



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Génie Industriel

Thème

**Contribution à l'étude de quelques marges
de sécurité fondamentales d'un système à
énergie photovoltaïque**

Présenté et soutenu par :

Melle **BOUHADEF Asmaa**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
Mr. Taha BENARBIA	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Président
Mr. Abderrahim BENFEKIR	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Encadreur
Mr. Mohammed KEDDAR	MAA	Univ. Oran-2, IMSI	Examineur

Juin 2022

Remerciements

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

Je tiens à manifester mes profondes gratitude, mon estime et ma reconnaissance à Monsieur Abderrahim BENFEKIR, pour avoir guidé ce travail et pour la confiance qu'il m'a témoignée. Il a été un model de rigueur scientifique et m'a apporté un soutien technique et moral considérables.

J'exprime aussi mon profonde considération aux membres du jury : Mr. Mohammed KEDDAR et Mr, Taha BENARBIA pour l'intérêt qu'iles ont porté à mon travail et m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

J'exprime aussi mes sincères remerciements à Mr Mohamed Yazid EL MONTRA et Mr Bouziane SEREIR, pour leur soutien matériel et moral nécessaires à la réalisation de ce mémoire et pour l'aide gracieuse de point de vue techniques (supports matériels) mis à mes dispositions.

RESUME

Les sources d'énergie non renouvelables, appelées également combustibles fossiles aux réserves potentiellement épuisées et limitées (charbon, gaz naturel, pétrole), sont issues de la pétrochimie des organismes vivants.

De nombreux enjeux, liés à l'économie du carbone, notamment le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique, marine et du sol, ainsi que le remplacement progressif des énergies fossiles par des énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne et solaire, ont contribué au développement du système énergétique actuel.

L'Algérie bénéficie d'un gisement naturel solaire élevé estimé à plus de 5 Milliards de GWh et d'une durée moyenne d'ensoleillement de plus de 2 600H/an pour les régions côtières, et pouvant dépasser les 3 500H/an pour le sud.

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes : Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats mais avec une production intermittente.

Le concept de "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer dans le temps l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture de l'électricité, de la chaleur et du froid.

À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable.

Sans énergie, il n'y a pas d'activité humaine, l'énergie joue un rôle important dans le développement socio-économique et même dans l'amélioration de la qualité de vie.

Dans ce cadre, le travail proposé a pour objectif de contribuer à l'étude des quelques marges de sécurité fondamentales des systèmes à Energie photovoltaïque. Dans la phase de conception on utilise les données météorologiques pour assurer le bon fonctionnement du système et pour profiter le maximum de cette énergie précieuse.

Mots-clés:

L'énergie solaire; le stockage; les énergies renouvelables; la production d'énergie système photovoltaïque, Analyse des données, les paramètres climatiques, marges de sécurité.

ABSTRACT

Non-renewable energy sources, also known as fossil fuels with potentially depleted and limited reserves (coal, natural gas, oil), are derived from the petrochemicals of living organisms.

Many issues related to the carbon economy, including global warming, air, marine and soil pollution, as well as the gradual replacement of fossil fuels by renewable energies, including wind and solar, have contributed to the development of the current energy system.

Algeria benefits from a high natural solar field estimated at more than 5 Billion GWh and with an average sunshine duration of more than 2 600H/year for coastal regions, and can exceed 3 500H/year for the south.

Our energy future must be based on non-polluting energies with significant resources: Renewable energies are the best candidates but with intermittent production.

The concept of "energy storage" is to provide flexibility and increase the reliability of energy systems. The aim is to balance energy supply and demand over time, both for the supply of electricity, heat and cold.

In the age of sustainable development, photovoltaic technology has shown its significant potential as a source of renewable energy.

Without energy, there is no human activity, energy plays an important role in socio-economic development and even in improving the quality of life.

In this context, the proposed work aims to contribute to the study of the few fundamental safety margins of photovoltaic energy systems. In the design phase, meteorological data is used to ensure the proper functioning of the system and to make the most of this valuable energy.

Keywords:

Solar energy; storage; renewable energy sources; photovoltaic power generation, data analysis, climate parameters, safety margins.

ملخص

مصادر الطاقة غير المتجددة، المعروفة أيضا بأنواع الوقود الاحفوري التي يحتمل أن تنضب واحتياجات محدودة (الفحم والغاز الطبيعي والنفط)، مستمدة من البتروكيماويات التي تستخدمها الكائنات الحية.

قد أسهمت قضايا كثيرة تتصل باقتصاد الكربون، بما في ذلك الاجترار العالمي، وتلوث الهواء، والمياه، والتربة، فضلا عن الاستعاضة التدريجية عن الوقود الاحفوري بالطاقة المتجددة، بما في ذلك طاقة الرياح والطاقة الشمسية، في تطوير نظام الطاقة الحالي.

تستفيد الجزائر من حقل شمسي طبيعي مرتفع يقدر بأكثر من 5 مليار واط ساعة، ويبلغ متوسط مدة أشعة الشمس فيه أكثر من 2600 ساعة في السنة للمناطق الساحلية، ويمكن أن تتجاوز 3 500 ساعة في السنة للجنوب.

يجب أن يقوم مستقبل طاقتنا على الطاقات غير الملوثة التي لديها موارد كبيرة: فالطاقات المتجددة هي أفضل المرشحين ولكن مع الإنتاج المتقطع.

مفهوم "تخزين الطاقة" هو توفير المرونة وزيادة موثوقية نظم الطاقة. والهدف من ذلك هو تحقيق التوازن بين عرض الطاقة والطلب عليها مع مرور الوقت، سواء فيما يتعلق بإمدادات الكهرباء أو الحرارة أو البرودة.

في عصر التنمية المستدامة، أظهرت التكنولوجيا الضوئية إمكانياتها الهامة كمصدر للطاقة المتجددة فبدون الطاقة، لا يوجد نشاط بشري، وتؤدي الطاقة دورا هاما في التنمية الاجتماعية - الاقتصادية بل وفي تحسين نوعية الحياة.

وفي هذا السياق، يهدف العمل المقترح إلى المساهمة في دراسة هوامش السلامة الأساسية القليلة لنظم الطاقة الضوئية. وفي مرحلة التصميم، تستخدم بيانات الأرصاد الجوية لضمان حسن سير عمل النظام وللاستفادة إلى أقصى حد من هذه الطاقة القيمة.

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الشمسية؛ التخزين؛ مصادر الطاقة المتجددة؛ توليد الطاقة الضوئية، تحليل البيانات، معلمات المناخ، هوامش الأمان.

ABREVIATIONS / SYMBOLES

<i>Abréviations / Symboles</i>	<i>Désignations</i>
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
Ed	Rayonnement direct
H	Irradiation
G_E / E	Eclairement en Watt/mètre carré (W/m ²)
G	L'éclairement de référence (1000 W/m ²).
CIS	Cuivre, Indium, Sélénium.
CIGS	Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium.
GPV	Générateur photovoltaïque.
S	Surface active du générateur photovoltaïque en mètre carré (m ²)
I	Courant électrique (A)
I_{Mod}	Courant aux bornes du module PV (A)
I_{max}	Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
I_{co}	Courant du circuit ouvert de cellule photovoltaïque(A)
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)
I_{ccs}	Courant de court-circuit de Ns cellules en série. (A)
I_{ccp}	Somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle(A)
I_{pm}	Courant pour la puissance maximale extraite(A)
I_{ph}	Le photo-courant (A).
I_{sat}	Courant de saturation (A)
R_p	Résistances parallèle shunt. (Ω)
R_s	Résistance série (Ω).
U_{cos}	Somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série (V).
U_{cop}	Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle (V).
U_{co}	Tension de circuit ouvert (V).
U_{max}	Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
U	Tension (V)
U_{Mod}	Tension aux bornes du module PV (V).
P	Puissance (W)
P_m	Puissance maximum extraite (W)
P_{max}	La puissance maximale produite PV (W) / Puissance maximale délivrée par le générateur PV en watt (W)
P	Puissance (W)
T_c	Température de cellule (°K).
T_a	Température ambiante (°K).
T_{ref}	Température de référence (298 °K).
T_c	Température de cellule (°K).
T_a	Température ambiante (°K).
T_{ref}	Température de référence (298 °K).
N_s	Nombre de cellules connectées en série / Nombre de modules dans le panneau en série
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle / Nombre de modules dans le panneau en parallèle

DC	Courant Continu (Direct Current).
AC	Courant Alternatif (Alternative Current).
G_c	Coefficient de conductivité thermique entre le panneau solaire et l'environnement extérieur
FF	Facteur de forme
MPPT	MPPT : Maximum Power Point Tracking.
K	coefficient de Boltzman (1.38.10 ⁻²³ J / K)
α	Angle d'azimut
β	Angle d'inclinaison
δ	Angle solaire de déclinaison
ω	Angle horaire du soleil
γ	Altitude
Ψ	Azimut solaire
φ	Angle de latitude géographique
η	Rendement
h	Constante de Planck (6.62.10 ⁻³⁴ j.s).

LISTE DES FIGURES

N°	N° de Figures	Intitulés	N° de Pages
Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables			
01	Figure I.1	Energies renouvelables	09
02	Figure I.2	Énergie éolienne	09
03	Figure I.3	Moulins à vent	10
04	Figure I.4	Composants d'une éolienne	10
06	Figure I.5	Énergie Biomasse	11
06	Figure I.6	Chaleur	12
07	Figure I.7	Énergie hydraulique	13
08	Figure I.8	Hydroliennes	14
09	Figure I.9	Moulin à eau	15
10	Figure I.10	Coupe d'un barrage hydroélectrique	16
11	Figure I.11	Schéma de la structure interne du globe	18
12	Figure I.12	Fusion d'hydrogène en hélium	18
13	Figure I.13	Énergie solaire thermique	19
14	Figure I.14	Chauffage de la maison par énergie solaire passive	20
15	Figure I.15	Chauffe-eau solaire	21
16	Figure I.16	Énergie solaire photovoltaïque	22
17	Figure I.17	Schéma production de l'électricité par énergie photovoltaïque	23
18	Figure I.18	Principe du fonctionnement d'un GP	24
19	Figure I.19	Energie solaire thermique	25
20	Figure I.20	Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à base température	25
21	Figure I.21	Centrale thermodynamique parabolique	26
22	Figure I.22	Centrale thermodynamique à tour	26
23	Figure I.23	Centrale thermodynamique cylindro-parabolique.	27
24	Figure I.24	Eclairage naturel	27
Chapitre II : Energie photovoltaïque			
25	Figure II.1	Distance entre le soleil et la terre	30
26	Figure II.2	Heure de puissance crête	31
27	Figure II.3.a	Position du soleil observée d'après l'origine O	32
28	Figure II.3.b	Angle horaire et la déclinaison	32
29	Figure II.4	Incendie de la flotte romaine	33
30	Figure II.5	Miroir ardent	34
31	Figure II.6	Four solaire	34
32	Figure II.7	Coupe transversale d'une "boîte chaude" avec thermomètre	35
33	Figure II.8	Plans et Photos de la centrale thermique de Méadi en 1913 (Egypte)	36
34	Figure II.9	Four de Mont-Louis	36
35	Figure II.10	Première voiture solaire	37
36	Figure II.11	Spectre de rayonnement solaire	39
37	Figure II.12.a	Réponse spectrale d'une cellule PV	39
38	Figure II.12.b	Réponse spectrale d'une cellule Photovoltaïque	39
39	Figure II.13	Trois composantes du rayonnement solaire	41

		global sur un plan incliné.	
40	Figure II.14	Analyse Spectrale Solaire	42
41	Figure II.15	Ensoleillement Solaire Mondial	42
42	Figure II.16	Ensoleillement Solaire en ALGERIE exprimé en kWh/m ² /an	43
43	Figure II.17	Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontale au mois de Juillet	44
44	Figure II.18	Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontale au mois de Décembre	44
45	Figure II.19	Irradiation globale journalière reçue sur un plan normal au mois de Juillet	44
46	Figure II.20	Irradiation globale journalière reçue sur un plan normal au mois de Décembre	44
47	Figure II.21	Energie solaire photovoltaïque	45
48	Figure II.22	Carte du monde de l'irradiation moyenne annule En kWh/m ² /jour sur un plan horizontal	45
49	Figure II.23	Représentation Schématique d'une Cellule Solaire	46
50	Figure II.24.a	Effet photovoltaïque	50
51	Figure II.24.b	Effet photovoltaïque (Autre représentation)	50
<i>Chapitre III : Sécurité des systèmes Photovoltaïque</i>			
54	Figure III.1	Composants principales d'une chaîne photovoltaïque	54
55	Figure III.2	Centrale photovoltaïque	54
56	Figure III.3	Représentation schématique d'une cellule solaire	55
57	Figure III.4	Cellule photovoltaïque	56
58	Figure III.5	Structure d'une cellule solaire en silicium	57
59	Figure III.6	Types de cellules photovoltaïques	59
60	Figure III.7.a	Cellule PV monocristalline	59
61	Figure III.7.b	Cellule PV poly cristalline	59
62	Figure III.9	Cellule photovoltaïque amorphe	60
63	Figure III.10	Cellule poly-cristalline	61
64	Figure III.11	Cellule monocristalline	61
65	Figure III.12	Cellule silicium amorphe en couche mince	62
66	Figure III.13	Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS	63
67	Figure III.14	Cellules multi-jonctions	64
68	Figure III.15	Panneaux solaires installés	65
69	Figure III.16	Première implantation d'une structure PV	66
70	Figure III.17	Plusieurs formes de structures PV	67
71	Figure III.18	Différents composants de panneau photovoltaïque.	69
72	Figure III.19	Principe de fonctionnement de panneau solaire	69
73	Figure III.20	Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque « Cellule PV typique »	70
74	Figure III.21	Présentation schématique le principe d'une cellule solaire	70
75	Figure III.22	Composants d'un GPV	71
76	Figure III.23	Caractéristique I (A), et P (W) du module PV à 36 cellules série et 2 branches Parallèles	71

77	Figure III.24	Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque	72
78	Figure III.24.a	Caractéristique P(V) à $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$	73
79	Figure III.24.b	Caractéristique I(V) à $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$ [9].	73
80	Figure III.11.25	Schéma d'une cellule élémentaire.	76
81	Figure III.26.a	Caractéristique I(V) d'un PV	76
82	Figure III.26.b	Caractéristique P(V) d'un PV	77
83	Figure III.27	Influences des résistances séries et shunt	77
84	Figure III.27.a	Influence de résistance série	78
85	Figure III.27.b	Influence de résistance shunt	78
86	Figure III.28	Influence de l'ensoleillement $\psi = E_s$.	79
87	Figure III.29.a	I(V) en fonction d'éclairement	80
88	Figure III.29.b	P(V) en fonction de l'éclairement	80
89	Figure III.30	Influence de la température.	81
90	Figure III.31.a	I(V) en fonction de température	81
91	Figure III.31.b	Zoom sur la caractéristique I(V)	82
92	Figure III.32.a	P(V) en fonction de température	82
93	Figure III.32.b	Zoom sur la caractéristique P(V)	82
94	Figure III.33	Groupement de cellules PV	83
95	Figure III.34	Composants d'un générateur PV	83
96	Figure III.34	Association de ω cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série	85
97	Figure III.35	Caractéristiques de ω cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série	85
98	Figure III.36	Branchement de cellules en série.	86
99	Figure III.37	Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension	86
100	Figure III.38	Branchement de panneaux cellules en parallèle.	87
101	Figure III.39	Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension	87
102	Figure III.40	Etage d'adaptation entre un GPV et une charge	89
103	Figure III.41	Schéma descriptif d'un système photovoltaïque	90
104	Figure III.42	Classification des onduleurs PV connectés au réseau	92
105	Figure III.43	Exemple de boîte de jonction et câblage	92
106	Figure III.44	Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque	93
107	Figure III.45	Schéma synoptique d'un système PV, sans et avec stockage	93
<i>Chapitre IV : Les marges de sécurité d'un système à énergie photovoltaïque</i>			
108	Figure IV.1	Effet du rayonnement solaire sur les courbes de fonctionnement de la cellule solaire.	97
109	Figure IV.2	Effet de la température (l'environnement extérieur)	97
110	Figure IV.3	Caractéristique d'une cellule ombrée.	99
111	Figure IV.4	Efficacité des panneaux solaires avec poussière (a), sans poussière (b) en fonction de temps	99
112	Figure IV.5	Stockage batterie.	100
113	Figure IV.6	Inclinaison et l'orientation du panneau	101

		photovoltaïque	
114	Figure IV.7	Protection des systèmes PV par les diodes	102
115	Figure IV.8	Synthèse des protections mises en place tout au long de l'installation photovoltaïque	106
116	Figure IV.9	Exemples de défauts rencontrés dans la boîte de jonction.	108
117	Figure IV.10	Exemples de défauts rencontrés dans le système de câblage.	109
118	Figure IV.11	Exemples de défauts rencontrés dans le système protection.	110

LISTE DES TABLEAUX

N°	N° de tableaux	Intitulés	N° de Pages
<i>Chapitre II : Energie photovoltaïque</i>			
01	Tableau II.1	Potentiel solaire en Algérie	43
02	Tableau II.2	Domaine d'application des différents types cellules photovoltaïques avec leur rendement	51
<i>Chapitre III : Sécurité des systèmes Photovoltaïque</i>			
03	Tableau III.1	Comparaison entre les différentes cellules	64
<i>Chapitre IV : Les marges de sécurité d'un système à énergie photovoltaïque</i>			
04	Tableau IV.1	Evolution la température avec $(V_{co}), (I_{cc}), (P_m), (FF)$ et (η) .	98
05	Tableau IV.2	Paramètres extraits par la méthode pour différentes températures.	98
06	Tableau IV.3	Mesures de protection contre les chocs électriques adaptés à chaque situation.	105
07	Tableau IV.4	Mesures de protection contre les surintensités.	105
08	Tableau IV.5	Exemples de défauts rencontrés dans les générateurs photovoltaïques	107
09	Tableau IV.6	Exemples de défauts rencontrés dans la boîte de jonction.	108
10	Tableau IV.7	Exemples de défauts rencontrés dans le système de câblage	108
11	Tableau IV.8	Exemples de défauts rencontrés dans le système protection.	110
12	Tableau IV.9	Exemples de défauts rencontrés dans l'onduleur	111
13	Tableau IV.10	Exemples de défauts rencontrés dans le système d'acquisition	111

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
RESUME/ ABSTRACT/ ملخص.....	II
ABREVIATIONS / SYMBOLES	V
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
INTRODUCTION GENERALE.....	01
<i>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES</i>	
I.1. INTRODUCTION	06
I.2. DIFFERENTS FORMES DES ENERGIES	06
I.3. ENERGIES NON RENOUVELABLES	07
I.3.1. Combustibles fossiles.....	07
I.3.2. Energie nucléaire	07
I.3.3. Épuisement des stocks	07
I.4. ENERGIES RENOUVELABLES	08
I.4.1. Croissance de l'exploitation des énergies renouvelables	08
I.4.2. Production de l'électricité par les énergies renouvelables	09
I.4.2.1. Energie éolienne.....	09
I.4.2.2. Energie biomasse	11
I.4.2.2.1. Valorisation de la biomasse	12
I.4.2.3. Energie hydraulique	13
I.4.2.3.1. Energie des vagues.....	14
I.4.2.4. Energie géothermique	16
I.4.2.5. Energie solaire.....	18
I.4.2.5.1. Energie solaire pour produire de la chaleur	20
I.4.2.5.2. Energie solaire pour produire de l'électricité	22
I.4.2.5.3. Energie solaire pour thermique	24
I.4.2.5.4. Eclairage naturel.....	27
I.4.2.6. Energies marines	27
I.4.2.7. Hydrogène	27
I.5. CONCLUSION.....	28
<i>CHAPITRE II : ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE</i>	
II.1. INTRODUCTION	30
II.2. SOLEIL	30
II.2.1. Définitions et généralités	30
II.2.2. Position de soleil	32
II.3. ENERGIE SOLAIRE	33
II.3.1. Historique et état actuel	33
II.3.2. Energie solaire en Algérie	38
II.3.3. Rayonnement solaire	38
II.3.3.1. Introduction	38
II.3.3.2. Caractéristiques du rayonnement solaire	40
II.3.3.2.1. Energie renouvelable solaire.....	40
II.3.3.2.2. Différents types des rayonnements solaires	40
II.3.3.2.3. Masse d'air	41
II.3.4. Spectre solaire.....	41
II.3.5. Potentiel solaire	42
II.3.5.1. Potentiel solaire mondial	42
II.3.5.2. Potentiel solaire en Algérie	42

II.3.6. Energie solaire photovoltaïque	45
II.4. ECLAIREMENT ET IRRADIATION	45
II.4.1. Irradiation	45
II.4.2. Eclairage	46
II.5. ABSORPTION DE LA LUMIERE	46
II.6. TRANSFERT DE L'ENERGIE DES PHOTONS AUX PARTICULES CHARGEES ELECTRIQUEMENT	46
II.7. AVANTAGES ET LES INCONVENANTS DE L'ENERGIE « PV »	47
II.7.1. Avantages	47
II.7.2. Inconvénients	47
II.8. EFFET « PHOTOVOLTAÏQUE »	48
II.8.1. Terme « Photovoltaïque PV »	48
II.8.2. Définitions et généralités	48
II.8.3. Principe de fonctionnement	49
II.9. DOMAINE D'APPLICATION DU PHOTOVOLTAÏQUE	50
II.10. AVENIR DU PHOTOVOLTAÏQUE	51
II.11. CONCLUSION	51
Chapitre III : Différents Composants du Système PV	
III.1. INTRODUCTION	54
III.2. CELLULE « PHOTOVOLTAÏQUE »	55
III.2.1. Généralités / Définitions	55
III.2.2. Principe de fonctionnement	57
III.2.3. Technologies des cellules photovoltaïques / Différents types de cellules « PV »	58
III.2.3.1. Introduction	58
III.2.3.2. Première technologie (<i>CRISTALLINES/ AMORPHES</i>)	59
III.2.3.3. Deuxième technologie /cellules siliciums amorphes en couche mince	62
III.2.3.4. Troisième technologie / cellules sans silicium en couche mince cis / cigs / Semi-conducteurs	62
III.2.3.5. Cellules multi-jonctions	64
III.2.4. Comparaison entre les différentes cellules	64
III.3. PANNEAU SOLAIRE	65
III.3.1. Introduction	65
III.3.2. Généralités et définitions	65
III.3.3. Fabrication de panneau solaire	68
III.3.4. Principe de fonctionnement de panneau solaire /Conversion photovoltaïque	69
III.3.5. Caractéristiques électriques du panneau solaire	70
III.3.5.1. Caractéristiques Courants –Tension	72
III.3.5.2. Paramètres externes d'une cellule solaire photovoltaïque	74
III.3.5.3. Influence des paramètres externes sur la caractéristique I(V)	76
III.3.5.3.1. Influence des résistances série et shunt	77
III.3.5.3.2. Influence de l'éclairage	78
III.3.5.3.3. Influence de la température	80
III.4. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (PV)	83
III.4.1. Introduction	83
III.4.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque	84
III.4.3. Association en série / Association en parallèle	84
III.4.3.1. Introduction	84
III.4.3.2. Association en série	86
III.4.3.3. Association en parallèle	87

III.4.4. Avantages et inconvénients des générateur « PV »	88
III.4.4.1. Avantages	88
III.4.4.1. Inconvénients	88
III.4.4. Adaptation entre la charge et la source	89
III.5. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	89
III.5.1. Définition d'un système photovoltaïque	89
III.5.2. Description d'un système photovoltaïque	90
III.5.2.1. Générateur photovoltaïque	91
III.5.2.2. Convertisseur	91
III.5.2.3. Câblage et boîte de jonction.....	92
III.5.3. Différents configuration du système «Photovoltaïque»	93
III.5.3.1. Système autonome sans batterie	94
III.5.3.2. Système autonome avec batterie	94
III.5.3.3. Système fonctionnant au fil du soleil	94
III.5.3.4. Système avec appoint électrique	94
III.6. CONCLUSION	94

Chapitre IV : Contributions liées aux Marges de Sécurité pour les systèmes Photovoltaïques

IV.1. INTRODUCTION	96
IV.2. EFFETS DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LES CELLULES PV.....	96
IV.2.1. Effet de rayonnement solaire	96
IV.2.2. Effet de la température (l'environnement extérieur)	97
IV.2.3. Effet de vent	98
IV.2.4. Effet d'ombre	98
IV.2.5. Effet poussière	99
IV.3. EFFETS DES AUTRES PARAMETRES.....	100
IV.3.1. Capacité des batteries de stockage	100
IV.3.2. Inclinaison et l'orientation du panneau photovoltaïque	100
IV.3.3. Paramètres liés aux types des cellules	101
IV.4. SECURITE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE	101
IV.5. COMPOSANTS DE PROTECTION DE SYSTEME PV	102
IV.5.1. Diodes.....	102
IV.5.2. Mise à la terre.....	102
IV.5.2.1. Protection des appareils contre les surtensions dues à la foudre	103
IV.5.2.2. Protection contre les courants de fuite et décharges statiques	104
IV.5.2.3. Protection contre les défauts d'isolation cote courant alternatif	104
IV.5.3. Interpréteur /Le disjoncteur	104
IV.5.4. Fusible	104
IV.6. SYSTEME DE PROTECTION	105
IV.6.1. Protection contre les chocs électrique	105
IV.6.2. Protection contre les surintensités	105
IV.6.3. Protection de découplage.....	106
IV.6.4. Sectionnement et coupure d'urgence	106
IV.7. DEFAUTS LES PLUS FREQUENTS RENCONTRES DANS UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE	106
IV.7.1. Défauts dans le générateurs PV	107
IV.7.2. Défauts dans la boîte de jonction	108
IV.7.3. Défauts dans le système de câblage	109
IV.7.4. Défauts dans le système de protection	110
IV.7.5. Défauts dans l'onduleur	111

IV.7.6. Défauts dans le système d'acquisition.....	111
IV.8. MARGES DE SECURITE DES SYSTEMES A UNE ENERGIE PV UTILISANT LES DONNEES METEOROLOGIQUES	112
IV.9. CONCLUSION.....	113
CONCLUSION GENERALE	114
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	i

INTRODUCTION GENERALE

Depuis la révolution industrielle la consommation totale d'énergie électrique dans le monde entier est augmentée, elle a plus que doublée en 40 ans (de 1973 à 2013). La grande partie de l'énergie électrique utilisée par l'humanité provient des énergies fossiles. Selon l'agence internationale de l'énergie, ses ressources conventionnelles représentent 80,4 % de production d'énergie globale, elles sont à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO₂ [1]. [2].

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, l'énergie est donc une complication fondamentale de l'humanité dans le monde d'aujourd'hui : Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. [3]

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [3]

Actuellement, la plus grande part de la consommation énergétique mondiale est dédiée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. En revanche, l'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence des technologies plus récentes et moins polluantes. Ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [1]. En troisième place on trouve le nucléaire.

Certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle on le trouve avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'Algérie [4].

Exploiter toutes ces ressources est la question qui se posera à l'humanité de demain : La demande d'énergie continue de croître et une grave pollution menace les êtres vivants et l'environnement.

En Algérie et partout dans le monde la consommation en énergie électrique est en très forte croissance. Il semble que tendanciellement, la consommation d'énergie va continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. On parle périodiquement de diverses solutions techniques permettant de garder ce rythme de vie ; ça d'une part, d'autre part l'épuisement des ressources fossiles plus ou moins à long terme, la flambée des prix du brut, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables : L'hydroélectricité en tête. Certains pays produisent l'essentiel de leur électricité grâce aux barrages et aux cours d'eau.

Ces dernières décennies, notre planète a connu un accroissement du taux d'émission des gaz à effet de serre qui a été le résultat de l'avancement considérable de la technologie et de l'industrie. Ceci a eu comme conséquence néfaste, un bouleversement climatique et des catastrophes naturelles notables. Le recours au développement des énergies non polluantes est alors apparu comme l'ultime solution face à ce problème. [5]

Dans le cadre du développement durable et face au double enjeu planétaire sont posés les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, les gouvernements engagés dans le *Protocole de Kyoto* doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources *d'Énergies Renouvelables*, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial. [3]

Selon le dernier " Inventaire sur la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ". La production d'électricité étant toujours issue des combustibles fossiles, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. En effet 19 % du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici et au future, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables, pour cela plusieurs travaux de recherches ont été lancés dans plusieurs laboratoires de recherche dans le domaine de développement durable, pour but de satisfaire la demande de consommation énergétique d'une part et d'autre part pour réduire les effets négatives des ressources d'origine fossile sur l'environnement [4]

Dans le monde entier les chercheurs demandent en urgence de faire changer la vision ancienne pour la production d'électricité, ils appellent aux ressources d'énergies renouvelables qui vont prendre la place d'autres ressources fossiles afin de répondre aux exigences actuelles [6]. Une alternative intéressante et puissante comme celle de l'énergie solaire a attiré l'attention au niveau de la production de l'électricité à grande échelle. Cependant elles présentent un inconvénient par le caractère imprévisible et la dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps [7].

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement sans pollution et dans une moindre dépendance des ressources pour cela la production de l'énergie électrique, par ces systèmes tels que les sources solaires, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse au lieu des systèmes habituels anti-environnementaux tels que le gaz, le charbon et le pétrole, est une idée remarquable mais non fréquente et sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

On entend par énergie renouvelable, 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 Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. [3]

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...).

Le rayonnement solaire est réparti sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. [3]

Le soleil peut satisfaire tous nos besoins si nous apprenons à exploiter rationnellement l'énergie qu'il rayonne vers la terre. Il brille dans le ciel depuis presque cinq milliards d'années et

les scientifiques ont calculé qu'il est à la moitié de son existence. Nous avons du mal à imaginer qu'au cours d'une année le soleil diffuse vers la terre quatre mille fois plus d'énergie que celle consommée par toute la population mondiale. Aujourd'hui il paraît insensé de ne pas en profiter car nous avons les moyens technologiques nécessaires. De plus il faut considérer que cette source d'énergie est gratuite, propre et inépuisable. L'énergie photovoltaïque est l'une de trois utilisations de l'énergie solaire. Cette dernière est utilisée pour la production de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques.

Bien malgré que cette énergie soit gratuite, un contrôle et un suivi de bon fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est rentable, car chaque Kilowatt-heure alimenté par le courant solaire compte et se transforme en argent comptant.

À l'ère du développement durable, l'énergie photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. En effet, plus de 22 GW ont été produites en 2010 contre 0.4 GW en 1998, soit une augmentation de 5500% selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible. [5]

Les panneaux solaires ou photovoltaïques sont l'élément de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du Soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique qui est donnée par le fabricant sous forme de courbes. Ces courbes représentent généralement l'évolution du courant et de la puissance par rapport à la tension du panneau. La caractéristique électrique du panneau est de nature non linéaire et possède un point particulier appelé « Point de Puissance Maximale » (en anglais "Maximum Power Point" MPP). Ce point est le point de fonctionnement optimal pour lequel le panneau opère à sa puissance maximale. [5]

Cependant, Les paramètres climatiques tels que la température, la poussière et l'éclairement sont des paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique I-V de la cellule solaire. La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires. Sachant que sur le total d'énergie incidente, une très faible portion est réfléchiée par la surface du capteur et une petite portion est extraite sous forme d'énergie électrique, en conséquence c'est la grande partie de l'énergie incidente qui devra être dissipée sous forme de chaleur. Ceci conduit, sous rayonnement, à une température de fonctionnement relativement élevée si cette énergie non convertie en électricité n'est pas évacuée.

L'énergie solaire photovoltaïque, qui est l'une des sources d'énergie renouvelables découverte par E. Becquerel en 1839. Il s'agit de la conversion directe du rayonnement électromagnétique solaire en électricité. Elle dépend fortement des conditions climatiques et de la localisation du site, ce qui rend la position du MPP variable dans le temps et donc difficile à situer.

L'énergie photovoltaïque a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans dans le domaine spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker d'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Cette technique, comme son nom l'indique, traque le

MPP dans le temps et permet de la sorte de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir.

Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Il permet de faire un gain qui peut atteindre 25% d'où son importance. Techniquement, le MPPT fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance.

L'énergie solaire n'étant pas disponible la nuit, il est nécessaire d'équiper les systèmes photovoltaïques autonomes par des batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'énergie et de la restituer en temps voulu. Pour les systèmes raccordés au réseau de distribution électrique, le stockage de l'énergie et bien évidemment pas indispensable. La présence des batteries exige l'utilisation d'une unité dédiée à la gestion de l'énergie. En effet, ces dernières possèdent deux tensions critiques (tension de surcharge et tension de décharge profonde) qui doivent être respectées sous peine d'usure prématurée ou pire, leur détérioration.

L'évolution continue de l'électronique de puissance, plus particulièrement les dispositifs de conversion de la puissance a permis de concevoir de nouveaux schémas plus sophistiqués et moins encombrants améliorant par la même occasion leur rendement. Cela a une influence directe sur le rendement et le coût global du système photovoltaïque dans son ensemble.

Le travail, présenté dans ce mémoire, est la contribution à l'étude de quelques marges de sécurité fondamentales du système photovoltaïque.

Le mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentera les généralités sur l'énergie renouvelable et les différents types d'énergies renouvelables, les avantages et les inconvénients de ces énergies renouvelables, l'énergie solaire et son rayonnement.

Dans le deuxième chapitre, on introduira la notion de l'énergie solaire (son histoire), son importance en apport d'énergie) en Algérie et dans le monde, la notion de rayonnement solaire (spectre, caractéristiques, et différents types de rayonnements) ainsi que le potentiel solaire. Enfin on clôturera le chapitre par la notion du photovoltaïque et de l'énergie photovoltaïque

Dans le troisième chapitre, on développera les cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement, les caractéristique d'une cellule solaire, ainsi que la composition des panneaux photovoltaïques (modules), l'intérêt et le rôle des générateurs photovoltaïques dans les systèmes photovoltaïques, enfin l'identification et les différentes configurations des systèmes Photovoltaïques.

Le quatrième chapitre, sera consacré principalement à quelques marges de sécurité fondamentales pour l'obtention d'une performance maximale au même temps une diminution des pertes d'énergie, les effets des facteurs climatiques sur les composants du système photovoltaïque (cellules) et autres paramètres, différents types de protection envisagés pour remédier aux différents défauts des composants pouvant surgir dans une installation Photovoltaïque. Autrement dit on évoquera la sécurité des systèmes Photovoltaïques, et leur protection.

Enfin, une conclusion générale qui couronne ce travail de mémoire.

