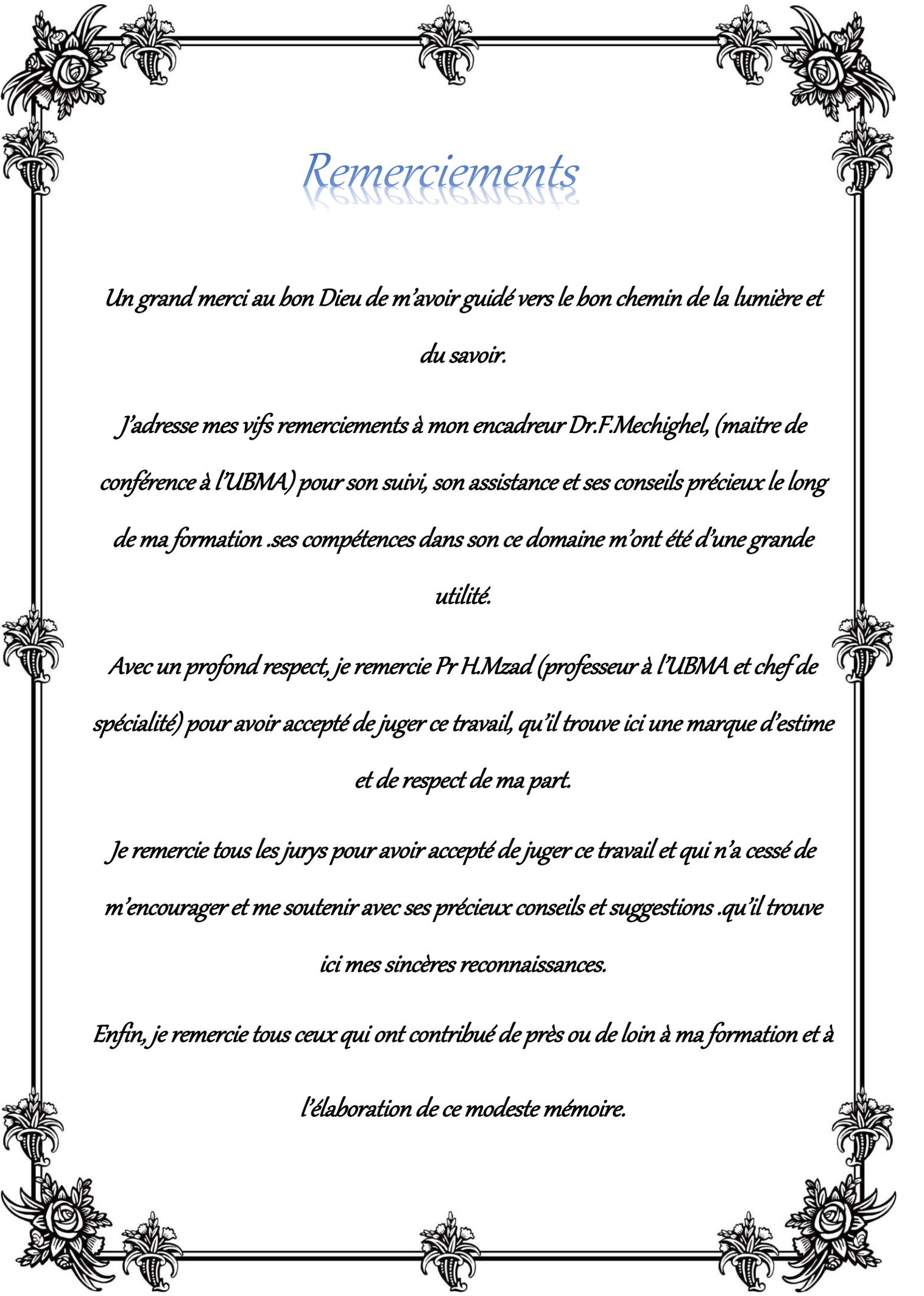
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA

Dr. Mechighel Farid

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

Année: 2014/2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

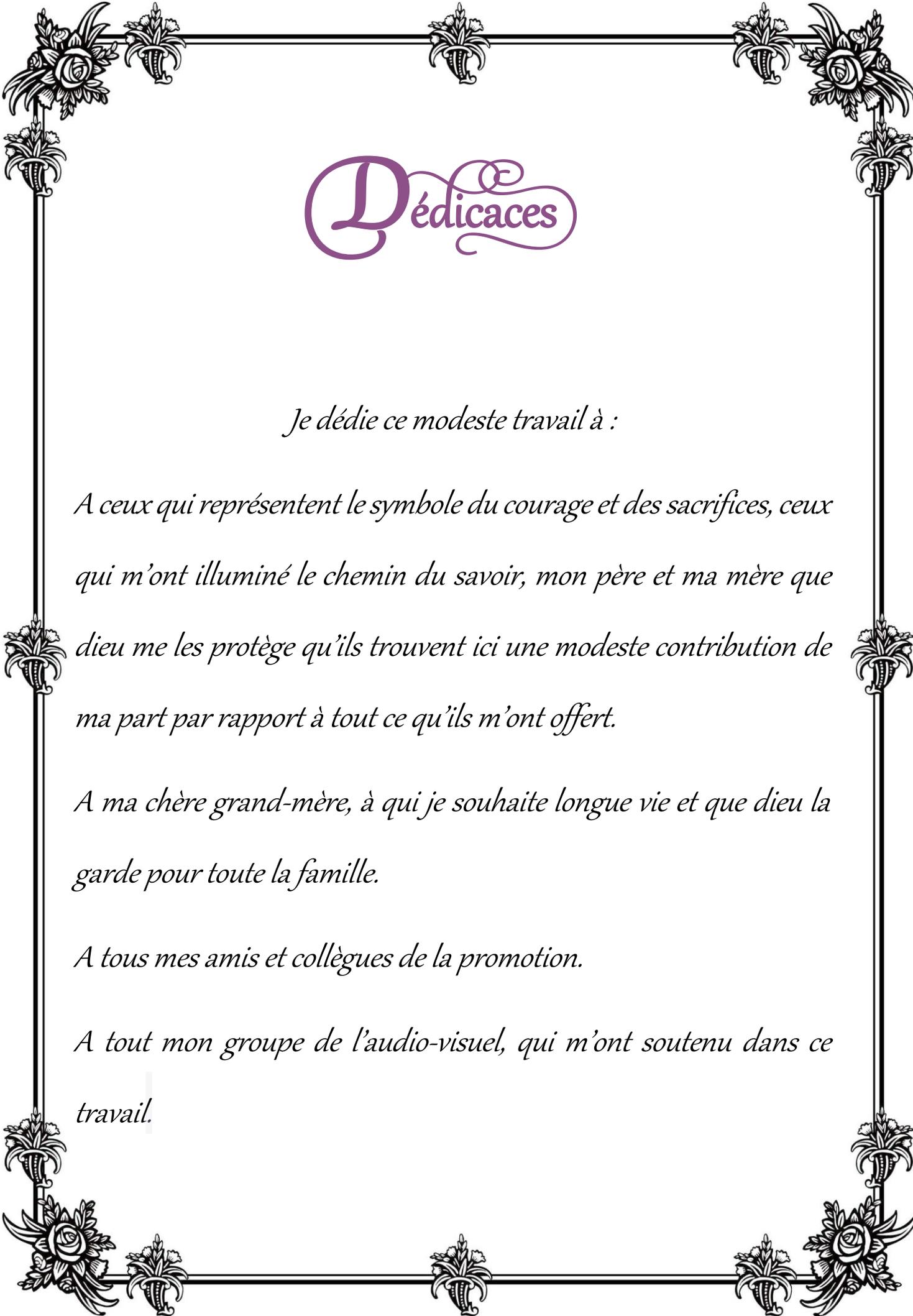
*Un grand merci au bon Dieu de m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et
du savoir.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur Dr.F.Mechighel, (maitre de
conférence à l'UBMA) pour son suivi, son assistance et ses conseils précieux le long
de ma formation .ses compétences dans son ce domaine m'ont été d'une grande
utilité.*

*Avec un profond respect, je remercie Pr H.Mzad (professeur à l'UBMA et chef de
spécialité) pour avoir accepté de juger ce travail, qu'il trouve ici une marque d'estime
et de respect de ma part.*

*Je remercie tous les jurys pour avoir accepté de juger ce travail et qui n'a cessé de
m'encourager et me soutenir avec ses précieux conseils et suggestions .qu'il trouve
ici mes sincères reconnaissances.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à
l'élaboration de ce modeste mémoire.*



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A ceux qui représentent le symbole du courage et des sacrifices, ceux qui m'ont illuminé le chemin du savoir, mon père et ma mère que dieu me les protège qu'ils trouvent ici une modeste contribution de ma part par rapport à tout ce qu'ils m'ont offert.

A ma chère grand-mère, à qui je souhaite longue vie et que dieu la garde pour toute la famille.

A tous mes amis et collègues de la promotion.

A tout mon groupe de l'audio-visuel, qui m'ont soutenu dans ce travail.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1	Le symbole de g é n é r a t e u r de courant	7
Figure 1.2	Le symbole de g é n é r a t e u r de courant alternatif	8
Figure 1.3	R é c e p t e u r s en parall è l e	9
Figure 1.4	R é c e p t e u r s en s é r i e	10
Figure 1.5	D é c o m p o s i t i o n de la lumi è r e blanche par un prisme	12
Figure 1.6	R é p o n s e spectrale des photopiles et sensibilité de l' œ i l humain	13
Figure 1.7	Mod é l i s a t i o n de l' i n é g a l e répartition de l' é n e r g i e solaire dans le monde	14
Figure 1.8	D é f i n i t i o n de l' A i r Mass : $m = 1/\sin(h)$	18
Figure 1.9	Spectre de rayonnement du soleil et raies d'absorption par l'atmosphère	20
Figure 1.10	Les 3 d i f f é r e n t s types de rayonnement solaire	21
Figure 1.11	Inclinaison et orientation d'un panneau solaire	22
Figure 1.12	Sch é m a de principe de la terre et des angles rentrant dans le calcul de l'irradiance. Vue locale de l'utilisateur avec azimut et élévation.	23

Chapitre 2

Figure 2.1	jonction de type NP	26
Figure 2.2	Représentation schématique d'une cellule solaire	28
Figure 2.3	Cellules solaires monocristallines	30
Figure 2.4	Cellules solaires poly cristallines	31
Figure 2.5	Cellules solaires amorphes	32
Figure 2.6	Les cellules multi-jonctions	33
Figure 2.7	Principe de la cellule à multi-jonction-	33

Figure 2.8	Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque	34
Figure 2.9	Cellules flexibles	34
Figure 2.10	Caractéristique courant tension de N_s cellule en série	36
Figure 2.11	Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle	37
Figure 2.12	Modèle de cellule photovoltaïque idéal	38
Figure 2.13	Modèle de la cellule photovoltaïque réel	40
Figure 2.14	Calcul du ratio de performance	47
Figure 2.15	Évolution des performances d'un module photovoltaïque en fonction de la température d'utilisation	48

Chapitre 3

Figure 3.1	Installation photovoltaïque autonome	51
Figure 3.2	Installation photovoltaïque par réseaux.	52
Figure 3.3	Batterie GEL solaire « VICTRON » 200-220 Ah	61
Figure 3.4	Câblage électrique du cabanon.	62

Chapitre 4

Figure 4.1	Schéma de l'installation autonome	66
Figure 4.2	Les axes d'analyse d'énergie renouvelable par RETScreen	68
Figure 4.3	Capture d'écran. Information sur le projet	70
Figure 4.4	Capture d'écran .lieu de projet (Adrar)	71
Figure 4.5	Besoin énergétique pour installation PV pour l'habitation	72
Figure 4.6	choisi le type PV pour l'habitation	72
Figure 4.7	Besoin énergétique (choisi onduleur) pour installation PV	73
Figure 4.8	la feuille de calcul analyse des réductions d'émissions GSE	74
Figure 4.9	la feuille de calcul analyse des coûts	74

LISTE DES TABELAUX

Chapitre 1

Tableau (1.1)	Type d'onde longueur d'onde fréquence usages principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages.	14
----------------------	---	-----------

Chapitre 2

Tableau 2.1	Rendement des différentes technologies	22
Tableau 2.2	Type de batterie existant actuellement sur le marché	43

Chapitre 3

Tableau 3.1	Estimation des consommations d'appareils disponible dans le cabanon	53
Tableau 3.2	Les consommations électriques du cabanon	56
Tableau 3.3	Estimation de l'énergie journalière globale	57
Tableau 3.4	Caractéristiques techniques des différents types des modules Sharp	58

Résumé

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque (PV) est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen de cellules PV.

Nous rappelons le principe de fonctionnement et les paramètres principaux d'une cellule PV. Nous avons comparé différents procédés technologiques pour la réalisation des cellules solaires.

Nous étudions le fonctionnement de cellules PV à contacts par la simulation numérique utilisés dans le but de comparaison les besoin énergétiques d'un cabanon à différent saison. et paussi une simulation d'une maison avec logiciel de RETscreen.

Mots-Clés : les énergies renouvelables -cellule photovoltaïque – les besoin énergétiques- simulation – RETscreen. –

.

Sommaire

Liste de figure

Liste du tableau

Résumé

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Notions fondamentales sur gisement solaire

1.1 Introduction	3
1.2 Rappels d'électricité	3
1.3 Générateurs et récepteurs	6
1.3.1 Générateurs d'énergie	6
1.3.1.1 Générateurs de courant continu	7
1.3.1.2 Générateurs de courant alternatif	7
1.3.2 Récepteurs (ou consommateurs) d'énergie	8
1.4 Montages en série et parallèle	9
1.5 Ensoleillement Et Lumière	10
1.5.1 Qu'est-ce que la lumière	10
1.5.2 Couleur et longueur d'onde	11
1.6 La photopile	12
1.7 Le rayonnement solaire	15
1.7.1 Rayonnement et énergie	16
1.7.2 Rayonnement solaire et atmosphère	16
1.7.3 Rayonnement du corps noir : soleil hors atmosphère, constante solaire	18
1.7.4 Rayonnement perçu au sol (rôle de l'atmosphère)	19
1.7.5 Les types de rayonnement solaire	20
1.8 Orientation et inclinaison	21

Chapitre 2 : Etude D'un Système Photovoltaïque

2.1 Introduction	24
2.2 Energie renouvelable	24
2.3 Historique des panneaux solaires photovoltaïques	25
2.4 Principe de fonctionnement	26
2.4.1 Les Propriétés des Semi-conducteurs	26
2.4.2 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque	27
2.4.3 Matériaux utilisés dans les cellules PV	29
2.5 Technologie d'une cellule photovoltaïque	29
2.6 Architecture d'un générateur photovoltaïque	35
2.6.1 Regroupement en série	35
2.6.2 Regroupement en parallèle	36
2.7 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	37
2.7.1 Cellule photovoltaïque idéal	37
2.7.2 Cellule photovoltaïque réelle	39
2.8. Installation des panneaux	40

2.8.1 Disposition des panneaux	40
2.8.2 Fixation des panneaux	41
2.8.3 L'orientation des panneaux	41
2.8.4 Installations des éléments de la batterie	42
2.8.5 Câblage électrique	43
2.9 Types d'accumulateurs	43
2.10 Rendement d'un système photovoltaïque	44
2.11 Influence de la température photovoltaïque	48
2.11 Conclusion	49

Chapitre 3 : Calcul de besoin énergétique d'une maisonnette équipée d'un Système Photovoltaïque

3.1 Introduction	50
3.2 Choix du type d'installation photovoltaïque	50
3.2.1 Installation autonome	50
3.2.2 Installations raccordées au réseau	51
3.3 Cas d'étude : Étude d'une maisonnette à ANNABA équipée d'une installation autonome PV	52
3.3.1 Calcul de la Consommation totale	52
3.3.2 Dimensionnement du module photovoltaïque	56
3.3.2.1 Ensoleillement	56
3.3.2.2 Calcul de la puissance crête requise par l'installation	57
3.3.2.3 Calcul du nombre de panneau	59
3.3.3 Dimensionnement de la batterie	59
3.3.4 Câblage électrique	62
3.4. Conclusion	64

Chapitre 4 : Étude technico-économique d'un système photovoltaïque : Simulation avec le logiciel RETScreen

4.1 Introduction	65
4.2 Type d'installation	65
4.3 Simulation avec logiciel	66
4.3.1 Logiciels pour le photovoltaïque	66
4.3.2 Présentation du logiciel RETScreen	67
4.4 Analyse des résultats RETScreen	75
4.5 Conclusion	75

Conclusion Générale	76
----------------------------	-----------

Références	78
-------------------	-----------

Annexe	80
---------------	-----------

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que ceux des pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. Cette consommation donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le recours au développement des énergies non polluantes est alors apparu comme l'ultime solution face à ce problème.

En vertu du Protocole de Kyoto, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8% en dessous de leurs niveaux de 1990 sur la période 2008–2012.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse doivent jouer un rôle important pour atteindre cet objectif.

Par énergie renouvelable on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressources illimitées. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

Notre objectif dans ce travail est l'étude d'un système photovoltaïque qui est équipé d'un générateur solaire constitué un assemblage de cellules qui transforment directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Avec d'un ensemble de convertisseurs et de régulateurs qui gèrent à la fois le stockage et la distribution de l'énergie électrique vers la charge.

- Le premier chapitre donne des notions sur l'énergie solaire, l'énergie photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la cellule PV qui passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents et l'effet des variations climatiques sur le Générateur Photovoltaïque GPV.
- Dans le troisième chapitre on a calculé les besoins en énergie électrique et l'énergie totale moyenne nécessaire aux consommations énergétiques.
- Enfin, dans le chapitre 4, nous présentons la modélisation détaillée des coûts (économiques et énergétiques) sur un cycle de vie du système avec le logiciel RETscreen.