Chapitre I :
Généralités sur les énergies
renouvelables

I.1-INTRODUCTION

L'énergie, sous de nombreuses formes, est l'un des piliers du développement mondial, mais fait face à une crise croissante. En effet, la demande croissante en ressources énergétiques dans les économies émergentes et la raréfaction des énergies fossiles traditionnelles bouleversent les modèles énergétiques actuels.

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère.

Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle. Elles permettent la production d'énergie mécanique, d'énergie électricité et de l'énergie thermique

L'augmentation de la demande et la diminution des réserves de pétrole dans les pays émergents encouragent la mise en place d'alternatives pour répondre à ces demandes croissantes. Les énergies renouvelables sont une vraie solution pour les énergies fossiles, notamment pour les collectivités qui dépendent presque exclusivement de ces types d'énergies socio-économiques.

Les préoccupations croissantes sur l'environnement après le Protocole de Kyoto ont encouragé l'exploitation des ressources renouvelables propres et inépuisables. La production de l'énergie par des ressources renouvelables est principalement mise en œuvre pour alimenter les zones rurales éloignées. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. 2014.

Les énergies, autres que celles provenant des sources fossiles, sont surtout représentées par les énergies renouvelables, l'hydroélectricité en tête. Certains pays produisent l'essentiel de leur électricité grâce aux barrages et aux cours d'eau [8].

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement sans pollution et dans une moindre dépendance des ressources pour cela la production de l'énergie électrique par ces systèmes tels que les sources solaires, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse au lieu des systèmes habituels anti-environnementaux tels que le gaz, le charbon et le pétrole est une idée remarquable mais non fréquente au Liban. [9].

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire [3].

Pour cela les systèmes hybrides combinent entre plusieurs formes d'énergie font l'axe principal de plusieurs travaux de recherches pour les sites éloignés de réseau électrique.

I.2- DIFFERENTES FORMES DES ENERGIES [10]. [11]

Les différentes formes des énergies qu'on peut rencontrer entre autres sont :

- **Énergie chimique** : Cette énergie provient des atomes, des molécules et de leurs interactions.
- **Énergie Électrique** : Générée par le mouvement des électrons.
- **Énergie d'attraction** : Les objets volumineux tels que la terre et le soleil créent la gravité et le pouvoir d'attraction.
- **Énergie thermique** : Elle provient des molécules résultant de différentes réactions thermiques.

- **Énergie solaire** : La lumière est appelée énergie radioactive et la terre tire une grande partie de son énergie de la lumière du soleil.
- **Énergie cinétique** : Tout ce qui bouge a de l'énergie et cette énergie est appelée carte de mouvement.
- **Énergie nucléaire** : Les divisions massives de cette énergie peuvent être générées par la division successive des atomes.
- **Énergie potentielle** (l'énergie d'état) : Il s'agit de l'énergie stockée dans un objet particulier.
- Ect.....

I.3-ENERGIES NON RENOUVELABLES

Ce sont des énergies conventionnelles ou énergies qui sont épuisées et comprennent le charbon, le pétrole, le gaz naturel et les produits chimiques, c'est-à-dire une énergie qui ne peut pas être reconstruite ou compensée rapidement [11]

Une énergie est dite non renouvelable si elle est produite à un rythme trop lent pour que son stock puisse être renouvelé à l'échelle d'une vie humaine. Elles sont encore très utilisées car elles fournissent un très bon rendement énergétique, comme les énergies non-vertes et sont source de pollution.

Les principales sources d'énergies non renouvelables sont :

I.3.1- COMBUSTIBLES FOSSILES

L'inconvénient majeur de ces combustibles fossiles est l'émission, lors de leur combustion, de dioxyde de carbone qui est l'un des gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique actuel :

- **Le charbon** : Il est issu de la transformation lente de la matière organique (plusieurs millions d'années). Il s'agit d'une des sources d'énergie les plus utilisées au monde.
- **Le gaz** : Composé de gaz type méthane retrouvé dans certaines roches.
- **Le pétrole** : il s'agit donc d'une huile minérale piégée dans la roche, où le pétrole est une des sources d'énergie les plus utilisées au monde.

I.3.2- ENERGIE NUCLEAIRE

L'énergie nucléaire repose essentiellement sur l'uranium naturel, un élément radioactif présent dans le sous sol Terrestre.

L'intérêt de l'énergie nucléaire est de produire de grandes quantités d'énergie sans émettre de gaz à effet de Serre. Ses principaux inconvénients sont la production de déchets radioactifs ayant une longue durée de vie qu'il faut stocker de manière sécurisée et le risque lié à une fuite de substance radioactive lors d'une catastrophe naturelle. L'exploitation de l'énergie nucléaire a engendré entre autres deux catastrophes majeures dans le monde : l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986 en Ukraine et celui de la centrale de Fukushima Daiichi en 2011 au Japon [11]

I.3.3- ÉPUISEMENT DES STOCKS

L'épuisement des stocks de combustibles fossiles et d'uranium est inévitable et les réserves disponibles seront entièrement utilisées dans environ un siècle, ce qui rend indispensable le

développement des énergies renouvelables qui sont pourtant encore largement minoritaires à l'heure actuelle.

I.4- ENERGIES RENOUVELABLES

Une énergie est dite renouvelable si elle est disponible de manière continue. Ses réserves ne diminuent pas ou se reconstituent rapidement. Ces énergies sont des énergies propres car elles engendrent très peu de déchets. Cependant, le principal frein au développement des énergies renouvelables est que ces énergies n'ont pas, pour l'instant, un fort rendement.

Elle est connue sous le nom d'énergie alternative, dérivant de ressources naturelles inexploitées et inépuisables, notamment l'énergie solaire, éolienne, aérienne et l'eau. D'une manière générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs. De la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes.

Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, "ENR". En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes [12]

I.4.1- CROISSANCE DE L'EXPLOITATION DES ENERGIES RENOUVELABLES

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre selon le protocole de Kyoto ; rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables [13]. On dit que la source d'énergie est renouvelable si le fait de faire la consommer n'influence jamais sur sa quantité, ni faire limiter son utilisation au futur. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années.

D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables [2]

Le besoin d'une alternative renouvelable pour faire produire l'électricité a été le sujet de discussion pour plusieurs secteurs et aux niveaux d'un grand nombre de pays au monde entier.

Les études ont été élaborées pour faire de cet outil l'axe de recherche pour plusieurs chercheurs afin de réaliser un but majeur celui de minimiser les effets négatifs de ressources classiques de production de l'énergie.

L'Algérie est parmi les pays qui ont appelés à diversifier ses ressources économiques voir énergétiques de manière à limiter sa dépendance au pétrole et au gaz. Selon monsieur Brahim Zitouni directeur de la société émiratie de la biotechnologie [14]. Selon lui, les projets de type "Desertec" dont le pays, à la juste volonté de se doter, propose en filigrane de faire basculer graduellement le système énergétique algérien, en particulier dans sa dimension de production électrique vers l'énergie solaire.

I.4.2- PRODUCTION DE L'ELECTRICITE PAR LES ENERGIES RENOUVELABLES

Y'on a pleinement d'énergies qui rentrent dans cette catégorie, elles sont classées comme suit (voir figure I.1)

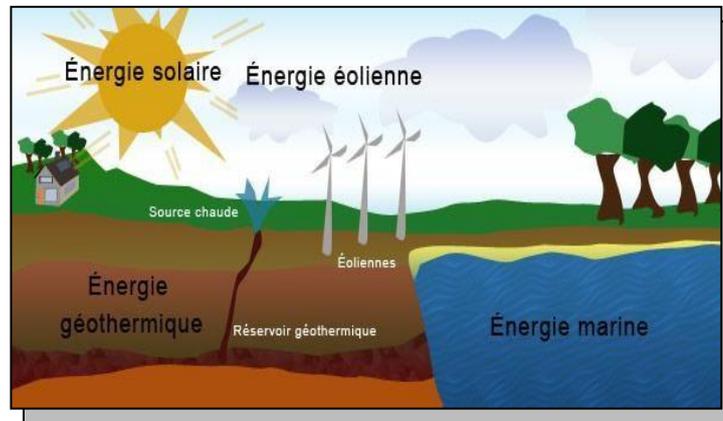


Figure I.1 : Energies renouvelables

I.4.2.1- ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable. L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;

Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...).

Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

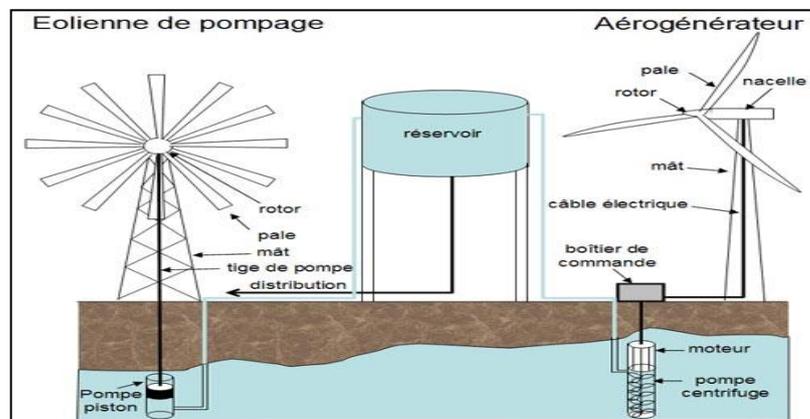


Figure I.2. Énergie éolienne

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales. Cette source est non polluante. Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [15]



Figure I.3 : Moulins à vent

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou être utilisée par des charges isolées. [16]

Les éoliennes exploitent le mouvement de l'air pour produire de l'énergie et cela par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique. L'énergie éolienne, ne produit pas de pollution et constitue une forme d'énergie indéfiniment durable. Le vent tourne les pales de l'hélice qui à leur tour font tourner l'arbre d'une génératrice produisant de l'électricité. [16]

Pour obtenir un rendement optimal, la vitesse du vent doit être d'environ 50 km/h. Au-delà de 90 km/h, les éoliennes ne peuvent plus tourner car cela endommagerait trop vite les mécanismes [16]

Pour le fonctionnement, une éolienne a besoin d'un vent d'au moins 10 km/h. La capacité d'une éolienne à produire de l'énergie s'appelle la puissance (en watts). La puissance des éoliennes varie suivant leur taille. Actuellement, il existe des petites éoliennes permettant de générer 400W et des grosses éoliennes industrielles pouvant avoir une puissance allant jusqu'à 5 MW (=5000000 W) [17].

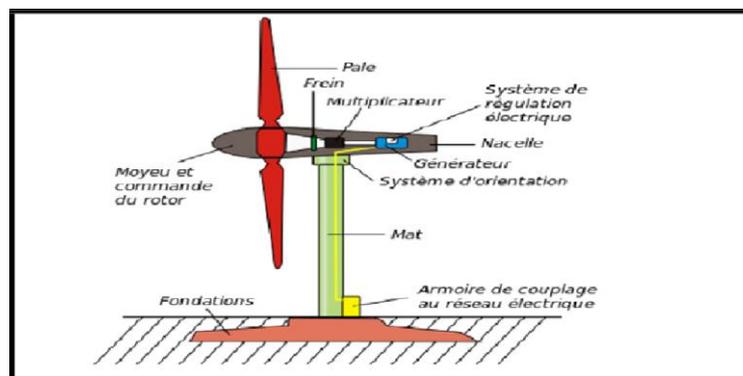


Figure I.4 : Composants d'une éolienne [17].

I.4.2.2- ENERGIE BIOMASSE

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies la biomasse énergie est la partie de la biomasse utilisée ou utilisable comme source d'énergie ; soit directement par combustion (ex : bois énergie), soit indirectement après méthanisation (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (agro carburant). La biomasse peut être toute matière organique d'origine végétale (micro algues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons).

La source de biomasse peut être la nature sauvage et/ou cultivée (agro carburants, agro-combustibles).

Une définition juridique française plus restrictive est : « fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers »². Trois modes de valorisations coexistent : thermique, chimique et biochimique [6-7-8]. [18].

La biomasse désigne donc toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde [19]. Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse ce qui est bien montré par la (figure I.5). Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [20]

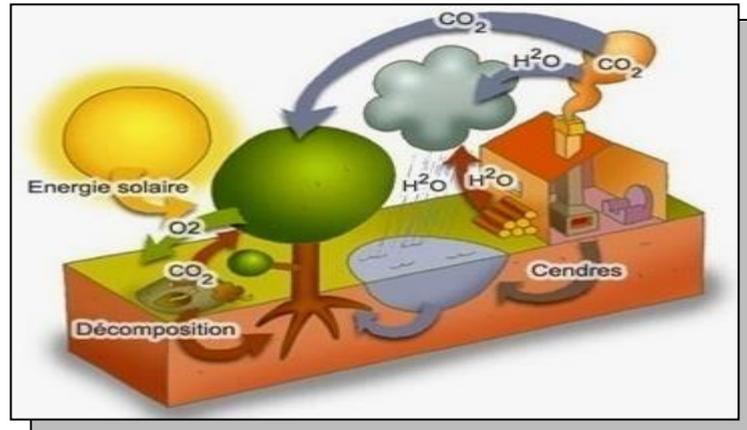


Figure 1.5 : Énergie Biomasse

Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des coproduits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage. [12]

Elle est la source d'énergie principale pour cuisiner et se chauffer. Cette biomasse qui comprend tous les produits obtenus à partir de plantes ou de résidus de plantes, secs ou déshydratés comme le bois, la paille, les grignons d'olives, la bagasse de la canne à sucre, est exploitée par combustion ou métabolisation. Mais pour être une réelle énergie renouvelable, les quantités brûlées ne doivent pas excéder les quantités produites. En fonction des besoins, elle permet une production de chaleur ou d'électricité. De ce fait, sa participation à la production d'énergie mondiale est énorme par rapport aux autres énergies [12]

I.4.2.2.1- VALORISATION DE LA BIOMASSE

Il existe trois types de la biomasse [12]

1- Sous forme de chaleur Bioénergie : Le bois est la source d'énergie la plus intéressante dans la problématique des énergies renouvelables. Tout le monde a en tête les dégâts provoqués par la déforestation dans les régions tropicales. Le bois constitue donc une source d'énergie renouvelable et relativement propre. Dans un pays qui pratique la sylviculture et replante au minimum autant d'arbres qu'il en coupe, le bilan écologique est donc neutre[21]

L'énergie chimique du bois est libérée par combustion sous forme de chaleur et utilisée directement pour le chauffage ou pour produire de l'électricité. Le bois comme source de chauffage est utilisé à toute échelle. Plus rarement on utilise la pyrolyse ou la gazéification.

Il existe également d'autres bioénergies qui découlent directement des déchets que nous produisons. C'est le cas pour le traitement de déchets destinés aux cimenteries sous forme de Combustibles Solides de Substitution (CSS) pour consommer beaucoup moins de pétrole.



Figure I.6. Chaleur

2- Sous forme de carburant : Biocarburant : Il existe deux familles de biocarburants : Les éthanol et les biodiesels.

Les éthanol, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'éthyl- tertio-butylether ; et la canne à sucre. Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation [22]

Les biodiesels : Sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja). Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole. En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques (essence et gazole). Ils entraînent alors une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsables de l'effet de serre. Mais ces biocarburants ont un énorme inconvénient ; ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières [21]. C'est une L'huile végétale brute, et les esters d'huiles végétales (colza,..).

3- Par conversion biologique : Biogaz : On appelle biogaz les effluents gazeux, issus de la fermentation de matières organiques contenues dans les décharges, les stations d'épuration etc. Le biogaz est un mélange composé essentiellement du méthane (CH_4) en proportion 65% (un puissant gaz à effet de serre et sa captation est de toute façon hautement souhaitable) et du gaz carbonique (CO_2) en proportion 35%. Suivant sa provenance, le biogaz contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré (H_2S), d'oxygène, d'aromatiques, de composés organo-halogénés

(chlore et fluor) et des métaux lourds (présentes à l'état de traces). Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques animales ou végétales, qui se déroule en trois étapes (hydrolyse, acidogènes et méthanogènes) sous l'action de certaines bactéries. Il se déroule spontanément dans les centres d'enfouissement des déchets municipaux, mais on peut le provoquer artificiellement dans des enceintes appelées digesteurs où l'on introduit à la fois les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes.

Cette technique de méthanisation volontaire peut s'appliquer aux [21] :

- Ordures ménagères brutes ou à leur fraction fermentescible.
- Boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles.
- Déchets organiques industriels, (cuirs et peaux, chimie, parachimie,...).
- Déchets de l'agriculture et de l'élevage (fientes, lisier, fumier,...).

Le biogaz peut être considéré comme une ressource énergétique, souvent via sa combustion pour produire de la vapeur et de l'électricité ; son utilisation directe dans des moteurs à gaz pauvres peut aussi être envisagée.

I.4.2.3- ENERGIE HYDRAULIQUE

Les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables.

On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans.

Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé...).



Figure I.7. Énergie hydraulique

Depuis l'invention de l'électricité cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique. D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines.

I.4.2.3.1- ÉNERGIE DES VAGUES

Elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pélamis, sorte de ver en métal articulé ou le Searev. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.

A. Énergie marémotrice

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées et causés par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil. Elle est utilisée soit sous forme d'énergie potentielle - l'élévation du niveau de la mer, soit sous forme d'énergie cinétique - les courants de marée.

B. Énergie hydrolienne

Une hydrolienne est une turbine hydraulique (sous-marine ou à flots) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique du vent [9]. [23].

La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en mouvement en énergie mécanique, qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur.

C. Énergie thermique des mers

L'énergie thermique des mers (ETM) ou énergie marée-thermique est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans. Un acronyme souvent rencontré est OTEC, pour « Ocean thermal énergie conversion ». L'Union européenne utilise le terme énergie hydro-thermique pour « l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur dans les eaux de surface ».

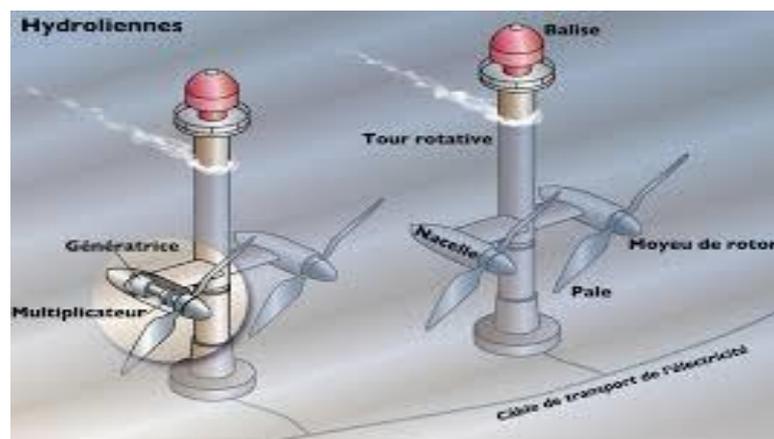


Figure I.8 : Hydroliennes

D. Énergie osmotique

L'énergie osmotique est l'énergie qu'il serait possible d'obtenir au voisinage des estuaires (où l'eau douce fluviale se mélange à l'eau salée de la mer), en exploitant le phénomène d'**osmose** qui se produirait continuellement au niveau d'une membrane appropriée qui séparerait ses masses de salinité différente.

Les énergies renouvelables sont une source de sécurité dans les domaines économiques, sociaux et environnementaux.

Dans le cas où les énergies renouvelables sont substituées aux énergies fossiles, elles favorisent l'indépendance énergétique. Il est donc possible qu'elles participent à la réduction des conflits liés aux intérêts énergétiques.

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice (figure I.9). La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source à l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexes, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [20]



Figure I.9 : Moulin à eau

Le principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique est assimilable à celui de l'énergie éolienne : Le mouvement de l'eau fait tourner une turbine qui produit de l'électricité. Plus l'eau coule vite, plus l'énergie produite est importante. En effet, la quantité d'énergie produite dépend de la pression et du volume d'eau à disposition. La pression est elle-même liée à la différence de hauteur entre la surface du lac et la position de la turbine. Ce mode de production d'électricité est l'un des plus propres et des plus efficaces (pas de déchets ni de CO_2).

Il s'appuie sur une ressource puissante et illimitée qui n'a pas besoin d'être transformée : L'eau passe à travers une centrale, et en ressort intacte.

La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité repose sur la force de l'eau qui va activer une turbine qui déclenche un alternateur et produit de l'électricité.

À un étranglement des rives d'un cours d'eau, un barrage est érigé qui crée une retenue d'eau : Au pied de ce barrage, on installe des turbines reliées à des alternateurs (générateurs). On alimente en eau sous pression, les turbines par un système de canalisations et de régulateurs de débit (Figure I.10). La turbine hydraulique couplée à un alternateur (ou générateur) convertit l'énergie cinétique de l'eau en mouvement en énergie électrique utilisable par les consommateurs :

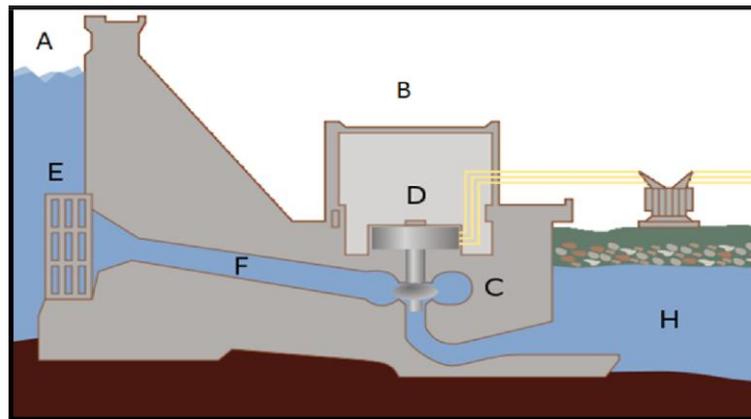


Figure I.10 : Coupe d'un barrage hydroélectrique [24]

A – réservoir	D – générateur	G-Lignes haute tension
B - centrale électrique,	E- vanne	H- rivière
C - turbine,	F- conduite forcée,	

I.4.2.4- ENERGIE GEOTHERMIQUE

Le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : La terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans des cas particuliers, la géothermie peut consister à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin de refroidir les installations de surface.

Différentes sources de chaleurs sont à l'origine de la chaleur interne de la terre : La radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différenciation et les mouvements différentiels [25]. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps.

Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [19].

La chaleur naturellement présente dans le sous-sol de notre planète est une puissante source d'énergie. Plus vous creusez profondément, plus la température que vous atteignez est élevée. L'énergie géothermique utilise cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité. Selon la température des différentes couches de la surface terrestre, la géothermie se divise en "haute énergie" (150°C), "moyenne énergie" (90-150°C), "basse énergie" (30-90°C) et "très basse énergie" (inférieure à 30°C). Ainsi, plus vous descendez sous terre, plus la température est élevée et vous pouvez l'utiliser différemment.

L'énergie géothermique est une source d'énergie développée à partir de la chaleur sous la surface de la terre. Les puits sont utilisés pour transporter la vapeur et l'eau chaude du sous-sol profond vers la surface. L'eau chaude utilisée fait tourner une turbine pour produire de l'électricité ou de la chaleur [26]

Soit la géothermie désigne à la fois la *science* qui étudie les phénomènes thermiques internes du *globe terrestre*, et la *technologie* qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en *chaleur*.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour *fracturer* une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de *calories* (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. On distingue classiquement trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation:

On distingue quatre types de géothermie : e haute, de moyenne, de basse et de très basse énergie [26]

1- Géothermie de haute / moyenne énergies :

La géothermie à haute énergie qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Elle est surtout utilisée pour produire de l'électricité.

La géothermie haute énergie (aux températures supérieures à 180 °c) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

La géothermie moyenne-énergie (aux températures comprises entre 100 °c et 180 °c) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire. Elle exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur).

2- Géothermie de basse énergie :

La géothermie de basse énergie (température comprise entre 30°c et 100°c) est rencontrée à une profondeur moyenne (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) de 1000 à 2500m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage des serres.

Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.

3-Géothermie de très basse énergie :

La géothermie de très basse énergie est rencontrée à des faibles profondeurs (nappes phréatiques) où la température est de l'ordre de 10 à 12°c. Elle est utilisée pour le rafraîchissement et le chauffage des bâtiments à travers les puits.

Principales utilisations : le chauffage et la climatisation individuelle par dispositifs thermodynamiques généralement fonctionnant à l'électricité, d'où le terme électrothermodynamique, appelés plus communément « pompes à chaleurs aérothermiques » (puisant dans l'air extérieur) et « pompe à chaleur géothermique ».

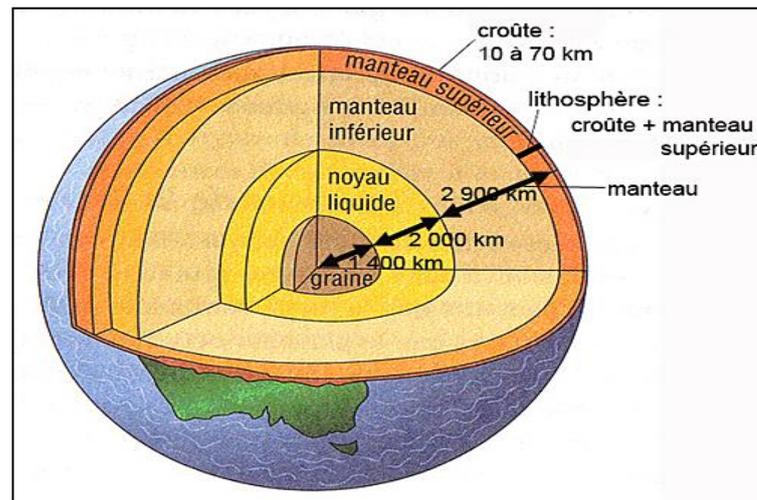


Figure I.11 : Schéma de la structure interne du globe [26]

I.4.2.5- ENERGIE SOLAIRE

Le soleil produit de l'énergie grâce aux réactions de fusion nucléaire qui se produisent en son noyau, à cause de la chaleur et de la pression très élevées les atomes d'hydrogène et leurs isotopes se heurtent violemment pour former de l'hélium, libérant en même temps une énorme quantité d'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique de basse longueur d'onde et de très haute fréquence: les rayons gamma.

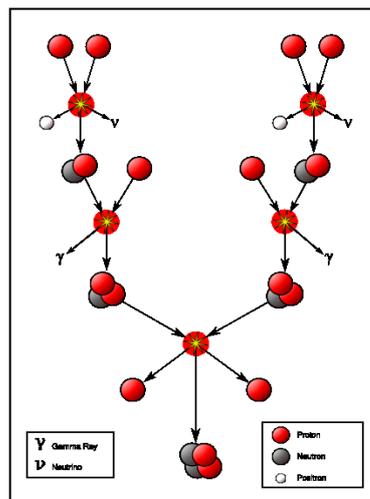


Figure I.12. Fusion d'hydrogène en hélium

Ainsi, chaque seconde, le Soleil transforme 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium et perd 4 millions de tonnes, expulsées dans l'espace sous forme de particule ou de rayonnement. Tous les atomes présents au cœur du Soleil peuvent fusionner. C'est ainsi que tous les éléments présents dans l'Univers ont été formés.

Après avoir été émis à la suite des réactions nucléaires à l'intérieur du noyau, les rayons gamma doivent, pour atteindre la surface, traverser la zone radiative du Soleil.

Cependant, la zone radiative est opaque et très dense, et les rayons gamma sont absorbés par les atomes de cette zone et sont réémis sous forme de photons de moindre énergie, à leur tour absorbés et réémis, jusqu'à atteindre la surface du Soleil, en passant par la zone de convection et la chromosphère.

Du coup, les photons produits à l'intérieur du noyau mettent parfois un temps estimé entre 20 000 et 50 millions d'années à atteindre la surface du Soleil mais toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière y sont représentées, ou presque. Puis, en 8 minutes en moyenne, à la vitesse de 3.108 m/s, les photons atteignent la Terre [27-28].

Deux atomes d'hydrogène fusionnent et libèrent un neutrino et un positron, formant un atome de deutérium, un isotope de l'hydrogène: $2\text{H} \Rightarrow \text{D} + e^+ + \nu$.

L'atome formé fusionne avec un atome d'hydrogène et libère un photon gamma, formant un atome d'hélium 3, un isotope de l'hélium: $\text{D} + \text{H} \Rightarrow \text{He-3} + \gamma$.

L'atome d'hélium3 fusionne avec un autre atome d'hélium3, formant deux atomes d'hydrogène et un atome d'hélium4: $2\text{He-3} \Rightarrow 2\text{H} + \text{He-4}$.

On estime aujourd'hui que le Soleil va encore «vivre» pendant 6 milliards d'années. Tout ce temps, il continuera à produire de l'énergie. L'énergie solaire est donc une source infinie d'énergie.

Deux grandes familles d'énergies rentrent dans cette catégorie décrites ci-dessous :

La première thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant [2]. Elle utilise de la chaleur transmise par rayonnement.

La deuxième photovoltaïque basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire (figure I.13). Elle utilise le rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.



Figure I.13 : Énergie solaire thermique

On peut la considérer comme une énergie propre puisque sa production énergétique à partir des modules PV n'engendre pas de déchets impliquant la pollution à la terre. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie puisque le rendement des panneaux PV est relativement faible [20]

L'énergie solaire est basée sur l'utilisation directe de la lumière du soleil. Le fait que le soleil soit la principale source de production d'énergie peut être définie comme une masse très lourde, 333

000 fois plus lourde que la Terre. Il contient également la plus forte proportion d'hydrogène, environ 70% d'hélium, 27% et le reste de 3% (Lithium, Carbone, Azote, Oxygène...).

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie les plus renouvelables dont dispose l'humanité. C'est une énergie propre, qui ne laisse aucun résidu négatif et dure éternellement tant que le soleil est là. Actuellement, la recherche et les expériences visent à exploiter l'énergie solaire et à la convertir en électricité. Cellules photovoltaïques, qui seront décrites en détail plus tard dans les temps modernes, l'énergie solaire est largement utilisée en la convertissant en énergie électrique et thermique grâce à la conversion photovoltaïque et à la conversion thermique de l'énergie solaire. Les adeptes de l'énergie solaire se plaisent à rappeler que toute forme d'énergie sur terre a pour origine le soleil.

Que ce soit les vents engendrés par les fluctuations de températures à la surface de la terre, le cycle de l'eau qui s'évapore sous ses rayons, la biomasse qui transforme son énergie en matière organique ou même les combustibles fossiles façonnés lentement par sa chaleur, il est indispensable à toute forme d'énergie terrestre [10].

I.4.2.5.1- ENERGIE SOLAIRE POUR PRODUIRE DE LA CHALEUR

1. Energie solaire passive pour se chauffer :

L'énergie solaire passive est une énergie abondante et non polluante qui suppose la conception de bâtiments et la mise en place des composants de construction appropriés.

Le chauffage solaire passif fonctionne comme suit : l'énergie lumineuse du Soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres est absorbée par les murs, les planchers et les meubles, puis libérée sous forme de chaleur. Des baies vitrées ainsi que la thermo-circulation permettent de faire diminuer la consommation en d'autres énergies.

Donc l'énergie solaire passive peut être utilisée avec profit tout en améliorant significativement le confort des occupants.

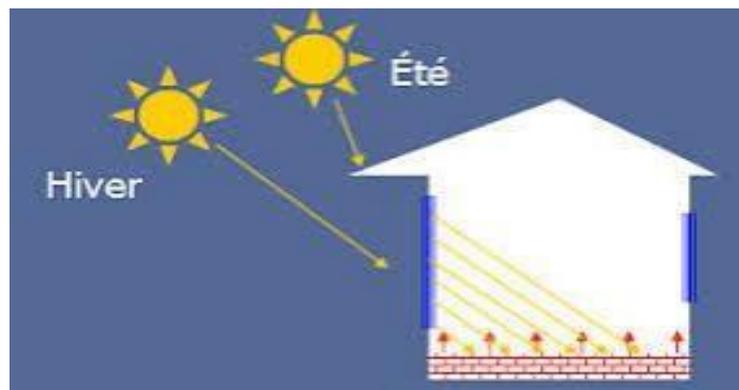


Figure I.14 : Chauffage de la maison par énergie solaire passive [26]

Donc Il s'agit d'utiliser le soleil pour réchauffer les habitations. Pour cela, les pièces orientées au sud sont conçues avec de grandes baies vitrées qui laissent entrer le rayonnement solaire. Ce chauffage appelé passif est utilisé dans les bâtiments bioclimatiques aux parois bien isolées. Nous pouvons faire l'essai, si on se place derrière une vitre qui reçoit bien les rayons du soleil. Vous sentiriez une chaleur très agréable.

2- Mise en marche du chauffe-eau solaire

Les différentes étapes sont :

A. Capturer l'énergie solaire : Le *capteur solaire* (1) comprend :

- Une plaque et des tubes métalliques noirs. Ils constituent l'absorbeur. Ils reçoivent le rayonnement solaire et s'échauffent.
- Un coffre rigide et thermiquement isolé entourant l'absorbeur. Sa partie supérieure,

vitrée, laisse pénétrer le soleil et retient la chaleur comme une petite serre.

B. Transporter la chaleur

C'est le rôle du *circuit primaire* (2). Étanche et calorifugé, il contient de l'eau additionnée d'antigel. Ce liquide s'échauffe en passant dans les tubes du capteur, et se dirige vers un ballon de stockage.

C. Restituer la chaleur

Là, grâce à un échangeur thermique (serpentin), le liquide cède ses calories solaires à l'*eau sanitaire* (3). Le liquide caloporteur, refroidi, repart vers le *capteur* (4) où il est chauffé à nouveau.

D. Stocker l'eau chaude

Le *ballon solaire* (5) : c'est la réserve d'eau sanitaire. L'eau chaude soutirée est remplacée immédiatement par la même quantité d'*eau froide du réseau* (6), réchauffée à son tour par le liquide caloporteur du circuit primaire.