Chapitre 1 : Notions fondamentales sur le gisement solaire

1.1 Introduction

Nous rappelons dans ce chapitre les bases d'électricité nécessaires à la compréhension des notions et phénomènes électriques ainsi que des notions du rayonnement solaire. Nous introduisons donc ici des définitions, des principes et des unités auxquels il faudra se référer au cours de la lecture de ce mémoire.

1.2. Rappels d'électricité

1.2.1. Le courant électrique

Le courant électrique est une circulation de particules chargées, les électrons, présents dans toute matière. Ce flux chargé est porteur d'énergie et nous rappelons ici comment on le caractérise. Pour une meilleure compréhension, nous ferons appel à des analogies avec une circulation d'eau, car toutes proportions gardées, les concepts sont les mêmes.

1.2.2. La différence de potentiel (ou tension électrique)

En électricité la différence de potentiel est la quantité d'énergie mobilisable par les électrons pour aller d'un point A à un point B d'un circuit [1].

La différence de potentiel aux bornes d'un générateur est appelée **tension nominale** (tension d'utilisation dans les conditions de fonctionnement normal).

La valeur de mesure est le **volt** (V). La tension électrique se mesure avec un voltmètre.

$1 V = 1\,000 mV = 1\,000\,000 \mu V$ où mV = millivolts et μV = microvolts.

Le symbole d'expression est la lettre U .

1.2.3. Le courant électrique (ou intensité)

C'est en électricité la quantité d'électrons qui circule par unité de temps [1].

Le courant circulant normalement dans un circuit donné est appelé *courant nominal*.

La valeur de mesure est l'*ampère* (A). L'intensité du courant électrique se mesure à l'aide d'un ampèremètre.

$1 \text{ A} = 1\,000 \text{ mA} = 1\,000\,000 \mu\text{A}$ où $m\text{ A} = \text{milliampères}$ et $\mu\text{ A} = \text{microampères}$.

Le symbole d'expression est la lettre I .

1.2.4. La résistance (ou résistor)

La résistance mesure la « difficulté » de passage d'un courant [1].

Elle se mesure en ohms (Ω). Pour un conducteur parfait, elle est reliée au courant et à la tension par la relation :

$$U = RI \quad (1.1)$$

1.2.5. La puissance

C'est le produit de la quantité d'électrons (courant) par l'énergie mobilisable par les électrons (tension) [1].

La valeur de mesure est le *watt* (W).

Le symbole d'expression est la lettre P .

La puissance s'exprime par la formule :

$$P = UI \quad (1.2)$$

$(W) = (V) \cdot (A)$ P s'exprime en watts, U en volts et I en ampères

Exemple :

Une ampoule fonctionnant sous une tension de 12 V et consommant un courant de 0,5 A aura une puissance de :

$$P = UI = 12 \cdot 0,5 = 6 \text{ W}$$

1.2.6. La consommation électrique

C'est l'énergie électrique consommée ou produite pendant une unité de temps [1].

Cette grandeur nous est très familière puisque c'est celle qui sert de base au calcul de nos factures d'électricité domestique. Les compagnies d'électricité facturent à leurs clients le nombre de kilowatts-heure (*KWh*) qu'ils consomment. Quand on a allumé une lampe de 100 W pendant 10 h, on a consommé :

$$100 \text{ W} \cdot 10 \text{ h} = 1\,000 \text{ Wh} = 1 \text{ kWh}$$

La consommation électrique correspond donc au produit de la puissance (en watts) par le temps (en heures) :

$$E = Pt \tag{1.4}$$

(Wh) = (W) (h) . Elle peut s'exprimer en joules (*J*), qui sont des (W)(s), ou plus commodément en watts-heure (*Wh*) :

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kiloWatt-heure} = 3,6 \text{ mégajoules} = 3,6 \text{ millions de joules}$$

C'est aussi la capacité multipliée par la tension :

$$E = UI t = QU \text{ (Wh)} \tag{1.5}$$

$$(V)(A)(h) = (Ah)(V) .$$

Exemple :

L'appareil de notre exemple précédent, qui consomme 0,1 A en permanence, s'il fonctionne sous une tension de 12V, a une puissance de :

$$0,1 \cdot 12 = 1,2$$

(A) (V) = (W) Il aura consommé au bout de 10 jours une énergie de :

$$1,2 \cdot 240 = 288 (W) (h) = (Wh)$$

Ce qui est équivalent à:

$$24 \cdot 12 = 288$$

$$(Ah)(V) = (Wh).$$

1.3. Générateurs et récepteurs :

1.3.1. Générateurs d'énergie :

Comme leur nom l'indique, les générateurs d'énergie génèrent et donc produisent de l'énergie électrique [1].

Sachant néanmoins que l'énergie ne naît pas spontanément mais résulte toujours d'une transformation, certains diront qu'en théorie, le terme de *générateur* est impropre.

Mais il désigne dans la pratique une source d'énergie au sens de l'usage : un générateur est donc un composant qui fournit de l'énergie à un système, comme une batterie ou un photo-générateur, et plus généralement une centrale électrique, un alternateur, une chute d'eau...

Les photo-générateurs sont des générateurs de courant continu (DC), par opposition aux générateurs de courant alternatif (AC). Insistons au passage sur le terme (générateur de courant).

1.3.1.1. Générateurs de courant continu :

Un tel générateur fournit du courant continu : tous les électrons circulent dans le même sens dans le circuit.

Les deux bornes des générateurs de courant continu ne jouent pas le même rôle. On dit qu'ils sont polarisés. Ils possèdent une borne positive et une borne négative du fait du sens de circulation du courant.

Par convention, on dit que le courant électrique sort par la borne positive du générateur (donc en sens inverse du flux réel d'électrons).



Figure 1.1 : Le symbole de générateur de courant [2].

1.3.1.2. Générateurs de courant alternatif

Un courant est dit alternatif lorsque les électrons circulent alternativement dans un sens, puis dans un autre du circuit, et ce, à une certaine fréquence.

Les deux bornes des générateurs de courant alternatif jouent le même rôle. Ils ne sont pas polarisés.

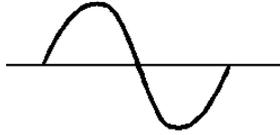


Figure 1.2 : Le symbole de générateur de courant alternatif [2].

Le temps entre deux changements de sens est la période du courant alternatif (t en secondes), $1/t$ est la fréquence du courant alternatif, elle s'exprime en *hertz*.

Exemple : EDF distribue du courant alternatif 50 Hz , donc à 50 alternances par seconde.

1.3.2. Récepteurs (ou consommateurs) d'énergie

Les appareils qui reçoivent, et donc consomment, le courant électrique sont appelés des récepteurs.

Certains appareils sont présents dans notre vie de tous les jours : ampoule, rasoir électrique, réfrigérateurs, appareils de mesure, alarmes, relais radio, etc.

Ils se différencient par le type d'énergie qu'ils utilisent : thermique (grille-pain, réfrigérateur...), mécanique (rasoir, ventilateur, moteur...) et même électrochimique quand il s'agit d'une batterie.

De même que les générateurs, ces « consommateurs » transforment l'énergie, et c'est donc en fonction de leur usage qu'ils sont appelés récepteurs : ils fournissent un service aux « consommateurs » que nous sommes.

1.4. Montages en série et parallèle

Ces montages s'appliquent aux générateurs comme aux récepteurs.

Il s'agit de voir ce qui se passe lorsque l'on câble ensemble plusieurs récepteurs ou plusieurs générateurs. Les règles sont données ci-dessous.

1.4.1. En parallèle

Les tensions des différentes « branches » sont les mêmes et les courants s'additionnent :

$$U_1 = U_2$$

$$I = I_1 + I_2$$

Exemple : 2 ampoules en parallèle alimentées par une pile (**Fig1.3**).

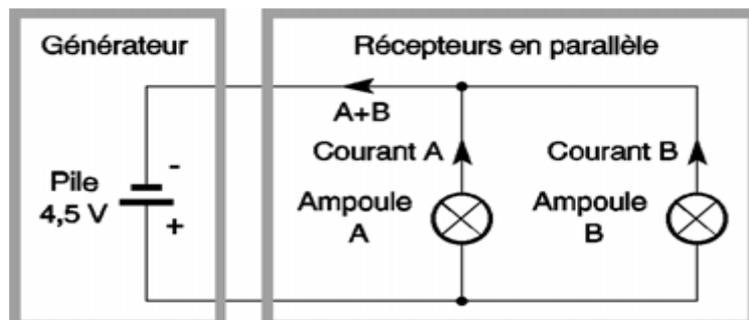


Figure 1.3 : Récepteurs en parallèle [1].

Chaque ampoule a une tension nominale de 4,5 V et une puissance de 1 W.

$$I = 1/4,5 = 0,22 \text{ A}$$

Le courant passant dans chaque ampoule est de 0,22 A, le courant consommé sur la pile est de : $I = 2 \cdot 0,22 = 0,44 \text{ A}$

La tension est la même aux bornes de chaque composant.

1.4.2. En s érie

Les courants sont les mêmes et les tensions s'additionnent :

$$I_1 = I_2$$

$$U = U_1 + U_2$$

Exemple : 2 ampoules en s érie aliment ées par une pile

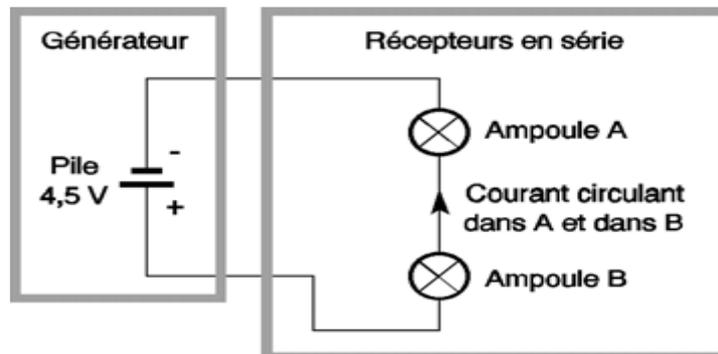


Figure 1.4 : Récepteurs en s érie [1].

1.5. Ensoleillement Et Lumi ère

1.5.1. Qu'est-ce que la lumi ère ?

La lumi ère est un ph énom ène physique, un transport d'énergie sans transport de mati ère. Dans son acception g énérale de lumi ère visible, elle est constitu ée de l'ensemble des ondes électromagn étiques per çues par la vision humaine, c'est-à-dire dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 380 nm (violet) et 780 nm (rouge)¹. Par un effet d'adaptation des espèces vivantes à leur environnement, cette région du spectre électromagn étique recoupe celle où l'éclairement énerg étique solaire est maximal à la surface de la terre [3].

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique.

Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

1.5.2. Couleur et longueur d'onde

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquences radio, microondes...

Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, et propres au développement de la vie.

Regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre : l'infrarouge procure de la chaleur, le visible est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie, s'il est besoin de le préciser), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à $3\text{ }\mu\text{m}$ ($= 3\,000\text{ nm}$)

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer « **ultraviolette** » la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380 nm) au rouge (longueur d'onde 780 nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche [4].

On réalise la même décomposition avec un prisme.

On appelle **spectre**, ou **répartition spectrale**, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent.

Une lumière rouge est une portion de lumière blanche, de même qu'une lumière bleue ou orange. Les lampes artificielles les plus courantes, quoique blanches à l'œil, diffèrent par leur spectre.

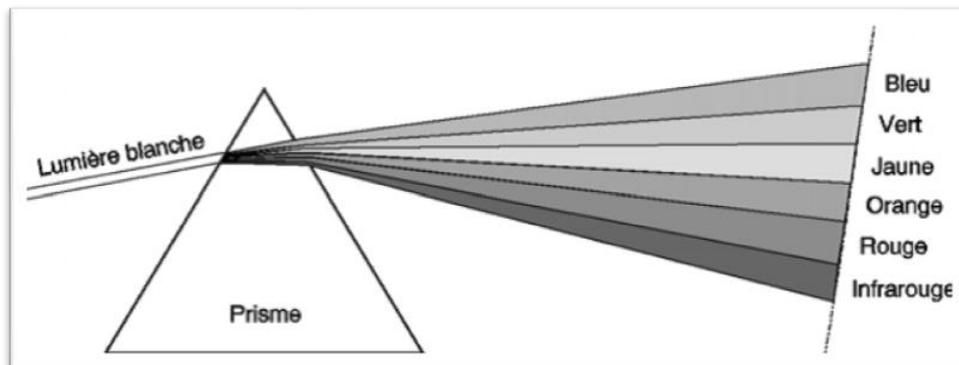


Figure 1.5 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme [4].

1.6. La photopile

Une photopile comprend essentiellement une couche d'un matériau semi-conducteur, suffisamment épaisse pour absorber la quasi-totalité du rayonnement incident, et une jonction semi-conductrice. Les photons du rayonnement incident ayant une énergie suffisante sont absorbés en donnant naissance à une paire électron-trou. À l'intérieur de la jonction existe un champ électrique, dont l'action sépare les couples « électron-trou », en provoquant la naissance d'un courant électrique. Celui-ci est collecté au moyen de contacts métalliques reliés à un circuit électrique fermé. Une photopile se caractérise notamment par son rendement, qui est le rapport entre la puissance maximale qu'elle délivre et la puissance qu'elle reçoit. Celui-ci est compris, en général, entre 10 et 20 %.

Pour la fabrication des photopiles, on utilise soit du silicium monocristallin (très pur) ou de l'arséniure de gallium, qui offrent le meilleur rendement mais sont très coûteux, soit du silicium polycristallin ou des matériaux en couches minces (sulfure de cadmium, silicium amorphe), plus économiques mais dont le rendement est plus faible.

Les photopiles trouvent notamment une application importante dans le domaine spatial : les engins spatiaux en vol orbital (hormis ceux qui circulent à de grandes distances du Soleil) sont alimentés en énergie électrique par des panneaux de photopiles. [1]

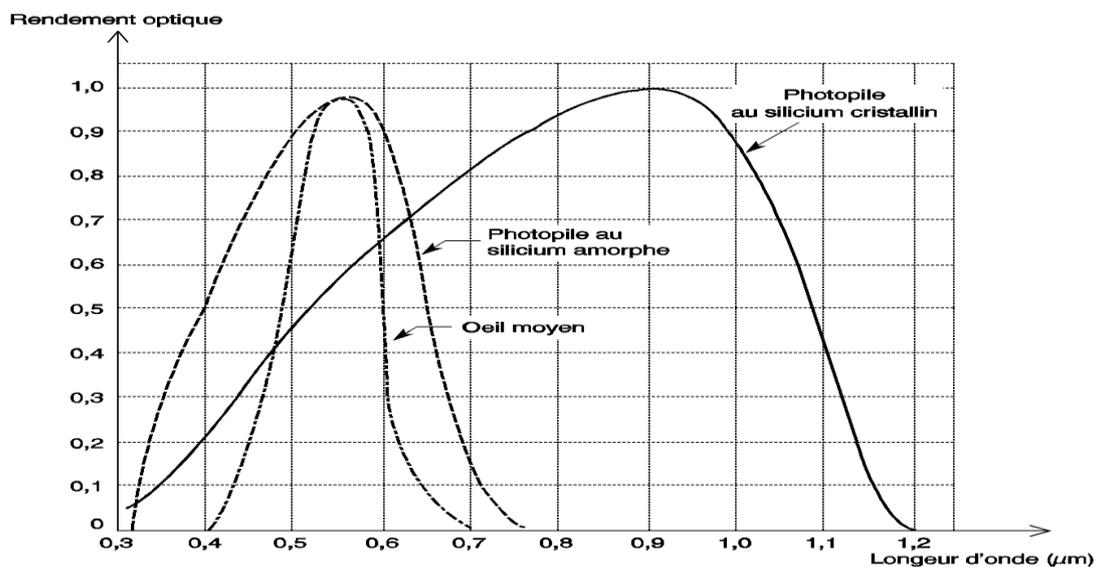


Figure 1.6 : Réponse spectrale des photopiles et sensibilité de l'œil humain [5].

Tableau 1.1 : Type d'onde longueur d'onde fréquence usages principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages [1].

Type d'onde	Longueur d'onde	Fréquence	Usages
Ondes radio	$> 1 \text{ mm}$	$< 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$	Radio, TV, radars
Infrarouge	$1 \text{ mm} \text{ à } 0,8 \text{ } \mu\text{m}$	$3 \cdot 10^{11} \text{ à } 4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	Vision nocturne, télécommandes
Lumière visible	$0,8 \text{ à } 0,4 \text{ } \mu\text{m}$	$3,7 \cdot 10^{14} \text{ à } 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	Vision diurne, photosynthèse
Ultraviolet	$0,4 \text{ à } 0,05 \text{ } \mu\text{m}$	$7,5 \cdot 10^{14} \text{ à } 6 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$	Bronzage, purification de l'eau
Rayons X	$0,05 \text{ } \mu\text{m} \text{ à } 10^{-2} \text{ \AA}$	$6 \cdot 10^{13} \text{ à } 3 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$	Radiographie
Rayons gamma	$< 10^{-2} \text{ \AA}$	$> 3 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$	-

μm = micromètre : $1 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$, $1\ 000 \text{ } \mu\text{m} = 1 \text{ mm}$
 nm = nanomètre : $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, $1\ 000 \text{ nm} = 1 \text{ } \mu\text{m}$
 \AA = angström : $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$, $10\ 000 \text{ \AA} = 1 \text{ } \mu\text{m}$
 Hz = hertz : $1 \text{ Hz} = 1/1 \text{ s} = \text{s}^{-1}$

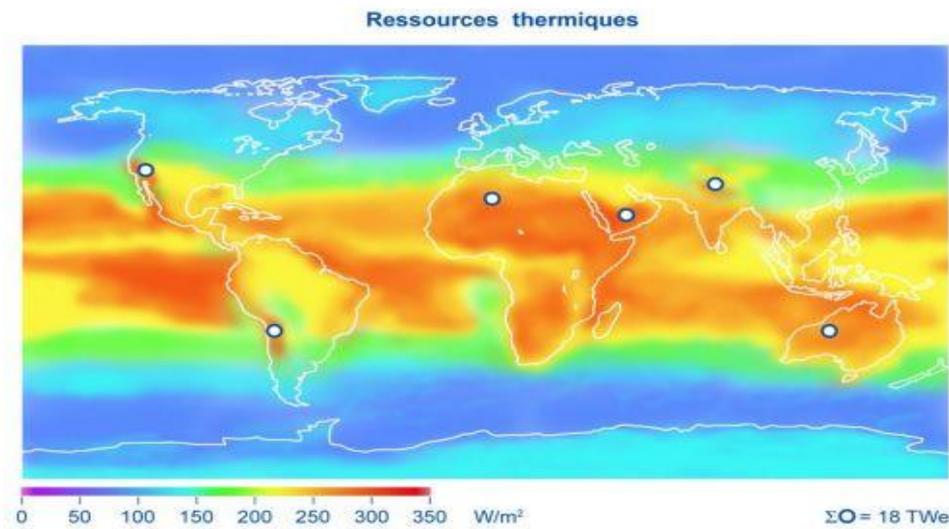


Figure 1.7 : Modélisation de l'inégale répartition de l'énergie solaire dans le monde [6].

1.7. Le rayonnement solaire

Le Soleil existe depuis plusieurs milliards d'années. Les rayons solaires arrivent en permanence sur Terre et chauffent la surface de notre planète. Sans cet apport d'énergie, la Terre serait glaciale. Quel est donc ce rayonnement solaire indispensable à notre planète ?

L'énergie solaire arrive sur Terre sous forme d'un rayonnement électromagnétique dont la lumière visible fait partie.

Un rayonnement électromagnétique se décompose en ondes radio et millimétriques, en émissions dans l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet et, au-delà, en rayons X et gamma. Un corps froid comme la Terre émet principalement des ondes radio, millimétriques et infrarouges. Un corps chaud comme le Soleil émet sur tout le spectre. Il nous envoie un flux d'énergie dominé par la partie visible du spectre. Une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère. Les rayonnements ultraviolets et X sont principalement absorbés au-dessus de 100 km en altitude, tandis que les rayonnements visible et infrarouge sont en partie réfléchis par l'atmosphère et les nuages.

La surface de la Terre, qui n'est pas très chaude, 15°C en moyenne, réémet une partie de l'énergie solaire qui peut être absorbée par l'atmosphère (gaz à effet de serre) et les nuages. L'énergie solaire reçue par la Terre n'est pas constante dans le temps. Le cycle solaire, d'une périodicité de 11 ans, est observé depuis des siècles à travers la variation du nombre de taches à la surface du Soleil. Le flux d'énergie émis par le Soleil ne varie cependant que d'un millième environ au cours d'un tel cycle.

1.7.1. Rayonnement et énergie

Les échanges d'énergie portés par le rayonnement électromagnétique qui ont lieu entre le soleil et le système terre-océan-atmosphère ne se font pas de manière continue, mais de façon discrète, sous forme de paquets d'énergie, véhiculés par des corpuscules élémentaires immatériels, les photons. Chaque photon transporte ainsi un quantum d'énergie proportionnel à la fréquence de l'onde électromagnétique considérée ; cette énergie est d'autant plus grande que la fréquence est élevée.

La relation suivante exprime la quantité d'énergie associée à un photon en fonction de la fréquence de l'onde :

$$E = h.\nu \quad (1.6)$$

Où :

- E : l'énergie de l'onde électromagnétique
- ν : la fréquence de l'onde
- h : la constante de Planck ($6,625.10^{-34} \text{ j.s}$)

Ainsi, les rayonnements électromagnétiques de courte longueur d'onde ou de fréquence élevée véhiculent davantage d'énergie que les rayonnements de grande longueur d'onde (basse fréquence).

1.7.2. Rayonnement solaire et atmosphère

La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s ; les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à

1 360 W/m^2 (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil).

Le watt par m^2 (W/m^2) est l'unité la plus utilisée pour quantifier le rayonnement solaire. C'est un flux, une puissance par unité de surface. 1 W/m^2 est aussi égal à 1 Joule par seconde et par m^2 puisque 1 $W = 1 J/s$. Ici l'énergie est électromagnétique, mais les unités sont les mêmes que pour une énergie électrique.

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1 360 W/m^2 subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée.

En effet, si l'on fait face au Soleil, on le voit à une certaine hauteur, qu'on appelle hauteur apparente. C'est l'angle h entre le plan horizontal situé sous nos pieds et une droite pointée vers le Soleil.

On voit bien sur la (**Fig 1.8**) que cet angle h détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère et donc les pertes engendrées.

On appelle m (masse atmosphérique), ou *Air Mass*, cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu.

Sur notre figure, $m = 1$ si le Soleil entre dans l'atmosphère au point A, et $m = 2$ s'il y entre en M, donc :

$$m = 1/\sin(h).$$

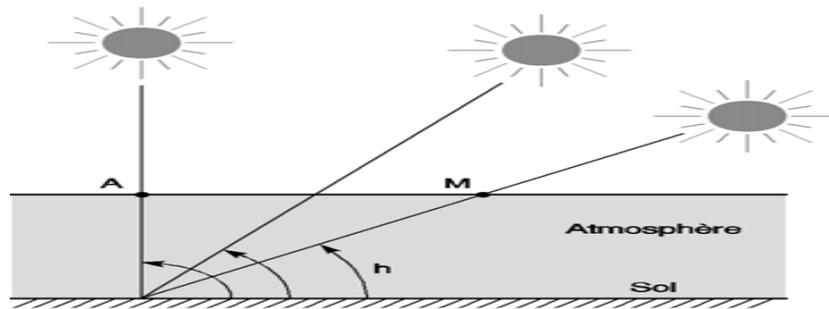


Figure 1.8 : Définition de l'Air Mass : $m = 1/\sin(h)$.

1.7.3. Rayonnement du corps noir : soleil hors atmosphère, constante solaire

On peut considérer, en première approximation, que l'énergie du rayonnement du soleil hors de l'atmosphère suit la loi du rayonnement du corps noir (figure 1). En effet, pour de grandes longueurs d'ondes, c'est-à-dire pour des photons peu énergétiques, la loi donnant l'énergie moyenne rayonnée $[E(\lambda, T)]$ par unité de volume des photons dans un intervalle de longueur d'onde $d\lambda$ se réduit à la loi classique de **Rayleigh-Jeans** :

$$E(\lambda, T)d\lambda = (8\pi kT / \lambda^4)d\lambda \quad (1.7)$$

Avec k constante de Boltzmann.

Ainsi, plus le corps noir émet à une température élevée, plus son rayonnement est énergétique, et la longueur d'onde du maximum énergétique diminue : c'est la loi de déplacement de Wien.

Le rayonnement devient visible par l'œil humain pour des couleurs allant du rouge au violet.

En intégrant la densité moyenne d'énergie totale par unité de volume des photons sur toutes les fréquences (ou longueurs d'onde λ), nous obtenons la célèbre **loi de Stefan-Boltzmann** :

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (1.8)$$

Avec E (W/m^2) flux énergétique par unité de surface,

σ Constante de Stefan ($\sigma = 5,7 \cdot 10^8 \text{ w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k}^{-4}$).

Le soleil a une température de surface estimée à 5 760 K. le flux énergétique, en provenance de cet astre, intercepté dans l'angle solide représenté par la terre vaut : Il est connu sous la dénomination : « **constante solaire** » **hors atmosphère**,

C'est-à-dire pour une masse atmosphérique nulle (AM0, Air Mass 0).

1.7.4. Rayonnement perçu au sol (rôle de l'atmosphère)

Quant aux conditions normalisées de test des panneaux solaires, elles sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1\,000 \text{ W/m}^2$, un spectre solaire AM 1,5 et $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de température ambiante. Ces conditions sont appelées STC (*Standard Test Conditions*).

La (Fig 1.9) montre ce spectre AM 1,5 normalisé : les « trous » que l'on observe correspondent aux absorptions par les gaz de l'atmosphère.

Cela correspond à un ensoleillement assez fort, soleil au Zénith (au plus haut de sa course), ciel parfaitement dégagé (sur la plage à Nice, au printemps). Ce n'est pas très représentatif, en tout cas dans notre zone tempérée, souvent riche en nuages.

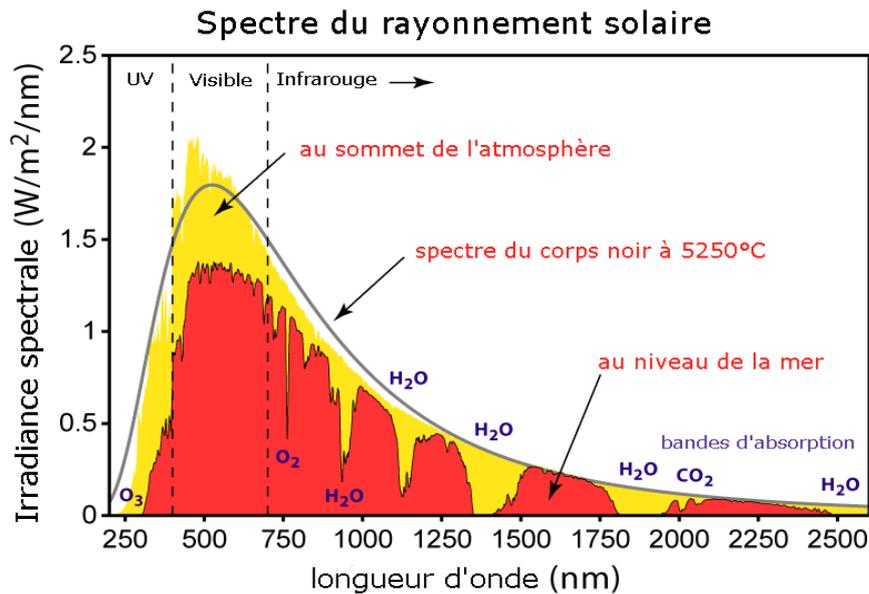


Figure 1.9 : Spéctre de rayonnement du soleil et raies d'absorption par l'atmosphère. [7]

1.7.5. Les types de rayonnement solaire

La partie du rayonnement solaire exploitée par les systèmes photovoltaïques se limite à la **lumière**, mais elle peut elle-même être décomposée en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment :

- **Le rayonnement direct**, le plus puissant, qui provient directement du soleil sans subir d'obstacles sur sa trajectoire (nuage, immeubles...). C'est lui qui nous aveugle lorsque l'on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps d'écouvert.
- **Le rayonnement diffus** provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages. C'est à lui que nous devons la "lumière du jour" qui nous permet d'y voir clair même quand le temps est couvert.

- **Le rayonnement dû à l'albédo**, résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). C'est lui qui peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir.

Bien que son intensité soit moins forte, le rayonnement diffus représente généralement une part significative du rayonnement total, parfois même majoritaire, 60% par exemple en Allemagne ou à Lille contre 40% dans le Sud de la France. Il est également important dans les zones intertropicales [8]

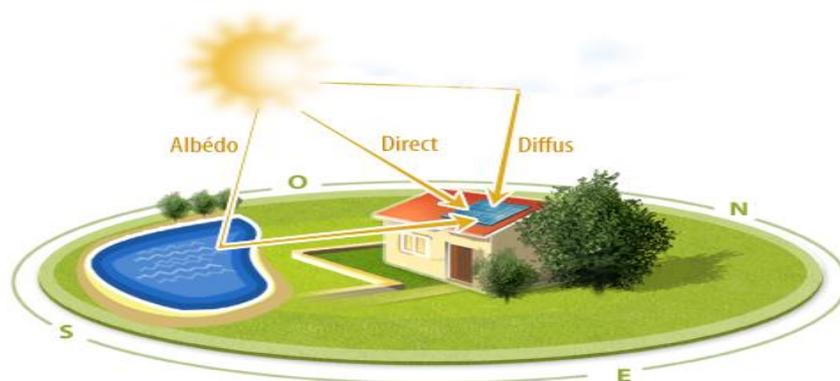


Figure 1.10 : Les 3 différents types de rayonnement solaire. [8]

1.8. Orientation et inclinaison

Une question vient immédiatement à l'esprit après cet exposé : comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer ?

On doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison (Fig1.11). L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison.

L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal

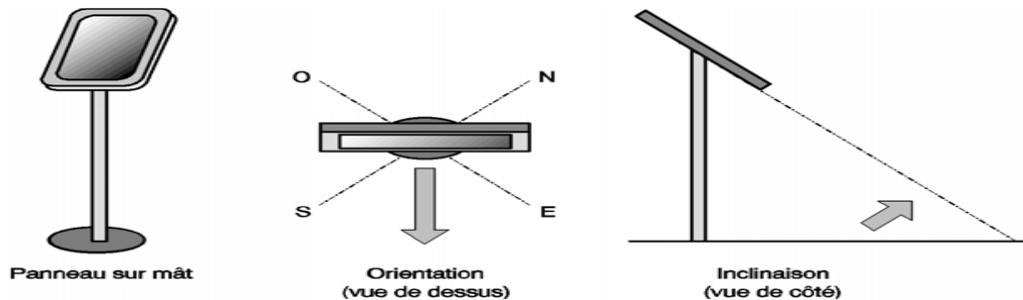


Figure 1.11 : Inclinaison et orientation d'un panneau solaire.

Étant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie, sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien.

L'inclinaison idéale des panneaux, elle, dépend bien entendu de la hauteur du soleil pendant la période d'utilisation : plus le soleil est bas sur l'horizon, plus on aura intérêt à relever les panneaux vers la verticale pour les placer face au soleil. Donc l'inclinaison idéale dépend directement de la période de l'année qu'on veut privilégier, et donc de l'utilisation des panneaux, du but recherché

Angle permettant de projeter le flux incident sur la surface du capteur.

Les figures suivantes illustrent les angles qui rentrent en jeu dans le calcul de l'irradiance disponible à un moment de la journée, pour une localisation spatiale et un montage spécifique angulaire du capteur

i. Déclinaison : δ

La déclinaison est l'angle situé entre l'équateur et la distance du centre de la Terre au centre du Soleil. Comme l'axe de la Terre est incliné à $23,45^\circ$, la déclinaison varie au cours d'une année de $\pm 23,45^\circ$. En été et en hiver, la déclinaison atteint son maximum. En revanche, au printemps et à l'automne, elle s'élève à 0° .

ii. Azimut : α

L'azimut solaire est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu. On le mesure à partir du Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest (0° pour le Sud, 180° pour le Nord). Les lignes verticales du diagramme figurent les angles azimutaux de 10° en 10° .

Elévation du soleil ou hauteur : γ

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. Les lignes horizontales du diagramme figurent les hauteurs angulaires de 10° en 10° au-dessus de l'horizon (0° pour le plan horizontal et 90° pour le zénith). $\gamma_{\max} = 90 - \phi + \delta$.

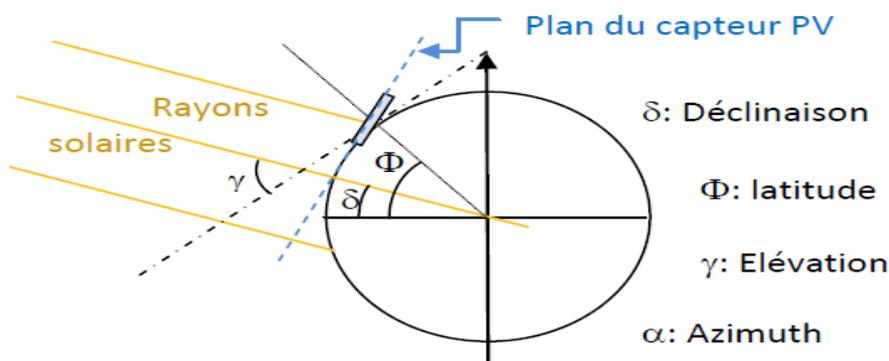


Figure 1.12 : Schéma de principe de la terre et des angles rentrant dans le calcul de l'irradiance. Vue locale de l'utilisateur avec azimut et élévation.

Chapitre 2 : Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques

2.1. Introduction

Nous allons maintenant tenter de comprendre comment est produite l'électricité à partir de la lumière, et comment sont fabriqués les photo-générateurs.

Chacun sait que : « **Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme** ». Convertir l'énergie lumineuse en électricité, telle est la fonction d'une *photopile* ou d'une cellule solaire.

Tous les photo-générateurs sont donc des transformateurs d'énergie qui, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, produisent de l'énergie électrique.

2.2. Energie renouvelable

Les sources d'énergie conventionnelles telles que le nucléaire ou les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont issues de stocks limités de matières extraites du sous-sol de la terre. Chacune d'elles provoque dans leurs utilisations des conséquences à long terme plus ou moins importantes sur l'environnement et qui tendent à être mieux maîtrisées : pollution atmosphérique, changement climatique, contamination radioactive.... A l'opposé, les sources d'énergie renouvelables ont recours à des flux naturels qui traversent de façon plus ou moins permanente la Biosphère. Si il est utilisé qu'une infime partie de ces flux, alors ces énergies resteront inoffensives pour l'environnement naturel aussi bien localement que globalement. Toutes les énergies renouvelables sont issues directement ou indirectement du soleil. Son rayonnement direct peut être utilisé de deux manières :

- sa chaleur peut être concentrée pour chauffer de l'eau sanitaire, des immeubles, des séchoirs, ou bien un liquide en circulation afin de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur ou d'une dynamo. C'est le solaire thermique.
- sa lumière peut être transformée directement en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque

L'énergie solaire qui touche la terre représente en tout environ 1 540 1015 kWh/an (1 540 péta kWh/an). C'est 15 000 fois plus que la consommation d'électricité mondiale. Il faut évidemment prendre en compte l'ensoleillement local ainsi que les performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire par panneau photovoltaïque (PV) [9].

2.3. Historique des panneaux solaires photovoltaïques

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [10] :

- 1839 : le physicien français **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 curiosité de laboratoire.
- 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 solutions nouvelles 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 photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 Km en Australie
- "Lem" et "Heweliusz", les premiers nano-satellites polonais de la constellation BRITEL, décolleront en 2013.