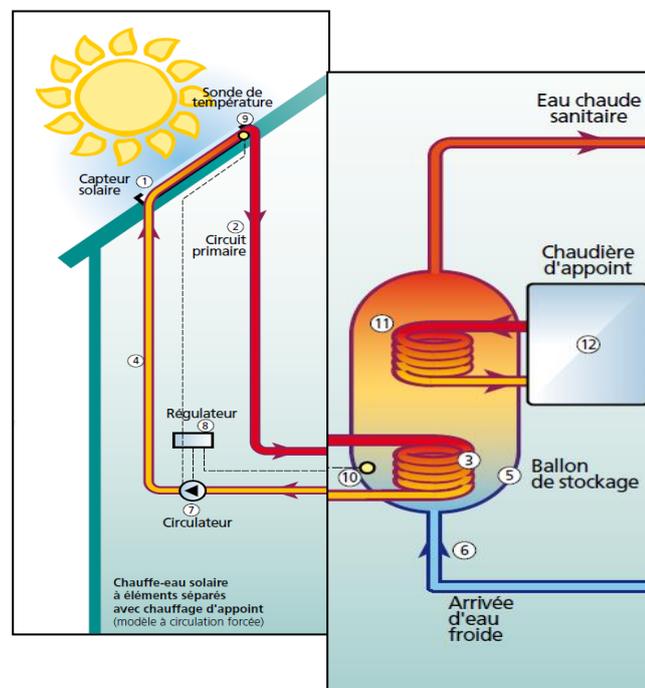


Figure I.15. Chauffe-eau solaire

E. Faire circuler le liquide caloporteur

La circulation du liquide peut être naturelle ou forcée :

➤ Dans le premier cas, le liquide caloporteur circule grâce à sa différence de densité avec l'eau du ballon. Tant qu'il est plus chaud, donc moins dense qu'elle, il s'élève naturellement par thermo-circulation. Le ballon doit être placé plus haut que les capteurs. Sur ce principe sont conçus les chauffe-eau solaires « en thermosiphon » ;

➤ Dans le second cas, une petite pompe électrique, le **circulateur** (7), met en mouvement le liquide caloporteur quand il est plus chaud que l'eau sanitaire du ballon. Son fonctionnement est commandé par un **dispositif de régulation** (8) jouant sur les écarts de températures : si la **sonde du ballon** (10) est plus chaude que celle du **capteur** (9), la régulation coupe le circulateur. Sinon, le circulateur est remis en route et le liquide primaire réchauffe l'eau sanitaire du ballon.

F. Pallier l'insuffisance d'ensoleillement

Le ballon est équipé d'un dispositif d'appoint qui prend le relais en cas de besoin (ensoleillement faible) et reconstitue le stock d'eau chaude. Il peut s'agir d'un **échangeur** (11) (appoint hydraulique) raccordé à **une chaudière** (12) (gaz, fioul, bois).

I.4.2.5.2- ENERGIE SOLAIRE POUR PRODUIRE DE L'ELECTRICITE

Pour capter l'énergie lumineuse du soleil et la transformer en électricité, on utilise des modules photovoltaïques. Ces modules solaires, aux reflets bleutés, sont constitués, dans la plupart des cas, d'un assemblage de cellules photovoltaïques en silicium. Le silicium est fabriqué à partir de la silice (notamment présente dans le sable), une matière abondante sur toute la Terre. Mais, il faut rendre ce silicium très pur ce qui nécessite un apport important d'énergie.

❖ *Energie solaire photovoltaïque:*

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.



Figure I.16 : Énergie solaire photovoltaïque

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

- Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m² et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.
- Les modules solaires poly-cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
- Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée [29]

L'énergie photovoltaïque est la conversion directe de lumière solaire en électricité. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien [30] Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après son nom on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt".

L'énergie photovoltaïque est la manière la plus élégante de produire de l'électricité. Elle se produit sans bruit, sans parties mécaniques, et sous pollution.

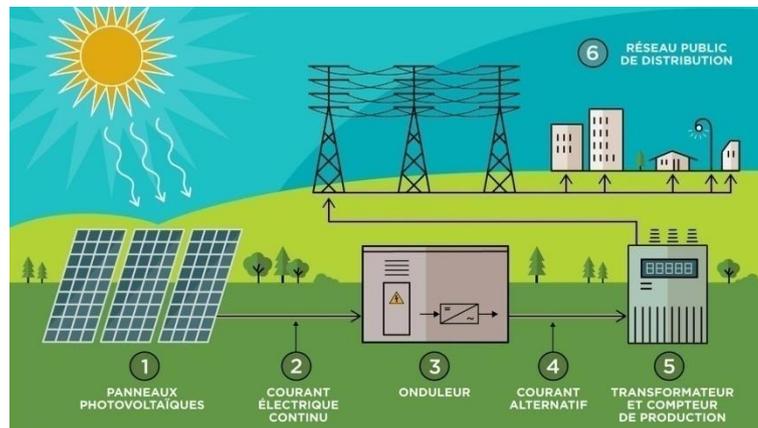


Figure I.17: Schéma production de l'électricité par énergie photovoltaïque [31]

Donc l'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable, elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie de rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque [31]

❖ *Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque*

L'électricité correspond à un déplacement d'électrons. Aussi, pour rendre les électrons plus mobiles, le silicium découpé en fine tranche est « dopé ».

La cellule photovoltaïque est en fait composée de deux zones : une zone dans laquelle une partie des atomes de silicium sont remplacés par des atomes de phosphore et une autre zone dans laquelle une partie des atomes de silicium sont remplacés par des atomes de bore. Il en résulte la création d'un champ électrique à l'interface de ces deux zones.

L'atome de phosphore possède un électron de plus que l'atome de silicium sur sa couche périphérique, et l'atome de bore en a un en moins.

Ainsi quand la lumière pénètre le silicium, elle apporte de l'énergie sous forme de photons. Les photons vont communiquer leur énergie aux atomes de silicium, conduisant à la création de charges électriques.

Les électrons de la zone dopée au phosphore vont rejoindre les trous de la zone dopée au bore via la connexion extérieure. Ils sont alors collectés par les grilles en métal. Au passage, leur déplacement crée un courant électrique.

Pratiquement, une cellule photovoltaïque en technologie cristalline est donc composée de plusieurs couches actives :

- Une couche « anti-reflet » sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons.
- Une grille conductrice avant « collectrice des électrons ».
- Une couche dopée n (généralement grâce aux atomes de bore) avec porteurs de charges libres négatifs (électrons).
- Une couche dopée p (généralement grâce aux atomes de phosphore) avec porteurs de charges positifs (trous).
- Un contact métallique arrière pour collecter les charges positives.

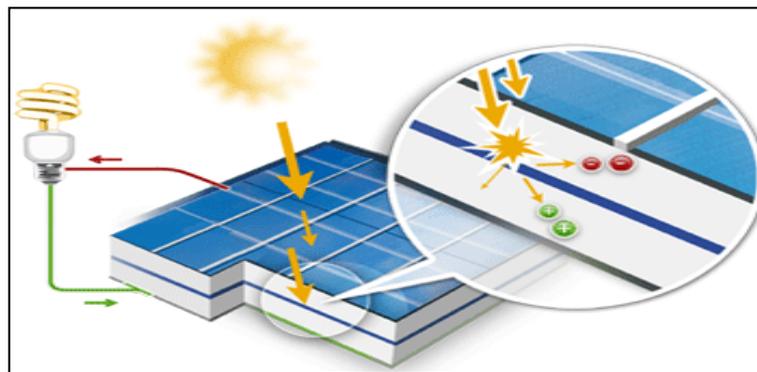


Figure I.18 : Principe du fonctionnement d'un GP

L'électricité photovoltaïque ainsi produite peut ensuite être injectée dans le réseau électrique général pour être utilisée ailleurs, ou stockée dans des batteries pour servir à des moments où il n'y a plus de soleil.

I.4.2.5.3- ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

Dans les conditions terrestres, le rayonnement thermique se situe entre 0,1 et 100 micromètres. Il se caractérise par l'émission d'un rayonnement au détriment de l'énergie calorifique du corps émetteur. Ainsi, un corps émettant un rayonnement thermique diminue son énergie calorifique et un corps recevant un rayonnement thermique augmente son énergie calorifique. Le soleil émet principalement dans le rayonnement visible, entre 0,4 et 0,8 micromètre. Ainsi, en entrant en contact avec un corps, le rayonnement solaire augmente la température de ce corps. On parle ici d'énergie solaire thermique.

Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée par exemple pour réchauffer ou sécher des objets (y compris le corps humain) en les exposant au soleil.

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaire),
- Indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou hélio thermodynamique)).

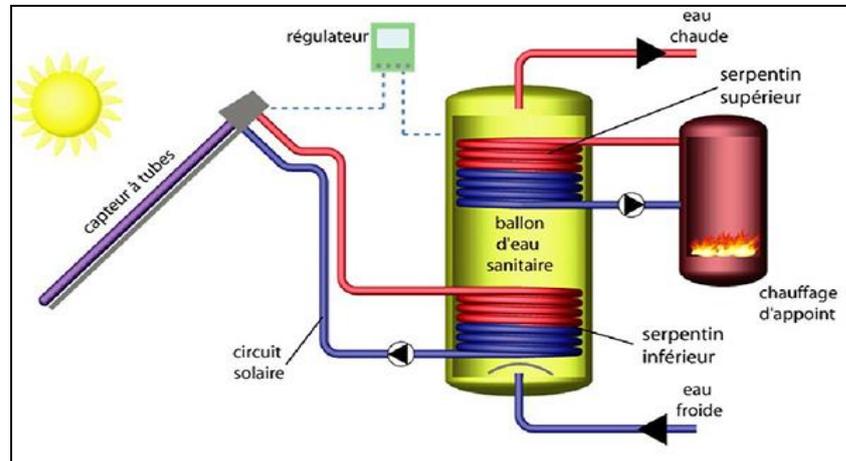


Figure I.19 : Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique peut également être utilisée pour la cuisine. Apparue dans les années 1970, la cuisine solaire consiste à préparer des plats à l'aide d'un cuiseur ou d'un four solaire. Les petits fours solaires permettent des températures de cuisson de l'ordre des 150 °C, les paraboles solaires permettent de faire les mêmes plats qu'une cuisinière classique à gaz ou électrique.

L'énergie solaire thermique désigne l'énergie récupérée à partir de la lumière du soleil par des capteurs solaires thermiques vitrés pour assurer le chauffage. Il existe deux types d'énergie solaire thermique :

- *L'énergie solaire thermique à base tension* : Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur ; Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus. Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct".

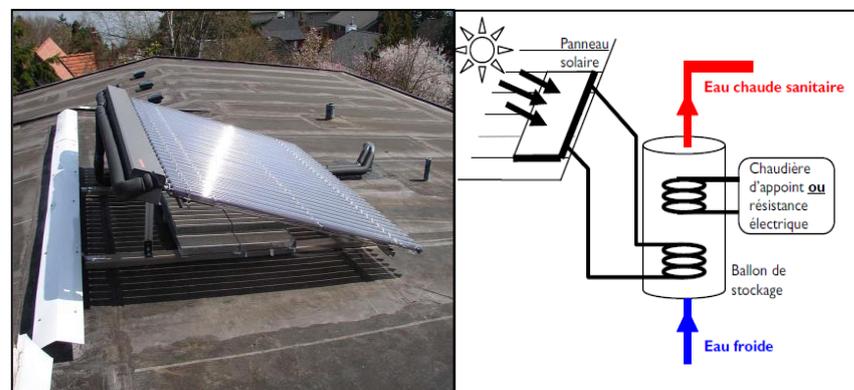


Figure I.20: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à base température [32]

- *L'énergie solaire thermique à haute tension* : La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 °C et 1000 °C. La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente-t-elle- même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'hélio-thermodynamique.

- Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration [31] Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.

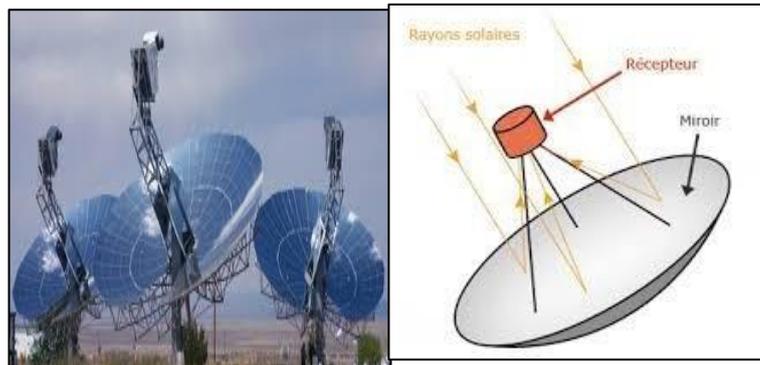


Figure I.21 : Centrale thermodynamique parabolique [31]

- Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.

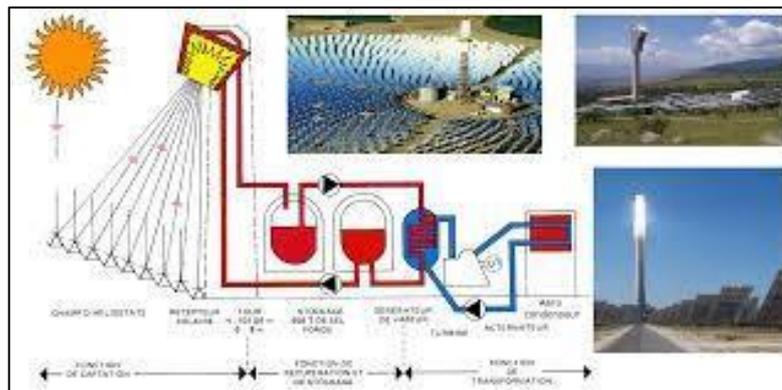


Figure I.22 : Centrale thermodynamique à tour [31]

- Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire.

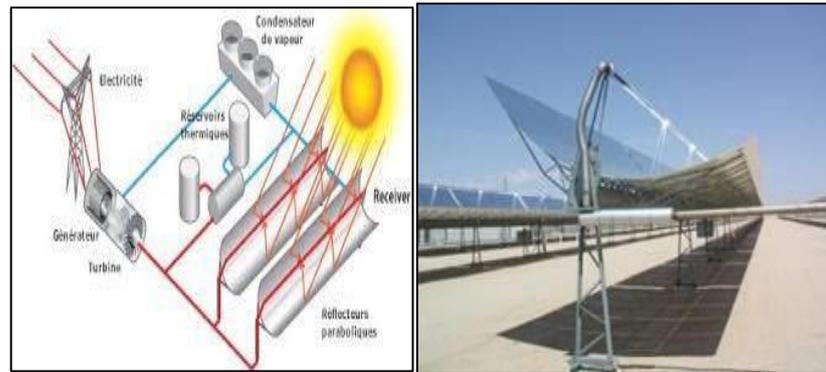


Figure I.23 : Centrale thermodynamique cylindro-parabolique.

I.4.2.5.4- ECLAIRAGE NATUREL

L'éclairage naturel est défini par l'apport lumineux fourni par le soleil, et est source de lumière dynamique, elle varie continuellement à travers la journée. Le système doit être activé manuellement.



Figure I.24 : Eclairage naturel [26]

I.4.2.6- ENERGIES MARINES

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir [33]

I.4.2.7- HYDROGENE

Dans le domaine de la recherche, une autre énergie a le vent en poupe. Très abondante, plus énergétique que le pétrole ou le gaz naturel, ni polluante, ni toxique, elle pourrait, du moins en théorie, répondre à tous nos besoins l'hydrogène tout ça à cause de ses avantages :

- L'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie propre.
- l'hydrogène peut être stocké et distribué dans une variété de formes.
- l'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles pour fournir de l'électricité de manière différente. Il peut être utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant tourner la machine. Il peut également être directement utilisé par un électro-réacteur chimique dans les piles à combustible pour produire de l'électricité. Pour les puissances élevées la conversion la plus efficace de l'hydrogène à l'électricité peut être atteinte en production combinée en chaleur [34]

I.5- CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, tel que l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique...etc.

Les avantages des sources d'énergie renouvelables sont nombreux car elles sont généralement propres, sûres et, surtout, elles existent en quantités illimitées. La décentralisation des énergies renouvelables est également un facteur positif très important dans le développement de certaines régions et localités. Ces sources d'énergie respectent l'environnement lors de leur fabrication, de leur fonctionnement et de leur fin de vie, ainsi que lors de leur démantèlement. Différent des combustibles fossiles).

Pour résumer, ces sources d'énergie renouvelables peuvent réduire considérablement les émissions de CO₂. Les recherches effectuées affirment qu'en théorie, la terre pourrait être entièrement alimentée par des énergies renouvelables, en utilisant seulement 500 000 kilomètres carrés de panneaux solaires. Cette vision de la production d'énergies renouvelables est a priori séduisante.

Chapitre II :
Energie Photovoltaïque

II.1- INTRODUCTION

Parmi les sources d'énergie renouvelables on trouve celle qui se produit par les panneaux photovoltaïques (PV), qui sont actuellement considérés comme la source d'énergie naturelle la plus utile, car elle ne produit aucun gaz à effet de serre au cours de la production d'électricité, elle est distribuée sur toute la terre, et participe en tant qu'un facteur primordial de tous les autres processus de production d'énergie sur terre [35]

II.2 - SOLEIL

II.2.1- DEFINITIONS ET GENERALITES

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 139.10^4 Km, situé à une distance moyenne de 149.600.000 km de globe terrestre Le soleil est composé de matières gazeuses, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 Km. [37]

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre ,150millions de kilomètres environ, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180 millions de giga watts, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux sources d'énergie fossiles (non-renouvelables) [31]

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse, de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et autres (2%). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein, $E = mc^2$. Cette réaction maintient la surface du Soleil à une température approximative de 5800°K .

L'énergie du Soleil est transmise sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque l'énergie a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à $1367 \text{ W}=\text{m}^2$. Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire [38] [39].

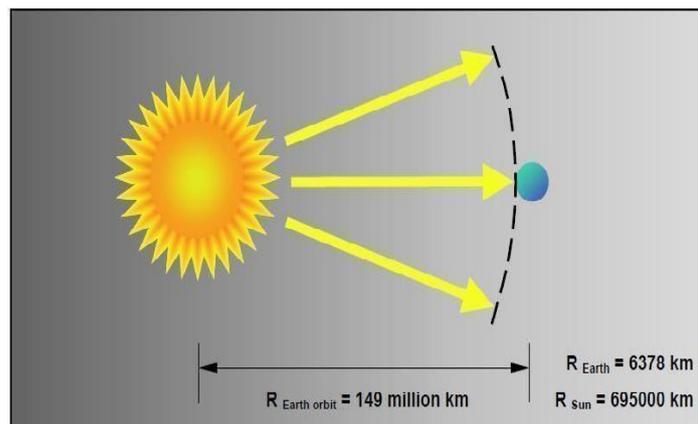


Figure II.1 : Distance entre le soleil et la terre [31]

En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil ($1,2.10^{17}$ Watts) pour combler ses besoins pour presque une année. Ce qui fait du soleil une source d'énergie inépuisable. Les panneaux solaires photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique.

L'irradiance est la mesure de la densité de puissance de la lumière du soleil, elle est mesurée en W/m^2 . L'irradiance est ainsi, une quantité instantanée. La constante solaire correspond à l'irradiance venant du soleil et reçue par la terre au-dessus de l'atmosphère.

L'irradiation est la mesure de la densité d'énergie de la lumière du soleil, elle est mesurée en kWh/m^2 . L'irradiation est souvent exprimée en «heures de puissance crête», qui correspond à la durée en heures, à un niveau d'irradiance constant de 1kW/m^2 , nécessaire pour produire l'irradiation quotidienne. Le nombre d'heures de puissance crête est obtenu par intégration de l'irradiance sur toutes les heures de clarté (*figure II.2*). La connaissance de cette valeur permet de quantifier rapidement les possibilités offertes par le générateur solaire. Un module de 50Wc fournira 150WhH dans un site correspondant à un ensoleillement de trois heures de puissance crête [40] [5] [41]

L'irradiance et l'irradiation dépendent de l'emplacement, des conditions climatiques et de la période de l'année. Elles dépendent aussi de l'ombre des arbres et des bâtiments qui pourrait exister et de l'inclinaison de la surface.

Dans le cadre de l'utilisation des panneaux photovoltaïques, il serait utile de pouvoir déterminer avec exactitude, la durée d'insolation à un endroit particulier en un jour précis.

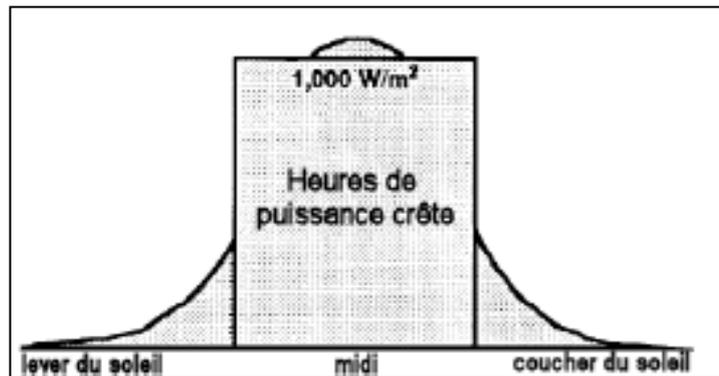


Figure II.2 : Heure de puissance crête [40] [5] [41]

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur $10\,000\text{ w/m}^2$ crête dans les zones tempérées et jusqu'à $14\,000\text{ W/m}^2$ lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [42] [43].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente un alternatif intéressant et bien adaptée à des besoins limités. Le développement dans le domaine de semi-conducteurs et l'électronique de puissance mènent à une activité de recherche importante afin d'améliorer et maximiser l'efficacité des modules photovoltaïques. Cette optimisation de configuration de commutation de convertisseur à améliorer le rendement de conversion électrique pour le raccordement des panneaux photovoltaïques (PV) au réseau ou à un périphérique de stockage pour une installation autonome [36].

Autrement dit l'énergie solaire désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.

II.2.2- POSITION DE SOLEIL

La position du soleil sur la sphère céleste est donnée par l'angle d'altitude γ et l'angle d'azimut ψ . Elle dépend de la date, la période du jour, et de la position géographique de l'observateur [44]

La date, en nombre de jours n , détermine l'angle solaire de déclinaison δ de la terre, qui est au point O en radian. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\delta = 23.45 \left(\frac{\pi}{180}\right) \times \sin\left(2\pi \times \frac{(284+n)}{365}\right) \tag{II.1}$$

Le temps de la journée, en heures, est le reflet d'un angle nommé angle horaire du soleil (ω), en radian équivalant à l'heure, qui est donné par l'équation suivante :

$$\omega = (TSV - 12h) \times \left(\frac{\pi}{12h}\right) \tag{II.2}$$

L'altitude γ et l'azimut ψ à un certain temps et date, à longitude Λ et à latitude φ , sont calculés à partir des équations (II.4) et (II.5) [44]:

$$\sin(\gamma) = \sin \varphi \sin \delta + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \tag{II.3}$$

$$\cos \omega = \frac{\sin(\varphi) \sin(\gamma) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\gamma)} \tag{II.4}$$

On remarque que l'azimut du soleil ψ est négatif le matin et positif l'après-midi. L'angle d'élévation γ entre le lever et le coucher du soleil est positif pour les emplacements de l'hémisphère nord ; négatif dans l'hémisphère sud.

La déclinaison estivale δ dans l'hémisphère nord est positive. L'angle de latitude géographique φ est positif dans l'hémisphère nord et négatif dans l'hémisphère sud (Figure II.3) [16]

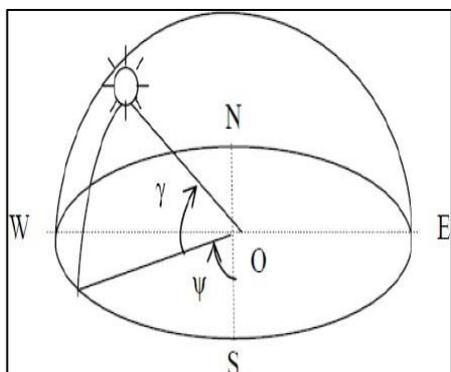


Figure II.3.a : Position du soleil observée d'après l'origine O

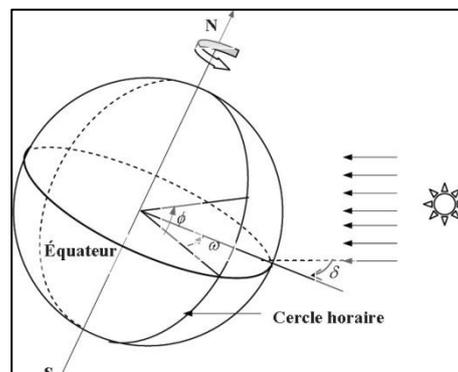


Figure II.3.b : Angle horaire et la déclinaison

II.3- ENERGIE SOLAIRE

II.3.1- HISTORIQUE ET ETAT ACTUEL

L'utilisation de l'énergie solaire est un fait très ancien. L'énergie solaire est à l'origine de la vie sur Terre: les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leur matière organique. Le but de cette sous-partie est de montrer que l'évolution des techniques d'exploitation de l'énergie solaire s'est faite en plusieurs phases.

Dans l'ère de *l'antiquité*, les Grecs et les Romains savaient utiliser l'énergie solaire. Pour allumer la flamme des jeux olympiques, ils utilisaient une sorte de miroir parabolique primitif, le skaphia, car pour eux seuls les rayons du Soleil étaient assez purs pour allumer cette flamme.

Le philosophe grec Socrate a enseigné l'architecture bioclimatique en expliquant que les maisons orientées au sud bénéficiaient de la chaleur du Soleil en hiver, tandis qu'en été, le soleil se retrouvait quasiment au dessus des toits laissant les maisons dans une extrême fraîcheur.

On raconte qu'Archimède réussit à enflammer des bateaux de la flotte romaine qui assiégeait Syracuse en, grâce à de nombreux miroirs géants en bronze polis tous orientés sur le même point du navire. Mais ce fait a fait débat au cours des siècles, certains savants jugeant en effet cette histoire improbable.



Figure II.4 : Incendie de la flotte romaine

Aujourd'hui on est pourtant presque sûr que cette histoire est un mythe, si l'on en croit l'expérience réalisée par des étudiants du MIT (Massachusetts Institute of Technology) qui ont réitéré l'expérience d'Archimède en **2005** et on réussit à enflammer en 10 minutes et à 30 mètres une reconstitution de bateau romain, qui cependant était sèche et immobile, ce qui a facilité l'enflamment.

Cependant, *au XVIIIème siècle*, le Siècle des Lumières voit renaître l'intérêt pour le Soleil et les premières études et expériences sur son énergie.

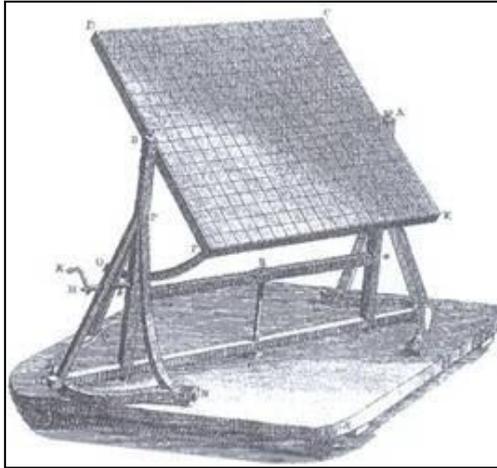


Figure II.5 : Miroir ardent

En **1747**, le botaniste Buffon met au point une machine capable d'enflammer des planches en bois à 48 mètres. Cet engin est composé de 168 petits miroirs plans de 16 centimètres de largeur sur 22 de hauteur qui réfléchissent les rayons du soleil en un point unique permettant une élévation de la température.



Figure II.6 : Four solaire

Ainsi, il parvient à enflammer du bois à une distance de 65 mètres, et de faire fondre de l'étain à 49 mètres, du plomb à 42 mètres, et de l'argent à 20 mètres. Le célèbre chimiste français **Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)** invente en **1774** un très puissant four solaire dans le but de faire fondre des métaux sans que ceux ci soient pollués par les produits des combustibles.

Pour cela il utilise deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du Soleil, et qui lui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C.

Le suisse **Horace Bénédicte de Saussure (1740; 1799)** invente en **1767** le tout premier four solaire qu'il appelle "boîte chaude" qui lui permet de démontrer l'effet de serre. Il obtient une température de 160°C.

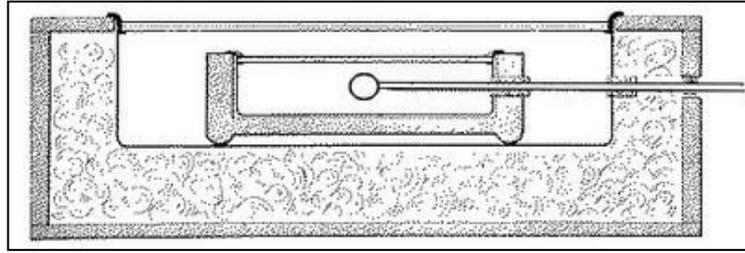


Figure II.7 : Coupe transversale d'une "boîte chaude" avec thermomètre

Par contre, le *XIX^{ème} siècle* est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique. En **1839**, le physicien **Alexandre Edmond Becquerel** découvre par hasard l'effet photovoltaïque : En plaçant deux électrodes métalliques dans un liquide conducteur et en exposant l'ensemble au rayonnement solaire, on peut mesurer une faible tension. Ce fut donc la première fois que l'énergie solaire fut transformée en énergie électrique.

*/ En **1872**, l'ingénieur suédois **Charles Wilson** construit un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m², ce distillateur produisit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à un prix minime.

*/ En **1875**, l'industriel allemand **Werner von Siemens** décrit le principe d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le principe photovoltaïque devant l'Académie des Sciences de Berlin. Le professeur français **Augustin Mouchot** inventa le principe de poursuite du Soleil avec un capteur à concentration. En **1873**, grâce à une subvention du conseil général de Tours il construit une machine de 4m² qu'il présente en **1875** à l'Académie des Sciences.

*/ En **1877**, c'est une subvention du conseil général d'Alger qui lui permet de construire un nouveau capteur de 20m² couplé à une machine à vapeur qu'il expose lors de l'Exposition Universelle de Paris en **1878**. L'engin, d'une puissance d'un demi-cheval (368 W), permet d'imprimer le journal de l'Exposition Le Soleil à raison de 500 exemplaires/heure. La machine eut un grand succès et fut primée. **Augustin Mouchot** avait déjà deviné que les énergies fossiles que les occidentales commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il préconisait et étudiait l'énergie solaire qui selon lui était déjà l'énergie du futur. C'est ce qu'il écrivait dans le livre qu'il publiait en **1869**, La Chaleur Solaire et ses Applications Industrielles.

*/ En **1883** : La première cellule en sélénium fut construite par l'américain **Charles Fritts** ($\eta=1\%$) : Dans les années **1880**, l'américain **Charles FRITTS** mit au point les premières cellules solaires au sélénium. Les investigations sur le silicium, les tentatives pour l'isoler, le purifier, mettre en œuvre ses propriétés physiques, commencèrent avant **1910**.

A partir du *XX^{ème} siècle*, une nouvelle voie de l'exploitation de l'énergie solaire s'ouvre alors. Il faudra attendre **1900** pour qu'**Einstein** explique cet effet et en **1910** pour qu'il soit mis en évidence par **Robert Andrew Millikan**. En **1904** : Albert Einstein (**1879-1975**) expliqua cet effet et reçut le prix Nobel en **1921** : **Einstein** en expliqua les mécanismes en **1912**, mais ce n'est qu'entre **1930** et **1945** qu'un premier procédé industriel de purification par refroidissement progressif du silicium fondu fut mis au point.

*/ Après **1900**, toutes les technologies découvertes au siècle précédant sont améliorées. De nouvelles découvertes sont faites et dès **1970** le solaire connaît un vif regain d'intérêt. Les premières centrales solaires sont construites, et les premières applications individuelles apparaissent.

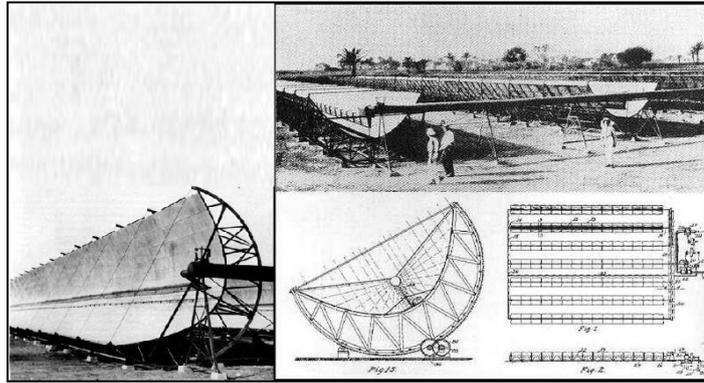


Figure II.8 : Plans et Photos de la centrale thermique de Méadi en 1913 (Egypte)

Le physicien anglais **Charles Vernon Boys** (1855; 1944) est l'inventeur du capteur cylindro-parabolique. Son invention servit pour la première fois en Egypte, à Mead, où on construisit en **1912** une centrale thermique qui fonctionnait sur le principe de **Boys**, permettant d'irriguer une grande surface de cultures. Cette centrale était composée de 5 réflecteurs de 60 mètres de long pour une ouverture de 4 mètres qui couplés à une pompe permirent de pomper plus de 2000 litres d'eau par minute à partir de 1913, irriguant 200 hectares de champs de coton. Des installations similaires à celle-ci furent prévues dans le Soudan anglais et dans les colonies africaines de l'empire Allemand, mais ces centrales restèrent à l'état de projet à cause du début de la seconde guerre mondiale.

A partir de **1920**, aux Etats-Unis, des particuliers installent chez eux des chauffe-eaux solaires, et des « Crystal House », maisons chauffées uniquement grâce à l'apport énergétique du Soleil, sont construites.

Le français Félix Trombe (1906; 1985) invente le premier four solaire à concentration: en **1944**, lors de leur fuite, les allemands abandonnent un projecteur de DCA. Ces projecteurs très puissants qui permettaient de repérer les avions ennemis dans le ciel nocturne sont des miroirs paraboliques orientables au foyer duquel on plaçait une puissante ampoule ce qui donnait un faisceau de lumière parallèle.

Trombe décide d'utiliser de réutiliser le projecteur abandonné à l'envers et de jour. Le projecteur est placé de telle manière que les rayons du soleil sont concentrés au foyer du miroir. Quand on place une bûche de bois au niveau du foyer celle-ci s'enflamme instantanément. Il est le directeur de la construction d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50 kW à Mont-Louis dans les Pyrénées-Orientales. Puis il dirige celle du four solaire d'Odeillo d'une puissance de 1000 kW. C'est le plus puissant four solaire du monde. Il est utilisé par l'industrie.

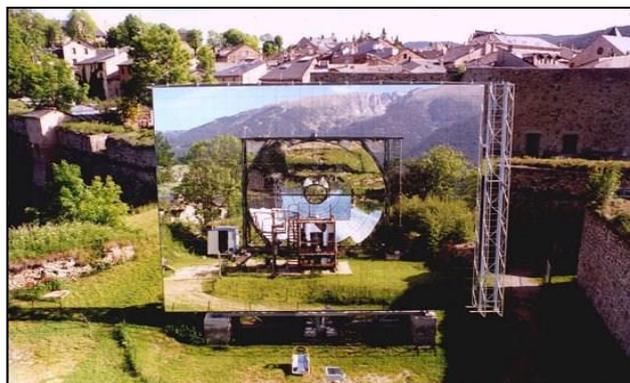


Figure II.9 : Four de Mont-Louis

L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années **1950** lors des premiers lancements spatiaux de satellites ;

Il faut attendre **1954** pour voir la création de la toute première cellule photovoltaïque au silicium. Elle est mise au point par les américains **Gerald Pearson, Daryl Chapin** et **Calvin Fuller**, des laboratoires de la Bell Téléphone.