La recherche porte également aujourd'hui sur des polymères et matériaux organiques (éventuellement souples) susceptibles de remplacer le silicium.

2.4. Principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques

2.4.1. Les Propriétés des Semi-conducteurs

Un Semi-conducteur est un composant dont la conductivité électrique (plus importante que celle des isolants, mais plus faible que celle des métaux) augmente par addition d'impuretés dans sa structure. Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si, un élément chimique le plus souvent associé à l'oxygène dans la silice SiO_2 , donc très abondant dans la nature.

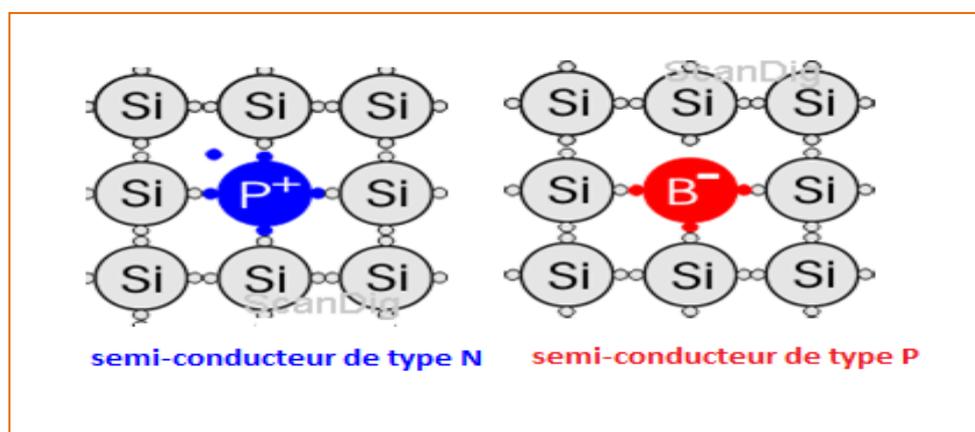


Figure 2.1 : jonction de type NP.

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant par des impuretés. Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P.

La (Fig 2.1) montre comment se font les liaisons dans un cristal de silicium.

Chaque atome de Si comporte 4 électrons périphériques, appelés électrons de valence, et chacun de ses quatre voisins apporte un électron à mettre en commun pour créer quatre liaisons avec ses plus proches voisins. Il y a donc huit électrons externes autour de chaque Si (configuration stable). Le principe est ensuite d'utiliser les éléments voisins dans la classification périodique l'une présentant un excès d'électrons grâce au phosphore (Ph) et l'autre un déficit en électrons grâce au Bore (Bo), sont dites respectivement dopée de type N et dopée de type P.

2.4.2. Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [11].

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

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN).

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont représentés sur la figure 2.2.

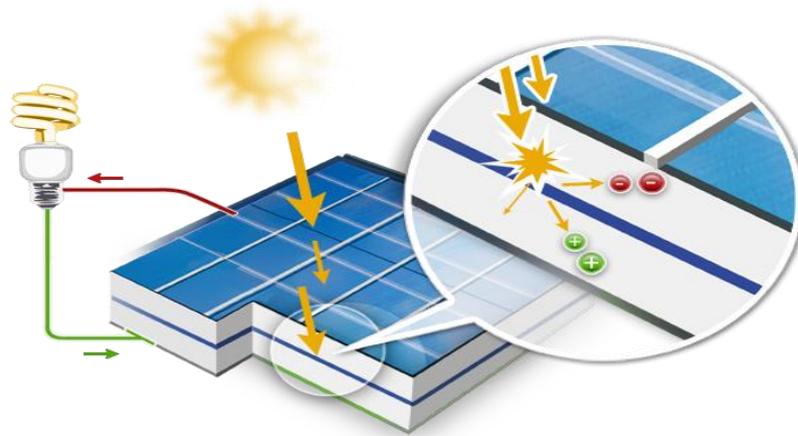


Figure 2.2 : Représentation schématique d'une cellule solaire [11].

Donc une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N.

2.4.3. Matériaux utilisés dans les cellules PV

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès).

Les différents types de cellules PV existants sont :

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)
- Cellule en silicium polycristallin (rendement : 11 à 15%)
- Cellule Tandem (voir annexe)
- Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%) (voir annexe)

2.5. Technologie d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires peuvent être réparties en trois groupes, selon le matériau de base utilisé :

- cellules monocristallines
- cellules polycristallines
- cellules à couches minces

Le groupe des cellules à couche mince compte les cellules amorphes au silicium et les cellules formées à partir d'autres matériaux, comme le tellure de

cadmium (Cd Te), le di-séléniure de cuivre et d'indium (CIS) ou l'arséniure de gallium (Ga As). Dans la pratique, les cellules en silicium ont fini par s'imposer.

A. Cellules solaires monocristallines :

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 μm d'épaisseur, appelées galettes (en anglais *wafers*). Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arrêté 152 mm. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion.

Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules polycristallines.



Figure 2.3 : Cellules solaires monocristallines [9].

B. Cellules solaires polycristallines

Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires polycristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré.

Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires polycristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 μm d'épaisseur. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti-réflexion. La couche anti-réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires polycristallines présentent un rendement entre 13 et 16 %.

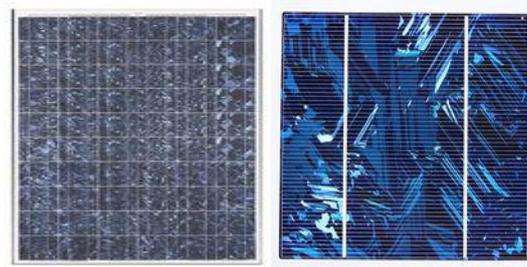


Figure 2.4 : Cellules solaires polycristallines [9*].

C. Cellules solaires amorphes

Le terme amorphe vient du grec (a : sans, morphe : forme) et signifie qui n'a pas de forme. En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux.

Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par exemple le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à environ 0,5 à 2 μm . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est-il pas nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 % [9].

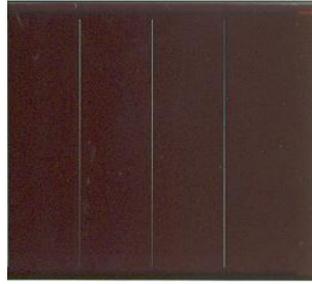


Figure 2.5 : Cellules solaires amorphes [9].

Tableau 2.1 : Rendement des différentes technologies.

Matériau de base	Rendement en %	Surface en m^2
Cellule monocristalline	15-18	7-9
Cellule polycristalline	13-16	8-9
Cellule amorphe	6-8	13-20
Cellule Audis éniure de cuivre et d'indium	10-12	9-11

D. Les cellules multi-jonctions à haut rendement

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (noté E_g en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée à l'énergie du photon. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur

énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Fig. 2.6). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants .

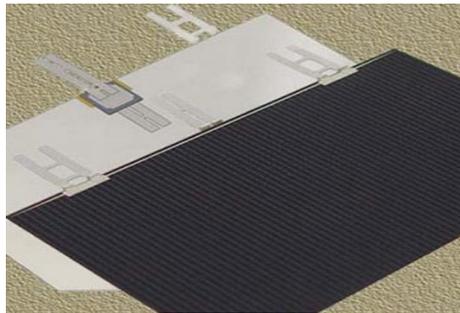


Figure 2.6 : Les cellules multi-jonctions [12].

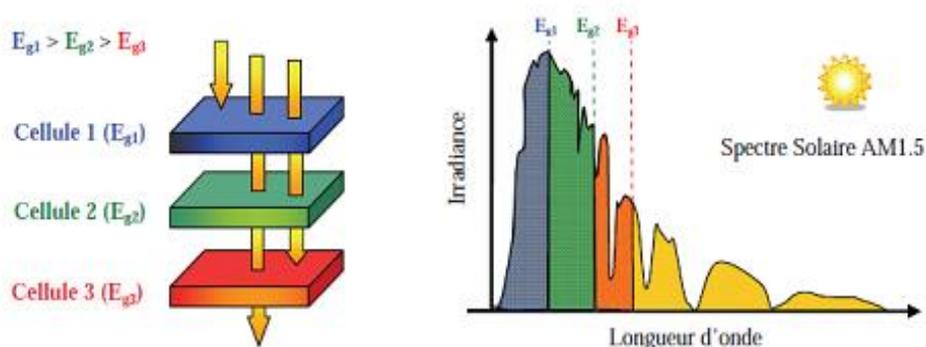


Figure 2.7 : Principe de la cellule à multi-jonction

E. Autres types de cellules

Il existe d'autres types de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées ou encore à l'étude, les principales étant :

i. Photovoltaïque à concentration :

Certaines cellules sont destinées à fonctionner avec des rayons solaires concentrés. Elles sont alors placées à l'intérieur d'un collecteur qui concentre la lumière du soleil sur les cellules au moyen d'une lentille. L'idée est d'utiliser le

moins possible de matériau photovoltaïque semi-conducteur, et le plus possible de la lumière du soleil. Leur rendement se situe entre 20 et 30%.

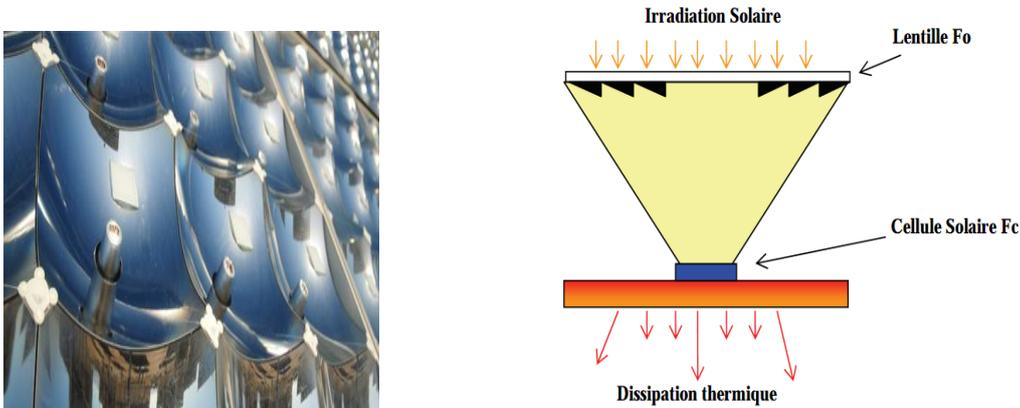


Figure 2.8 : Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [13].

ii. Cellules flexibles :

Basées sur un processus de production similaire à celui des couches minces, ces cellules sont constituées d'un dépôt de matière active sur un plastique fin, rendant le tout flexible.

Cela ouvre la voie à une série d'applications, en particulier pour l'intégration aux bâtiments (toiture) et pour les applications domestiques.

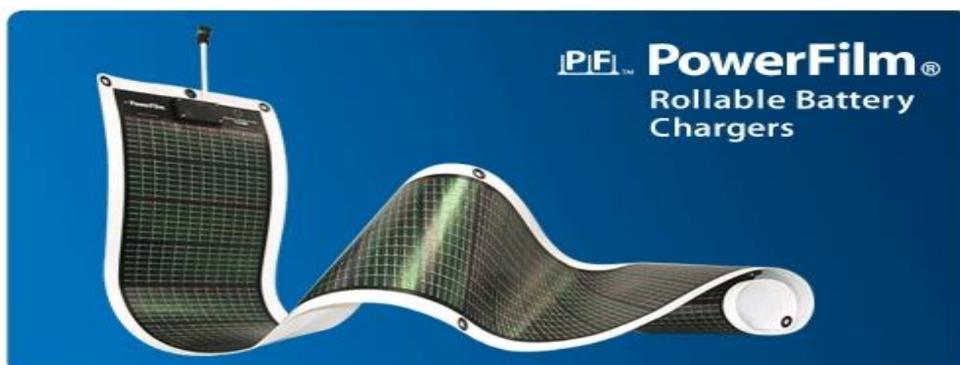


Figure 2.9 : Cellules flexibles [9].

2.6. Architecture d'un générateur photovoltaïque

2.6.1. Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série (Fig. 2.10) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (2.1) résume les caractéristiques électriques d'une association en série de (N_s) cellules [14].

$$V_{coNS} = N_s \cdot V_{co} \quad (2.1)$$

$$I_{CC} = I_C \quad (2.2)$$

$V_{co} \cdot N_s$: La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série,

I_{CC} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite *tension de circuit ouvert* V_{co} ou tension à vide.

On la mesure à l'aide d'un voltmètre. Cette tension est de l'ordre de 0,7 Volt pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairement).

Un photo-générateur étant une association de cellules élémentaires, la tension à vide V_{co} sera typiquement égale à: $V_{co} = n \cdot 0,7 \text{ Volt}$

où n est le nombre de cellules. Par exemple, $V_{co} = 4,2 \text{ Volt}$ si $n = 6$ cellules en série.

La tension maximale que cette photopile peut délivrer sous l'éclairement considéré est de 4,2 V. Mais, dans cet état, la photopile ne délivre aucun courant et ne peut alimenter aucun récepteur.

C'est sous une tension inférieure que la photopile sera utilisée, afin qu'elle délivre tension et courant pour alimenter le récepteur.

I_{cc} : Courant de court-circuit

Lorsqu'on place le photo-générateur en court-circuit, il délivre son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre (2.10). On appelle ce courant maximal à tension nulle *courant de court-circuit*.

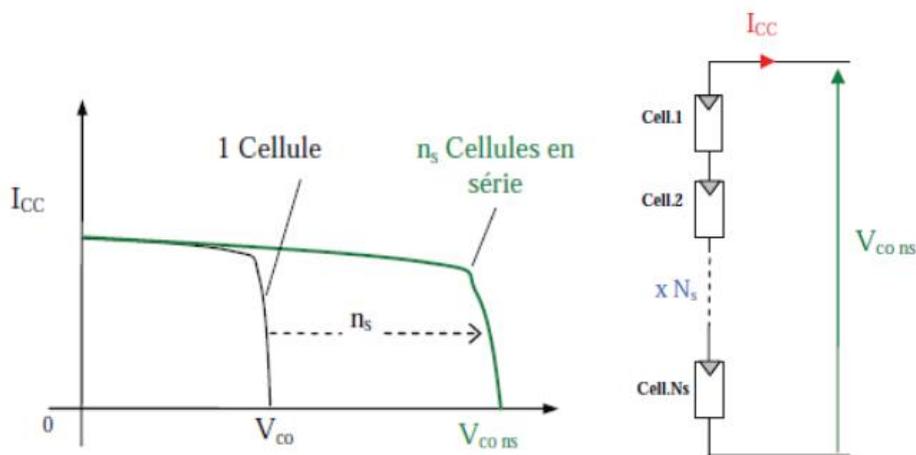


Figure 2.10 : Caractéristique courant-tension de N_s cellules en série [14].

2.6.2. Regroupement en parallèle

Une association en parallèle de (N_p) cellules figure (2.11) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants :

$$I_{ccNP} = N_{PX} \cdot I_{SC} \quad (2.3)$$

$$V_{co} = V_{coNP} \quad (2.4)$$

Avec ; I_{sc} pour la terminologie anglaise signifiant (Short-Circuit current)

I_{ccNP} : La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle,

V_{coNP} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

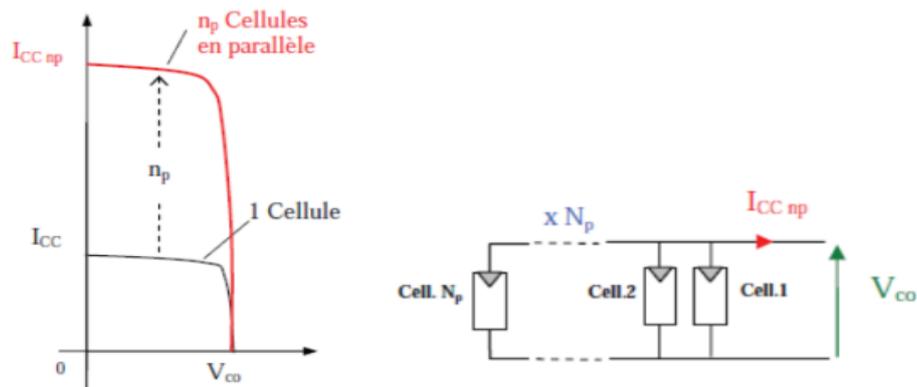


Figure 2.11 : Caractéristique courant-tension de (N_p) cellule en parallèle [14].

2.6.3. Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles N_p et un courant égal à celui d'une seule cellule. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW , sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [14].

2.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

2.7.1 Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance

lumineuse incidente, en parallèle avec une diode (Fig 2.12) qui correspond à l'aire de transition $p-n$ de la cellule PV.

D'après la loi des nœuds (**loi de Kirchhoff**) :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.5)$$

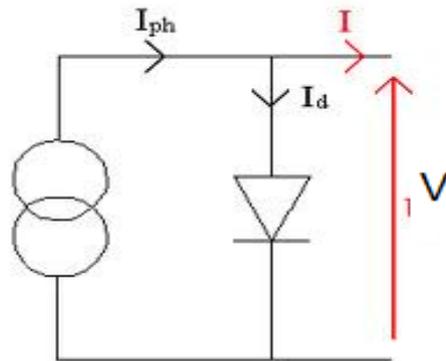


Figure 2.12 : Modèle de cellule photovoltaïque idéal.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (2.6)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$I_d = I_0 \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \quad (2.7)$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension à la borne de diode.

V_T : kT/q Potentielle thermique.

Donc la relation sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \quad (2.8)$$

La quantité kT/q , homogène à une tension, est fréquemment notée V_T :

Potentielle thermique.

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ Joules/Kelvin (la constante de Boltzmann)}$$

2.7.2. Cellule photovoltaïque réelle

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p [14].