*/ En **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

*/ Toujours en **1954**, des chercheurs des laboratoires américains **Bell, Darryl Chapin** et **Carl Fuller**, annoncèrent au public que des cellules solaires à base de silicium avaient été obtenues avec un rendement de 6%. Bien que ces scientifiques arrivèrent par la suite à fabriquer en laboratoire des cellules à 15% de rendement, ils rencontrèrent des obstacles économiques et les laboratoires et abandonnèrent leurs efforts de recherche pour diminuer les coûts de fabrication [38]

Mais la technologie mise au point est hors de prix: non seulement elle à un faible rendement mais en plus elle nécessite l'utilisation du silicium très cher à l'époque. Il faut attendre **1958** et l'invention d'une cellule d'un rendement de 8% pour son premier emploi par l'industrie aérospatiale.

*/ En **1958**, le premier satellite équipé de cellules photovoltaïques, est donc lancé: 1ère utilisation photovoltaïque dans un satellite artificiel américain **Vanguard 1** ($\eta=9\%$ et 0,1 W) ;

*/ En **1963** : Première application terrestre dans un phare au Japon (242 W) ;

*/ Les crises économiques des années **1970** (La flambée des prix du pétrole, **1973**), en **1973** : 1^{ère} maison photovoltaïque 'Solar One' fût construite à l'université de Delaware aux USA : La première maison alimentée en électricité par des cellules photovoltaïque ;

*/ L'utilisation des cellules solaires débute dans le domaine spatial. Les recherches ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique de **1973** pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

*/ Puis le choc pétrolier de **1980** donne un grand élan aux technologies solaires devenant d'un coup moins chères. De nombreux projets de centrales thermiques solaires apparaissent dans le monde, comme la centrale Thémis en France dont la construction s'étale **1980 à 1982**.



Figure II.10 : Première voiture solaire

*/ En **1983** : En Australie, La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4.000 km, Indépendamment du pétrole, de nombreux petits appareils portatifs sont équipés de cellule photovoltaïque comme des calculatrices ou des montres.

Mais avec le contre-choc pétrolier de **1986**, de nombreux projets sont arrêtés et en France la centrale Thémis est fermée.

*/ En **1992** : 1^{ère} installation Photovoltaïque reliée au réseau électrique en France (900 W) ;

*/ En **2015** : Plus de 200 GWc de panneaux solaires installés dans le monde.

Aujourd'hui, dans un contexte avéré de réchauffement climatique et de flambée des prix des énergies fossiles, l'énergie solaire est de nouveau propulsée sur le devant de la scène.

L'exploitation du solaire par l'homme s'est donc déroulée en 3 phases:

- La découverte (Antiquité), et redécouverte (XVIII^{ème} siècle);
- L'expérimentation (XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles);
- Le développement à grande échelle des moyens d'exploitation (XIX^{ème} et XX^{ème} siècles).

Et elle n'est pas un fait récent, contrairement à ce que nous avons souvent tendance à le penser. [45]

II.3.2- ENERGIE SOLAIRE EN ALGERIE

Dans beaucoup de pays, qui souvent ne bénéficient pas d'un ensoleillement aussi favorable qu'en Algérie, l'énergie solaire gagne en signification à une vitesse exponentielle. La croissance moyenne mondiale du marché a été de 33% au cours des dix dernières années. Ce qui concerne notre pays, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et Sahara.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays. Si on prend une autre échelle d'exportation d'importantes quantités de pétrole et de gaz vers l'Europe, l'énergie solaire que peut l'Algérie produire peut satisfaire la totalité des besoins de l'Europe en électricité. Bien que les conditions géographiques, climatiques et météorologiques soient très favorables, l'énergie solaire en Algérie n'a pas encore percé et ce marché demeure encore presque vierge [46]

II.3.3- RAYONNEMENT SOLAIRE

II.3.3.1-INTRODUCTION

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2µm) à l'infrarouge (2.5µm). L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux

Prévenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé [47]

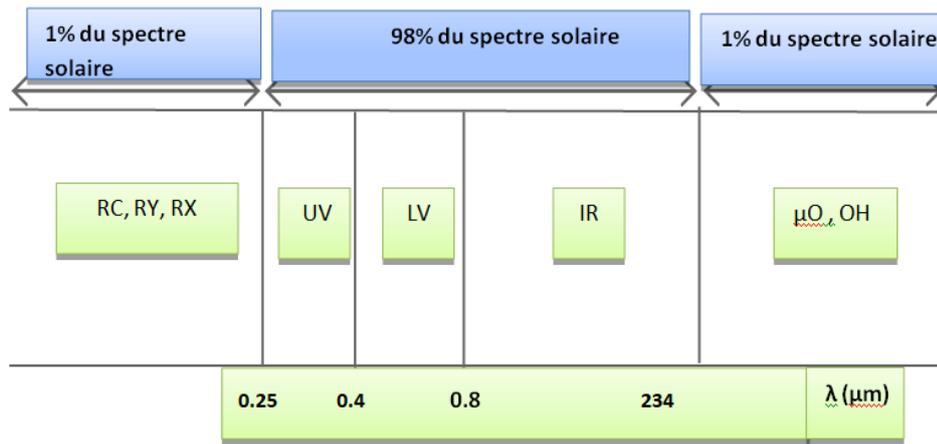


Figure II.11 : Spectre de rayonnement solaire [47]

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10⁶ Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10⁶ GW, c'est pour cela que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie non-renouvelables.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 220 à 10000 nm.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets (< à 400 nm) ;
- 47 % dans la bande visibles (400 à 800 nm) ;
- 44 % dans la bande des infrarouges (> à 800 nm).

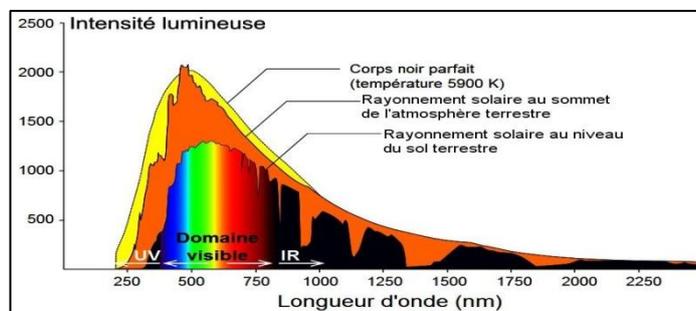


Figure II.12.a : Réponse spectrale d'une cellule PV. [9]

Autre représentation :

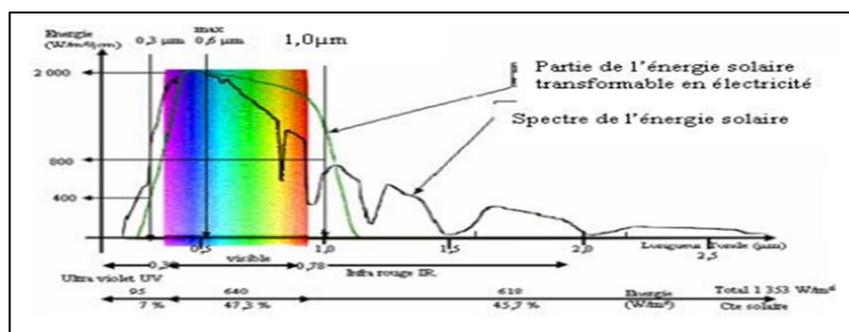


Figure II-12.b : Réponse spectrale d'une cellule Photovoltaïque

Au cours de ces dix dernières années, **ce spectre** a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (**ISO 9845-1 :1992**) et la société américaine de test et de matériaux (**ASTM E 892-87 :1992**) ont fixées le flux de standardisation Es à 1000 W/m².

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.). [9]

Donc le rayonnement solaire est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'**ultraviolet** lointain comme les **rayons gamma** aux **ondes radio** en passant par la **lumière visible**¹. Le rayonnement solaire contient aussi des **rayons cosmiques** de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées.

Une partie de ce rayonnement est filtrée par la **couche d'ozone** avant d'atteindre la **troposphère**.

II.3.3.2- CARACTERISTIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

II.3.3.2.1-ENERGIE RENOUVELABLE SOLAIRE

Le Rayonnement Solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée et la plus abondante sur la terre. Le soleil décharge en permanence une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire où la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie rayonnée dans l'espace [48]

II.3.3.2.2- DIFFERENTS TYPES DES RAYONNEMENTS SOLAIRES

➤ **RAYONNEMENT DIRECT :**

C'est un rayonnement reçu directement du soleil : Ceux sont des rayons qui proviennent de l'atmosphère (Surtout les rayonnements «**Ultra-violet** » mesurés grâce au **Pyrhéliomètre** »).

La conversion du rayonnement direct E_d est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [14, 15] Ab. Le rayonnement direct est converti pour un plan avec un angle d'azimut α et d'inclinaison β selon l'équation suivant :

$$E_d = E_d \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \quad (\text{II.5})$$

➤ **RAYONNEMENT DIFFUS**

C'est un rayonnement provenant de toute la voûte céleste : Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie de rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et qui pourra être mesuré par un **Pyranomètre** avec écran masquant le soleil.

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols [44]

➤ RAYONNEMENT REFLECHI (ALBEDO)

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albedo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (Eau, neige, etc.).

➤ RAYONNEMENT GLOBAL

La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement Réfléchi par le sol et les objets se trouvant à la surface : Ce rayonnement est mesuré par un *Pyranomètre* ou un *Solari mètre* sans écran.

Autrement dit le rayonnement global, sur une surface inclinée, est la somme des rayonnements: Direct, Diffus et Réfléchi.

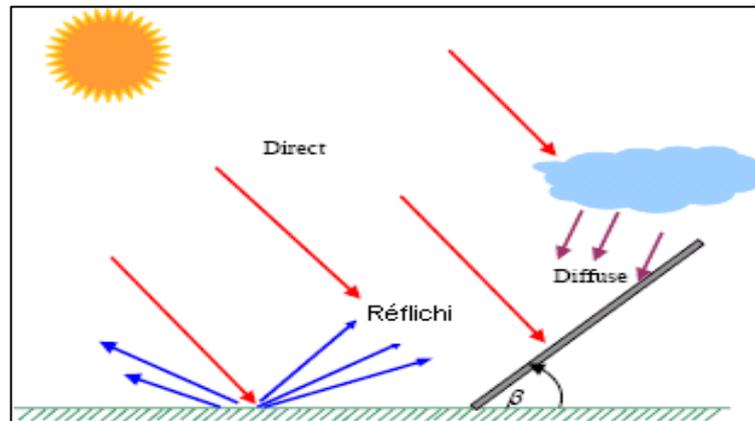


Figure II.13: Trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

II.3.3.2.3- MASSE D'AIR

La Masse d'Air « AM » est la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est calculée en fonction de l'angle entre le soleil et le Zénith [Boudghene [49]

$$AM = \frac{1}{\sin\theta} \quad (\text{II.6})$$

Où θ : est l'angle entre la position du soleil et le Zénith exprimé en degré.

II.3.4- SPECTRE SOLAIRE

La lumière solaire est composée toutes sortes de rayonnements de différentes couleurs caractérisées par une gamme de longueur d'ondes. Les photons « Grains de lumière », qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'énergie qui est spécifique à la longueur d'onde et donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h * \nu \quad (\text{II.7})$$

Où - h : Constante de Plank.
 - ν : Vitesse de lumière.
 - c : Vitesse de Lumière.
 - λ : Longueur d'onde.

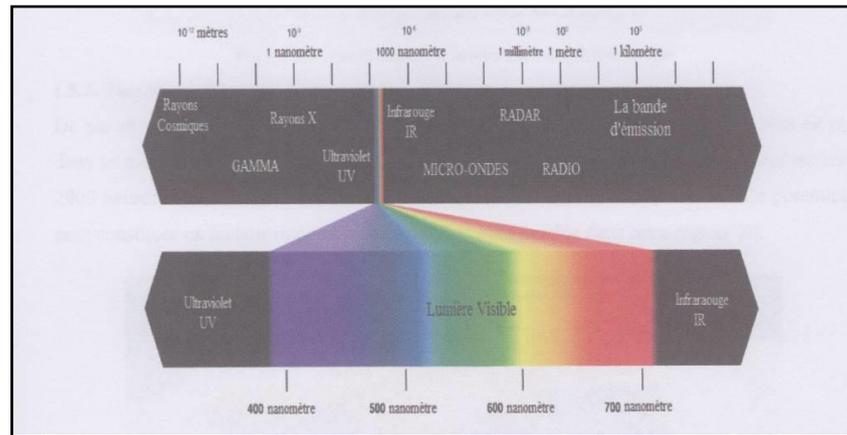


Figure II.14: Analyse Spectrale Solaire

Sur Terre, l'atmosphère (à travers le dioxyde de carbone, l'Ozone, la vapeur d'eau, ect....) absorbe en grande partie les rayonnements Infrarouge «IR» et les Ultra-violet «UV» et peu de lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible. [50]

II.3.5- POTENTIEL SOLAIRE

II.3.5.1- POTENTIEL SOLAIRE MONDIAL

Les zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire concentrée sont celles où l'ensoleillement direct est supérieur à 1900 kWh/m²/an. Les régions adaptées sont nombreuses et enferment un potentiel en énergie très important. Elles se situent principalement en Afrique du Nord et celle Septentrionale, en proche et moyen orient, en Australie et dans le Sud-ouest des Etats Unis, En Inde ou encore en Asie Centrale. [51]

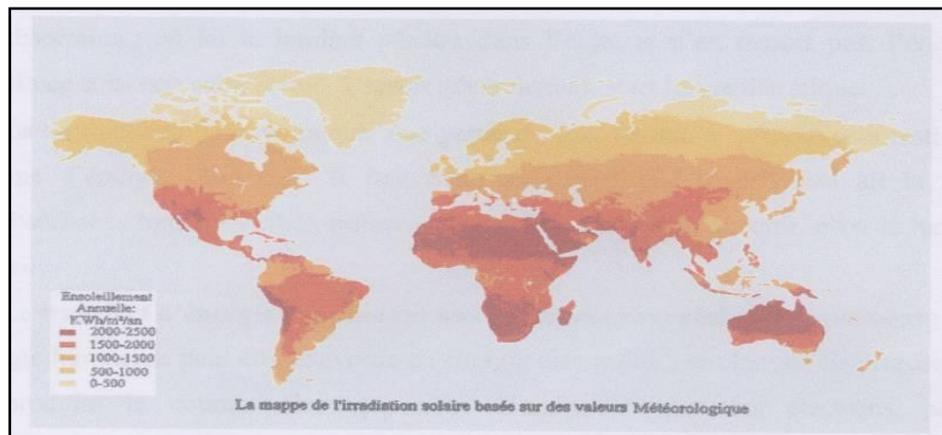


Figure II.15 : Ensoleillement Solaire Mondial

II.3.5.2- POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE

De part de situation géographique, l'Algérie possède un gisement Solaire très élevé dans le monde. La durée de l'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures en hauts plateaux et Sahara. Ce potentiel peut constituer un facteur très important de développement durable dans ces régions [51]

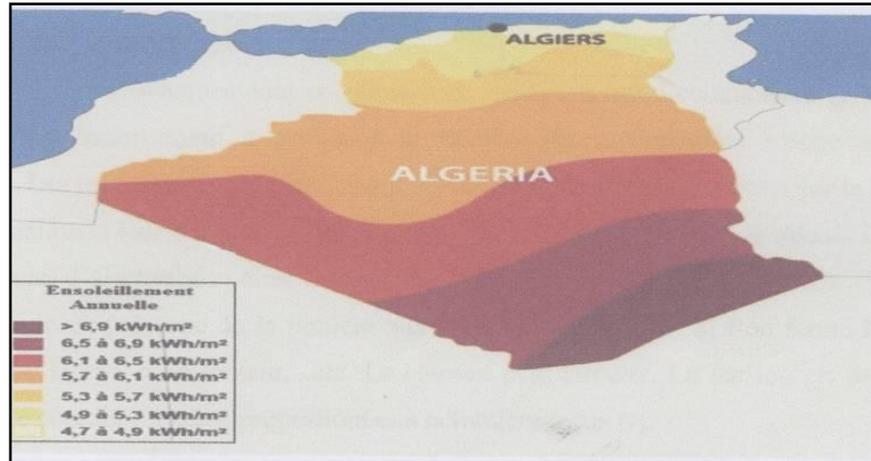


Figure II.16: Ensoleillement Solaire en ALGERIE exprimé en kWh/m²/an

Dans beaucoup de pays, qui souvent ne bénéficient pas d'un ensoleillement aussi favorable qu'en Algérie, l'énergie solaire gagne en signification à une vitesse exponentielle. La croissance moyenne mondiale du marché a été de 33% au cours des dix dernières années.

En ce qui concerne notre pays, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde (voir les figures II-18, II-19, II-20 et II-21) de son emplacement géographique. La durée d'insolation (d'ensoleillement) sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et Sahara.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national(voir **tableau II.1**), soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2650 kWh/m²/an au Sud du pays.

Tableau II.1 : Potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh / m ² / an)	1700	1900	2650

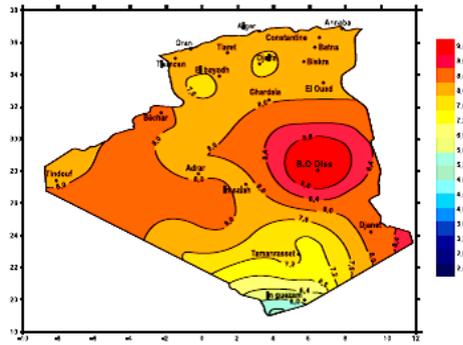


Figure II.17 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontale au mois de Juillet

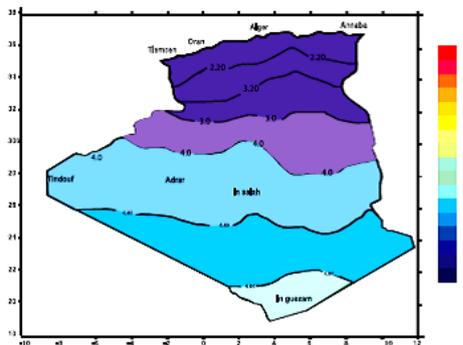


Figure II.18 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontale au mois de Décembre

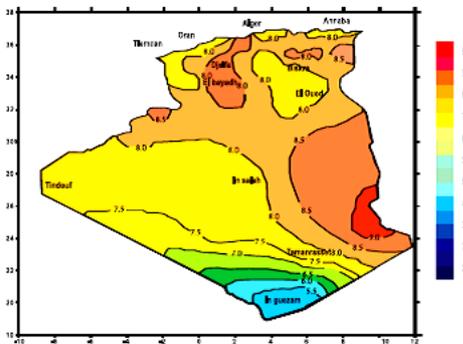


Figure II.19 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan normal au mois de Juillet

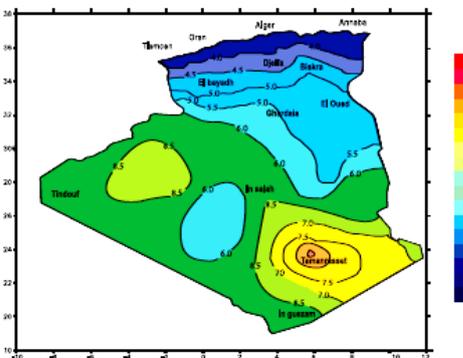


Figure II.20 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan normal au mois de Décembre

Si on prend une autre échelle d'exportation d'importantes quantités de pétrole et de gaz vers l'Europe, l'énergie solaire que peut l'Algérie produire, peut satisfaire la totalité des besoins de l'Europe en électricité. Bien que les conditions géographiques, climatiques et météorologiques soient très favorables, l'énergie solaire en Algérie n'a pas encore percé et ce marché demeure encore presque vierge [46]

II.3.6- ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.



Figure II.21 : Energie solaire photovoltaïque

II.4- ECLAIREMENT ET IRRADIATION

II.4.1-IRRADIATION

L'irradiation est l'énergie reçue par une surface.

Elle s'exprime en $J m^{-2}$ (joule par mètre carré). Symbole H .

D'autres unités peuvent être utilisées comme le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré). [31]

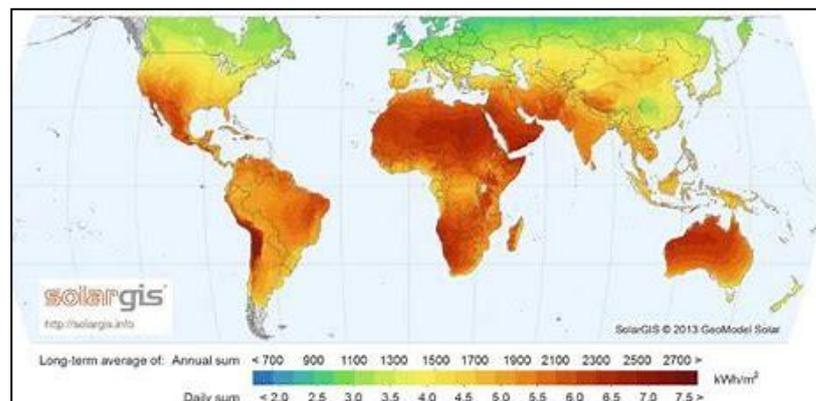


Figure II.22 : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle En $kWh/m^2/jour$ sur un plan horizontal [31]

II.4.2-ECLAIREMENT

L'éclairement est défini comme la puissance reçue par une surface, exprimée en W/m^2 (Watts par mètre carré). Notation G.

A noter qu'en plus des effets atmosphériques, le rayonnement solaire dépend :

- Orientation et pente de la surface.
- La latitude du lieu et son niveau de pollution.
- Période de l'année et heure de la journée à prendre en compte.
- La nature de la couverture nuageuse.

II.5- ABSORPTION DE LA LUMIERE

La lumière est composée de particules (les Photons) qui peuvent pénétrer dans certaines matières et même passer au travers. En général, un rayon lumineux, qui arrive sur une matière solide, subit principalement trois événements optiques qui sont :

- La réflexion : Dans le cas où la lumière est renvoyée par la surface du solide.
- La transmission : Dans ce cas la lumière traverse le solide.
- L'absorption : Cette fois-ci, la lumière pénètre dans le solide et n'en ressort pas.

L'énergie est restituée sous une autre forme à savoir l'énergie calorifique (Thermique).

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restitué sous forme d'énergie électrique : Donc au départ, il faut que le matériau choisi ait la capacité d'absorber la lumière visible étant donné, ce que l'on cherche à convertir c'est bien la lumière provenant du soleil.

II.6- TRANSFERT DE L'ENERGIE DES PHOTONS AUX PARTICULES CHARGÉES ELECTRIQUEMENT

L'énergie lumineuse peut être convertie en énergie électrique : Les charges électriques, qui vont produire du courant électrique sous l'effet d'illumination (Embrassement), sont les électrons : Particules élémentaires chargées négativement (e^-). Les photons vont absorber leur énergie aux électrons des couches électroniques périphériques, ce qui leur permet de se libérer de l'attraction de leur noyau : C'est l'effet photovoltaïque. L'effet photovoltaïque (émission des électrons par un métal sous l'action des radiations lumineuses) recouvre plusieurs phénomènes d'interaction de la matière où les photons cèdent leur énergie aux électrons. Les électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si ils sont attirés (les électrons) vers l'extérieur pour les faire acheminer dans un circuit.

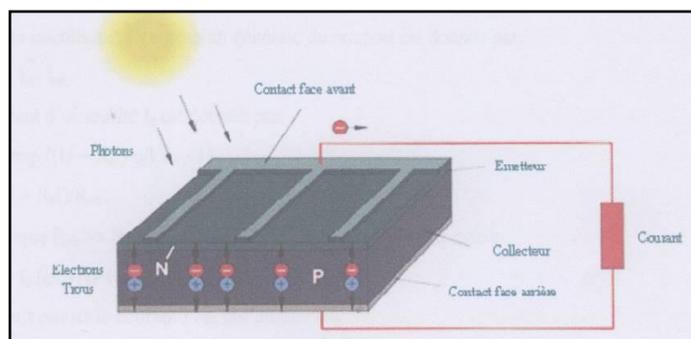


Figure II.23 : Représentation Schématique d'une Cellule Solaire

II.7- AVANTAGES ET LES INCONVENANTS DE L'ENERGIE « PV »

II.7.1- AVANTAGES

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on peut citer :

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont :

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre.
- Propreté durant son utilisation : Pas de pollution.
- Grande fiabilité : Une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
 - Peu d'entretien Son coup de maintenance bas : Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
 - Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts).
 - Utilisation autonome et décentralisée : L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments. Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.
 - Sa structure fixe.
 - Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
 - L'installation ne produit aucun bruit : Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
 - Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière : L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année. Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale ; [52]
 - Leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet. [8]
 - Ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.

Bien que ces avantages soient intéressants, il y a aussi des inconvénients

II.7.2- INCONVENIENTS [52]

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces.
- Technologie coûteuse, coût élevé de l'installation.
- Facteur de charge faible.
- Stockage difficile.
- Difficulté à recycler les composants du système.
- Investissement élevé dépendant des décisions politiques.
- Rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- Puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

II.8- EFFET « PHOTOVOLTAÏQUE » [53]

II.8.1- TERME « PHOTOVOLTAÏQUE (PV) »

Le terme "Photovoltaïque" fait référence au processus physique de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique en transférant l'énergie des photons aux électrons dans un matériau.

Le préfixe Photo vient du mot grec "phos", qui signifie lumière. "Volt" vient du nom de famille d'Alessandro Volta (1745-1827) qui inventa la pile électrique en **1800** et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. Physicien qui a contribué à l'étude de l'électricité « lumière électricité ». Ainsi, photovoltaïque (PV) signifie littéralement photoélectrique.

Le principe du photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (pour cette explication, il a remporté le prix Nobel de physique en 1921) [16].

II.8.2- DEFINITIONS ET GENERALITES

C'est la conversion de l'énergie qui transporte les photons de la lumière lorsqu'ils rentrent en collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités, en énergie électrique capable de créer un courant d'électrons à travers un circuit extérieur, en réalisant un travail utile. La clé pour produire un courant électrique utile est d'arriver à extraire les électrons libérés. Un procédé pour faire cela est d'introduire dans le matériau semi-conducteur des éléments chimiques qui contribuent à produire un excès d'électrons et de trous.

Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation au semi-conducteur est achevé.

Un dopant approprié pour le silicium est le bore. La structure créée s'appelle un semi-conducteur de type P (positif).

Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Le semi-conducteur est dit de type N (négatif).

Si les photons de la lumière incidente communiquent de l'énergie aux électrons du semi-conducteur, quelques électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, en étant expulsés hors du semi-conducteur dans un circuit extérieur. Ceci génère un courant électrique. Les électrons, après avoir parcouru le circuit externe, retournent dans le semi-conducteur par la face opposée.

Le matériau semi-conducteur ne stocke donc pas d'énergie électrique mais la génère, En transformant l'énergie incidente.

La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule de silicium de 26 %, mais les cellules commerciales obtenues de manière industrielle ne montent pas au dessus de 17 %. Ces valeurs, impliquant une limitation sur la puissance électrique pouvant être obtenue, montrent que seulement une petite partie de l'énergie solaire peut générer d'électricité.

II.8.3- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés":

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [54].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen des cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fût observée la première fois, en **1839**, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n'est qu'au cours des années **1950** que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [54].

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité. [55].

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir 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. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **N** et dopée de type **P**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **N** diffusent dans le matériau **p**. La zone initialement dopée **N** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **P** devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **N** et les trous vers la zone **P**. Une jonction (dite **PN**) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones **N** et **P**, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir engendrant ainsi une paire électron-trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **N** rejoignent les trous de la zone **P** via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule ; l'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité.

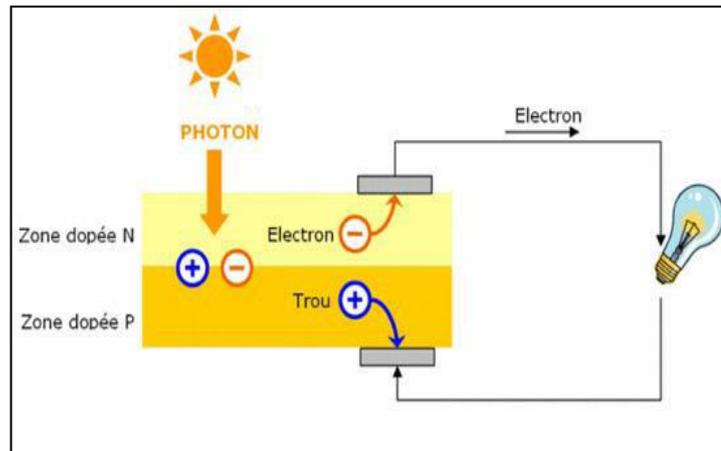


Figure II.24.a : Effet photovoltaïque [56].

Autrement dit la lumière produite par le soleil est composée de photons. Ces photons vont heurter la surface du panneau solaire et les électrons présents vont alors se mettre en mouvement dans une direction particulière permettant de créer un courant électrique continu.

Ce courant va ensuite être recueilli par des fils métalliques appelés «strings » qui vont transporter le courant de cellule en cellule. Le courant va ainsi s'additionner lors de son passage entre chaque cellule. Ce courant sera ensuite recueilli vers la centrale photovoltaïque.

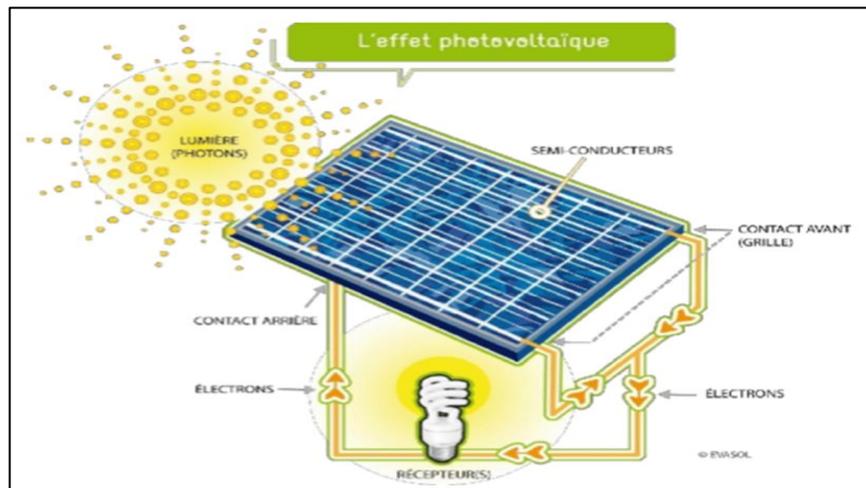


Figure II.21.b : Effet photovoltaïque (Autre représentation)

II.9- DOMAINE D'APPLICATION DU PHOTOVOLTAÏQUE

Le tableau ci-dessous résume le domaine d'application des différents types cellules photovoltaïques avec leur rendement quant à l'utilisation :

Tableau II.2 : Domaine d'application des différents types cellules photovoltaïques avec leur rendement

<i>Types de cellules</i>	<i>Rendement des cellules</i>			<i>Domaine d'Application</i>
	<i>Théorique</i>	<i>Pratique</i>	<i>Disponible</i>	
<i>Silicium monocristallin</i>	27,0 %	24,7 %	15 % - 18 %	Modules de grandes dimensions pour les Toits, les Façades, les Appareils de faibles puissances et les Espaces (Satellites)
<i>Silicium polycristalin</i>	27,0 %	19,8 %	13 % - 16 %	Modules de grandes dimensions pour les Toits, les Façades, les Générateurs de toutes tailles (reliés au réseau ou aux sites isolés)
<i>Silicium amorphe</i>	25,0 %	13,0 %	6 % - 8 %	Appareils de faibles puissances, Production d'énergie embarquée (les Calculatrices, les Montres..), Modules de grandes dimensions (Intégration dans les Bâtiments)

II.10- AVENIR DU PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie photovoltaïque, est une jeune énergie renouvelable dans la production de l'énergie électrique. Elle pourrait devenir l'énergie du future, parce que l'électricité qu'elle produite respecte globalement l'environnement grâce à sa faible émission de CO₂, ce qui participe à diminuer les émissions à effet de serre.

L'industrialisation du photovoltaïque, à une échelle significative, n'a qu'une vingtaine d'années. Il faut donc stimuler son marché pour que l'industrie devienne compétitive, grâce aux progrès technologiques et au développement des marchés qui s'associent pour faire baisser les prix.

Dans un pays comme l'Algérie qui dispose un gisement solaire très important. Le photovoltaïque est sûrement un mode à suivre pour l'électrification des sites isolés.

Aujourd'hui, la politique a changé et le programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique du gouvernement espère atteindre 40% d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique d'ici 2030. Ce chiffre est très grand, et connaissant la nature intermittente de l'énergie photovoltaïque, le taux de pénétration de cette dernière dans le bilan énergétique ne pourra être réalisé sans des systèmes de stockage aussi grands que diversifiés.

Alors, c'est le temps pour encourager l'investissement et la technologie en accord avec tous ce à une relation avec ce domaine à partir du développement des modules photovoltaïques de fabrication nationale à la formation des professionnels et spécialistes dans cette filière.

II.11- CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné une présentation détaillée sur l'histoire de l'énergie photovoltaïque et le principe de fonctionnement de cette énergie.

Donc on peut résumer que L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie

photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.

Chapitre III :
Différents Composants du
Système PV

III.1. INTRODUCTION

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle durant la nuit [57]. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [57]

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

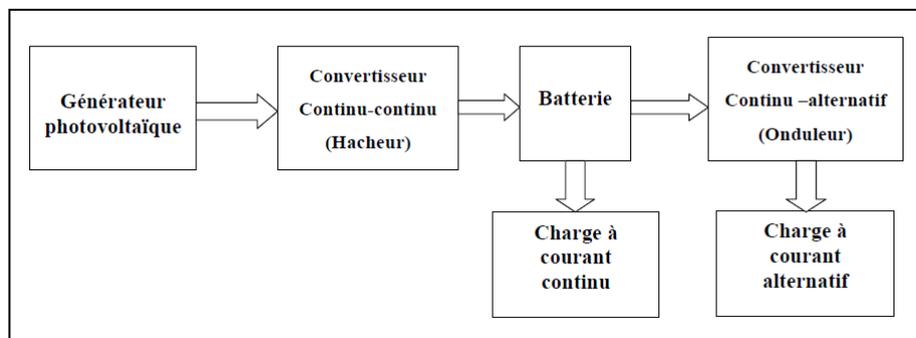


Figure III.1: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque [58]

Le courant continu disponible aux bornes du module peut être utilisé de différentes manières en raccordant ces bornes à un circuit électrique qui l'achemine vers un ensemble de composants qui forme un système Photovoltaïque.

Un module solaire photovoltaïque (ou panneau solaire) est un générateur électrique de courant continu composé d'un ensemble de cellules relié entre elles électriquement qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment des centrales photovoltaïques.



Figure III.2 : Centrale photovoltaïque

III.2- CELLULE « PHOTOVOLTAÏQUE »

III.2.1- GENERALITES / DEFINITIONS

Une cellule photovoltaïque (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) est un composant électronique qui produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène, les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium. 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 le pair électron / trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction « P-N ». D'autres structures peuvent également être utilisées [54]

Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires.

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 déposés (*voir Figure (III-3))* [54]

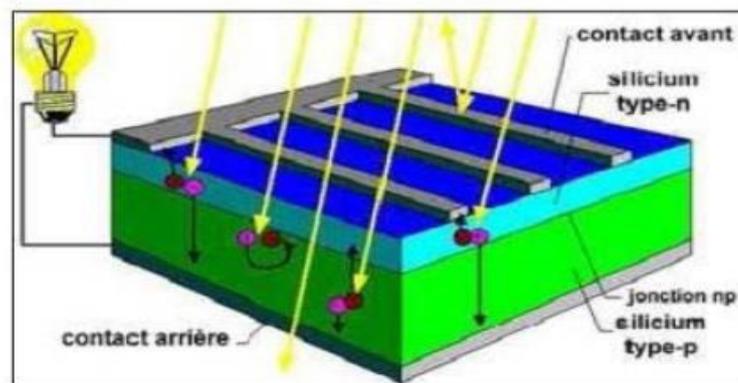


Figure III.3 : Représentation schématique d'une cellule solaire

Autrement cette cellule photovoltaïque qui est en fait composée de ces deux zones : Une zone dans laquelle une partie des atomes de silicium sont remplacés par des atomes de phosphore et une autre zone dans laquelle une partie des atomes de silicium sont remplacés par des atomes de bore. Il en résulte la création d'un champ électrique à l'interface de ces deux zones.

L'atome de phosphore possède un électron de plus que l'atome de silicium sur sa couche périphérique, et l'atome de bore en a un en moins.

Une cellule photovoltaïque est donc un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Cette transformation (conversion photovoltaïque met simultanément en jeu trois phénomènes physiques) est basée sur les trois mécanismes suivants à savoir :

*/ **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 électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;

*/ **Collecte des particules générées dans le dispositif** [54]

Ainsi quand la lumière pénètre le silicium, elle apporte de l'énergie sous forme de photons. Les photons vont communiquer leur énergie aux atomes de silicium, conduisant à la création de charges électriques.

Les électrons de la zone dopée au phosphore vont rejoindre les trous de la zone dopée au bore via la connexion extérieure. Ils sont alors collectés par les grilles en métal. Au passage, leur déplacement crée un courant électrique.

Pratiquement, une cellule photovoltaïque en technologie cristalline est donc composée de plusieurs couches actives :

*/ Une couche « anti-reflet » sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons

*/ Une grille conductrice avant « collectrice des électrons »

*/ Une couche dopée (**N**) (généralement grâce aux atomes de bore) avec porteurs de charges libres négatives (électrons)

*/ Une couche dopée (**P**) (généralement grâce aux atomes de phosphore) avec porteurs de charges positives (trous).

*/ Un contact métallique arrière pour collecter les charges positives.

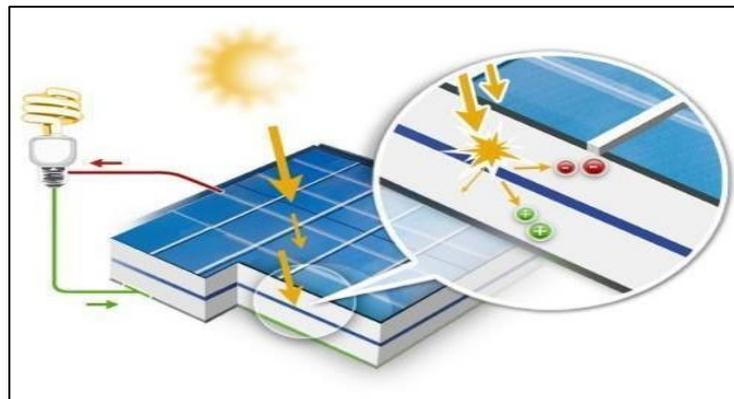


Figure III.4 : Cellule photovoltaïque

L'électricité photovoltaïque ainsi produite peut ensuite être injectée dans le réseau électrique général pour être utilisée ailleurs, ou stockée dans des batteries pour servir à des moments où il n'y a plus de soleil.

III.2.2- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V à 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

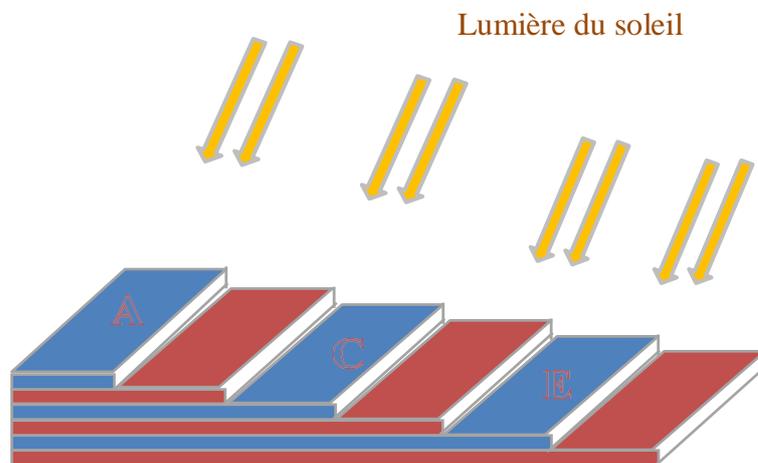
Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6V pour un courant nul.

Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{c0}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [59].

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 ou du phosphore.

L'électricité correspond à un déplacement d'électrons. Aussi, pour rendre les électrons plus mobiles, le silicium découpé en fine tranche est « dopé ».

La figure (III.5) suivante illustre une cellule PV.



A : Verre de protection ; D : Silicium négatif ; B : Couche anti réfléchissante ;
E : Silicium positif ; C : Grille de contact ; F : Support.

Figure III.5 : Structure d'une cellule solaire en silicium [8]

Un ensemble de cellules forme des modules solaires dont la fabrication a été multipliée par 8 sur la dernière décennie et dont le coût a baissé de 50 % en 5 ans. Actuellement, le rendement de ces cellules ne dépasse pas 15 %. [60]

Le fonctionnement de la photopile est donc basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un

réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type (*N*) (exemple: Silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type (*P*) (exemple: silicium dopé au bore) [54]

Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

III.2.3-TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES / DIFFERENTS TYPES DE CELLULES « PV »

III.2.3.1- INTRODUCTION

Dans le cadre de la nouvelle technologie, on utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires.

Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

Deux types de technologie se partagent la quasi-totalité du marché mondial : les photopiles couches minces et les photopiles cristallines avec toujours le silicium comme matériau semi-conducteur. Les photopiles couches minces utilisent en grande majorité le silicium amorphe hydrogéné, les photopiles cristallines utilisent le silicium monocristallin et poly-cristallin.

Actuellement, on peut citer quelques-uns des nouveaux axes de recherches dans le domaine de l'énergie photovoltaïque tels que :

*/ L'utilisation des nanotubes de carbone pour un meilleur rendement.

*/ Le recours à de nouveaux nanomatériaux pour une meilleure absorption des rayons du soleil.

*/ La fabrication de cellules solaires flexibles.

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 (figure III-6) 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 SiO₂. Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [38]

Les différents types de cellules photovoltaïques existants sont :

- */ Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)
- */ Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)
- */ Cellule en silicium poly-cristallin (rendement : 11 à 15%)
- */ Cellule Tandem
- */ Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%)



A

A-Silicium amorphe



B

B- Silicium poly-cristallin



C

C- Silicium monocristallin,

Figure III-6 : Types de cellules photovoltaïques

Donc les cellules Photovoltaïques se présentent en deux principales catégories

III.2.3.2- PREMIERE TECHNOLOGIE

❖ CELLULES CRISTALLINES

C'est une technologie éprouvée et robuste dont le rendement est de l'ordre de 13%. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Les modules en silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Toutes les étapes du processus de fabrication ne cessent de progresser régulièrement afin de viser le plus possible les rendements théoriques calculés tout en évitant d'augmenter le prix des modules. Il reste encore aujourd'hui un large potentiel d'optimisation [47]

Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (figure III.3.a) et celles à partir de silicium poly-cristallin (figure III.3.b). Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 24.7% contre 19.8% de rendement record sur petite cellule en laboratoire [61]

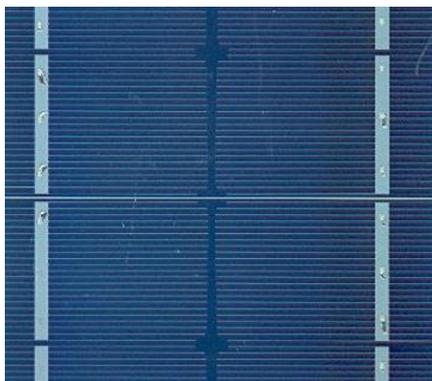


Figure III.7.a : Cellule PV monocristalline

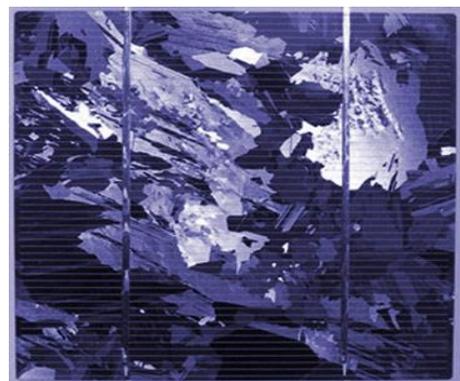


Figure III.7.b : Cellule PV poly cristalline

Le photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin [d'efficacité est de 12 à 15 %, de durée de vie de 25 à 30 ans] ou Poly- cristallin [d'efficacité qui varie généralement de 13 à 18 %].

❖ *CELLULES AMORPHES*

En comparaison avec la cellule cristalline le coût est moins. Les cellules amorphes sont utilisées partout et en particulier dans une production d'énergie électrique faible, par exemple une électrification destinée à alimenter des montres, des calculatrices, luminaires de secours. Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000 alors qu'elles représentaient 12 % en 1999. (Figure III.8) [62] [90] 2014

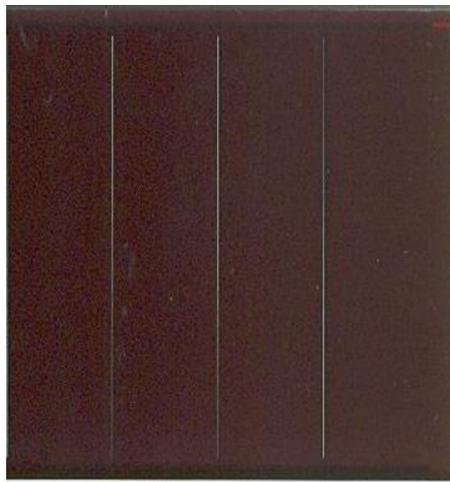


Figure III.8: Cellule photovoltaïque amorphe

1- CELLULES POLY-CRISTALLINES [63]

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Elle se caractérise par :

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²) ;
- Durée de vie importante (+/- 30 ans) ;
- Moins cher que le monocristallin ;
- Rendement faible ;
- sous un faible éclairement ;
- Rendement module commercial : 11 à 15% ;
- Rendement record en laboratoire : environ 20% ;
- Ces cellules ont pour l'instant le meilleur rapport qualité/prix.

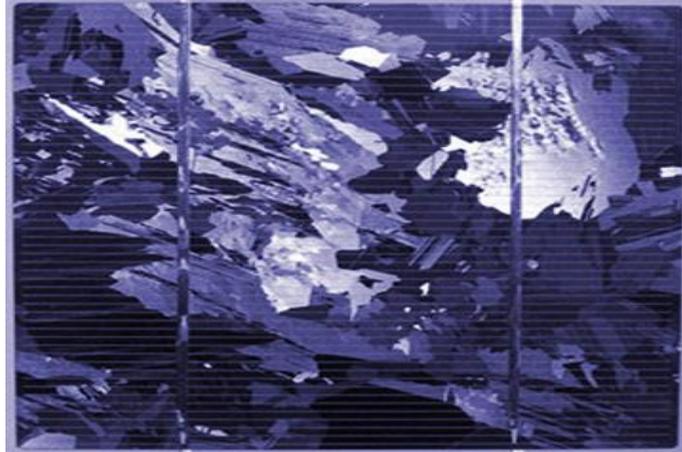


Figure III.9 : Cellule poly-cristalline [63]

2- CELLULES MONOCRISTALLINES :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Elle se caractérise par :

- Meilleur rendement que le poly-cristallin (environ 150 Wc/m²) ;
- Durée de vie importante (+/- 30 ans) ;
- Plus cher que le poly-cristallin ;
- Rendement faible sous un faible éclairement ;
- Rendement module commercial : 12 à 20% ;
- Rendement record en laboratoire : environ 25% ;
- Coût plus élevé que le poly-cristallin. [63]

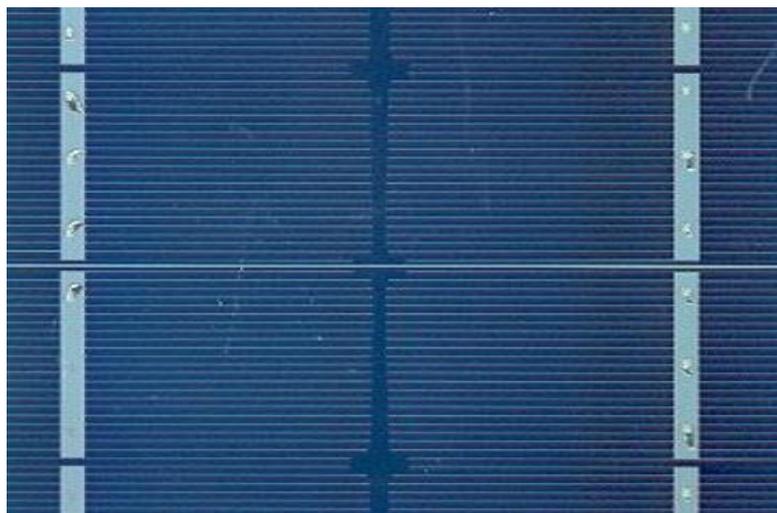


Figure III.10 : Cellule monocristalline [63]

III.2.3.3- DEUXIEME TECHNOLOGIE /CELLULES SILICIUMS AMORPHES EN COUCHE MINCE

Elle fait appel aux cellules de silicium amorphe. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

Elle se caractérise par :

- Fonctionnent avec un éclairage faible ;
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules ;
- Moins sensible aux températures élevées ;
- Souple ;
- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses ;
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps ;
- Rendement faible : 5 à 9% ;
- Rendement record en laboratoire : environ 13,4%. [63]

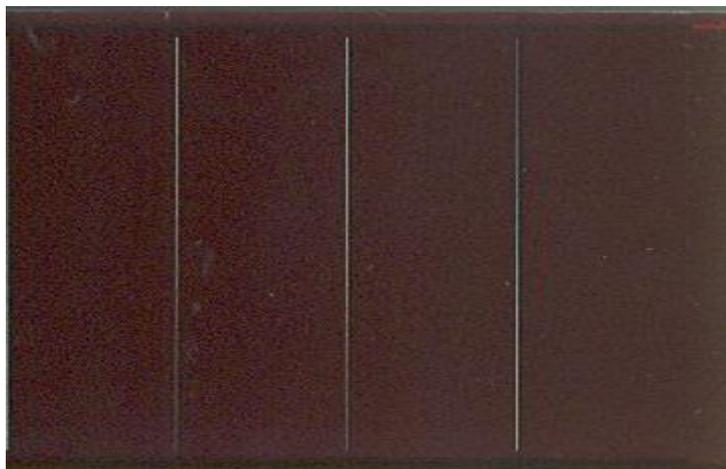


Figure III.11 : Cellule silicium amorphe en couche mince [63]

III.2.3.4- TROISIEME TECHNOLOGIE / CELLULES SANS SILICIUM EN COUCHE MINCE CIS / CIGS / SEMI-CONDUCTEURS

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité (σ) des isolants sont comprises entre 1. et 1.S/cm et celles des conducteurs entre 6 et 1.S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre 1.et 1. S/cm, on les appelle des semi-conducteurs [64]

On sait qu'au sein des structures cristallines de la matière, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées bandes d'énergies. Les bandes

de faible énergie correspondent à des électrons participant au maintien de la structure cristalline. Les bandes de hautes énergies correspondent à des électrons quasi libres, se détachent de la structure et par conséquent peuvent participer à une conduction électrique. On distingue les isolants et les conducteurs par la différence d'énergie qu'il existe entre ces bandes [65]

Plusieurs matériaux peuvent rentrer dans la catégorie des semi-conducteurs comme le silicium qui prend l'image du matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, de son abondance naturelle et de son coût de mise en œuvre économique. On peut citer quelques autres matériaux comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium [66]

On prend le nom semi-conducteur intrinsèque lorsque le matériau est pur, dans ce cas il ne comporte aucune impureté et son comportement électrique ne dépend que de la structure du matériau. Ce comportement correspond à un semi-conducteur parfait, c'est-à-dire sans défaut structurel ou impureté chimique. Un semi-conducteur réel n'est jamais parfaitement intrinsèque mais peut parfois en être proche comme le silicium monocristallin pur [67]

La troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium(CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre ces semi-conducteurs est sensible à des photons d'énergies différentes. [9]

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS ou CIGS. Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre).

De plus leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince. Elle se caractérise par :

- Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince,
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible.
- Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses"
- Rendement module commercial : 9 à 11%.
- Rendement record en laboratoire : environ 19,3%.
- Suite aux investissements massifs dans les cellules "traditionnelles" (silicium) au début des années 2000 qui a entraîné une baisse importante des coûts de fabrication, les cellules sans silicium en couche mince ont perdu leur avantage concurrentiel.

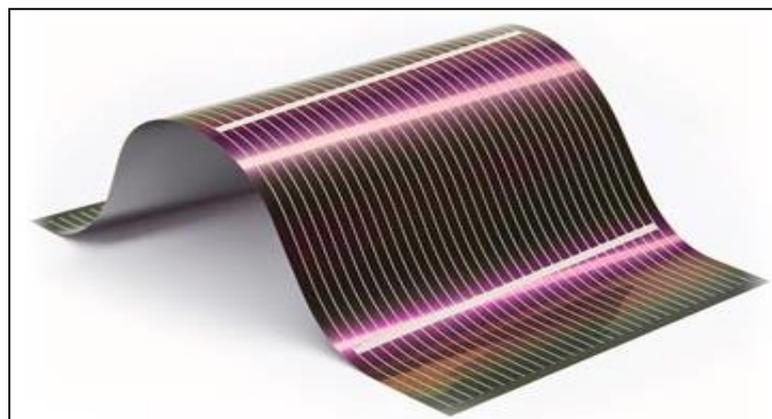


Figure III.12 : Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS [63]

III.2.3.5- CELLULES MULTI-JONCTIONS

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion. Elle se caractérise par :

- Rendement inégalé.
- Pas ou peu d'applications commerciales.
- Rendement record en laboratoire : environ 40% (sous une concentration de 240 soleils) ;
- Développé pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable.

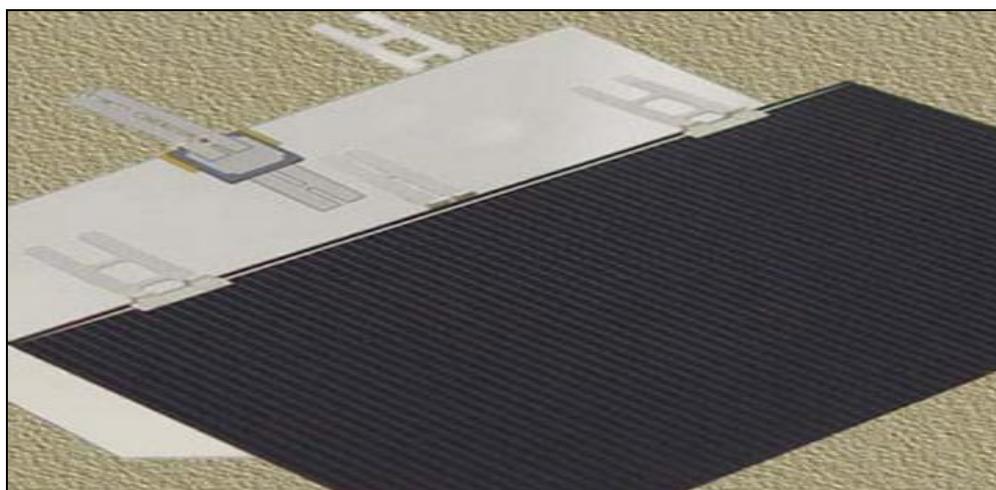


Figure III.13. Cellules multi-jonctions

III.2.4- COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES CELLULES

Tableau III-1 : Comparaison entre les différentes cellules

<i>Cellules</i>	<i>Rendement</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénien</i>
Cellules monocristallines	de 12 à 19%	Très bon rendement	- Coût élevé. -Rendement faible sous éclairage réduit.
Cellules poly-cristallines	de 11 à 15%	Rapport performance/prix	-Rendement faible sous éclairage réduit.
Cellules amorphes	de 5 à 7 %	-Fonctionnent avec éclairage faible. -Moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température -Possibilité de créer des panneaux souples	-Rendement global plus faible. -Rendement moindre sous éclairage direct.

*/ Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au mètre carré et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.

*/ Les modules solaires poly-cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.

*/ Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée [29]

III.3- PANNEAU SOLAIRE

III.3.1- INTRODUCTION

Les panneaux solaires photovoltaïques sont les plus utilisés et les plus populaires sur le marché, privilégiés pour leur rentabilité et leur fiabilité ainsi que pour leur facilité d'installation et d'utilisation, ils sont de plus en plus utilisés dans différents domaines tels que les installations résidentielles, commerciales et le système spatial des centrales électriques.

Dans une centrale solaire photovoltaïque, des centaines voire des milliers de panneaux photovoltaïques sont installés et placés selon les exigences du site, et afin d'avoir de l'énergie électrique utilisable, plusieurs dispositifs entrent en vigueur en séquence (convertisseurs, câblages, systèmes de protection...) Réaliser un système complet qui permet de générer un maximum d'électricité et d'assurer une bonne distribution et stockage de cette dernière.

III.3.2- GENERALITES ET DEFINITIONS

Un panneau solaire est un dispositif énergétique généralement plat et rigide. Les panneaux photovoltaïques standards mesurent 1,7 mètre de long et 1,0 mètre de large. L'épaisseur de leur cadre en aluminium est de 3 à 4 cm.

Un panneau classique pèse environ 19 kg, soit 11 kg par m². [68]

Il est composé de cellules de silicium, aussi appelées cellules photovoltaïques, capables de capter la lumière du soleil puis de la transformer en courant continu grâce à l'effet photovoltaïque.

Quelques endroits où l'installation des Photovoltaïques fait partie de la production énergétique



a) Rope Marina; b) Parker Ranch; c) Brazil

Figure III.14 : Panneaux solaires installés

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série ou bien en parallèle afin de produire la puissance souhaitable. Les premières implantations des structures étaient fondées sur l'association de plusieurs modules photovoltaïques attachés par un seul convertisseur on l'appelle un onduleur centré comme indiqué dans la figure (III.15) ci-dessous

Le rendement de cette structure est faible à cause de l'insertion obligatoire des diodes dans chaque branche parallèle afin d'éviter la dispersion d'énergie. Il y'a d'autre limitation tel que la perte en puissance qui touche la non-application réel d'algorithme MPPT ou chaque branche peut ne pas fonctionner en maximum de production de puissance.

Ce qui concerne la protection des panneaux solaires, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [59]

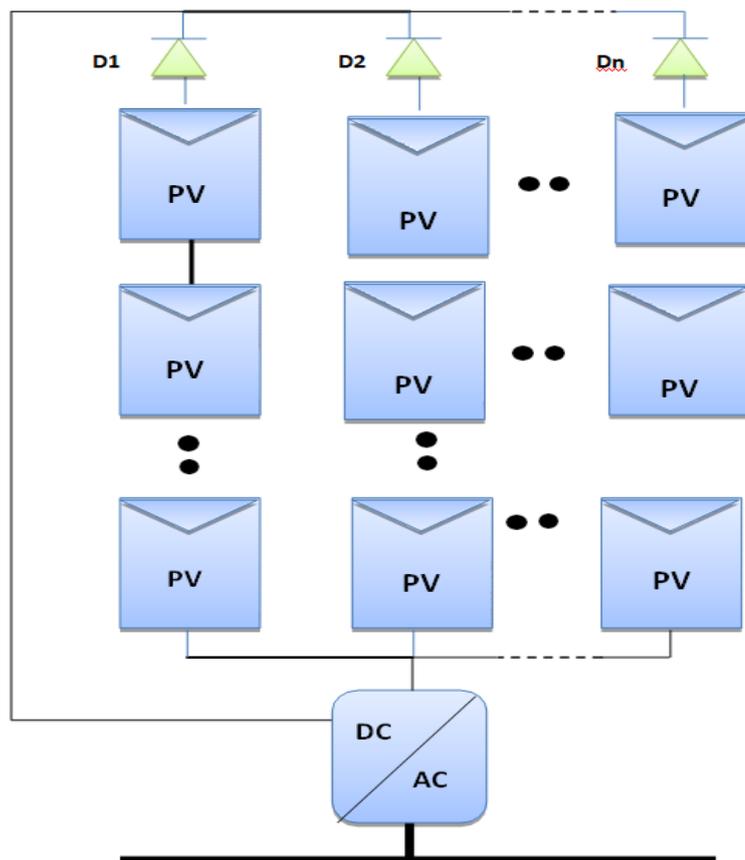


Figure III.15 : Première implantation d'une structure PV [67]

Cependant le choix de la structure convenable des modules photovoltaïques reste lié au niveau de la connexion en série comme la montre la figure (III.16 a) et 16.b)), cette topologie permet un accroissement d'efficacité et une meilleure utilisation de panneau photovoltaïque.

L'avantage principal de cette structure réside dans la suppression des pertes de puissance à cause d'absence des diodes de retour et l'application parfaite d'algorithme MPPT qui nous permet de produire une puissance maximale. Une autre structure très intéressante applique l'utilisation du micro onduleur lié avec un seul panneau figure (III.16 c), dans ce cas chaque panneau peut fonctionner au point de puissance maximale. Cette topologie touche une production d'une faible puissance typiquement entre 200w et 300w. L'avantage principal de ses micros onduleurs réside dans l'emplacement facile en cas d'une panne, ils présentent aussi une simplicité de raccordement avec le réseau ou bien la charge.

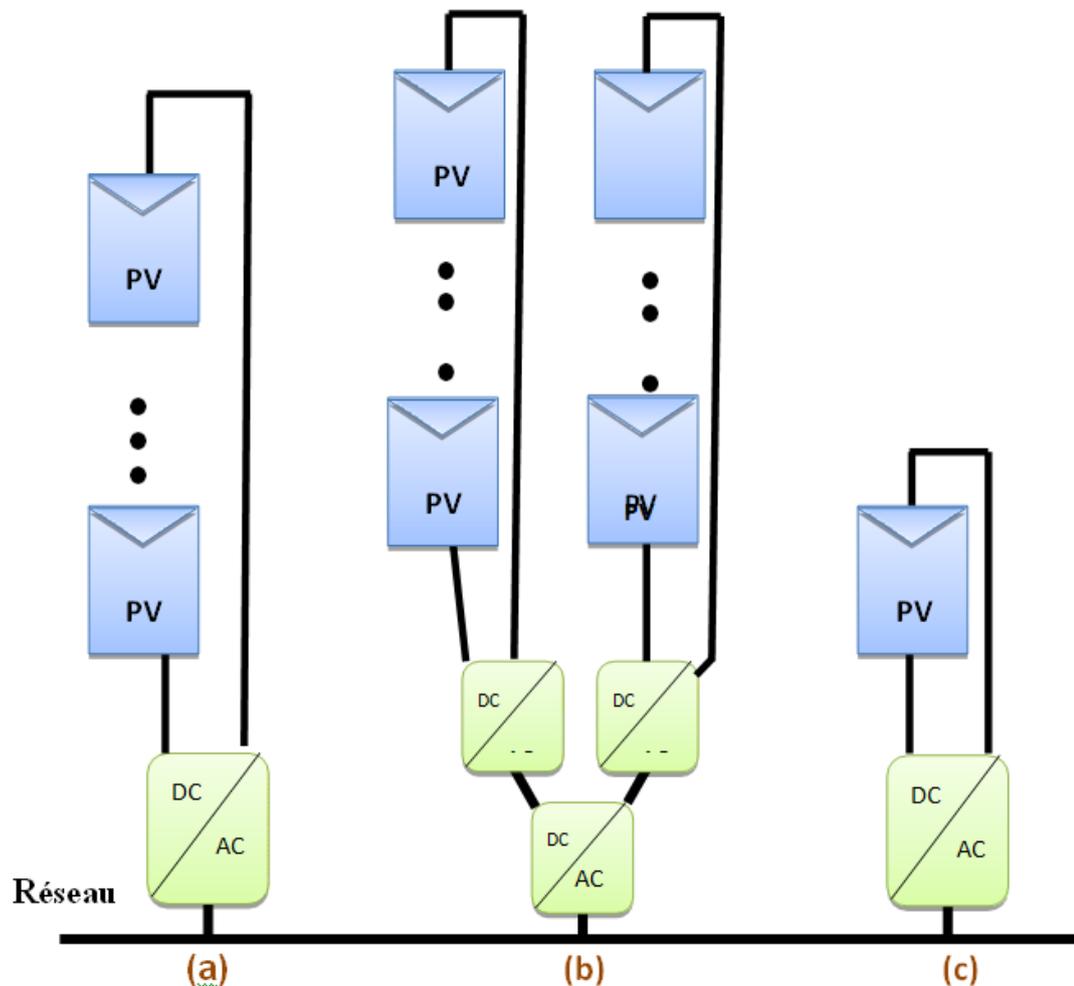


Figure III.16 : Plusieurs formes de structures PV [67]

Le micro-onduleur est fixé sur le panneau, il doit supporter toutes les conditions météorologiques, cela implique que ce convertisseur est non réparable. En outre pour les systèmes qui ont une longue durée de vie, les composants du panneau comme les semi-conducteurs, les filtres et principalement les systèmes de control doivent fonctionner dans une température élevée ce qui augmente la production.

Dans les revues scientifiques une simulation d'un onduleur connecté à des PVs est présentée dans l'article [69] par *J.T. Bialasiewicz* et *E.Muljadi*. Cependant l'optimisation du PV après le choix de sa structure est une étape très importante. Cette tâche est en relation avec le site d'installation du système photovoltaïque. Dans [70] les auteurs présentent une étude d'évaluation pour des PVs selon deux critères celle du l'éclairage et du type du charge demandée installée dans le site. Dans le même aspect une autre approche similaire est présentée par *Ziyad M. Salameh* et *al* dans [96]2014

afin de trouver une bonne configuration des PVs selon les mêmes facteurs pour un site spécifié, dans la même étude les données de force d'éclairement ont été enregistrées pour une trentaine d'années. Pas très loin de l'optimisation, une méthode déterministe et de la probabilité sont présentées par *G. Capizzi et al* dans [71]

III.3.3- FABRICATION DE PANNEAU SOLAIRE

Les différentes étapes de fabrication sont :

La première étape: Consiste à produire des lingots de silicium, c'est-à-dire de grands blocs de silicium ultra-pur (à 99,9999 %).

Pour ce faire, on ajoute à des centaines de kilogrammes de fragments de silicium, une petite quantité de bore, élément semi-métallique dur assez qui permet de donner une polarité positive au silicium. Ces fragments « enrichis » sont ensuite cuits dans un four à plus de 1500 degrés. Le silicium est sorti du four sous forme de barres appelées « lingot ». Les lingots sont découpées en fines plaques appelées « wafers » à l'aide de scies à fil. L'épaisseur des wafers est inférieure à 200 microns d'épaisseur, soit l'équivalent d'une feuille de papier [68]

La deuxième 'étape : Consiste à traiter chimiquement le wafer pour lui permettre de moins réfléchir la lumière.

A l'issue de ce traitement, la surface des wafers, lisse au départ, est constituée de minuscules pyramides. Cette texture en relief permet d'augmenter la conversion de la lumière en électricité.

Pour que le wafer devienne une cellule photovoltaïque, du phosphore, corps simple non métallique et lumineux dans l'obscurité, est déposée à très haute température sur sa face avant. Cet apport de phosphore permet de donner une polarité négative à cette face avant. Le wafer est maintenant une cellule photovoltaïque, disposant d'une face arrière de polarité négative et d'une face avant de polarité positive. [68]

Il reste à déposer des contacts métalliques sur les faces avant et arrière de la cellule pour collecter les électrons libérés dans le silicium. Chaque cellule photovoltaïque fonctionne donc comme une pile électrique, avec un pôle positif et un pôle négatif, à la différence près que la cellule photovoltaïque ne s'épuise jamais !

Les panneaux les plus courants sont composés de 60 cellules. Les cellules sont disposées entre deux pellicules de résine transparente. Un film en polyester est ensuite placé sur la face arrière. Ce sandwich est placé dans un tunnel dans lequel il est chauffé. Les deux pellicules de résine encapsulent les cellules de façon totalement étanche pour les protéger de toutes les agressions extérieures.

La troisième étape : elle consiste à placer un verre trempé, dont l'épaisseur est de 3 à 4 mm, en face avant. Le panneau est ensuite équipé de son cadre en aluminium dont la composition et le profil ont été étudiés pour offrir les meilleures qualités de résistance mécanique.

Enfin, une boîte de jonction est fixée à l'arrière du panneau solaire : Il s'agit de la borne de sortie de l'électricité solaire. Chaque borne présente un câble « plus » et un câble « moins » équipé d'une connectique spéciale pour assurer la meilleure connexion électrique et une étanchéité parfaite.