On a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_P \quad (2.9)$$

$$I_P = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.10)$$

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p}\right) - 1 \right) \quad (2.11)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Le courant photonique dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

k : Constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Joule/Kelvin).

q : Charge d'électron $= 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en Kelvin.

Donc l'équation (2.11) devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} - 1 \right) \right) - \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (2.12)$$

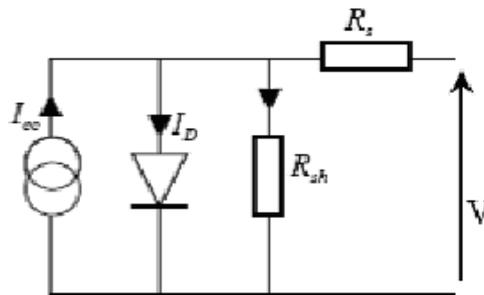


Figure 2.13 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel [14].

2.8. Installation des panneaux

Pour installer les panneaux solaires dans un site, il est nécessaire de vérifier les conductions suivantes :

2.8.1. Disposition des panneaux

Les structures doivent être solides, fixées au sol, pour résister à des vents d'au moins de 150 Km/h. De plus, elles doivent être fiables dans le temps, elles doivent utiliser un matériau de bonne fiabilité (autre l'aluminium anodisé, la visserie inox et la visserie inoxydable).

2.8.2 Fixation des panneaux

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes :

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

2.8.3. L'orientation des panneaux

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

Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à 10° pour assurer un auto nettoyage lors des pluies.

Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes (les traqueurs) qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, (voir annexe) la présence des pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques à concentration où seul le rayonnement direct est concentré sur

la surface active. Il arrive cependant qu'il soit impossible d'installer le panneau exactement face au sud.

2.8.4. Installations des éléments de la batterie

L'utilisation de la batterie peut présenter des dangers :

Risque d'explosion, dégagement de gaz toxiques (brouillard d'acide sulfurique).

En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation. Compte tenu de cela, l'installation de ces éléments doit être effectuée avec un grand soin.

Ils doivent être installés dans un local approprié à l'abri des intempéries, surtout quand le produit de la capacité par la tension de décharge est supérieur à 1000.

Ce local doit satisfaire à certaines exigences, qui sont les suivantes :

- D'être bien ventilé pour garantir la circulation des gaz.
- D'être à une température proche de 25°C, pour assurer le bon fonctionnement des éléments.

2.8.5. Câblage électrique

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

Nous allons d'abord effectuer un branchement par un câble électrique qui sera un câble de qualité par exemple, il devra subir les agressions du vent, de la pluie, du soleil, du gel, croissance marines et autres. La section sera d'au moins 1.5 mm², 2.5mm² dès que la longueur excède 25m ou que la puissance du module soit supérieure à 100W

2.8.6. Câblage de liaison

Il se trouve entre les modules et le régulateur, il doit être d'une section d'au moins $2,5\text{mm}^2$ ou plus si la longueur excède 15cm. Pour une intensité inférieure à 4 A, sa section sera calculée de façon à ne pas avoir plus de 6% de chute de tension.

2.9. Types d'accumulateurs

Parfois, appelée 'accumulateur', une batterie est destinée à emmagasiner de l'électricité. Le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Nous résumons dans le tableau les différents types de batteries que l'on rencontre sur le marché.

Tableau 2.2 : Type de batterie existant actuellement sur le marché

Type de batterie	propriétés	Puissance inférieure	Coût
Plomb-acide	Fiable, recyclable, avec entretien	35	Pas trop chère
Scellé plomb-acide	Entretien nul, utilisé dans n'importe quelle position	39	Pas très chère
Bipolaire plomb-acide	Recharge rapide permise et surtout durable	50	Très chère
Nickel-cadmium	Toxique, effet de mémoire	45	Très chère
Nikel-fer	Non toxique-durable	55	Très chère
Nikel-métal hydrure	Non toxique-durable	90	Très chère
Zinc-bromure	Analogue à la précédente mais très toxique	90	Très chère
Sodium-sulfure	Fonctionne à 300°C . d'où danger d'incendie	110	Très chère
Lithium-Ion(SAFT)	Sure, puissante, formes diverses	150	Très chère

2.10. Rendement d'un système photovoltaïque

Comme tout système de conversion d'énergie, une installation photovoltaïque est caractérisée entre autres par son rendement. Nous allons voir ici comment exprimer ce rendement indépendamment des diverses typologies de systèmes photovoltaïques rencontrés. Le calcul du **Ratio de Performance** permet en effet de rendre compte de la qualité de fonctionnement d'une installation indépendamment de l'irradiation ou de la puissance crête des modules [8].

La production d'une installation photovoltaïque est donnée par l'équation suivante :

$$E_{elec} = H_i S \eta \quad (2.14)$$

Avec

- E_{dec} [kWh/an] : énergie électrique produite en sortie du système sur un an
- H_i [kWh/m².an] : irradiation globale reçue dans le plan des modules sur 1m² pendant un an.
- S [m²] : surface du champ des modules photovoltaïques
- η : rendement global du système

Le rendement global du système inclut l'ensemble des pertes provoquées par ses composants, des modules jusqu'au point d'injection du **courant alternatif** sur le réseau de distribution. [8]

Il permet de caractériser la fraction de l'énergie lumineuse captée au départ que l'on retrouve sous forme électrique injectée sur le réseau. Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse E_{lum} reçue sur les panneaux et l'énergie électrique E_{dec} de sortie injectée sur le réseau.

$$\eta = \frac{E_{elec}}{E_{lu}} \quad (2.15)$$

Le rendement global peut être séparé en deux composantes :

$$\eta = \eta_{stc} \eta_{systeme} \quad (2.16)$$

- η_{stc} est le rendement des modules en conditions de tests standards, c'est-à-dire sous une luminosité $G_{stc} = 1000 \text{ W/m}^2$ à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Soumis à cette luminosité, les panneaux délivrent une puissance électrique de sortie globale que l'on nomme la puissance crête P_c . C'est elle qui caractérise le champ photovoltaïque lors de son installation. Pour les particuliers, une installation moyenne fait environ 3 kW crête soit 3 kWc . Le rendement η_{stc} permet donc de caractériser l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, avant qu'elle n'arrive au niveau des onduleurs. Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse G_{stc} fois S (surface du champ photovoltaïque) reçue sur les panneaux et l'énergie électrique (la puissance crête) P_c de sortie des modules. [8]

$$\eta_{stc} = \frac{P_c}{G_{stc} S} \quad (2.17)$$

- $\eta_{systeme}$ est appelé ratio de performance et est égal aux autres rendements caractérisant les composants qui suivent les modules et liés à la typologie de l'installation :
 - le rendement de l'onduleur et son adaptation aux caractéristiques du champ photovoltaïque.
 - les pertes dans les câbles.
 - la température de fonctionnement des modules.

- la qualité d'appairage des modules selon leurs caractéristiques réelles (mismatch).
- la typologie de câblage des séries de modules tenant plus ou moins compte des masques proches.
- la tolérance sur la puissance crête de l'installation (divergence entre puissance théorique nominale et puissance réellement installé).
- la présence de masques (proches et lointains).

Le ratio de performance se situe entre 0,7 et 0,8 pour des installations classiques correctement conçues.

La production photovoltaïque dépend de 3 composantes :

En effet, en synthétisant les équations et si on exprime la puissance en kWc plutôt qu'en Wc (ce qui permet d'"éliminer" la variable G_{stc} ($G_{stc} = 1000 W/m^2 = 1kW/m^2$)), on obtient l'équation :

$$E_{elec} = H_i P_c \eta_{systeme} \quad (2.18)$$

La production photovoltaïque dépend donc de 3 composantes :

- l'irradiation reçue,
- la puissance crête,
- le ratio de performance ($\eta_{systeme}$) (PR, dans la littérature anglophone).

C'est le ratio de performance (PR) qui peut être utilisé pour quantifier la performance d'un système.

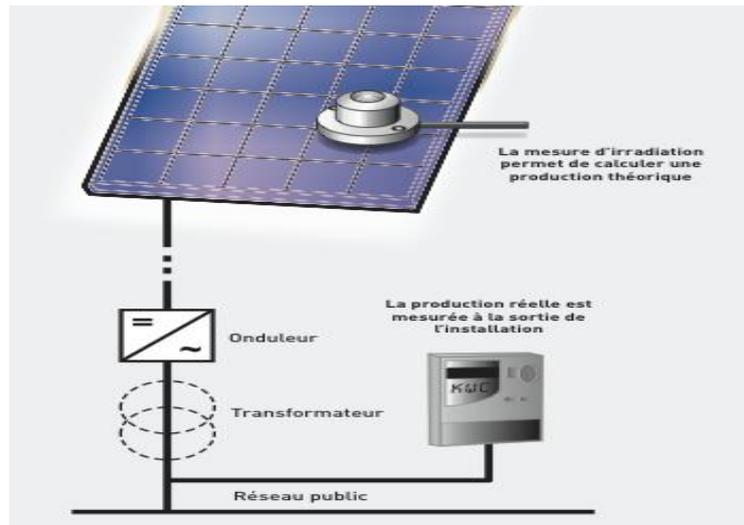


Figure (2.14) : Calcul du ratio de performance

Pratiquement, le ratio de performance s'obtient en effectuant le rapport entre la production réelle et la production théorique, pendant une période de référence. La différence entre les productions théoriques et réelles provient des pertes engendrées par les différents équipements de l'installation.

$$PR = \frac{\text{production réelle (kwh)}}{\text{production théorique (kwh)}} \quad (2.19)$$

- La production théorique est égale à la production idéale en sortie des module : $E_{dec} = H_i \cdot P_c$ (2.20)

Son utilisation permet d'obtenir un indicateur de performance indépendant de la puissance crête du système, de sa localisation géographique et des orientations et inclinaisons du champ.

Lors du dimensionnement d'un système, on s'attachera à maximiser ce coefficient, alors que les autres termes de la dernière équation (H_i et P_c) seront uniquement affectés par la localisation, l'inclinaison et l'orientation du champ, le type et la surface de modules employés. [8]

2.11. Influence de la température Photovoltaïque

La température d'utilisation est un paramètre important dans le comportement des cellules et des modules photovoltaïques en raison de leur exposition à un flux énergétique solaire de 1 kW/m^2 (plus communément appelé irradiance). Avec une conversion au mieux de l'ordre de 15 %, cette énergie est majoritairement dissipée en chaleur (environ 80 %), le reste étant réfléchi (environ 5 %).

Ainsi en l'absence d'une ventilation correcte, la température de la cellule et du module peut monter à plus de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ à midi (Fig 2.15). On observe alors une légère augmentation du courant en raison de la diminution de la largeur de la bande interdite et une diminution significative de la tension ($-0,4 \text{ \%}/\text{K}$) en raison d'une forte augmentation du courant direct de la diode.

En résumé, l'augmentation de température se traduit par une baisse de la puissance ($-0,35 \text{ \%}/\text{K}$) et surtout par un déplacement du point de puissance maximale, qui nécessite une adaptation de la valeur de la charge. Durant l'été, la perte peut représenter jusqu'à 12 % en relatif du rendement de conversion effectif moyen du module.

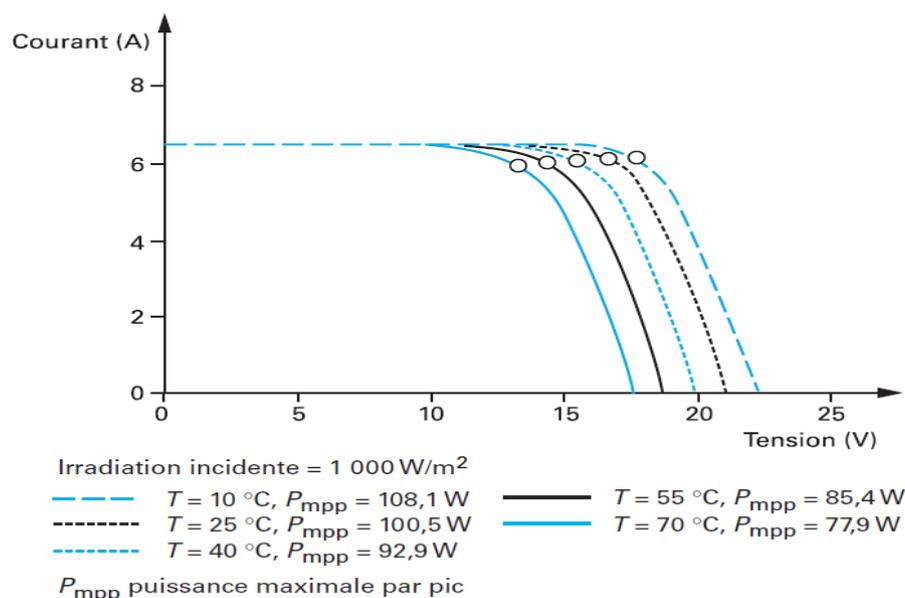


Figure 2.15 : Évolution des performances d'un module photovoltaïque en fonction de la température d'utilisation.

2.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologiques des éléments constitutifs d'un générateur PV et nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension d'un générateur photovoltaïque ainsi nous avons montré bien l'influence de la température et les installations des panneaux le rendement de la cellule.

Chapitre 3 : Calcul de besoin énergétique d'une maisonnette équipée d'un Système Photovoltaïque

3.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire un calcul du besoin énergétique d'une maisonnette équipée d'un système photovoltaïque. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période vacances (été hiver). Avant d'entamer les calculs nous allons choisir le type d'installation.

3.2. Choix du type d'installation photovoltaïque

Dans notre travail nous avons choisi le type d'installation autonome. Nous rappelons ici les types d'installations existantes.

3.2.1. Installation autonome

Les installations autonomes sont des installations non raccordées au réseau, composées de panneaux PV et dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité (Fig 3.1).

Etant donné que le courant fourni par le générateur PV est du courant DC, si l'installation de l'utilisateur requiert du courant AC, un onduleur est nécessaire. Ces installations sont avantageuses d'un point de vue technique et financier si le réseau électrique n'est pas présent ou s'il n'est pas facile d'accès, car elles peuvent remplacer des ensembles moteur-générateur. Par ailleurs, dans une configuration autonome, le champ PV est surdimensionné de sorte que, pendant les heures d'ensoleillement, l'alimentation de charge ainsi que la recharge des batteries de stockage puissent être garanties avec une certaine marge de sécurité en tenant compte des jours de faible ensoleillement.

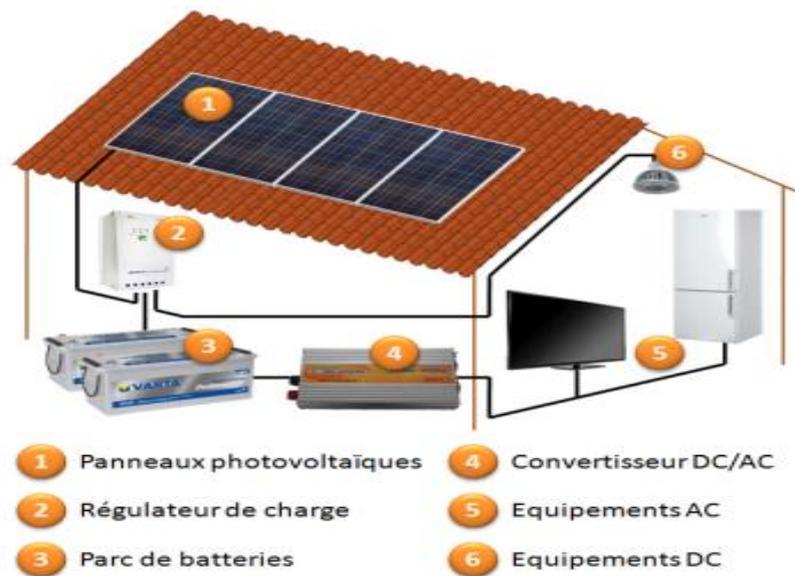


Figure 3.1 : installation photovoltaïque autonome.

3.2.2. Installations raccordées au réseau

Les installations raccordées en permanence au réseau utilisent l'énergie du réseau lorsque le générateur PV n'est pas en mesure de produire l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins du consommateur (Fig. 3.2). En revanche, si le système PV produit un excédent d'énergie électrique, celui-ci est mis sur le réseau, qui agit par conséquent comme un grand accumulateur : les systèmes raccordés au réseau n'ont donc pas besoin de batterie d'accumulateur. Ces installations offrent l'avantage de fournir une génération répartie et non centralisée : en effet, la valeur de l'énergie produite près de la zone de consommation est supérieure à celle de l'énergie produite dans les grandes centrales traditionnelles, car les pertes par transmission sont limitées et les dépenses liées au transport et aux systèmes électriques de répartition sont réduites. En outre, la production d'énergie lors des heures d'ensoleillement permet de réduire le recours au réseau pendant la journée, autrement dit lorsque la demande est supérieure.

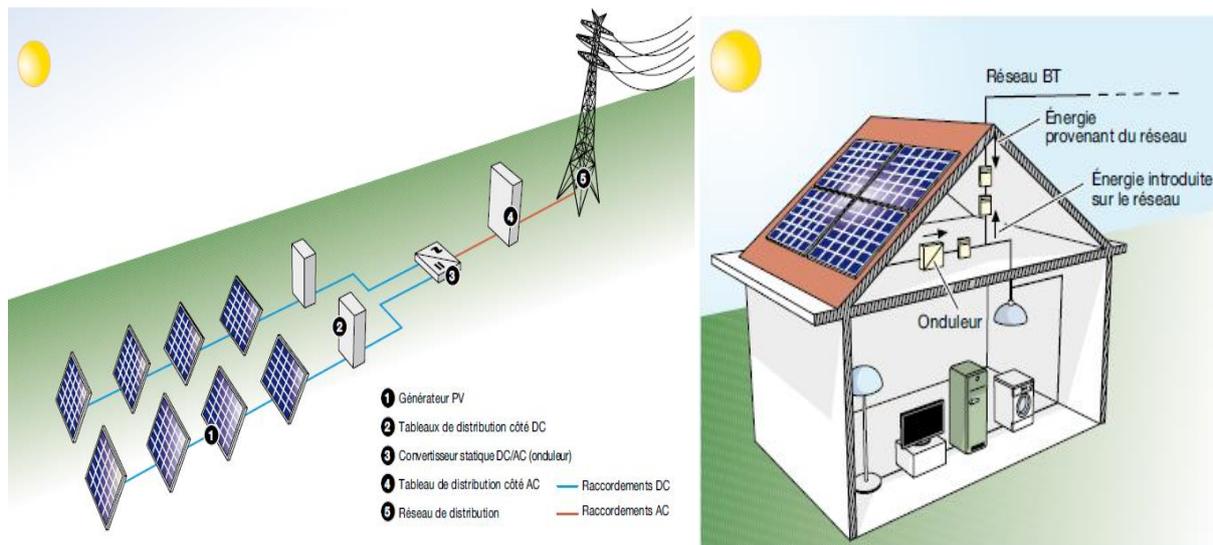


Figure 3.2 : installation photovoltaïque par réseaux.

3.3. Cas d'étude : Étude d'une maisonnette à ANNABA équipée d'une installation autonome PV :

On considère une maisonnette située à Annaba. On suppose que la maisonnette est occupée par quatre personnes dont les propriétaires n'y séjournent que pendant les vacances.

L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période de vacances (été hiver). Par la suite nous allons calculer l'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour E (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier (Fig. 3.2).

3.3.1 Calcul de la Consommation totale

L'installation photovoltaïque autonome permettra d'alimenter l'éclairage de la maison, la recharge des appareils portables (téléphone et ordinateur), un poste radio ainsi qu'un petit réfrigérateur. La documentation technique de ces appareils

nous renseigne sur leur consommation : La consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit :

L'énergie journalière consommée d'un équi (Wh/j) = la puissance de cet équipement (W) × durée d'utilisation de chaque équipement (h)

$$E_i = P_i \cdot t_i \quad (3.1)$$

Elle est donnée par la loi suivante [15]:

$$E = \sum_i E_i \quad (3.2)$$

Estimation des consommations d'appareils disponible dans la maisonnette :

Nous considérons que la maisonnette est équipée des appareils suivants (voir tableau 3.1) :

Tableau 3.1 : Estimation des consommations d'appareils disponible dans le cabanon.

Appareil	Consommation
Ampoule basse consommation	13 W
Téléphone portable	150 Wh par semaine
Ordinateur portable	300 W
Poste radio	50 W
Réfrigérateur	300 Wh par jour
Pompe à eau	6 A sous 12 VDC
Téléviseur	90 W

A priori, l'installation pourra donc rester en 12VDC

Nous estimons pour :

- *L'éclairage (Ampoule basse consommation)*

On prévoit 8 points lumineux 13 W pour les différentes pièces de la maison. Mais comme les occupants sont 04, on considère qu'il ne peut pas y avoir plus de 4 lampes allumées en même temps. On peut cependant dire qu'elles sont utilisées en moyenne 6h chacune en hiver et 3h en été. La consommation globale en éclairage est alors calculée de la façon suivante :

- **En Hiver** 4 ampoules x 13 W x 6 h = 312 Wh, soit : 26 Ah sous 12V.
- **En été** 4 ampoules x 13 W x 3 h = 156 Wh, soit : 13 Ah sous 12V.

C'est une consommation moyenne qui pourra se répartir différemment sur telle ou telle lampe, peu importe, du moment que l'enveloppe en énergie est suffisante.

Les utilisateurs devront, néanmoins veiller à ne pas laisser la lumière allumée dans les pièces inoccupées.

- *Fourniture en eau (Pompe à eau)*

La source naturelle étant disponible, il suffit simplement d'utiliser une pompe pour mettre en pression l'eau courante. Pour un débit de 10l/min, la pompe consomme 6A sous 12 V. comme il y a 4 personnes et que l'on compte 100 l pour chacun et par jour (pour le lavage, la cuisson...). Le besoin est de 400l/jour. Pour 40 min d'utilisation par jour,

La pompe consomme : $6 A \times 40/60 = 04 Ah$ toujours sous 12V.

- *Production de froid (Réfrigérateur)*

Un réfrigérateur en continu de 110 l, avec une bonne isolation thermique servira à conserver les aliments, mais uniquement lors des séjours. De plus, il est décidé

de ne s'en servir que l'été, puisque l'hiver, il suffit de laisser les denrées dehors. Cette équipement à un compresseur 70 W et une consommation de 300 Wh/j soit 25 Ah/j (en été seulement).

- *Téléviseur*

Pour éviter l'achat d'un téléviseur en continu, un modèle de commerce en 220VAC sera utilisé. Sa puissance est de 90 W et il est prévu de le brancher avec un petit onduleur spécifique à 90 % de rendement, qui sera allumé en même temps que la télé. Pour un usage prévu de 4h/j.

La consommation est : $90 \text{ W} \times 4 \text{ h} / 0.9 = 400 \text{ Wh}$, soit : 33.33 Ah sous 12V.

- *Autres équipement électriques (téléphone portable etc.)*

L'ordinateur est utilisé 4h par jour et le poste radio 6h. Les besoins en électricité par jour sont : 1 Ordinateur $\times 300 \text{ W} \times 4 \text{ h} = 1200 \text{ Wh}$, soit 100Ah. 1 Poste radio $\times 50 \text{ W} \times 6 \text{ h} = 300 \text{ Wh}$, soit 25Ah. Téléphone = 150Wh par semaine, ce qui est équivalent à 21.5 Wh soit 1.8 Ah sous 12 V.

Synthèse des consommations (Consommation totale)

Le calcul effectué présent dans le tableau 3.2, nous a permis d'avoir d'environ 2425.5 Wh de consommation par jour en été et 2281Wh/j en hiver. Une puissance crête assez élevée et qui peut être ne correspond pas à une installation de 12 V. (Nous vérifions cela par la suite). Nous voulons ainsi savoir la consommation par semaine, nous effectuons donc le calcul suivant pour l'hiver et l'été :

En été : TOTAL = 202.13Ah $\times 7 \text{ j} \approx 1415 \text{ Ah}$ par semaine.

En hiver : TOTAL = 190.13 Ah $\times 7 \text{ j} \approx 1331 \text{ Ah}$ par semaine.

Nous nous intéressons surtout à la consommation d'hiver. On conclut que pendant une semaine de camping à la plage en hiver, on consomme seulement 1331 Ah

Tableau 3.2 : Les consommations électriques du cabanon.

Saison	Eclairage	Eau	Froid	Téléviseur	Ordinateur	Poste-radio	Téléphone portable	Total (Ah/j) sous 12V	Total (Wh/j)
Eté	13 Ah/j	04 Ah/j	25 Ah/j	33.33 Ah/j	100 Ah/j	25 Ah/j	1.8 Ah/j	202.13 Ah/j	2425.5
Hiver	26 Ah/j	04 Ah/j		33.33 Ah/j	100 Ah/j	25 Ah/j	1.8 Ah/j	190.13 Ah/j	2281.15

3.3.2. Dimensionnement du module photovoltaïque

Une installation photovoltaïque autonome est le dimensionnement de son parc de modules photovoltaïques. Nous connaissons maintenant la quantité d'électricité nécessaire, et le temps dont nous disposons pour la produire. L'étape suivante consiste à calculer la quantité de modules photovoltaïques que l'on devra posséder pour couvrir ces besoins. Il faut pour cela connaître l'ensoleillement de la région où se trouve l'installation, et adapter ces données à sa situation

3.3.2.1. Ensoleillement

L'ensoleillement varie selon la région et l'époque de l'année. Vous devez localiser votre installation sur les cartes suivantes afin de savoir quelle quantité d'électricité vos modules peuvent produire. Une fois localisé, il suffit de relever le coefficient d'ensoleillement correspondant. Si votre installation est susceptible de servir autant en hiver qu'en été, vous devez utiliser la carte du mois de Décembre, car c'est la période de l'année à laquelle vous aurez le moins de soleil et d'électricité. De nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude théorique et expérimentale du rayonnement solaire. qui ont présenté une simulation de la

position apparente du soleil à chaque instant de la journée et de l'année. Ce travail est enrichi par un calcul d'estimation des énergies instantanées, journalières et annuelles sur un capteur d'orientation quelconque placé sur le site d'Annaba

Pour un ciel moyen, au site d'Annaba et pour un capteur incliné de 36.56° (latitude du lieu considéré), l'énergie journalière estimée selon le travail ci-dessus, pour les solstices d'été (S.E) et d'hiver (S.H), ainsi que pour les deux équinoxes de printemps (E.P) et d'automne (E.A) :

Tableau 3.3 : Estimation de l'énergie journalière globale E_{jG} . [17]

	l'énergie journalière globale (Wh / m^2)
S H	4500
EA-EP	7200
S E	7130

3.3.2.2. Calcul de la puissance crête requise par l'installation

Nous sommes dans le cadre d'une application domestique. Sharp propose une gamme de type de modules photovoltaïques dont on a choisi celui qui possède 100 Wc de puissance : c'est le module de type : NA-F100 (P5).

Tableau 3.4 : Caractéristiques techniques des différents types des modules Sharp. [9]

Caractéristiques mécaniques		Valeurs limites						
Cellule	Cellule tandem composée de silicium amorphe (α -Si) et de silicium microcristallin (μ c-Si)	Humidité (relative) de stockage	jusqu'à 90					%
Type de connexion	2 sous-modules montés en parallèle	Température de fonctionnement (cellules)	- 40 à +90					°C
Dimensions	1165 x 970 x 46 mm (1,13 m ²)	Température de stockage	- 40 à +90					°C
Poids	18 kg	Tension maximale du système	1000					V CC
Type de sortie	Câble avec connecteur	Résistance mécanique maximale	2400					N/m ²
Diodes bypass	1	Courant inverse	4					A

Caractéristiques électriques		Valeurs initiales			Valeurs nominales			
		NA-F100 (P5)	NA-F095 (P5)	NA-F090 (P5)	NA-F100 (P5)	NA-F095 (P5)	NA-F090 (P5)	
Puissance maximale	P_{max}	117,6 W _C	111,8 W _C	105,9 W _C	100 W _C	95 W _C	90 W _C	
Tension à vide	V_{OC}	65,9	64,9	63,9	64,9	63,9	62,6	V
Courant de court-circuit	I_{SC}	2,50	2,42	2,39	2,42	2,35	2,29	A
Tension au point de puissance maximale	V_{mpp}	52,6	51,9	50,4	47,8	47,5	47,2	V
Courant au point de puissance maximale	I_{mpp}	2,24	2,16	2,1	2,10	2,0	1,91	A
Rendement du module	η_m				8,8	8,4	8,0	%
NOCT					44	44	44	°C
Coefficient de température – tension à vide	αV_{OC}	- 0,30	- 0,30	- 0,30	- 0,30	- 0,30	- 0,30	% / °C
Coefficient de température – courant de court-circuit	αI_{SC}	+0,070	+0,070	+0,070	+0,070	+0,070	+0,070	% / °C

Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1 000 W/m², 25 °C, on parle alors de *watts-crête* (W_C) ou de *puissance-crête*). [9]

Les modules vont produire de l'électricité qui sera stockée dans les batteries pendant toute la durée de la charge. Mais ils vont également en produire durant la décharge. Vous venez de calculer la quantité d'énergie que les modules doivent produire chaque jour. Pour connaître la puissance crête à installer, il ne reste plus qu'à diviser ce nouveau résultat par le coefficient d'ensoleillement

En été : $P_c = E_{\text{électrique}} \times 1000 / E_{\text{solaire}} = 2425.5 \times 1000 / 7130.3 = 340.18 W_c$.

En hiver : $P_c = E_{\text{électrique}} \times 1000 / E_{\text{solaire}} = 2281.5 \times 1000 / 4500 = 507 W_c$.

La puissance crête à installer n'est plus la même dans les deux saisons, puisqu'il s'agit des consommations différentes et d'intensités de rayonnement solaire

reçue sur notre capteur différente aussi. (C'est évident que l'ensoleillement d'hivers doit être inférieur à celui d'été).

3.3.2.3. Calcul du nombre de panneau

Dans les deux cas (utilisation continue et périodique), les calculs peuvent être affinés en tenant compte de l'inclinaison et de l'orientation des modules, ainsi que des pertes engendrées par la chaleur et le matériel.

En été : $Np = Pc \text{ (générateur)} / Pc \text{ (panneau)} \times Cp = 340.18 \text{ Wh} / 100 \times 0.9 = 3.06 \approx 3 \text{ panneaux.}$

En hiver : $Np = Pc \text{ (générateur)} / Pc \text{ (panneau)} \times Cp = 507 \text{ Wh} / 100 \times 0.9 = 4.6 \approx 5 \text{ panneaux..}$

3.3.3 Dimensionnement de la batterie

Pour dimensionner les batteries de stockage, il ne reste plus qu'à se poser trois questions : quelle est la quantité d'énergie à stocker, quelle doit être l'autonomie de mon installation, et quelle est la profondeur de décharge maximum que je veux imposer à mes batteries ?

- **Energie stockée**

On peut se dispenser de calculs en choisissant directement : Energie stockée = énergie consommée = énergie produite ;

La quantité d'électricité dans une batterie (la capacité) s'exprime en Ampère-heure (Ah). Vous devez donc convertir vos Wh en Ah, sachant que $1 \text{ Ah} = 1 \text{ Wh} / \text{la tension du système (12, 24 ou 48V)}$.

- **Profondeur de décharge**

Pour déterminer la profondeur de décharge que l'on veut imposer à sa batterie, il faut arbitrer entre deux facteurs :

Tout d'abord, plus on permet aux batteries de se décharger profondément, plus on réduit le nombre de batteries nécessaires. En effet, une batterie que l'on décharge à 100% fournit autant d'énergie que deux batteries identiques que l'on décharge à 50%. On économise donc sur le coût initial de l'installation.

Cependant, la durée de vie d'une batterie est directement proportionnelle à sa profondeur de décharge. Ainsi, une batterie que l'on décharge à 100% vivra deux fois moins longtemps qu'une batterie que l'on décharge à 50%.

Le juste milieu que l'on choisit généralement d'appliquer se situe donc entre 60 et 80% de décharge, ce qui permet de réduire le nombre de batteries tout en leur assurant une bonne espérance de vie.

3.3.3.1 Calcul de la capacité de stockage

Puisque la valeur de la puissance crête à installer est comprise entre 500 Wc et 2000 Wc on compte pour une tension du système de 24 V. (voir annexe)

En été : $C = E_{\text{électrique}} \times N_{\text{ja}} / 24 \times P_d = 2425.5 \times 1 / 24 \times 0.8 = 126.33 \text{ Ah/j}$

En hiver : $C = E_{\text{électrique}} \times N_{\text{ja}} / 24 \times P_d = 2281.15 \times 1 / 24 \times 0.8 = 118.80 \text{ Ah/j}$

La capacité de stockage est proportionnelle à la consommation électrique, plus la consommation augmente, plus la capacité de stockage augmente. La profondeur de décharge, ainsi que la tension de recommandation du système sont des coefficients constants.

3.3.3.2 Calcul du nombre de la batterie

En été : $N_b = C(\text{champ de stockage}) / C(\text{capacité d'une batterie}) = 126.33 / 220 \approx 1 \text{ batterie}$

En hiver : $N_b = C(\text{champ de stockage}) / C(\text{capacité d'une batterie}) = 118.80 / 220 \approx 1 \text{ batterie}$

Notre cabanon n'a besoin qu'une seule batterie pour stocker l'énergie électrique fournie par les panneaux solaire. Nous disposons même d'un excédent d'énergie, autrement dit une batterie suffit largement pour notre consommation dans les deux saisons.

Nous sommes dans le cadre d'une application domestique par exemple on a :



La Batterie sélectionnée est de type GEL solaire VICTRON 200-220Ah, destiné au stockage de l'énergie solaire et éolienne.

Figure 3.3 : Batterie GEL solaire « VICTRON »
200-220 Ah

La batterie possède les caractéristiques suivantes :

- Technologie : plaques planes GEL
- Tension nominale : 12V
- Capacité : 200 Ah en C10 et 220 Ah en C20
- Tension de fin de charge : 10,8 V pour une batterie 12 V
- Dimensions en mm (L x l x H) : 522 x 238 x 240
- Poids : 66 Kg
- Très longue durée de vie (10 à 15 ans dans de bonnes conditions)
- Sans entretien pendant toute la durée de vie

Batterie 100% étanche, idéale pour être transportée.

3.3.4 Câblage électrique

Le schéma électrique global de l'installation est donné à la figure 2.4

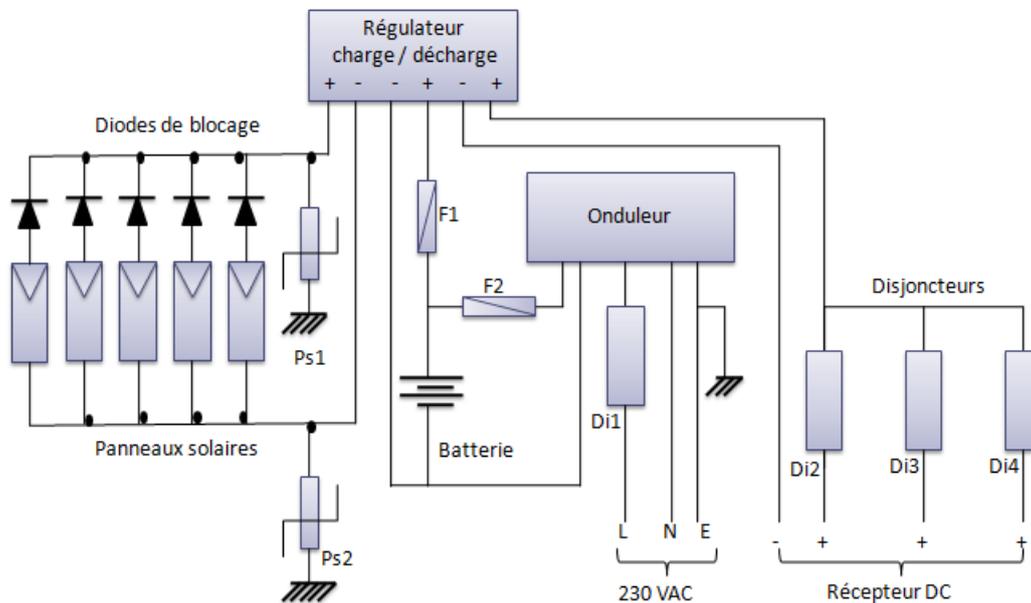


Figure 3.4 : Câblage électrique du cabanon.