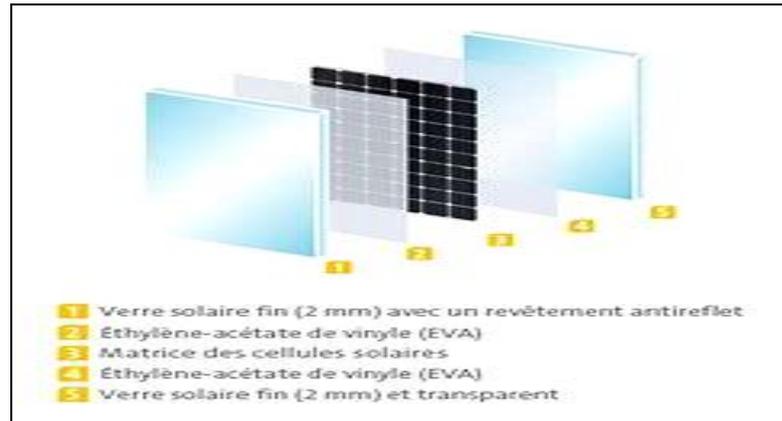


Figure III.17 : Différents composants de panneau photovoltaïque.

III.3.4- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE PANNEAU SOLAIRE / CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N.

Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque à la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium. [31]

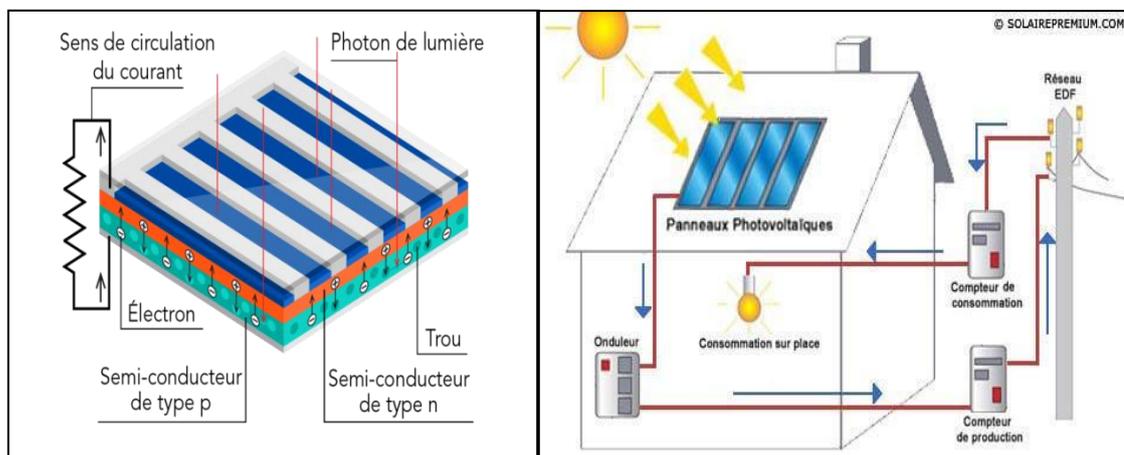


Figure III.18: Principe de fonctionnement de panneau solaire. [31]

Autrement dit, une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

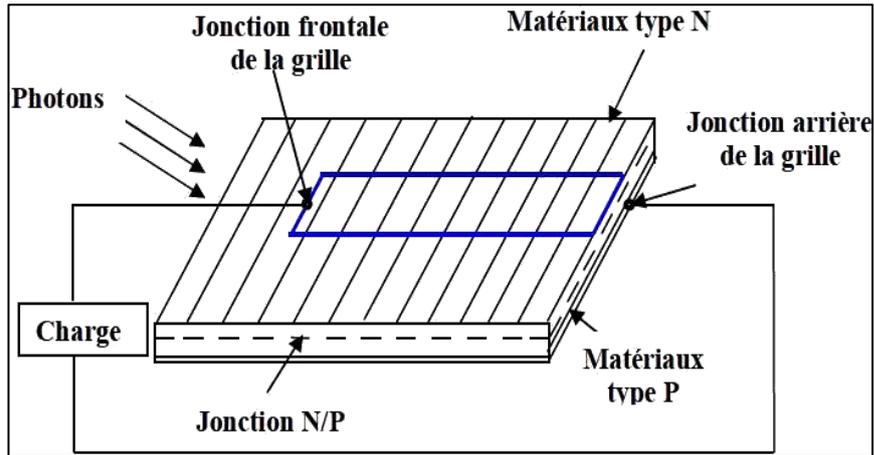


Figure III.19 : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque « Cellule PV typique » [9]

Des recherches sont effectuées sur d'autres matériaux, comme le di séléniure de cuivre et d'indium ou le tellure de cadmium [60].

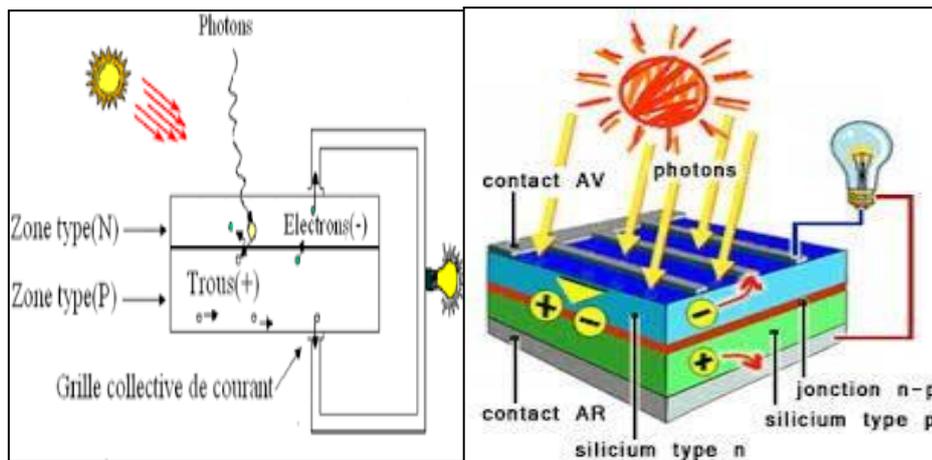


Figure III.20 : Présentation schématique le principe d'une cellule solaire [60]

III.3.5- CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU PANNEAU SOLAIRE

Les panneaux photovoltaïques sont constitués de cellules connectées en série et/ou en parallèle. Les cellules sont soudées les unes aux autres, traditionnellement sur leurs façades.

Dans le présent travail, les modules PV utilisés sont constitués de 36 cellules en série et de 2 branches parallèles, et le générateur est constitué de 15 modules en série et de 2 branches parallèles. Le passage du module au panneau se fait en ajoutant des diodes de protection, une en série pour éviter le passage du courant inverse, et une en parallèle, appelée diode de dérivation, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre de puissance. Un groupe permet de limiter la tension inverse de cellule aux bornes de ce groupe et de minimiser les pertes de production associées [31]

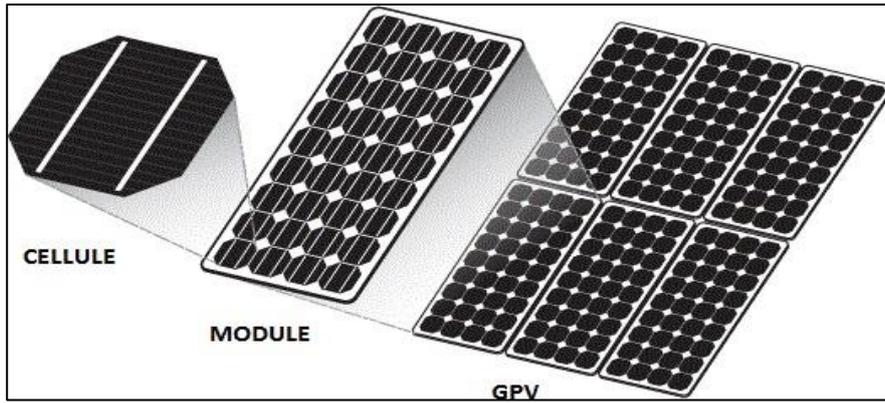


Figure III.21- Composants d'un GPV [31]

Le courant et la tension aux bornes d'un module photovoltaïque sont exprimés par la relation suivante [31]

$$I_{Mod} = N_P \times I \tag{III.1}$$

$$V_{Mod} = N_S \times V \tag{III.2}$$

L'association série permet d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série.

($V_{co} \times N_S = 0.6 \times 36 = 21.6 \text{ V}$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{OP} proche de celle d'une tension de batterie de 12v.

L'association parallèle permet d'augmenter le courant de l'ensemble, alors d'augmenter le courant de panneau solaire ($I_{co} \times N_P = 3 \times 36 = 108 \text{ A}$).

La caractéristique de puissance P (W) est aussi importante et sera visualisée en même temps que la caractéristique de l'intensité I (A). La relation qui donne la puissance est comme suit :

$$P = V_{Mod} \times I_{Mod} \tag{III.3}$$

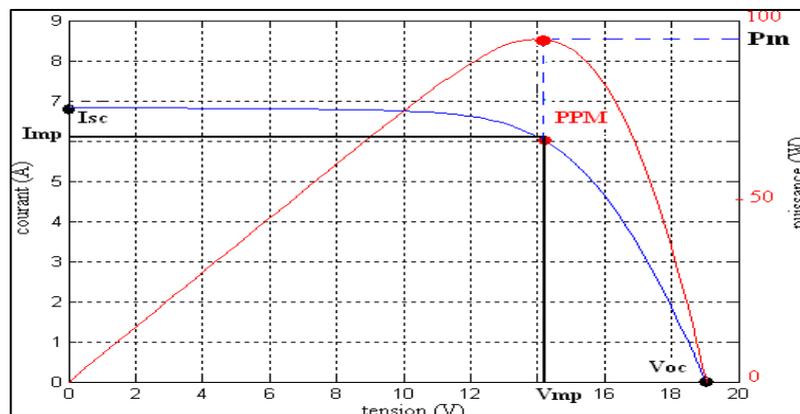


Figure III.22 : Caractéristique I (A), et P (W) du module PV à 36 cellules série et 2 branche Parallèles.

D'après les caractéristiques I(A) et P(W), on peut déterminer les points essentiels suivants [31]

III.3.5.1- CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la « figure III.19». La résistance série (R_s) est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule.

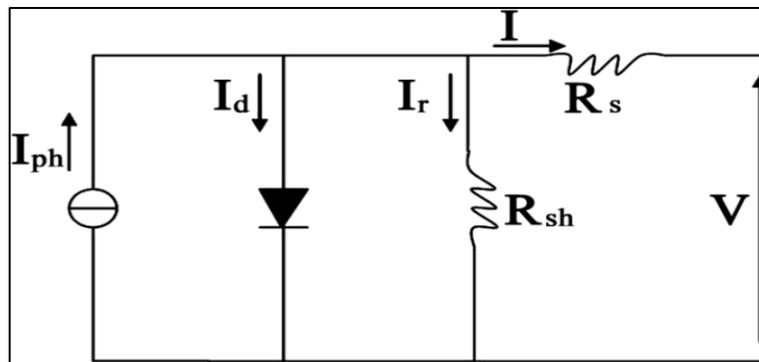


Figure III.23 : Schéma équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque [9].

Le courant de la photopile a pour expression:

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (III.4)$$

Avec:

*/ I_{ph} : Photo-courant de la cellule, proportionnel à l'ensoleillement (E_s): Ce courant correspond également au de courant court-circuit I_{sc} , où ce courant est atteint lorsque l'ensoleillement (E_s) tient la valeur maximale 1000 w/m^2 ;

$$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{E_s}{1000} \right) \quad (III.5)$$

*/ I_d :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (III.6)$$

Est le courant traversant la diode. On peut faire apparaître le potentiel thermodynamique :

$$\left(\left(V_T = \frac{nkT}{q} \right) \right) \quad (III.7)$$

Avec :

- I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode ;
- q : Charge de l'électron (1.6×10^{-19} C) ;
- k : Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} j/°K) ;
- n : Facteur d'idéalité (pratiquement $1 \leq n \leq 5$) ;
- T : Température de la jonction (en °K).

*/ I_r : Est le courant dérivé par la résistance shunt.

$$I_r = \frac{V + R_s x I}{R_{sh}} \quad \text{(III.8)}$$

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension ;

$$I = I_{sc} \left(\frac{E_s}{1000} \right) - I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s x I)}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s x I}{R_{sh}} \quad \text{(III.9)}$$

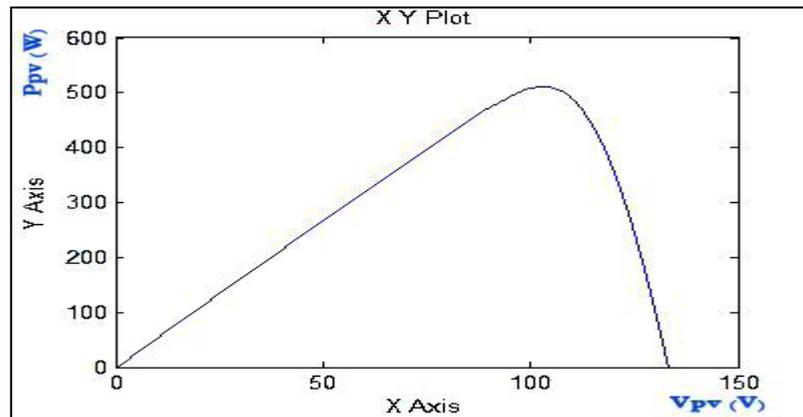


Figure III.24.a : Caractéristique P(V) à $E_s = 1000W/m^2$. [9].

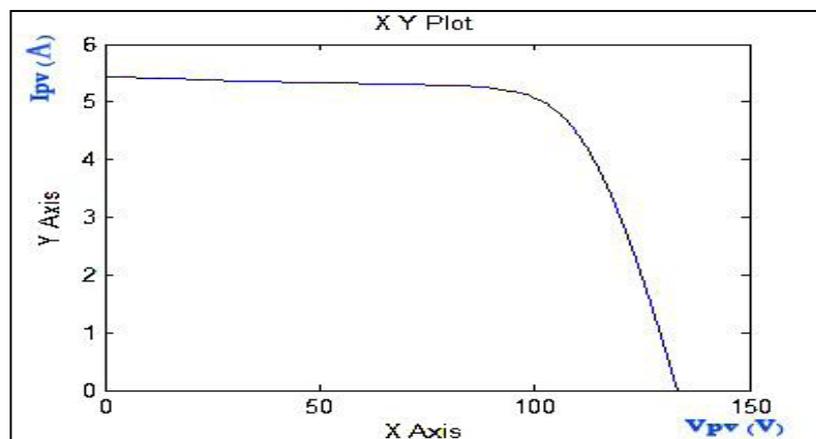


Figure III.24.b : Caractéristique I(V) à $E_s = 1000W/m^2$ [9].

III.3.5.2- PARAMETRES EXTERNES D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Dans [72] les auteurs *F. Adam et al* appliquent un modèle pour une estimation des paramètres d'un module photovoltaïque. Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes :

1- Courant de court-circuit : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. *Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie)*, ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} . Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation de « I », on obtient:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{R_s x I_{sc}}{V_T} \right) - 1 \right) - \frac{R_s x I_{sc}}{R_{sh}} \quad (\text{III.10})$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme « $I_0 \left(\exp \left(\frac{R_s x I_{sc}}{V_T} \right) - 1 \right)$ » devant I_{ph} : [9] Ib

$$I_{sc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{III.11})$$

En pratique ce courant est très proche du courant photovoltaïque I_{ph} ;

2- La tension de circuit ouvert (V_{oc}) : C'est la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul. C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{co}}{V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (\text{III.12})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{III.13})$$

3- Le point de puissance maximale (PPM): C'est le point où le générateur travaille en rendement maximal et produit une puissance de sortie maximale. La puissance utile maximale :

$$(P_M = V_M I_M) \quad (\text{II.14})$$

S'obtient en optimisant le produit courant tension.

I_m et V_m : Le courant et la tension correspondants au point PPM respectivement.

4- Rendement : Le rendement (η), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF V_{oc} I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{III.15})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [73]

Le rendement énergétique d'un générateur photovoltaïque est défini par le rapport entre la puissance électrique maximale générée et la puissance incidente sur sa superficie.

$$(\text{III.16}) \eta = \frac{P_{max}}{G.S}$$

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 13%.

5- Facteur de forme : C'est le facteur qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique $I(V)$. Le facteur de forme d'une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, il s'exprime par la relation ci-après :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} = \left(\frac{V_M \times I_M}{V_{co} \times I_{sc}} \right) \quad (\text{III.17})$$

Le facteur de forme FF est appelé aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor).

Ce facteur montre la déviation de la courbe courant-tension par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{sc}) qui correspond à la photopile idéale.

Les valeurs de « I_M et V_M » s'obtiennent à partir des équations (III.10) et (III.17).

Pour cela, on distingue deux cas :

- Si R_{sh} est infinie la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en I_M , et permet donc le calcul de V_M ;
- Si R_{sh} est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en V_M .

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement (E_s) de 1000 W/m² et à une température de 25°C.

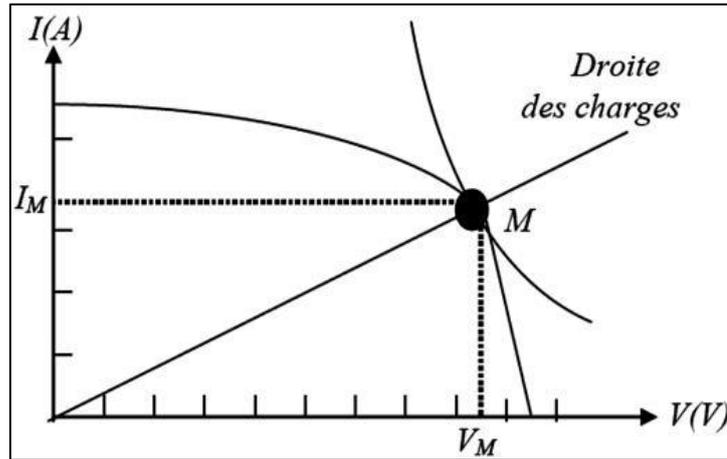


Figure III.25 : Schéma d'une cellule élémentaire. [9]

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

III.3.5.3- INFLUENCE DES PARAMETRES EXTERNES SUR LA CARACTERISTIQUE I (V) [74] [75]

Plusieurs articles ont été élaborés afin de connaître l'influence des paramètres externes sur le fonctionnement d'un PV. Dans [76] A. Ould Mohamed Yahya a présenté un modèle de simulation pour prédire la performance d'un système PV fonctionnant dans les conditions météorologiques d'un site d'installation, sous l'influence des différentes irradiances solaires, des différentes températures et pour des variables résistances séries et parallèles. Dans le même cadre les auteurs S. Rustemli et F. Dincer dans l'article [77] ont examiné le fonctionnement d'un PV sous l'influence de température.

La figure (III.26) présente, pour un éclairement et une température donnée, trois points remarquables: le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, et la puissance optimale qui est la puissance maximale (max P) délivrée par le module PV. Donc pour extraire le maximum d'énergie des modules PV, il faut les faire fonctionner au point de P_{max} .

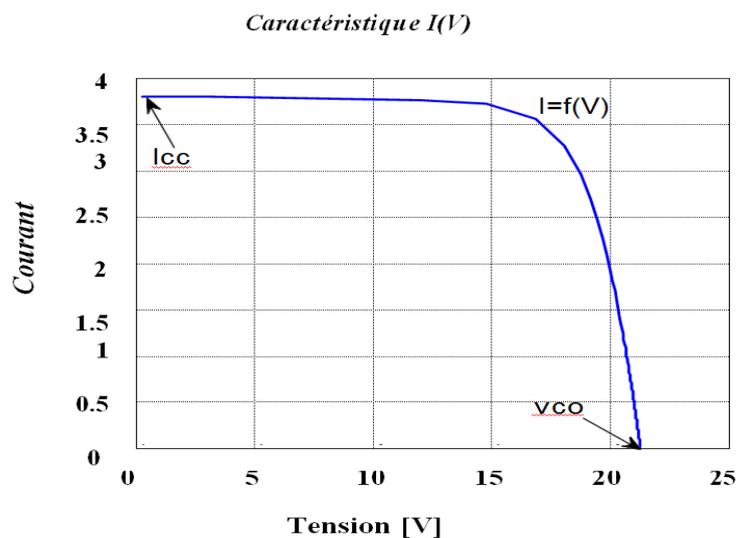


Figure III.26.a : Caractéristique $I(V)$ d'un PV

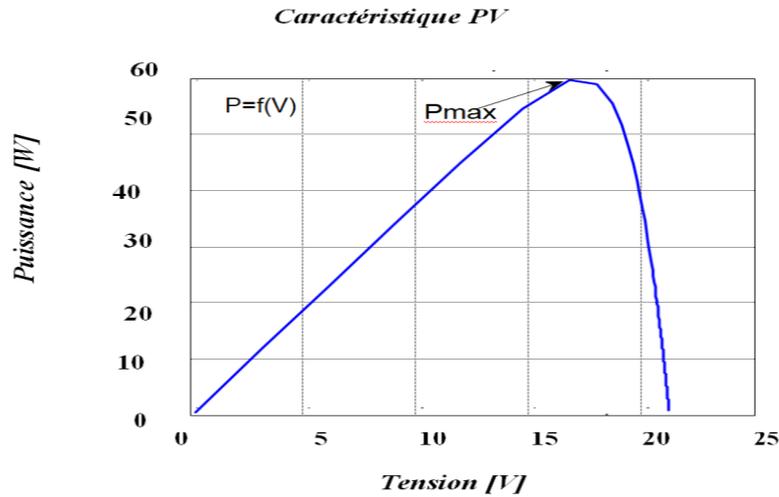


Figure III.26.b : Caractéristique $P(V)$ d'un PV

III.3.5.3.1- INFLUENCE DES RESISTANCES SERIE ET SHUNT

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La « figure III.27.a » montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point M de la « figure III.27 ». La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

Quant à la résistance shunt, elle est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs de courant. La « figure (III.27.b) » montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant (à gauche du point M de la « figure III.27 ». Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

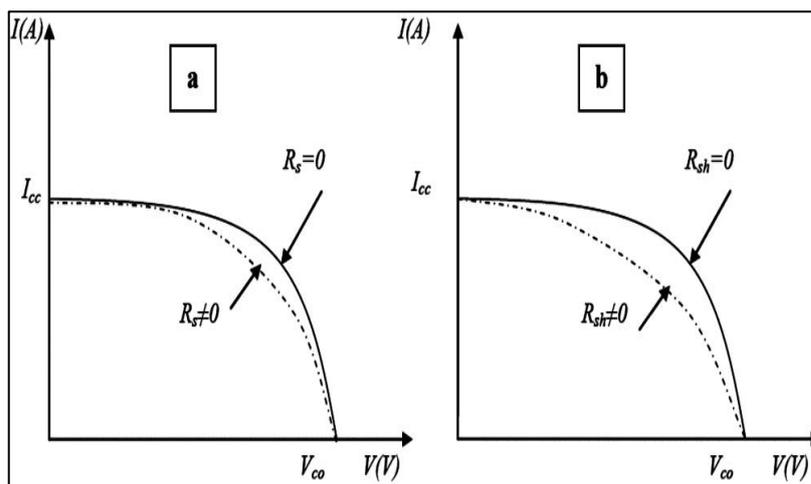


Figure III.27 : Influences des résistances séries et shunt

Autre représentations des Influences des résistances séries et shunt. [8]

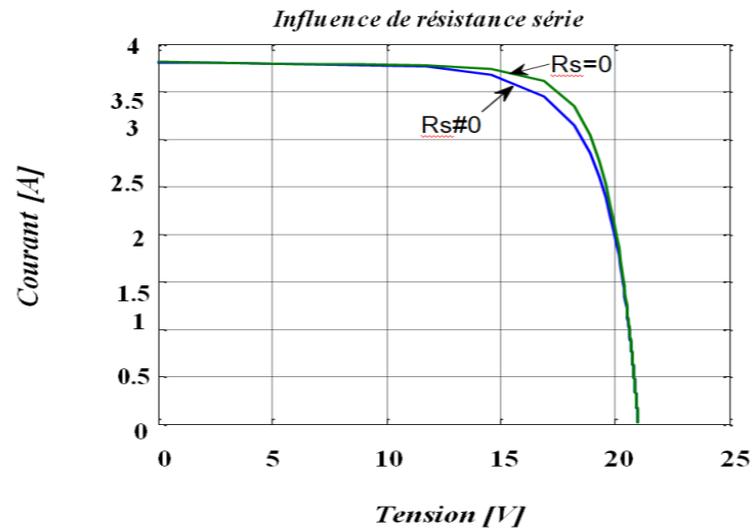


Figure III.27.a: Influence de résistance série

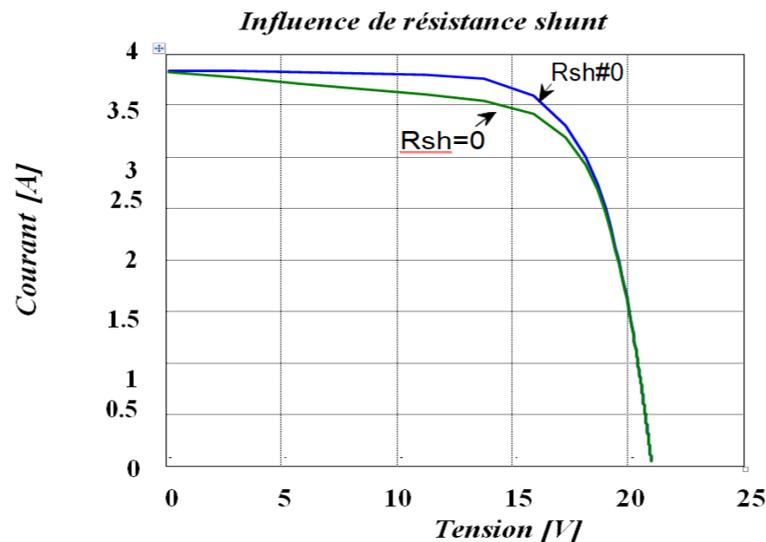


Figure III.27.b : Influence de résistance shunt

III.3.5.3.2- INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou à l'ensoleillement ($\psi = E_s$). Le courant I_d (V_d), étant par définition le courant directe de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. La « figure (III.28) » représente les caractéristiques $I = f(V)$ d'une cellule

photovoltaïque (jonction p-n sur du silicium monocristallin de 57mm de diamètre) à 28°C et sous diverses valeurs de l'ensoleillement (E_s).

A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} suite à une chute du flux lumineux. [9]

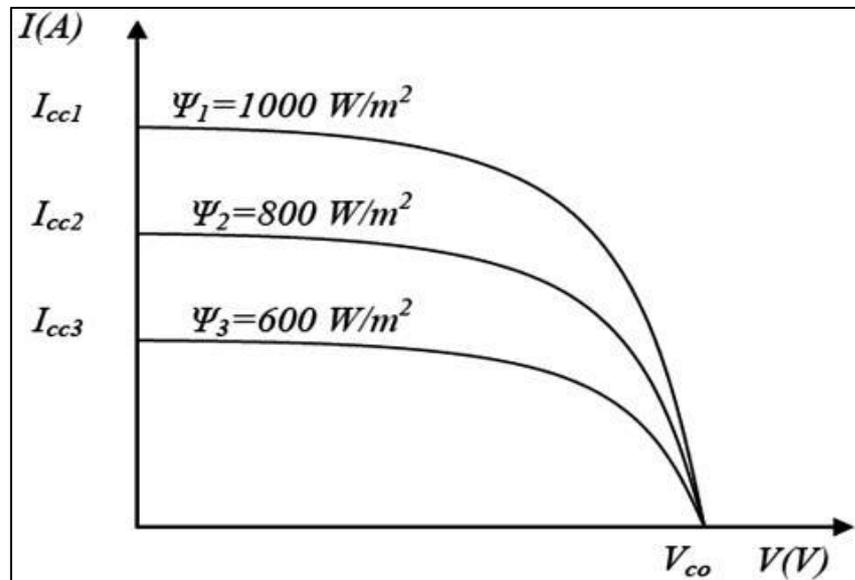


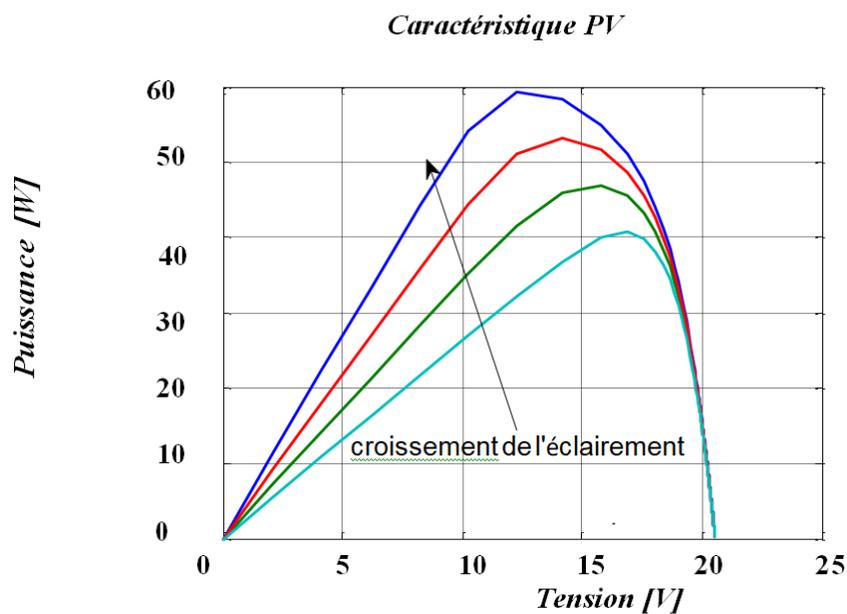
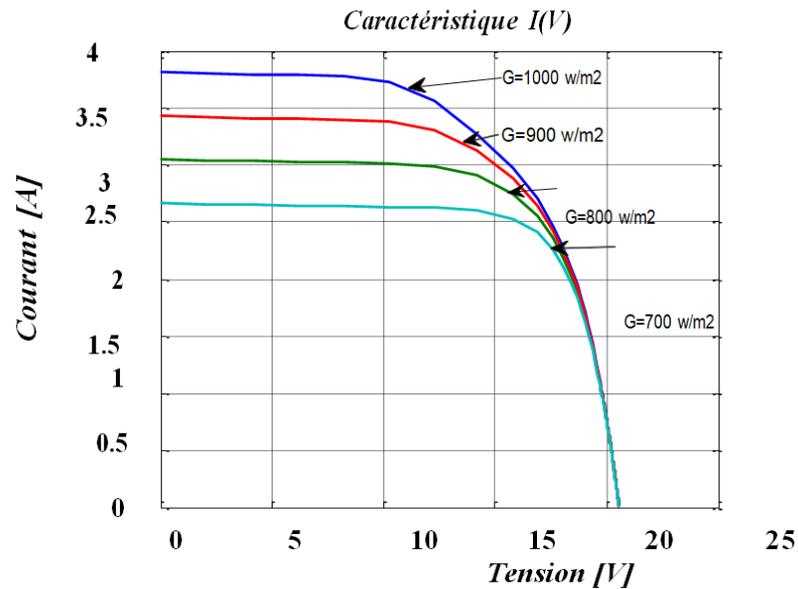
Figure III.28 : Influence de l'ensoleillement $\psi = E_s$.

Les figures ((III.29.a) et (III.29.b)), montrent respectivement la caractéristique I-V et P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement incident et à température ambiante. Nous constatons que les variations de courant de court-circuit (c'est à dire pratiquement le photo-courant créé dans le module PV est proportionnel au flux solaire incident). D'où le forte influence de l'éclairement sur le courant débité par le module PV. Cette influence se traduit par une augmentation de la puissance disponible dans les modules PV chaque fois l'éclairement augmente et à chacune des valeurs du flux lumineux correspond à une puissance électrique maximale que pourrait fournir un module PV [78].

$$I_{cc} = I_{cc}^* \left[\frac{G}{G^*} \right] + \alpha_i (T - T^*) \quad (\text{III.18})$$

Où

- */ I_{cc}^* : Représente le courant de court-circuit.
- */ α_i : ($A / ^\circ C$) Coefficient obtenu empiriquement.
- */ G^* : Irradiation de référence vaut $1 kW / m^2$.
- */ T^* : Température ambiante égale à $25^\circ C$.



III.3.5.3.3- INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de 3×10^{-2} m.A.K⁻¹ par cm² de cellule et par conséquent le courant I, ce qui engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} « figure III.30 ». L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de 5×10^{-5} W/K par cm² de cellule, soit une variation de 0,35% par degré. [9].

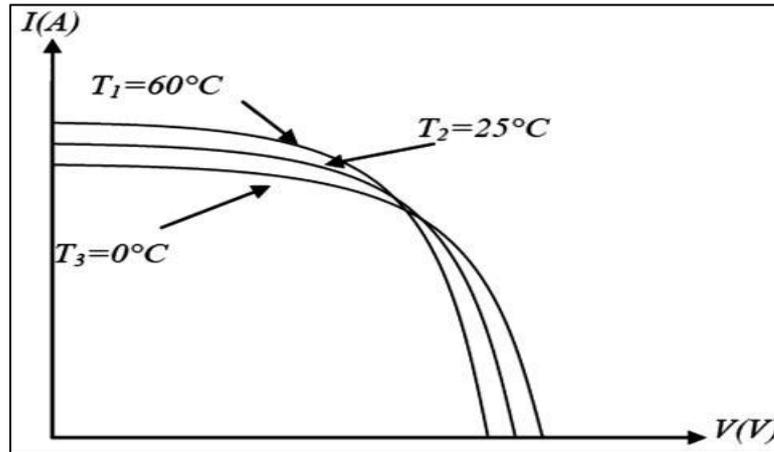


Figure III.30 : Influence de la température.

La température est un paramètre très important dans le comportement d'un module PV. Nous constatons à la figure III.29, qui représente la caractéristique $I(V)$ pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de la température, que le courant de court-circuit I_{cc} varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre une diminution de la tension en circuit ouvert et se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible dans les modules PV (figure. III.30). D'où l'influence de la température sur le comportement du module PV [79].

La tension à vide d'un module PV en fonction de la température et de l'éclairement est donnée par la relation suivante:

$$V_{co} = I_{co}^* + \alpha_2 (T - T^*) - (I_{cc} - I_{cc}^*) \cdot R_s \quad (III.19)$$

Où :

/ V_{co}^ et I_{cc}^* : représentent respectivement la tension de court-circuit et le courant de court-circuit à $T = 25^{\circ}C$ et $G = 1kW / m^2$.