➤ Panneau solaire

Les trois panneaux ont leur pôle négatif commun ; une diode de blocage (si possible Schottky 30 V/5 A) est montée dans la boîte de raccordement dans laquelle on les met en parallèle.

Les deux éléments de para surtension Ps1 et Ps2 doivent être connectés à une liaison équipotentielle avec un seul point à la terre. Un troisième élément de para-surtension peut être monté entre les bornes négatives et positives des panneaux. Ici la partie distribution DC n'est pas reliée à la terre mais reste flottante.

➤ Régulateur

Le régulateur contrôle la charge par les panneaux et en décharge coupe les récepteurs DC si la batterie descend en basse tension. C'est un régulateur série, c'est pourquoi on ajoute des diodes de blocage avec chaque panneau il faut

contrôler que la diode de blocage n'est pas déjà intégrée au régulateur dans les spécifications du fabricant, auquel cas on ne doit pas en ajouter de supplémentaire.

➤ Batterie

La batterie, entourée d'isolant du genre bonisol est montée dans un bac plastique (PVC avec couvercle). Le bonisol sert de cale de batterie dans le bac et d'isolant thermique. Le couvercle de bac protège les bornes et empêche leur accès. Les bacs sont reperçés en atelier avec de gros trous à gauche et à droite sur les côtés pour faciliter le câblage ; ces trous laissent également s'échapper les gaz éventuels. Le fusible F1 protège la liaison aux panneaux et aux récepteurs DC contre les courts-circuits accidentels ; on choisira environ 1.5 fois le courant maximal possible (celui calculé pour la sortie du régulateur).

Le fusible F2 protège la liaison à l'onduleur si celui-ci n'est pas déjà intégré à l'appareil.

➤ Onduleur

Celui-ci est équipé de son propre régulateur l'arrêtant lorsque la tension baisse trop. C'est pourquoi il est câblé directement à la batterie et ne passe pas par la sortie d'éstagement du régulateur. Le disjoncteur Di1 permet de découpler la sortie ; il peut être remplacé par un interrupteur ou omis si l'onduleur a son propre interrupteur et sa propre protection. Dans le cas où le 220 VAC est utilisé pour alimenter également les lampes, on montera plusieurs disjoncteurs en parallèle si on désire découpler les étages ou certaines parties de l'habitation. Le reste du câblage en AC doit respecter les normes locales de distribution de l'électricité.

3.4. Conclusion

Le dimensionnement de l'installation photovoltaïque est la recherche de l'équilibre entre la satisfaction de la demande énergétique exprimée et la puissance à installer tant de point de vue des modules que les batteries.

La différence de charge entre les deux saisons nous a conduits à l'obtention (par calcul) 03 panneaux solaires en été. Tandis qu'en hiver, on a besoin de 05 panneaux solaire pour satisfaire la charge demandée.

Chapitre 4 : Étude technico-économique d'un système photovoltaïque : Simulation avec le logiciel RETScreen

4.1. Introduction

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier un projet d'installation photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous allons simuler une installation photovoltaïque pour un particulier qui possède une maison et on analyse une possible économie d'énergie qui soit importante, ainsi que la possibilité de réduction de l'émission de GES (gaz à effet de serre). Premièrement, nous avons sélectionné la région d'étude et ses paramètres météorologiques, nous choisissons la région d'Adrar.

La simulation de l'installation à Adrar en utilisant le logiciel RETScreen qui est un outil logiciel d'analyse de projets d'énergies propres basé sur Excel qui aide les décideurs à déterminer rapidement et à peu de frais si un projet d'énergie renouvelable, d'efficacité énergétique et de cogénération est financièrement et techniquement viable.

4.2. Type d'installation

À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kW) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle. Dans ces applications hors réseau, l'énergie solaire captée par les modules sert fréquemment à recharger des batteries d'accumulateurs. L'énergie électrique ainsi emmagasinée permet alors de livrer l'électricité aux usagers quand ils le demandent.

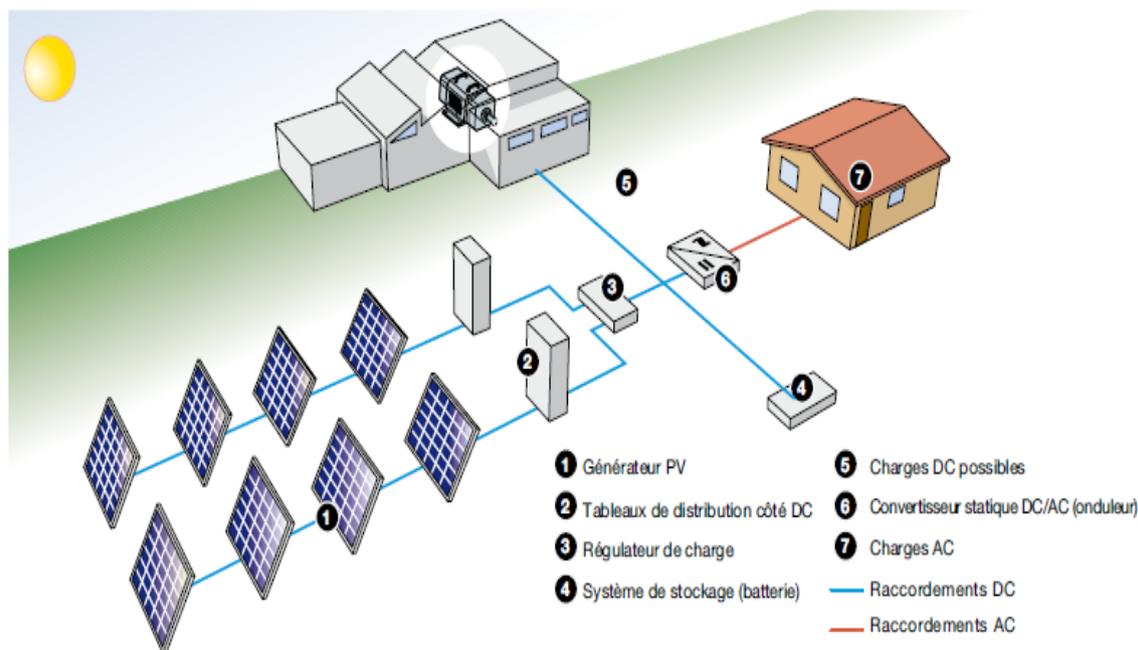


Figure (4.1) Schéma de l'installation étudiée (autonome).

4.3. Simulation avec le logiciel

4.3.1. Logiciels pour le photovoltaïque

Les technologies des panneaux solaires photovoltaïques ont beaucoup évolué et ces outils aussi. Il existe des logiciels pour la simulation (TRNSYS, INSEL, HOMER, PV-DesignPro), d'autres pour l'évaluation des coûts et des différentes données économiques (SOLinvest, RETScreen) ou pour l'analyse et la planification des systèmes (PV F-Chart, Laplace System, PV*SOL, PVcad, PVSYST, PV Professionnal, Kerychip, Tetti FV), certains sont destinés à l'industrie (APOS Photovoltaic Statlab, PV Cost Simulation Tool), certains sont développés pour la surveillance et le contrôle des systèmes installés (Meteocontrol, SPYCE) ou encore pour l'évaluation de site (ECOTECT, Shadow Analyzer, Shadows, GOSOL, METEONORM, Horizon, Sombrero) et finalement, il existe des outils disponibles en ligne, facilement accessibles à

tous (Solardesigntool, PV Potential Estimation Utility, Logiciel CalSol, Panel Shading). (Energy, 2011)[19].

Certains de ces logiciels ne font appel qu'à un sous-domaine du solaire photovoltaïque comme les panneaux intégrés aux immeubles ou d'autres sont utiles seulement pour les systèmes connectés au réseau par exemple. Il existe maintenant tout un monde de logiciels. Il est donc important de définir ses besoins pour identifier facilement les logiciels utiles.

De plus, plusieurs des logiciels faisant référence à l'énergie solaire photovoltaïque sont dans une seule langue (français, anglais, italien) et beaucoup sont d'origine allemande et en allemand uniquement, ce qui les rend plutôt inaccessibles [19].

4.3.2. Présentation du logiciel RETScreen

Afin de tirer profit des technologies d'énergies propres, les utilisateurs, décideurs, responsables politiques, planificateurs, investisseurs et fournisseurs d'équipements potentiels doivent être en mesure d'analyser facilement et rapidement le bienfondé d'une proposition de projet d'énergies propres. Ce type d'analyse devrait permettre, avec un minimum d'effort et d'investissement en temps, de révéler si oui ou non un projet potentiel d'énergies propres est suffisamment prometteur pour mériter une étude plus poussée. Le logiciel RETScreen répond à toutes ces exigences [20].

RETScreen est un modèle mathématique complexe pour évaluer la production d'énergie, les économies des coûts, les réductions d'émissions, la viabilité financière, et de risque pour les différents types des énergies propres et technologies. Chaque modèle de technologie d'énergie propre RETScreen a été développé dans un **classeur Microsoft Excel** individuel. Chaque classeur est ensuite composé d'une série de feuilles de Calcul. Ces feuilles de calcul ont un

aspect commun et suivent une démarche normalisée, commune à tous les modèles RETScreen.

Dans la version 4 de RETScreen, les capacités du logiciel ont été étendues des énergies renouvelables, de la cogénération et des réseaux énergétiques, à une gamme complète de technologies propres de chauffage, de climatisation et de mesures d'efficacité énergétique économiquement viables. L'intérêt international pour cet outil d'aide à la décision a été augmenté par l'expansion des données climatiques requises par l'outil, afin de couvrir la surface entière de la planète, incluant les régions raccordées à un réseau d'électricité central, isolés et hors du réseau, de même que par la traduction du logiciel en 36 langues, couvrant ainsi environ les deux-tiers de la population mondiale [19].

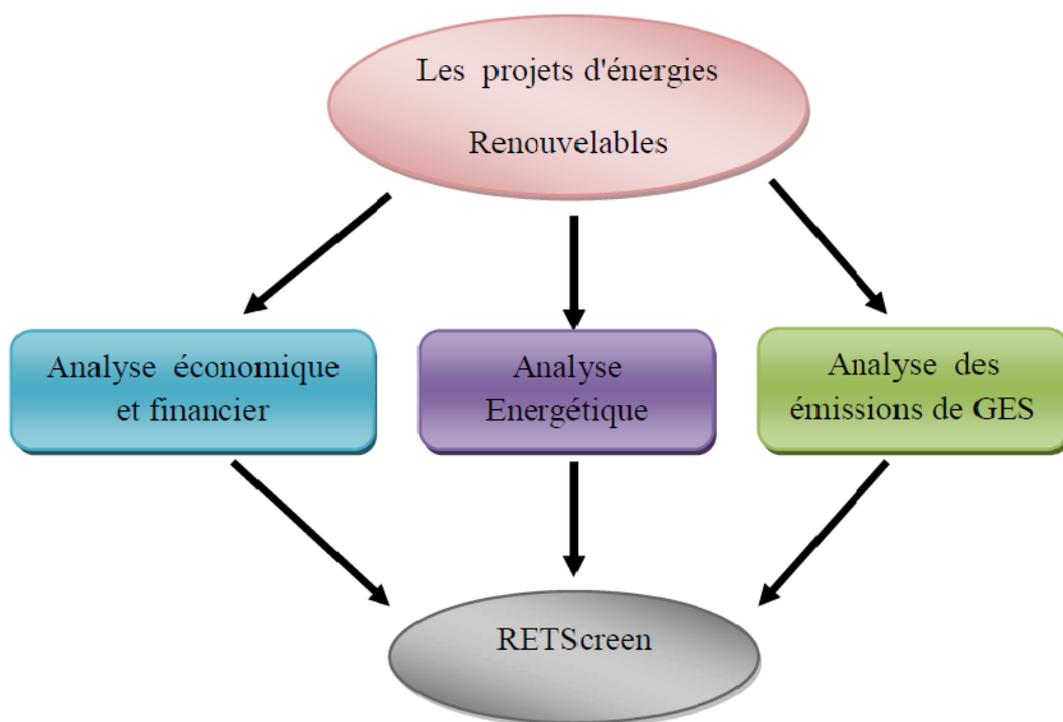


Figure 4.2 : Les axes d'analyse d'énergie renouvelable par RETScreen.[19].

Les éléments clés de ce travail significatif sont les suivants :

- Le développement d'une série de nouveaux modèles pour l'évaluation de mesures d'efficacité énergétique pour les bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels, les communautés ainsi que les installations et les procédés industriels.
- L'expansion de la base de données climatiques RETScreen à 6700 stations météorologiques au sol réparties à travers le monde et pour les régions habitées,
- L'intégration en un seul et même fichier des modèles RETScreen existants pour les énergies renouvelables (exemple : énergie éolienne) et la cogénération, de même que les nouveaux modèles pour les mesures d'efficacité énergétique, en plus de l'expansion des capacités des modèles existants pour évaluer des technologies émergentes, telles que l'énergie des courants océaniques et l'énergie de la houle.
- La traduction en 36 langues du logiciel et des bases de données (exemple : chinois, français, allemand, italien, japonais, portugais, russe, espagnol, etc.).
- La diffusion élargie de l'outil via le site web de RETScreen, des formations locales ciblées et la diffusion par un réseau international de formateurs RETScreen et de partenaires.



Figure 4.3 : Capture d'écran. Information sur le projet

RETScreen

Pays - région: Algérie

Province / État: n/a

Lieu des données climatiques: Adrar/Touat

Latitude: 27,9 °N

Longitude: -0,2 °E

Élévation: 283 m

Température extérieure de calcul de chauffage: 4,2 °C

Température extérieure de calcul de climatisation: 45,9 °C

Amplitude des températures du sol: 27,0 °C

	Température de l'air °C	Humidité relative %	Rayonnement solaire quotidien - horizontal kWh/m²/j	Pression atmosphérique kPa	Vitesse du vent m/s	Température du sol °C	Degrés-jours de chauffage °C-j	Degrés-jours de climatisation °C-j
Janv	12,4	38,6%	4,42	98,8	5,8	13,3	174	74
Févr	16,0	31,7%	5,22	98,6	6,5	16,8	56	168
Mars	19,4	26,5%	6,50	98,3	6,7	21,8	0	291
Avr	23,6	23,2%	7,22	97,9	6,6	27,3	0	408
Mai	28,1	20,1%	7,67	97,7	6,8	32,4	0	561
Juin	33,6	17,5%	8,14	97,7	6,4	37,6	0	708
Juill	36,0	14,7%	8,03	97,6	6,5	39,7	0	806
Août	35,4	16,8%	7,56	97,7	6,3	38,9	0	787
Sept	31,6	22,3%	6,50	97,9	6,3	34,9	0	648
Oct	25,0	29,4%	5,36	98,2	5,9	28,0	0	465
Nov	18,2	36,3%	4,42	98,5	5,7	20,4	0	246
Déc	12,9	41,5%	3,83	98,7	5,7	14,8	158	90
Annuel	24,4	26,5%	6,24	98,1	6,3	27,2	388	5 253
Source	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol	NASA	Sol	Sol

Mesuré à: m

Figure 4.4 : Capture d'écran lieu de projet(Adrar).

Projet de production d'électricité

Système de production d'électricité du cas de référence

Type de réseau	Hors réseau	
Technologie	Électricité du réseau	
Prix du combustible	DZD/kWh	1,779
Capacité	KW	
Coûts annuels d'exploitation et entretien	DZD	0
Prix de l'électricité - cas de référence	DZD/kWh	1,779
Coût total de l'électricité	DZD	2 351

Caractéristiques de la charge

- Méthode 1
- Méthode 2

Description	CA/CC	Corrélation ressource intermittente-charge	Charge du cas de référence W	Heures d'utilisation par jour h/j	Jours d'utilisation par semaine j/sem	Réduction de la charge du cas proposé %	Réduction du temps d'utilisation du cas proposé %
lampe	CA	Zéro	104,00	5,00	7		
téléviseur	CA	Zéro	120,00	3,00	7		
Réfrigérateur	CA	Zéro	600,00	1,00	7		
radio	CA	Zéro	20,00	2,00	7		
ordinateur	CA	Zéro	120,00	5,00	7		
ventilateur	CA	Zéro	60,00	5,00	7		
lave-linge	CA	Zéro	1 200,00	1,00	7		

Figure 4.5 : Besoin énergétique pour l'installation PV pour l'habitation.

Rayonnement solaire annuel - horizontal	MWh/m²	1,66	
Rayonnement solaire annuel - incliné	MWh/m²	1,82	

Photovoltaïque

Type	mono-Si		
Capacité électrique	KW	0,13	5,3%
Fabricant	BP Solar		DZD 58 700
Modèle	mono-Si - BP 1218		7 unité(s)
Rendement	%	7,6%	
Température nominale des cellules en opération	°C	45	
Coefficient de température	% / °C	0,40%	
Surface du capteur solaire	m²	1,7	
Méthode de contrôle	Fixe		
Pertes diverses	%	5,0%	

Sommaire

Facteur d'utilisation	%	13,9%	
Électricité fournie à la charge	MWh	0,15	11,6%

Système de production d'électricité de pointe

Technologie	Non nécessaire	
-------------	----------------	--

Figure 4.6 : Choix du type PV pour l'habitation.