*/ α_2 : ($V / ^{\circ}C$) Coefficient obtenu empiriquement

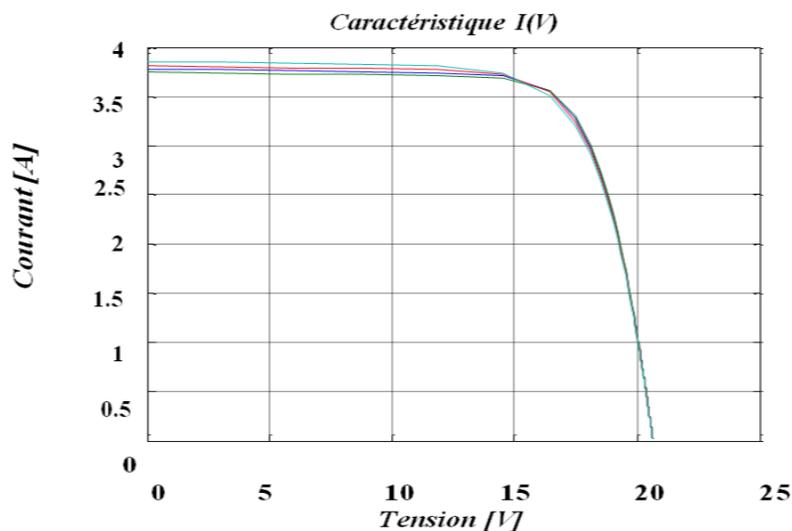


Figure III.31.a : $I(V)$ en fonction de température

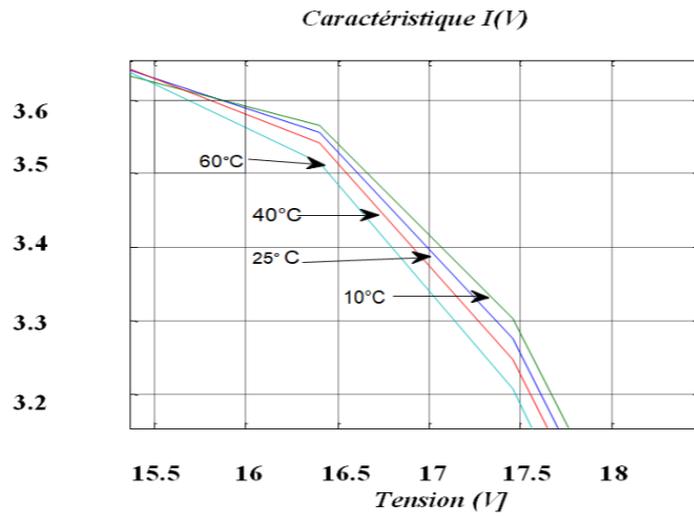


Figure III.31.b : Zoom sur la caractéristique I(V)

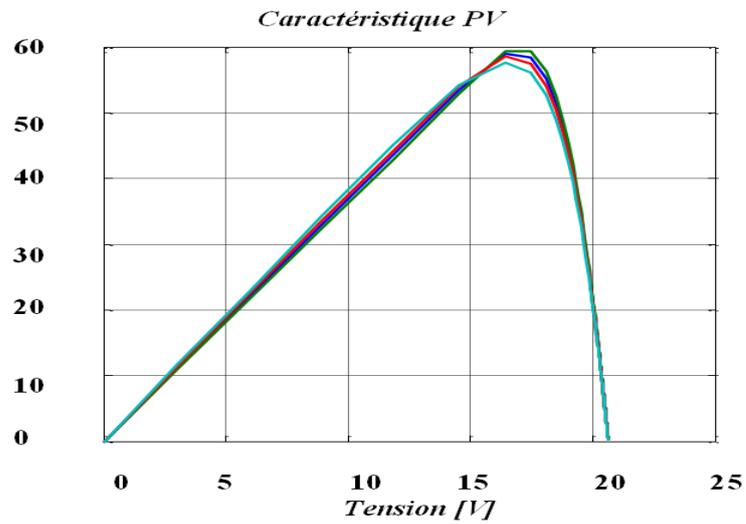


Figure III.32.a: P(V) en fonction de température

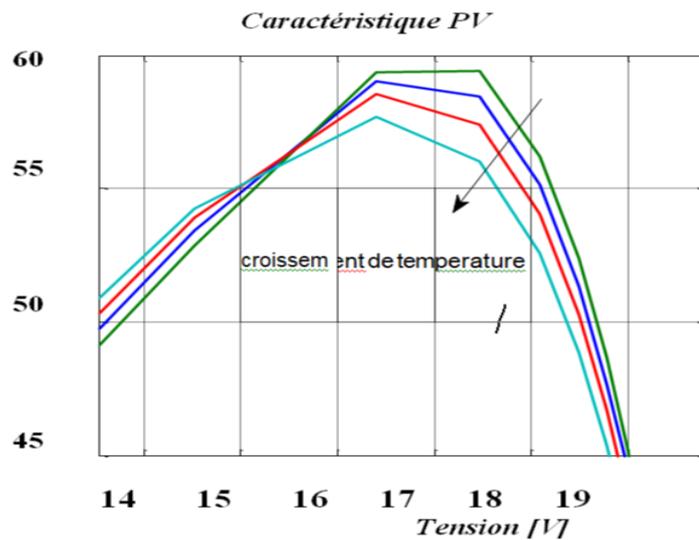


Figure III.32.b: Zoom sur la caractéristique P(V)

III.4- GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (PV)

III.4.1- INTRODUCTION

Etant donné que la cellule photovoltaïque est le plus petit élément dans un générateur PV, cela dit c'est l'élément de base de ce dernier, elle est responsable de la conversion directe de l'énergie solaire en un courant électrique continu, seulement elle génère une très faible puissance qui est de l'ordre de quelque watt. Un module PV est constitué de plusieurs groupes PV qui est à la base d'un ensemble de cellules PV raccordées en série ayant pour objectif d'augmenter leur tension. Ces cellules PV sont rassemblées en parallèle avec une seule diode by-pass [80]. Comme la montre Figure (III.33).

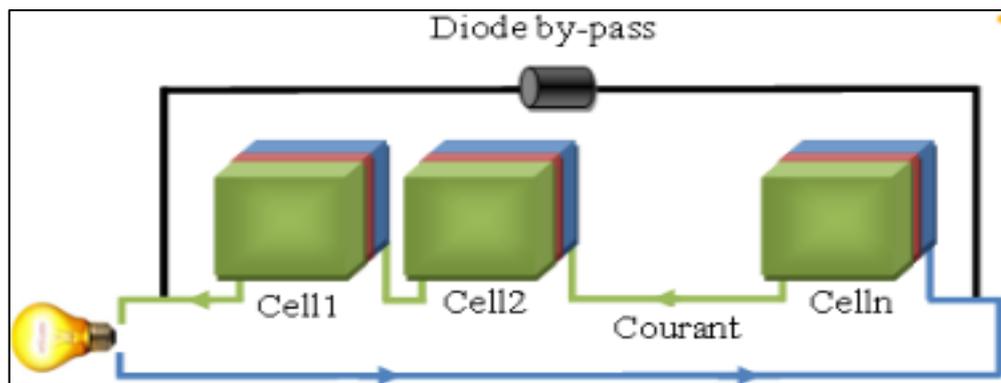


Figure III.33 : Groupement de cellules PV [80]

Ensuite ces groupes PV sont raccorder entre eux en parallèle afin d'augmenter le courant ainsi la puissance va être augmenté a des dizaines ou des centaines de watt par module (panneau).

Plusieurs autres composants sont ajoutés telle que (boîte de jonction, verre dur, verretrempé, joint silicone, cadre en aluminium et autre...) pour une sécurité mécanique du panneau et avoir un meilleur rendement. Comme le montre la Figure (III.34).

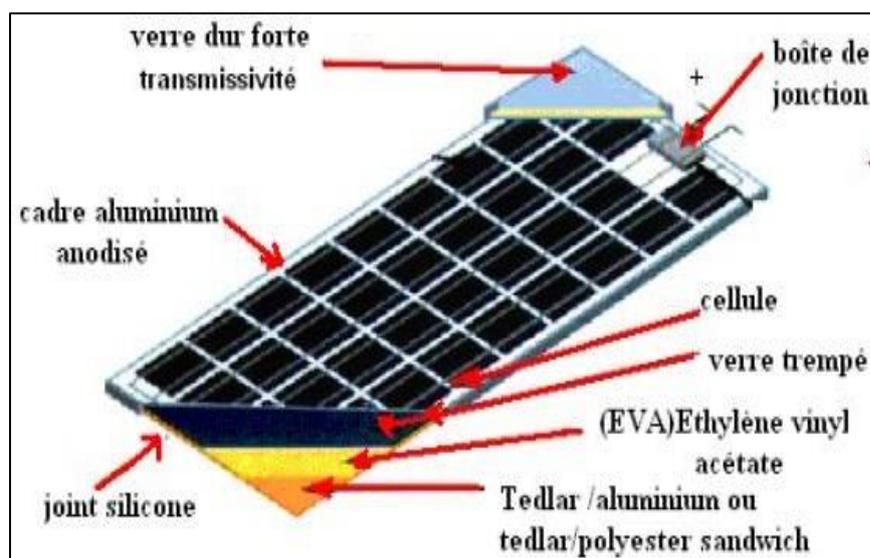


Figure III.34 : Composants d'un générateur PV [80]

III.4.2- CONSTITUTION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} ou la tension en circuit ouvert V_{co} .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance P , un courant I_{cc} et une tension V_{co} désirés [54]

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules Photovoltaïques sont connectées en série. La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces et l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc...), peuvent endommager les cellules de façon permanente.

III.4.3- ASSOCIATION EN SERIE / ASSOCIATION EN PARALLELE

III.4.3.1- INTRODUCTION

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules « figure (III.35) » pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques Watts-crête et quelques dizaines de Watts-crête ($1m^2$ de cellules PV produit de l'ordre de 100W).

Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. La courbe de fonctionnement I-V d'un module de base est une courbe se déduisant de la courbe de fonctionnement d'une cellule élémentaire par changement d'échelle sur l'axe des abscisses.

Une association série-parallèle de modules solaires aura de même une courbe de fonctionnement semblable à la cellule de base, obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes. Les performances d'un générateur photovoltaïque sont déterminées à partir de ces courbes. La connaissance du profil de ces courbes caractéristiques, pour une gamme d'éclairement la plus large possible, permet d'évaluer les puissances maximales délivrées ainsi que les rendements correspondants. Pour appliquer les caractéristiques courant-tension d'un groupement de cellules qui sera en tout point homothétique de la courbe $I=f(V)$ d'une seule cellule photovoltaïque caractéristique.

Quelques hypothèses sont nécessaires :

- Tous les panneaux ont les mêmes caractéristiques électriques.
- Aucune occultation partielle.
- Aucune influence thermique.

Un groupement mixte formé par la mise en série de (β) cellules en série et de (ω) cellules en parallèle est illustré dans la figure suivante (voir figure III.36):

La courbe de puissance d'un groupement série-parallèle est donc analogue à la courbe de puissance élémentaire. Ainsi tout ce qui a été dit pour une cellule élémentaire, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température ou l'influence des résistances série et parallèle, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable au cas du groupement. Le groupement des photopiles cité ci-dessus obéit à des règles strictes à respecter :

- Il ne faut connecter en série que des cellules ayant le même courant de court-circuit ;
- Il ne faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit-ouvert. [9]

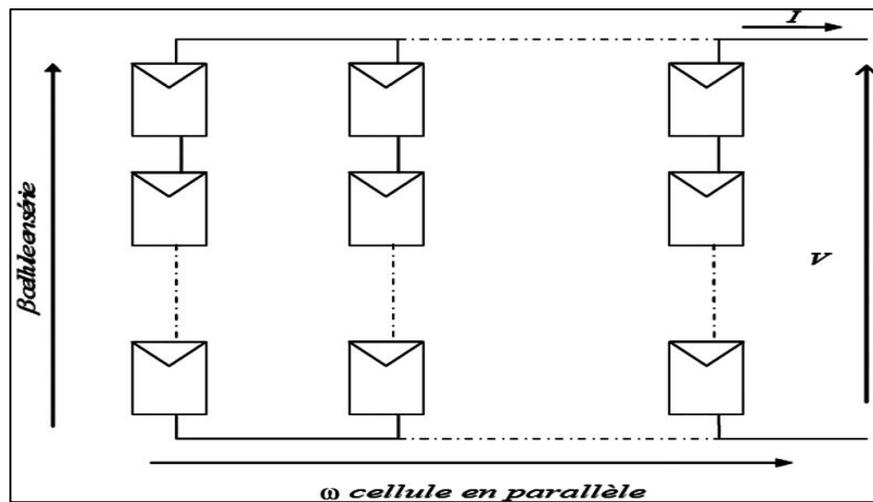


Figure III.35 : Association de ω cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série [9]

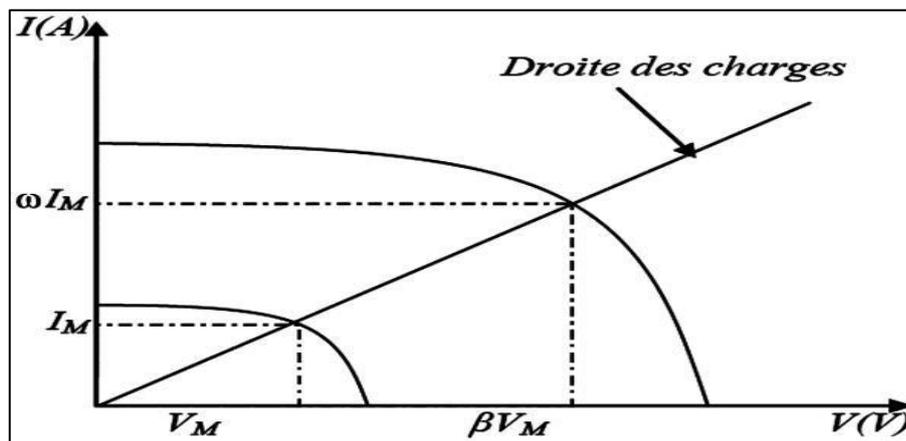


Figure III.36 : Caractéristiques de ω cellules solaires photovoltaïques en parallèle et β en série. [9]

Si les paramètres électriques des photopiles associées sont dispersés et si les règles précédentes ne sont pas respectées, certaines de ces photopiles vont se comporter en récepteur, en

polarisation directe ou inverse ce qui entraîne une élévation de la température de ces photopiles et peut entraîner la détérioration du module entier. Pour éviter ce problème, on procède souvent à :

- Un emplacement des modules photovoltaïques évitant les masques naturels ou artificiels provocants de l'ombre ;
- Une protection du réseau photovoltaïque par l'association de diodes. [9]

III.4.3.2- ASSOCIATION EN SERIE

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation ci dessous résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules :

$$V'_{co} = N_s * V_{co} \tag{III.20}$$

$$I_{ccs} = I_{cc} \tag{III .21}$$

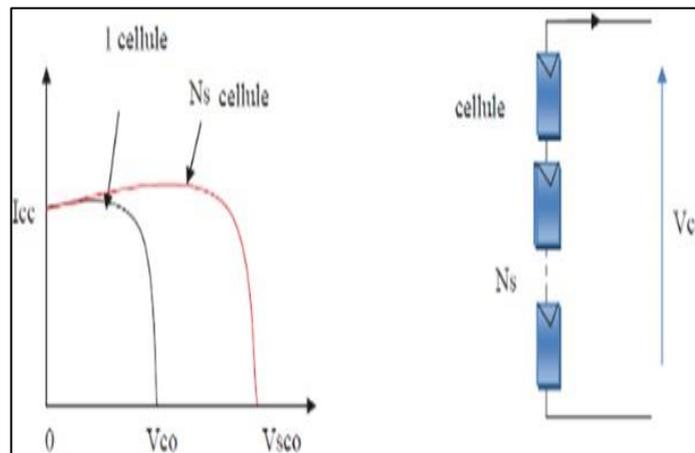


Figure III.37 : Branchement de cellules en série.

En additionnant des cellules (modules) identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [81]

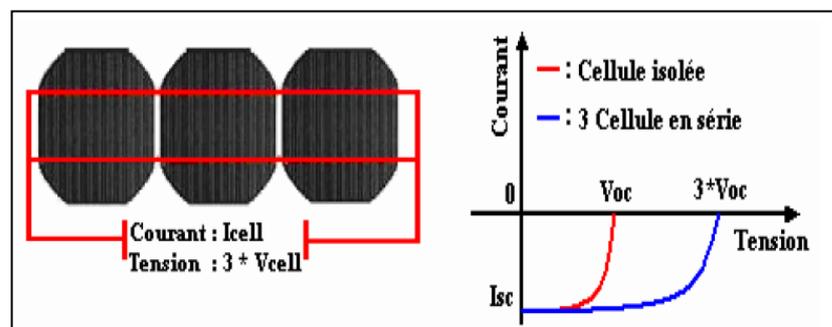


Figure III.38: Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension

III.4.3.3- ASSOCIATION EN PARALLELE

D'autre part, une association parallèle de « NP » cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie de générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I_{ccp} = N_p * I_{cc} \tag{III.22}$$

$$V_{co} = V_{cop} \tag{III.23}$$

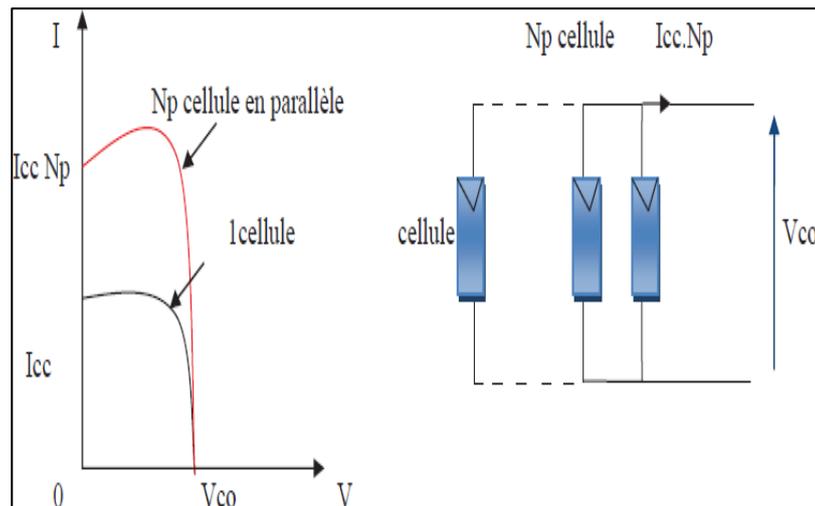


Figure III.39 : Branchement de panneaux cellules en parallèle.

En additionnant des cellules (modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche [81].

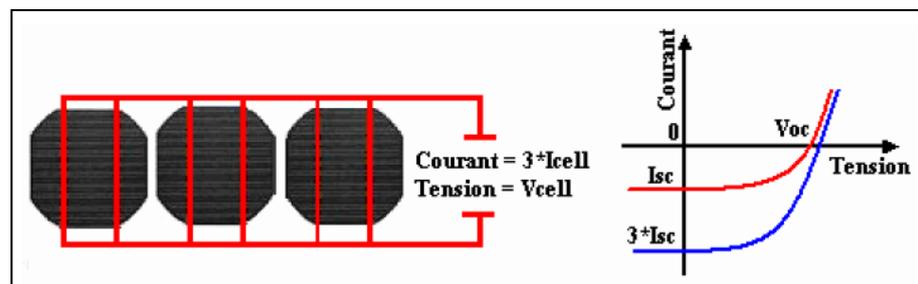


Figure III.40 : Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

III.4.4-AVANATAGES ET INCONVENANTS DES GENERATEUR « PV » [82] [62] [73]

III.4.4.1- AVANTAGES

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on site :

- Une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet .
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. Il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- Ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments. Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année. Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale.

III.4.4.2- INCONVENANTS

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication :

- Une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. la fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante.
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. [8]

III.4.5- ADAPTATION ENTRE LA CHARGE ET LA SOURCE

L'écart entre la production électrique du générateur photovoltaïque et la consommation de la charge crée une indisponibilité sérieuse d'un mécanisme d'adaptation entre le PV et la charge. Cet outil permet d'extraire un maximum de puissance dans chaque instant afin de la transférer pour la charge. L'étage d'adaptation joue un rôle très important dans ce concept, il se permet d'être une interface d'interconnexion entre la source d'énergie et la charge, il peut y'accéder à une production maximale de puissance à travers un système de contrôle capable de détecter les défaillances et la non-synchronisation entre l'entrée et la sortie. Un mécanisme de plus peut complexer le système et rend compte une augmentation de prix d'exploitation et d'application.

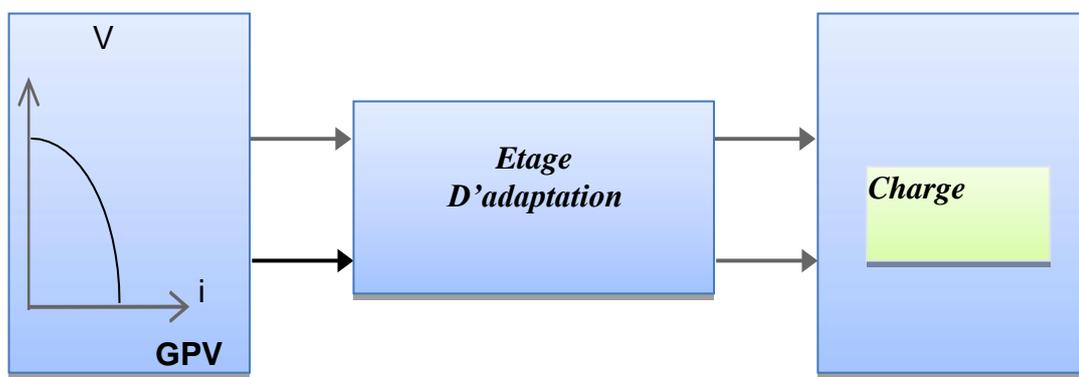


Figure III.41. Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [59]

Concernant la technique d'adaptation du générateur PV, on trouve dans l'article [83] présenté par F.Z. Zerhouni et B. Stambouli une utilisation d'une méthode spécifiée à la configuration des modules photovoltaïques selon l'éclairement solaire et la variation dans la charge. Les auteurs ont trouvé que le couplage direct entre le PV et la charge persiste des pertes de puissance remarquable, implique d'un point d'opération dépendant particulièrement de la charge. Pour cela ils ont étudié une méthode de couplage par changement de configuration. Ils ont fait prendre un générateur constitué de deux modules disposés en configuration série alimentent une charge résistive. Pour le premier essai une bonne adaptation se voit avec le couplage direct, un deuxième essai qu'ils ont fait en connectant le générateur avec d'autres charges donne une mauvaise adaptation. Cela donne un principe de changement de configuration simple, suppose qu'un nombre total de charges fixent les modules photovoltaïques. Un deuxième principe touche un changement de configuration selon l'éclairement. Ils ont observé que pour un même nombre de modules, pour une même charge, la puissance d'opération pour le récepteur varie selon la variation de l'éclairement. [83]

III.5-SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

III.5.1- DEFINITION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des

besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente.

La performance d'un système photovoltaïque dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système photovoltaïque doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système photovoltaïque.

III.5.2- DESCRIPTION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système PV, le module photovoltaïque à lui seul ne représente pas grand-chose. Pour répondre à un besoin défini, il faut en fait associer étroitement ces modules à un système complet correspondant à une application bien spécifique. Telle que les convertisseurs statiques (onduleur et hacheur) avec le système de régulation MPPT, les différents type de batteries et tout dispositif d'interconnexion et de sécurité ou de protection, dans le but d'assurer un approvisionnement dans les normes en électricité [80]

En général un système photovoltaïque comporte 3 majeures parties, qui sont représenté ci-dessous dans Figure (III.42).

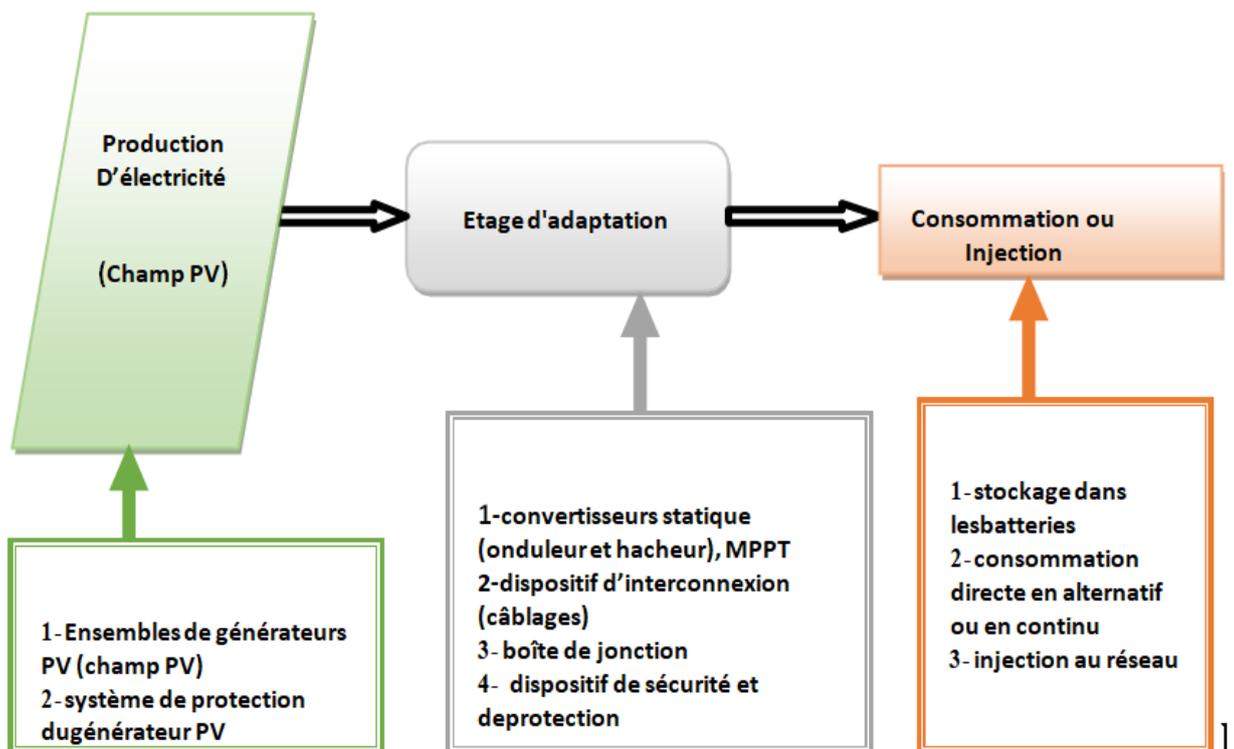


Figure III.42: Schéma descriptif d'un système photovoltaïque

III.5.2.1- GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE (voir § (III.3))

III.5.2.2- CONVERTISSEUR

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

En général on trouve deux sorte de convertisseurs dans une installation PV, le hacheur et l'onduleur qui ont pour rôle d'extraire la puissance maximale du générateur PV et la convertir en puissance alternative avant de la consommer [80]

• **HACHEUR :**

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Le hacheur a aussi pour rôle d'extraire la puissance maximale du générateur PV. C'est pourquoi il est muni d'un algorithme de recherche de type MPPT (Maximum Power Point Tracker) [80]

• **ONDULEUR**

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise [26]. Dans une station PV la puissance maximale extraite par le hacheur est convertie en puissance alternative active par l'onduleur.

L'onduleur est l'un des composants les plus importants dans une station PV, il existe plusieurs différents types topologies d'onduleurs utilisé selon la nature et l'exigence de l'installation et les plus importants sont :

a) **Onduleurs modulaires (module inverter) :** Chaque module solaire disposé d'un onduleur individuel, pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [80]

b) **Onduleurs centralisés (central inverter) :** Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Ce qui veut dire un seul onduleur de taille pour tout l'ensemble des modules du champ PV, et pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série [80]

c) **Onduleurs "String" ou "de Rangée" :** L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé [80]

III.5.2.3- CABLAGE ET BOITE DE JONCTION

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série. La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis. Cette boîte de jonction peut contenir des éléments de protection tels que des fusibles, des interrupteurs et des sectionneurs.

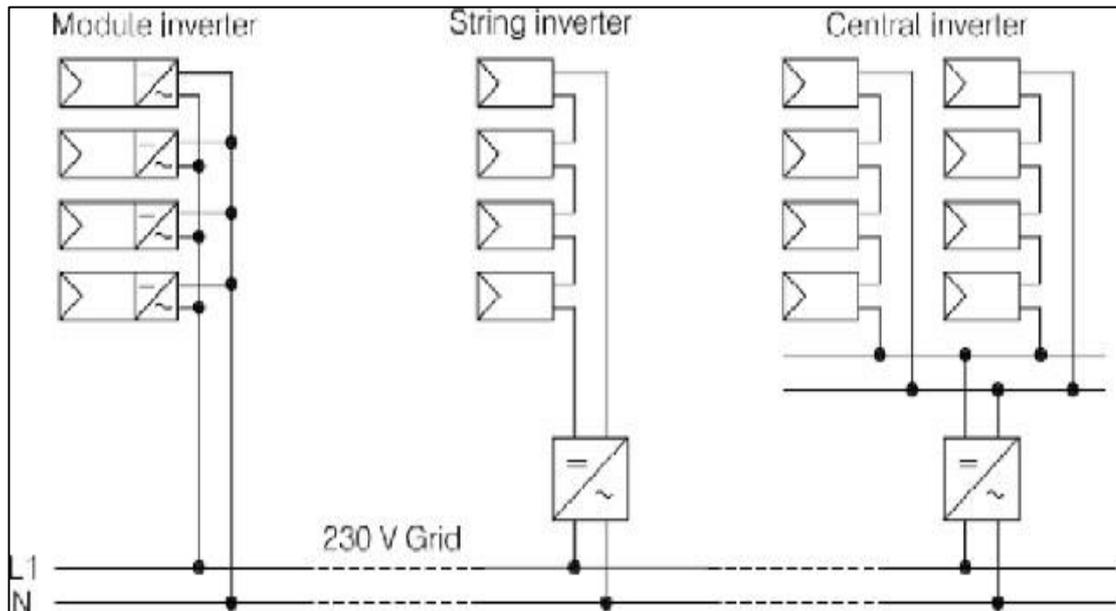


Figure III.43 : Classification des onduleurs PV connectés au réseau

Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage d'une installation car une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire considérablement le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie [80]



Figure III.44 : Exemple de boîte de jonction et câblage [80]

III.5.3- DIFFERENTS CONFIGURATION DU SYSTEME «PHOTOVOLTAIQUE»

Les systèmes photovoltaïques apparaissent comme une solution privilégiée pour la production d'électricité de faible ou moyenne puissance en site isolé et particulièrement pour les habitations. Ce système PV se compose de plusieurs éléments principalement les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires ; les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules ; le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge ainsi il règle la valeur de la tension nominale ; l'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin ; le câblage qui relie les différents composants du système entre eux [84].

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque ;
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC) ;
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC) ;
- Un système de régulation et de stockage
- Une source auxiliaire d'appoints. [84]

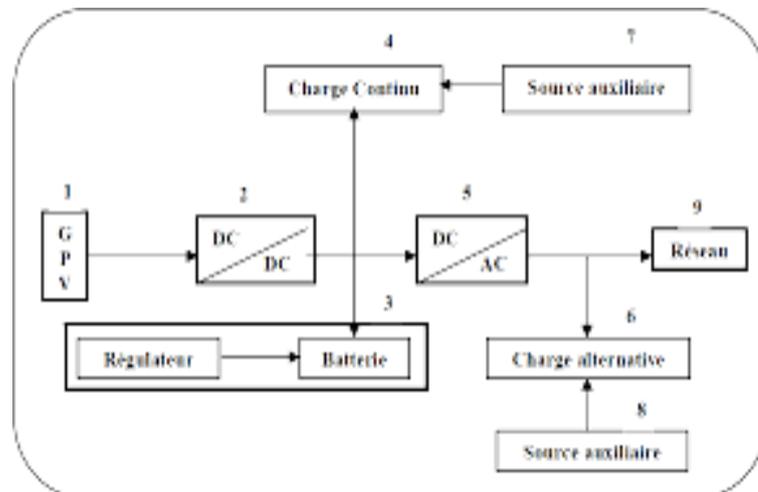


Figure III.45 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque

Autre représentation schématique d'une installation photovoltaïque

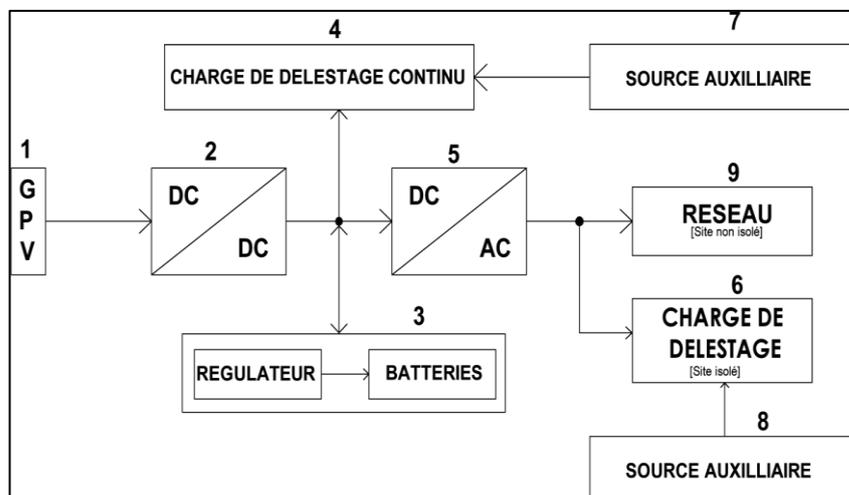


Figure II.46 : Schéma synoptique d'un système PV, sans et avec stockage. [9]

III.5.3.1. SYSTEME AUTONOME SANS BATTERIE

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure. II.10. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge [85].

III.5.3.2- SYSTEME AUTONOME AVEC BATTERIE

Ces systèmes sont représentés par les blocs [(1), (3), (4)] dans le cas où la charge est de type continu et les blocs [(1), (3), (5), (6)] si la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, donc l'énergie peut être utilisée même en l'absence du rayonnement solaire [85] [25] Ab.

III.5.3.3. SYSTEME FONCTIONNANT AU FIL DU SOLEIL

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue [(1), (2), (4)]. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit [(1), (5), (6)]. [85]

III.5.3.4. SYSTEME AVEC APPOINT ELECTRIQUE

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7)] et [(1),(2),(3),(4),(7),(9)]; ou de type alternatif [(1),(2),(3),(5),(6),(8)] et [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)]. Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie [85] .