Onduleur					
Capacité	kW	2,4	Charge de pointe - annuelle - CA		Surcoûts à l'investissement DZD 5000
Rendement	%	90%			
Pertes diverses	%	0%			
Accumulateurs					
Nombre de jours d'autonomie	j	4,0			
Tension	V	24,0			
Rendement	%	80%			
Niveau maximal de décharge	%	80%			
Rendement du régulateur de charge	%	95%			
Méthode de contrôle de la température		Ambiant			
Réduction moyenne de la capacité due à la température	%	2,6%			
Capacité	Ah	100	880		
Accumulateurs	kWh	2			DZD 18000
Technologie					
			Photovoltaïque		
Évaluation des ressources					
Système de positionnement solaire		Fixe			
Inclinaison	°	30,0			
Azimut	°	0,0			

Figure 4.7 : Besoin énergétique pour installation PV.

Nous avons rentré les pertes de transport et de distribution (t-d) du réseau électrique de référence, qui incluent toutes les pertes d'énergie entre la centrale électrique et le point de consommation. Les pertes de transport et de distribution sont de l'ordre de 6 à 10 % pour un réseau moderne et de 10 à 20 % pour un réseau situé dans un pays en développement ; pour l'Algérie cette valeur est égale à 9 %.

Les autres paramètres (facteur d'émissions GES, émissions de GES 'cas de référence', émissions de GES 'cas proposé', réduction annuelle brute d'émissions de GES, ...) sont calculés par le logiciel RETScreen.

La figure suivante représente la feuille de calcul « Analyse des réductions d'émissions ».

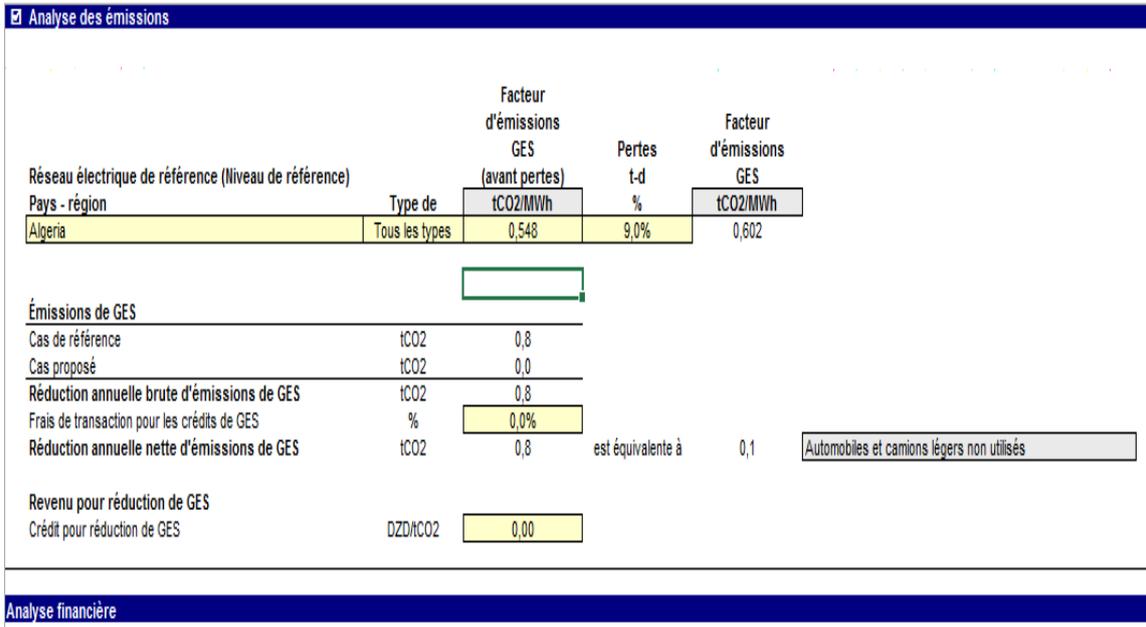


Figure 4.8 : la feuille de calcul et analyse des réductions d'émissions GES.

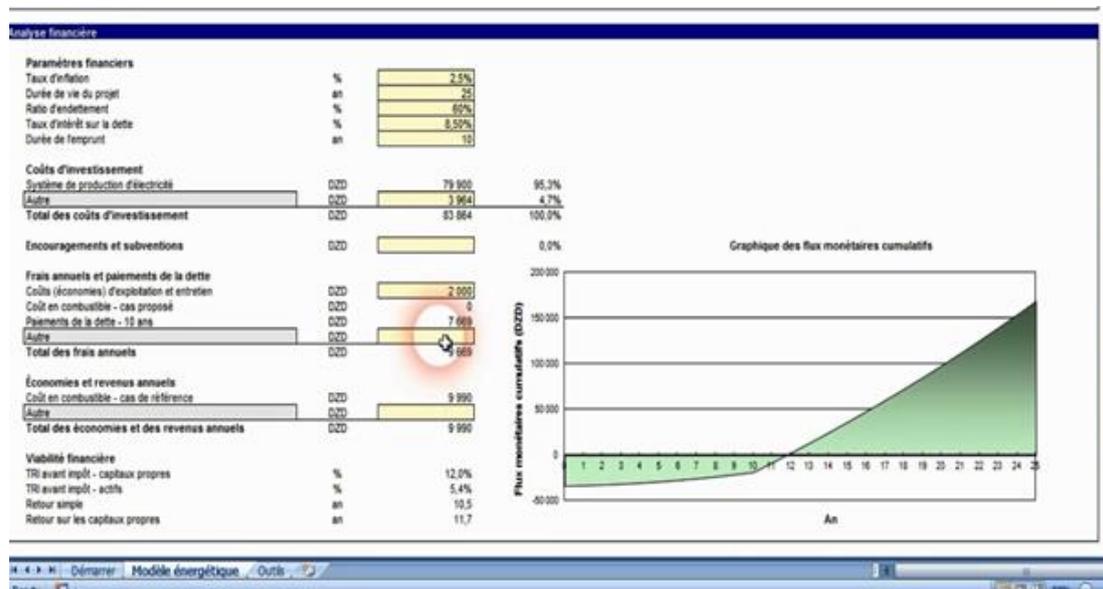


Figure 5.9 : la feuille de calcul et analyse des coûts.

4.4. Analyse des résultats RETScreen

RETScreen présente les résultats de l'analyse financière sous forme d'analyse des coûts globaux du projet sur son cycle de vie, ce qui permet de réaliser une juste comparaison entre les technologies d'énergies propres et leurs correspondants conventionnels.

Les résultats des flux monétaires cumulatifs sont montrés à la figure (5.9). ils sont produits par RETScreen pour le scénario de base, sans subvention et en considérant que le taux d'indexation des combustibles soit égal à zéro, c'est-à-dire le prix des combustibles reste constant pour les 25 ans prochains (la durée de vie du projet).

On remarque que le graphique des flux monétaires cumulatifs est divisé en deux parties ou bien deux régions :

- ✓ La première partie (0 ans à 12 ans) : dans cette partie le graphique des flux monétaires cumulatifs est négatif parce que les coûts de l'installation de PV sont supérieurs aux bénéfices tirés du projet.
- ✓ La deuxième partie (12 ans à 25 ans) : dans cette partie le graphique des flux monétaires cumulatifs est positif parce que les bénéfices tirés du projet sont supérieurs aux coûts du projet, où en l'année 12 on récupère le coût initial du projet.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude technico-économique d'un système PV que l'électricité photovoltaïque ne génère aucune nuisance : ni gaz à effet de serre, ni déchets.

L'analyse de résultats de la simulation a prouvé que la ville d'Adrar a un potentiel important de production de l'électricité à partir des panneaux solaires photovoltaïques.

Conclusion Générale

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80%) provient de gisements de combustibles fossiles carbonés (charbon, pétrole, gaz). Ces gisements constitués au fil des âges sont évidemment en quantité limitée ; ils sont épuisables.

La production mondiale d'énergie photovoltaïque augmente de façon importante depuis plusieurs années mais son développement reste limité par son coût qui reste trop élevé par rapport aux énergies fossiles et nucléaires. Afin de réduire le coût de fabrication.

Notre étude a apporté sur l'analyse des systèmes photovoltaïques de puissances destinées à l'habitation isolée.

D'une manière générale, cette étude a apporté l'éléments nécessaires pour la mise en déventement : elle est susceptible d'améliorer très rapidement et moyennant un coût optimal les conditions de vie et de productivité des habitations géographiquement dispersés.

Nous avons présenté en chapitre 2 le principe et l'influence de chaque composant constituant le système PV, puis on à présenter les modèles de composant nécessaire dans notre étude tel que (les champs PV, régulateur, batterie et le convertisseur).

Dans le chapitre 3 nous avons effectué une étude détaillée concernant la méthode de dimensionnement d'un système PV (autonome) pour un cabanon solaire que nous avons choisi située au site d'Annaba en tenant compte de sa consommation estimée à partir des appareils électriques disponibles au cabanon, sans oublier l'éclairage domestique.

Finaleme nt dans la der ni ère partie (chapitre 4), nous avons ré ali sé une é tude technico-é conomique d'un syst ème photovoltaï que (en utilisant le logiciel RETScreen). Nous avons conclu que les syst èmes PV autonomes peuvent jouer un rôle très important en apportant une solution réellement é conomique pour couvrir les besoins de base en é lectricité, puisque près d'un tiers de la population mondiale vit sans accès à l'é lectricité principalement dans les pays en voie de dé veloppement.

R é f é r e n c e s

[1] **Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi** : livre ‘cellules solaires (les bases de l’énergie photovoltaïque) 5^e Edition

[2] Site internet :

http://physique-enligne.univlille1.fr/electrocinetique/co/NLP_E_M14_G01_19.html

[3] Site internet :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Lumi%C3%A8re>

[4] Site internet :

http://www.ilephysique.net/physique_2-dispersion-lumiere-par-prisme.php

[5] Site internet :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique

[6] Site internet :

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>

[7] Site internet :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire

[8] Site internet :

<http://www.photovoltaique.info/Les-composantes-de-la-lumiere,239.html>

[9] **Philippe Guibert** : « TP Energie Solaire » Université pierre et marie curie : Master Energétique et Environnement

[10] Site internet :

<http://www.panneaux-solaires-france.com/histoire-panneaux-solaires>

[11] Site internet :

www.photovoltaique.info/IMGpdfrecherche_et_innovation_Lincot_2008.pdf

[12] **S. PETIBON** ‘ Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques’, université de Toulouse, 2009.

[13] Site internet :

http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_photovolta%C3%AFque_sous_concentration

[14] **Othmane ben Seddik** et **Fathi Djaloud** : Etude optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque mémoire de master UNIVERSITE KASDI MERBAH- OUARGLA.

Site internet :

http://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/BENSEDDIK_DJALOUUD.pdf?idmemoire=152

[15] **Fogelman** et **Régis Montloin**, « Installations Photovoltaïques dans l'habitat isolé » livre édité par : EDISUD, 1983

[16] Site internet :

<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1074/4/Methodede-dimensionnement-des-systemes-pholtovoltaIque-pour-lhabitat.pdf>

[17] Site internet :

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr>

[18] Site internet :

<http://www.systemespv.com/Systemes+hybrides>

[19] **ZOUAGRI Rima** : Etude de faisabilité technique et économique des installations solaires thermiques dans un bâtiment : Mémoire Université Hadj Lakhdar Batna

[20] Site internet :

<http://www.retscreen.net/ar/home.php>

Annexe 1 :

Cellule photovoltaïque tandem :

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux connexes, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

- Avantage :
 - sensibilité élargie sur une large plage de longueur d'onde. Excellent rendement.
- Inconvénient :
 - coût élevé dû à la superposition de deux cellules.

Annexe 2 :

Moyenne et haute concentration PV :

La moyenne et haute concentration augmente le rayonnement solaire par un facteur de 100 à 1000. Nous pouvons préciser que la moyenne a pour maximum 300 « soleils ».

Ces procédés utilisent généralement des lentilles de Fresnel à la place des miroirs mais bien-sûr beaucoup de systèmes sont mis en place.

Voici la présentation d'un exemple de système de concentration.

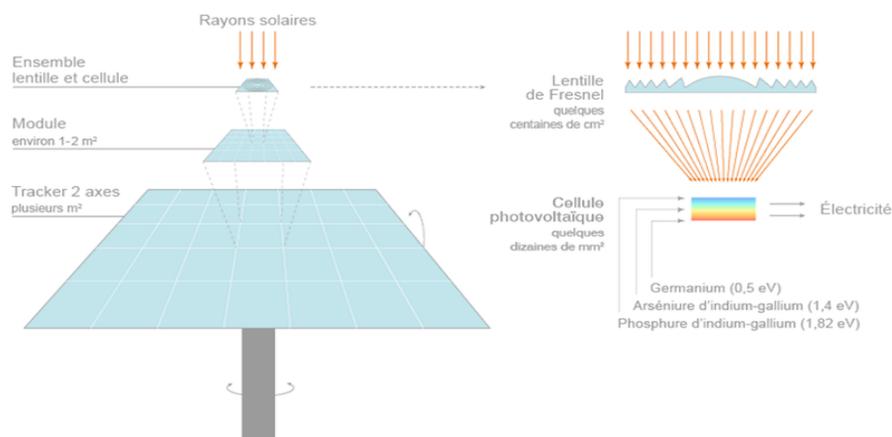


Figure1 : exemple de système PV de concentration

Annexe 3 :

Cellule photovoltaïque organique :

Cellule photovoltaïque organique ultra-performante

Une autre technologie utilisée pour la fabrication de **panneaux solaires flexibles** est celle des **OPV**, pour Organic Photovoltaics (photovoltaïque organique).

Le matériau photovoltaïque utilisé n'est plus du silicium, du CIGS ou du CdTe, mais un ou des polymères fabriqués à partir de composés chimiques organiques type carbone, oxygène, hydrogène, ou azote.

Une cellule **organique** photovoltaïque est constituée d'une ou de plusieurs couches de matériau organique semi-conducteur encapsulée entre deux électrodes dont l'une est transparente pour laisser passer le rayonnement solaire.

Pour expliquer très succinctement le principe de fonctionnement, prenons le cas des cellules **OPV** les plus courantes dites en hétéro jonction.

Dans ce cas elles sont composées d'un polymère donneur (type P3HT , poly 3-hexil thiophene) et d'un polymère accepteur (type PCBM ,Fullerène) , ces polymères étant encapsulés entre deux couches minces qui font office d'électrode.

Sous l'effet du rayonnement solaire et de l'absorption de photons, le matériau donneur réagit et génère des excitons, ces derniers se diffusent jusqu'à l'interface des deux matériaux où a lieu leur dissociation en électrons et trous. Des charges moins sont alors collectées par un film conducteur (typeLIF orAL) en contact avec l'accepteur, alors que des charges plus sont collectées coté donneur, au travers d'un film conducteur et transparent (Type PEDOT:PSS ou ITO pour oxyde d'indium et d'étain).

Annexe 4 :

Choix de la tension du fonctionnement :

Le choix de la tension nominale d'un système dépend de la disponibilité de matériels (modules et récepteurs), aussi, il dépend des niveaux de puissance et d'énergie nécessaire selon le type d'application.

Puissance crête (WC)	< 500 WC	500Wc - 2KWc	>2KWc
Tension du système (V)	12 VDC	24 VDC	48 VDC

Tableau : Les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance crête

Annexe 5 :

Les traqueurs :

L'utilisation de la technologie de suivi permettant aux modules solaires de suivre la trajectoire du soleil peut augmenter la production d'électricité d'environ un tiers (à condition d'optimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface). Certains affirment qu'elle peut être augmentée jusqu'à 40% dans certaines régions, par rapport à des modules à angle fixe.

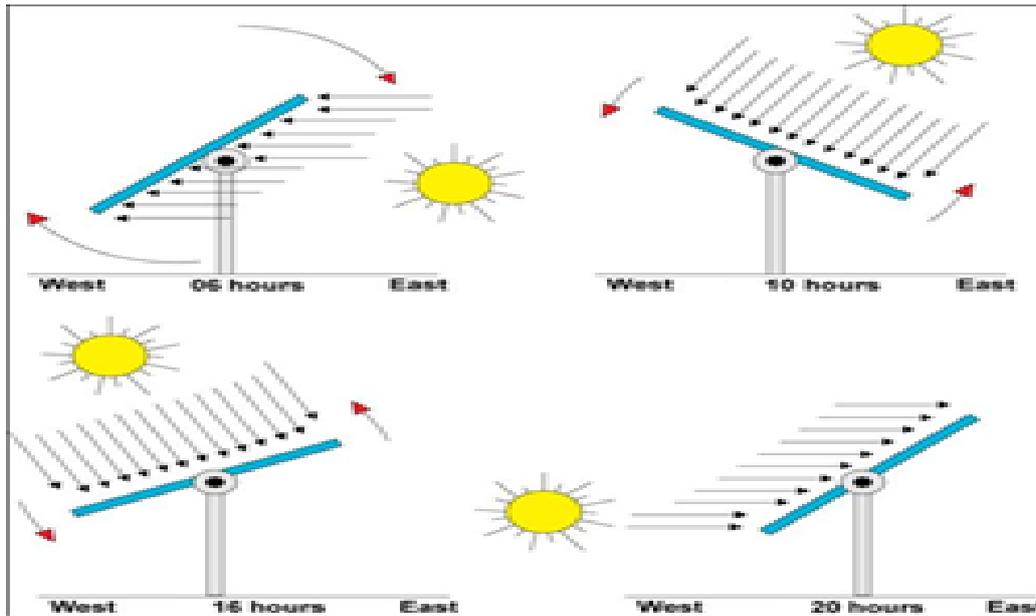


Figure2 : Installations avec traqueur solaire

Les types de traqueurs

Il existe deux principaux types de système de suivi :

- Traqueur mono-axe : le panneau tourne autour d'un axe selon un déplacement azimutal d'est en ouest au cours d'une journée.
- Traqueur double axe : le panneau tourne selon un axe d'est en ouest et selon un axe vertical.