III.6- CONCLUSION

Techniquement parlant, les capteurs « PV » sont proches des diodes « PN » dans leur construction, les matériaux utilisés et les mêmes phénomènes physiques qu'ils réalisent. Par conséquent, le comportement des cellules PV peut être modélisé comme des jonctions PN passives statiques et dynamiques, lorsque cette dernière n'est pas éclairée.

Dans ce chapitre, nous avons expliqué d'une manière explicite le système photovoltaïque.

Nous avons vu que les cellules photovoltaïques ont des caractéristiques I(V) non linéaires avec un point de puissance maximale (PPM) caractérisé par le courant (I_{max}) et la tension (V_{max}), l'interconnexion en série ou en parallèle des cellules PV introduit plusieurs problèmes de déséquilibre qui peuvent être très préjudiciables si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement. Nous avons vu également le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées, leur modes de fabrication et ce pour y parvenir : Deux types de cellules ont été présentées l'une cristalline et la deuxième amorphe pour un critère de comparaison. L'adaptation entre la charge et la source est aussi un critère majeur dans la conception et la réalisation de ce type de générateurs. Nous avons présenté le concept de modules PV avec les différents éléments qui les constituent,

Afin de garantir la pérennité des installations photovoltaïques destinées à produire de l'énergie électrique pendant de nombreuses années, une protection électrique doit être ajoutée aux modules.

Chapitre IV :
Contributions liées aux Marges de
Sécurité pour les systèmes
Photovoltaïques

IV.1- INTRODUCTION

Comme toutes les installations industrielles existantes, les centrales solaires photovoltaïques présentent plusieurs défaillances et anomalies qui peuvent affecter négativement la rentabilité de la centrale, liées à la défaillance des composants individuels de la centrale et aux perturbations liées aux conditions naturelles entre autres. La panne peut entraîner l'arrêt total de la station.

Les systèmes Photovoltaïques sont considérés fiables par rapport à d'autres systèmes, mais comme tout procédé, un système Photovoltaïque peut être exposé à plusieurs pannes provoquant le dysfonctionnement de ce dernier. Plusieurs études ont montré que la fiabilité des systèmes Photovoltaïques est fortement dépendante du matériel utilisé pour la construction des panneaux Photovoltaïques, de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire.

Un système Photovoltaïque peut avoir plusieurs défauts que ce soit les défauts de types construction, ou les défauts matériels et électriques causés par les conditions climatiques en général.

Dans ce chapitre notre travail on a introduit certains effets dus aux facteurs climatiques sur les cellules Photovoltaïque et à d'autres paramètres, on a mis au point la sécurité des systèmes Photovoltaïques ainsi que les composants de protection et les défauts dans une installation PV, les systèmes de protection, des défauts les plus fréquents rencontrés dans le champ Photovoltaïque ect...A cela, on a évoqué quelques marges de sécurité fondamentales des systèmes photovoltaïques pour la résolution des différentes contraintes qui peuvent être apparaitre.

IV.2. EFFETS DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LES CELLULES PV

Un module photovoltaïque dégradé peut ne jamais perdre sa fonction première de production d'électricité à partir du soleil, même si son utilisation n'est plus optimale. Cependant, lorsque la dégradation de puissance du module PV atteint un niveau inférieur à 80 % de sa valeur initiale, l'état de dégradation du module PV peut devenir problématique. Au cours de leur utilisation, les modules photovoltaïques sont exposés à diverses contraintes environnementales, à des dommages environnementaux et au changement climatique qui en résulte. Ce sont des facteurs qui entraînent une dégradation eutectique et des effets à long terme, le vieillissement des modules photovoltaïques. En fait, voici une liste exhaustive par ordre d'importance : température, humidité, rayonnement, vent...

IV.2.1. EFFET DE RAYONNEMENT SOLAIRE

Le rendement d'une cellule solaire photovoltaïque en silicium monocristallin et poly-cristallin dépend de l'intensité de rayonnement solaire incident, qui est mesuré en W/m^2 . Le courant de sortie de la cellule solaire augmente à mesure que l'intensité du rayonnement solaire augmente.

Quant à la tension en circuit ouvert de la cellule solaire, elle monte près de sa valeur la plus élevée avec le début de l'apparition du soleil, c'est-à-dire lorsque l'intensité est de $100 W/m^2$. Le rayonnement solaire est inférieur à $100 W/m^2$ lorsque la tension de sortie en circuit ouvert passe de 0,0 v à 0,5 v.

Cette valeur augmente sous forme logarithmique jusqu'à une valeur d'environ de 0,6 v lorsque l'intensité du rayonnement solaire est comprise entre (100-1000) W/m^2 .

Quant au courant de court-circuit, il augmente linéairement avec l'intensité du rayonnement solaire et sa valeur dépend de la surface de la cellule solaire. L'intensité du rayonnement solaire affecte indirectement la tension et le courant de la cellule solaire.

Le rayonnement solaire conduit à une augmentation de la température de la cellule solaire, comme cela sera expliqué plus loin.

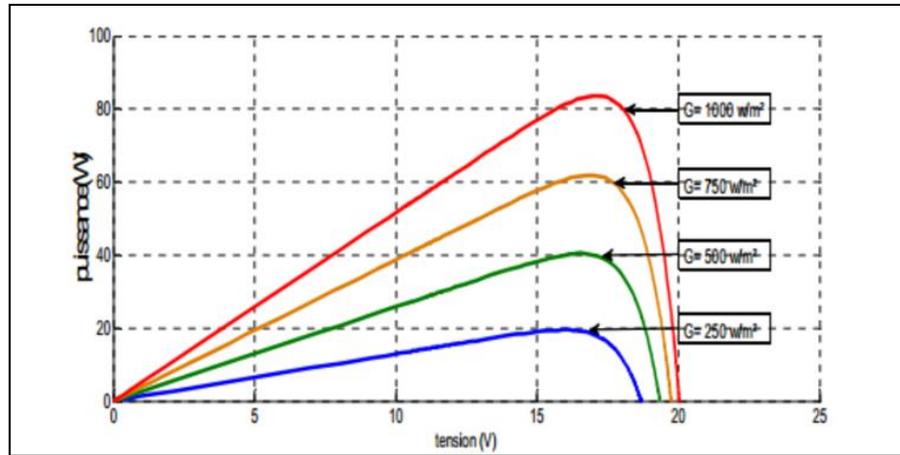


Figure IV.1 : Effet du rayonnement solaire sur les courbes de fonctionnement de la cellule solaire.

IV.2.2. EFFET DE LA TEMPERATURE (L'ENVIRONNEMENT EXTERIEUR)

L'augmentation de la température de l'environnement extérieur entraîne une augmentation de la température de la cellule solaire, qui à son tour entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit de la cellule solaire. La tension en circuit ouvert diminue de 2.3 mV/OC lorsque l'intensité du rayonnement solaire est constante.

De plus, le courant de court-circuit dépasse sa valeur à une température de 25 degrés Celsius de 0.005% chaque fois que la température de la cellule augmente d'un degré Celsius, et pour la faiblesse de ce pourcentage, l'effet de la chaleur peut être négligé dans le calcul de la relation de l'intensité du rayonnement solaire au courant de court-circuit, en particulier lorsque la température du panneau solaire change dans la plage naturelle de (20 à 60 degrés Celsius).

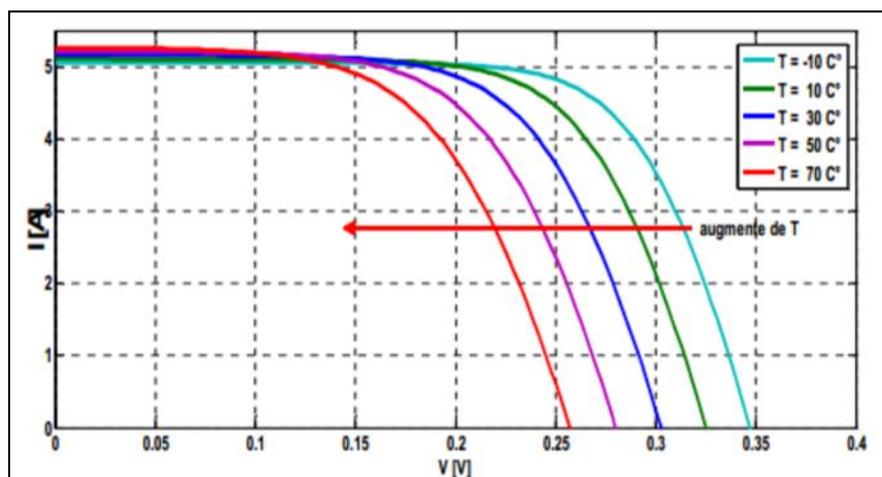


Figure IV.2 : Effet de la température (l'environnement extérieur)

Tableau IV.1 : Evolution la température avec (V_{co}), (I_{cc}), (P_m), (FF) et (η).

T (°C)	15	20	25	30	35	40	45	50
V_{co} (V)	0.6380	0.6277	0.6172	0.6065	0.5964	0.5857	0.5751	0.5645
I_{cc} (A)	5.1261	5.1367	5.1470	5.1582	5.1685	5.1791	5.1899	5.1997
P_m (W)	2.5396	2.4929	2.4454	2.3933	2.3483	2.2953	2.2445	2.1942
FF	0.778	0.775	0.771	0.765	0.762	0.757	0.752	0.747
η (%)	16.25	15.95	15.65	15.32	15.03	14.69	14.36	14.04

Tableau IV.2 : Paramètres extraits par la méthode pour différentes températures.

°C)	15	20	25	30	35	40	45	50
R_{sh} (Ω)	15.8228	15.0602	14.4928	13.8889	13.0890	12.7226	12.1655	11.7096
R_s (Ω)	0.00117	0.00124	0.00138	0.00148	0.0016	0.00182	0.00196	0.00214
N	1.526	1.516	1.505	1.503	1.478	1.453	1.450	1.445
I_s (μA)	0.345	0.377	0.573	0.946	1.233	1.585	2.103	2.597

IV.2.3. EFFET DE VENT

Le mouvement du vent n'affecte pas directement les performances de la cellule solaire, mais affecte plutôt la température de surface de la cellule solaire et affecte donc sa température interne. Et puisque le mouvement du vent affecte les courants de convection et contribue ainsi à augmenter le coefficient de transfert de chaleur. La convection, qui à son tour contribue au transfert de chaleur de la surface de la cellule vers l'environnement extérieur, ce qui entraîne une diminution de la température interne de la cellule et améliore ainsi son efficacité.

IV.2.4. EFFET D'OMBRE

L'ombre qui peut se former sur les panneaux solaires est l'un des facteurs les plus importants à prendre en compte lors de la construction de systèmes solaires, car l'ombre formée à la surface du panneau solaire entraîne une réduction de la quantité de rayonnement solaire tombant sur panneau solaire et conduit ainsi à une diminution de l'énergie électrique produite A propos du panneau solaire, où la valeur de l'énergie électrique produite est proportionnelle à la taille et à la forme de l'ombre formée à la surface du panneau solaire.

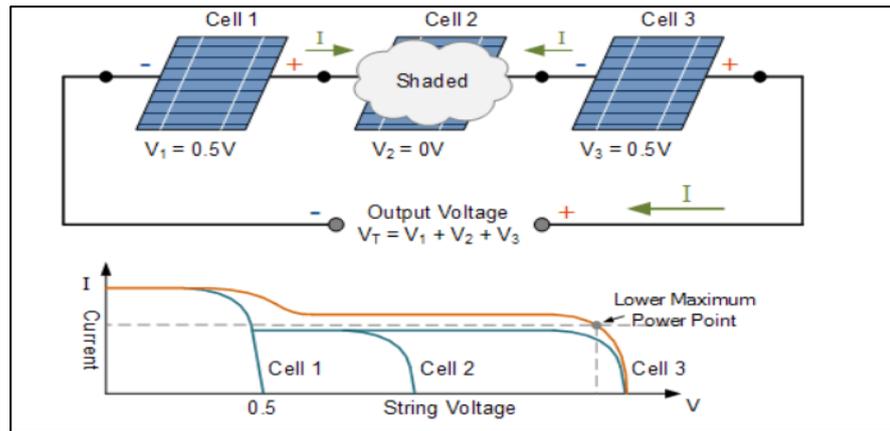


Figure IV.3 - Caractéristique d'une cellule ombrée.

IV.2.5. EFFET POUSSIERE

L'un des problèmes les plus importants auxquels sont confrontés les systèmes d'énergie solaire est l'accumulation de poussière et de saleté à la surface des modules solaires photovoltaïques. Par conséquent, les centrales photovoltaïques sont confrontées à de grands défis, en particulier dans les zones désertiques et sèches comme celles du Moyen-Orient.

La région du golfe Persique et l'Afrique du Nord. La plupart des études précédentes ont montré que la poussière et le sable transportés par le vent s'accumulent sur les surfaces des panneaux solaires et réfléchissent une partie de la lumière solaire qui les atteint, affectant leur efficacité, car les résultats montrent que la poussière réduit l'énergie produite de manière significative de 92.11% et la Efficacité 89%.

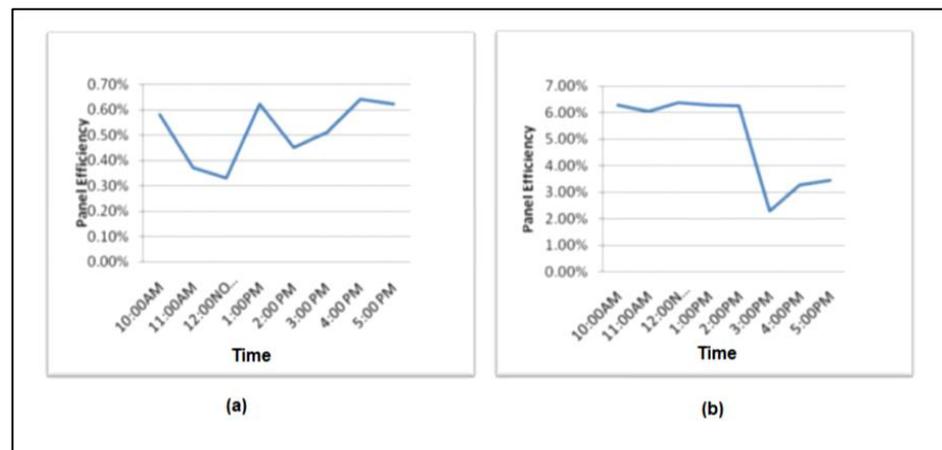


Figure IV.4 : Efficacité des panneaux solaires avec poussière (a), sans poussière (b) en fonction de temps.

RESUME :

- Les divers facteurs climatiques affectent la température de la cellule photovoltaïque, qui à son tour affecte la capacité de sortie maximale de la cellule en 04 facteurs.
- La température de la dalle a augmenté en raison de l'augmentation de la température de l'environnement extérieur.

- La température élevée du panneau en raison de la forte intensité du rayonnement solaire ou en raison de poussière.
- Diminution de la température du panneau due à l'augmentation de l'effet de transfert de chaleur par les courants de convection résultant du mouvement du vent.
- La température de la plaque augmente en raison du passage du courant électrique à travers elle.

La température de la cellule solaire est calculée à l'aide d'une équation linéaire :

$$T_s = T_a + F \times G \quad (\text{IV.1})$$

Où : $0.3 < F < 0.32$ selon le fabricant

L'effet du facteur vent, qui agit sur le transfert de chaleur du panneau solaire vers l'environnement extérieur, a été négligé.

IV.3. EFFETS DES AUTRES PARAMETRES

IV.3.1. CAPACITE DES BATTERIES DE STOCKAGE

Le stockage des batteries est nécessaire si l'on veut utiliser l'énergie solaire en dehors des heures d'ensoleillement ou si l'on souhaite momentanément disposer d'une puissance instantanée supérieure à celle produite par les modules solaires. Le local batteries doit être doté d'un système d'aération et d'un bac de récupération pouvant assurer la rétention de la capacité d'électrolyte des batteries en cas d'accident. L'augmentation de la capacité de stockage diminue le taux de charge, ce qui entraîne la tension des batteries chute pendant le processus de charge.



Figure IV.5 : Stockage batterie.

IV.3.2-INCLINAISON ET L'ORIENTATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE

Le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest. Pour garantir une production d'énergie optimale, les panneaux doivent être orientés vers le soleil. Si votre panneau solaire est mal orienté, cela affectera certainement son efficacité, qui est au moins 20% moins efficace par rapport aux régions du sud. L'orientation idéale d'un panneau solaire est généralement le sud et son azimut doit être de 180° . De cette façon, vos panneaux solaires sont placés de manière à recevoir toujours autant de lumière et de chaleur que possible.

L'angle d'inclinaison du panneau solaire est également important pour de meilleurs résultats. En plus de l'azimut de 180°, un toit en pente avec une inclinaison de 35° est idéal, mais pas nécessairement la norme. Tant que le toit n'est ni en dessous de 15° ni au-dessus de 60°, les panneaux solaires fourniront de bonnes performances.

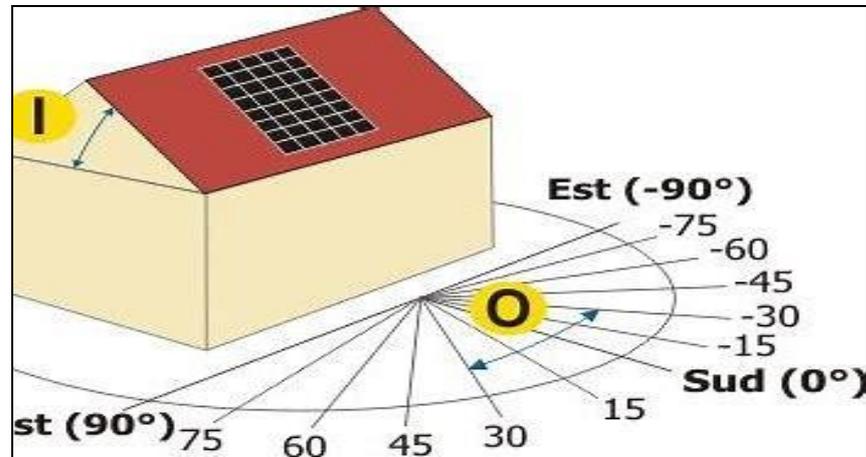


Figure IV.6 - Inclinaison et l'orientation du panneau photovoltaïque

IV.3.3. PARAMETRES LIES AUX TYPES DES CELLULES

Les paramètres importants liés aux types des cellules sont :

- **Rendement** : En termes d'efficacité, l'efficacité des panneaux photovoltaïques monocristallins sera d'environ 16-24 %. Il est supérieur au polycristallin. La différence est de 1% à 3% en raison de ses propriétés physiques qui lui permettent d'être produit tôt dans la journée jusqu'à tard le soir.
- **Puissant** : Les cellules monocristallines ont également tendance à avoir des tensions plus élevées que celles produites par les panneaux poly cristallins. Il faut savoir qu'un seul panneau mesure environ 1,7m x 1m et a une puissance de 300 Wc. 10 panneaux équivalent à une installation de 3 kWc.
- **Durée de vie** : En termes de durée de vie d'un monocristal, il est également plus viable qu'un monocristal.

IV.4- SECURITE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Pour garantir la durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules PV afin d'éviter des pannes destructrices comme dans toute installation électrique, être placés aux endroits adéquats, afin de pouvoir interrompre le circuit, manuellement ou automatiquement (à la suite d'un défaut). L'interruption manuelle peut être motivée par le besoin d'isoler une partie du circuit (maintenance, contrôle, mise hors circuit des consommateurs...). L'interruption automatique doit impérativement se produire en cas de défaut, et notamment de court-circuit.

La sécurité recherchée du côté CC ne concerne pas le risque d'électrisation ou d'électrocution (les tensions sont inférieures à 50V), mais surtout le risque d'incendie. En effet, sans protection, en cas de court-circuit, le courant généré par les batteries (ou même les panneaux solaires) ne sera pas coupé, et provoquera tout à la fois des arcs électriques pouvant produire un incendie, et, par échauffement, la fonte et l'embrasement des composants inflammables. Par ailleurs, la nature

même du courant continu interdit l'utilisation de dispositifs de protection conçus pour le courant alternatif, du fait de l'effet d'arc, bien souvent non interrompu dans les dispositifs de coupure prévus pour le courant alternatif.

La sécurité du côté CA doit bien entendu être la même que dans tous les circuits domestiques, et respecter la norme NF C 15-100.

Enfin, la mise à la terre et la protection de l'installation CC contre les surtensions transitoires dues à la foudre est vivement recommandée. En effet, les panneaux solaires ou les éoliennes sont en grande partie métalliques et le plus souvent placés en hauteur, et par conséquent sont exposés aux phénomènes électro-atmosphériques. Les surtensions transitoires dues à la foudre peuvent endommager ou détruire tout ou partie de vos appareils, et peuvent être évacuées vers la terre au moyen d'un parafoudre CC (l'appellation normalisée est : para-sur-tenseur, car les parafoudres ne protègent pas de la foudre, ce qui est le travail des paratonnerres, mais seulement des surtensions transitoires dues à la foudre) correctement relié à la terre. Les éventuels courants de fuite, de défaut, ou électrostatiques doivent aussi être évacués vers la terre.

IV.5- COMPOSANTS DE PROTECTION DE SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

IV.5.1- DIODES

Les différents types diodes rencontrées sont :

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance

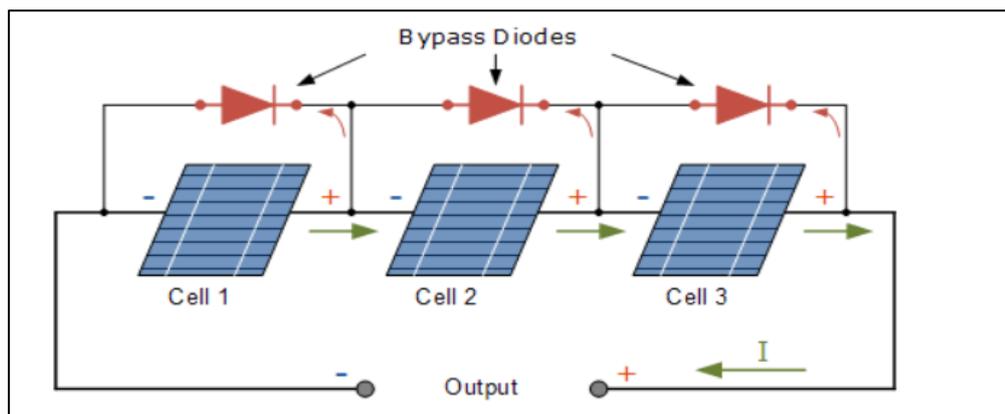


Figure IV.7 : Protection des systèmes PV par les diodes

IV.5.2- MISE A LA TERRE [86]

La mise à la terre et la protection de l'installation CC contre les surtensions transitoires dues à la foudre est vivement recommandée. En effet, les panneaux solaires sont en grande partie métalliques et le plus souvent placés en hauteur, et par conséquent sont exposés aux phénomènes

électro-atmosphériques. Les surtensions transitoires dues à la foudre peuvent endommager ou détruire tout ou partie de vos appareils, et peuvent être évacuées vers la terre au moyen d'un parafoudre CC (l'appellation normalisée est : para-sur-tenseur, car les parafoudres ne protègent pas de la foudre, ce qui est le travail des paratonnerres, mais seulement des surtensions transitoires dues à la foudre) correctement relié à la terre. Les éventuels courants de fuite, de défaut, ou électrostatiques doivent aussi être évacués vers la terre.

La mise à la terre des structures métalliques (cadre des panneaux solaires, structures métalliques de fixation, mât de l'éolienne, carcasses métalliques du régulateur et du convertisseur...) est réalisée au moyen d'un câble en cuivre souple de section 10mm² ou plus, la mise à la terre du parafoudre en 16mm².

L'équipotentialisation des conducteurs de terre est réalisée au moyen d'une barrette de terre, le contact avec la terre avec un piquet de terre en cuivre de 1,5m minimum descendu intégralement dans le sol.

La mise à la terre d'une installation photovoltaïque ou éolienne en site isolé devrait être obligatoire. Malheureusement, on constate bien souvent que les installateurs ou les usagers négligent ce point essentiel, mettant ainsi en péril, non seulement la pérennité de leur installation, mais aussi leur vie !.

La mise à la terre adéquate d'une installation photovoltaïque ou éolienne en site isolé remplit 3 fonctions :

- La protection des appareils contre les surtensions dues à la foudre ;
- La protection des personnes contre les décharges statiques ou d'éventuels courants de fuite ou de défaut ;
- La protection des personnes contre les défauts d'isolation des appareils connectés côté CA.

IV.5.2.1- PROTECTION DES APPAREILS CONTRE LES SURTENSIONS DUES A LA Foudre

Les panneaux solaires, généralement placés en hauteur, ainsi que leur structure métallique de fixation, mais aussi les éoliennes, sont susceptibles de se comporter comme des récepteurs vis-à-vis des charges électrostatiques au cours des orages. Il s'ensuit la production dans le câblage de courants induits pouvant atteindre des tensions bien supérieures aux tensions supportables par l'électronique des appareils (régulateur, convertisseur, moniteurs, etc...) et même par les batteries.

La protection de l'ensemble de l'installation s'effectue à l'aide d'un para-sur-tenseur, appelé aussi parafoudre, dont la tension nominale de service doit être, en principe sensiblement du double de la tension du système. Nos boîtiers de mise en parallèle pour installations à plusieurs modules photovoltaïques en sont pourvus. Pour les installations à un seul module, ou une seule branche de modules en série, ou encore celles où la mise en parallèle des modules n'a pas été effectuée au moyen d'un boîtier de mise en parallèle (ce qui n'est pas conseillé), il est vivement conseillé d'installer un parafoudre dans le coffret CC. L'évacuation des courants induits par la foudre s'effectue au moyen d'un conducteur de terre 10mm² ou 16mm², d'un répartiteur de terre (barrette d'équipotentialisation), et d'un piquet de terre.

IV.5.2.2-PROTECTION CONTRE LES COURANTS DE FUITE ET DECHARGES STATIQUES

En principe, toutes les masses métalliques (cadres des modules photovoltaïques, structures, mât, carcasses métalliques des appareils...) doivent être interconnectées (équipotentialisées) et reliées à la terre. Ceci s'effectue au moyen de conducteurs de terre 10mm² V/J, raccordés au répartiteur, puis au piquet de terre.

IV.5.2.3-PROTECTION CONTRE LES DEFAUTS D'ISOLATION COTE COURANT ALTERNATIF

Les appareils alimentés en CA par le convertisseur sont susceptibles de présenter des défauts d'isolation dangereux pour les utilisateurs (risque d'électrocution). Ces appareils sont en général munis d'une prise mâle « 2+T », qui comporte donc une fiche de terre destinée à évacuer les défauts d'isolation vers la terre. Il ya donc lieu, lors de la réalisation du circuit électrique domestique, de prévoir des prises murales femelles 2+T adéquates, afin de pouvoir ramener ces défauts à la terre par la barrette d'équipotentialisation et le piquet de terre.

IV.5.3- INTERPRETEUR /LE DISJONCTEUR [86]

Ces appareils doivent être en mesure d'assurer, sur commande manuelle ou sur défaut (masse, court-circuit), le sectionnement complet du circuit électrique côté courant continu en charge (c'est-à-dire sous tension), ce qui signifie qu'ils doivent être capables de supprimer totalement l'arc électrique produit à l'ouverture (ce qui peut ne pas être le cas des interrupteurs-disjoncteurs à courant alternatif pourtant encore couramment utilisés dans les installations solaires en site isolé).

Position et calibrage :

➤ ***Interrupteur-disjoncteur CC du champ solaire :***

Il se place à l'entrée « solaire » du régulateur. Il doit être calibré à une valeur légèrement supérieure à l'intensité de court-circuit du panneau ou du champ solaire. Il n'a pas de fonction de sécurité, puisqu'il ne réagira pas à la mise en court-circuit des panneaux, mais par contre est très utile pour couper l'alimentation solaire lors des contrôles ou de la maintenance.

➤ ***Interrupteur-disjoncteur CC du régulateur :***

Il se place à la sortie « batterie » du régulateur, et protège celui-ci contre le courant de la batterie en cas de défaut. Il doit être calibré à la même valeur que l'intensité maximale à la sortie « consommateur », mais peut, s'il n'y a pas de consommateur connecté à cette sortie, être calibré à la même valeur que l'interrupteur-disjoncteur d'entrée du régulateur.

➤ ***Interrupteur -disjoncteur CC des consommateurs :***

Il se place à la sortie « consommateurs » du régulateur et permet d'isoler le circuit consommateur en cas de défaut, d'intervention ou de maintenance, sans couper en même temps la charge solaire de la batterie.

IV.5.4- FUSIBLE [86]

Celui-ci est destiné à protéger l'entrée CC du convertisseur. Bien souvent, ces derniers possèdent déjà un fusible interne, mais peu accessible, et comme il n'est pas recommandé d'ouvrir ces appareils en cas de défaut, il vaut mieux placer un fusible externe à l'entrée CC. Il doit être calibré à la valeur maximum du courant d'entrée, exprimé en Ampère (A) du convertisseur, soit $I(A) = P(W) / U(V)$.

IV.6- SYSTEME DE PROTECTION [87]

Il existe plusieurs sortes de protection pour une installation photovoltaïque raccordée ou non au réseau, parmi ces derniers :

IV.6.1- PROTECTION CONTRE LES CHOCS ELECTRIQUES

En raison des spécificités d'un générateur photovoltaïque, coté DC, en plus des dispositions identiques à l'installation A.C, il est demandé d'utiliser des connecteurs PV en amont du premier coffret de regroupement et des câbles unipolaires avec une isolation renforcée équivalente à la classe II. Pour la protection contre les contacts indirects, au-dessus de 120 V D.C, seule l'utilisation d'une isolation renforcée, équivalente à la classe II, est admise.

Tableau IV.3 : Mesures de protection contre les chocs électriques adaptés à chaque situation.

	<i>Sur le circuit</i>	<i>Sur le circuit A.C</i>
<i>Protection contre les contacts directs</i>	Connecteur PV Isolation renforcée	Isolation simple enveloppes
<i>Protection contre les contacts indirects</i>	Isolation renforcée	Coupure automatique

IV.6.2- PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITES

Les surintensités doivent être maîtrisées afin d'éviter la destruction des câbles et autres composants. Côté continu d'une installation photovoltaïque usuelle (sans batteries), les surintensités sont dues principalement à un défaut d'une chaîne photovoltaïque conduisant à l'établissement de courants inverses en présence de plusieurs chaînes raccordées en parallèle. Si des surcharges ne peuvent se produire, des courts-circuits peuvent se produire consécutivement à une défaillance de l'isolement ; cependant de tels courts-circuits restent bien souvent d'une amplitude très limitée, ce qui les rend difficile à identifier et à éliminer.

C'est pour cette raison que l'isolation est renforcée et les conducteurs + et – séparés.

Sur la partie alternative, les surintensités peuvent être causées par des courts-circuits au niveau des onduleurs. Ces défauts ne nécessitent pas de précautions complémentaires à celles d'une installation usuelle.

Tableau IV.4 : Mesures de protection contre les surintensités.

	<i>Sur le circuit D.C</i>	<i>Sur le circuit A.C</i>
<i>Protection contre les courts- circuits</i>	Isolation renforcée câbles séparés dimensionnement à I _{sc}	Protection ampérométriques
<i>Protection contre la Surcharge</i>		Protection ampérométriques
<i>Protection sur le courant Inverse</i>	Protection par fusible sur chaque polarité	//////////

IV.6.3- PROTECTION DE DECOUPLAGE

Toutes les installations photovoltaïques raccordées au réseau doivent comporter une protection de découplage, c'est-à-dire un dispositif de coupure automatique du réseau qui intervient en cas de sortie de plages de fonctionnement de l'onduleur en tension ou fréquence. Cette protection de découplage est intégrée ou non à l'onduleur.

IV.6.4- SECTIONNEMENT ET COUPURE D'URGENCE

L'onduleur doit pouvoir être mis hors tension en cas de danger (défaut, échauffement, etc.) à l'aide d'une coupure d'urgence. De même, la maintenance de l'onduleur doit pouvoir être assurée en toute sécurité après sectionnement. Des dispositifs de coupure et de sectionnement sont placés en amont coté « D.C ». et en aval coté « A.C ». et au plus près de celui-ci.

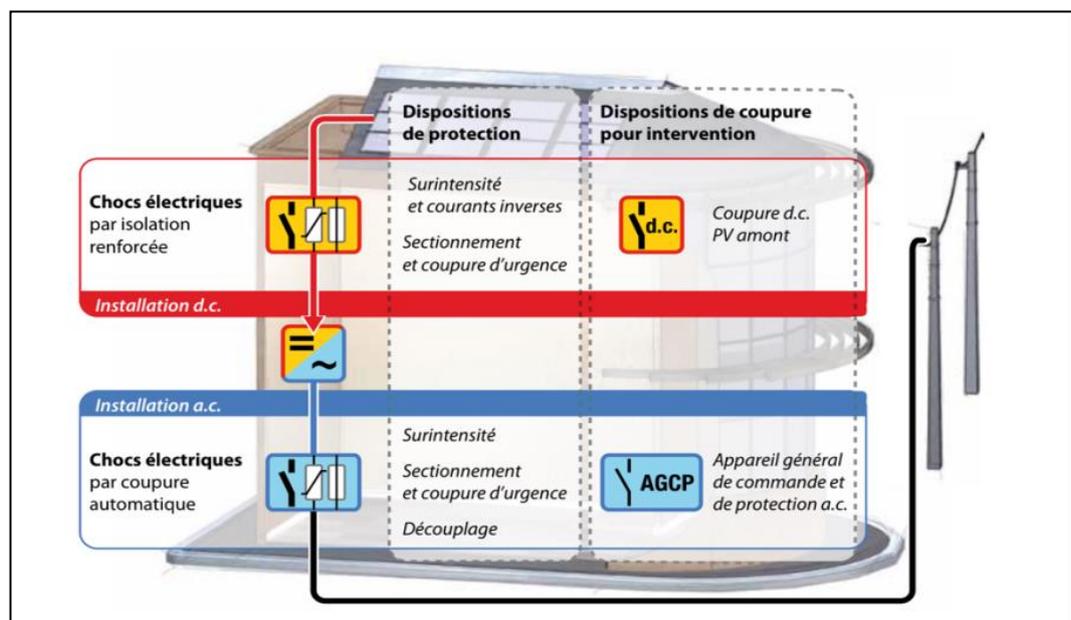


Figure IV.8 : Synthèse des protections mises en place tout au long de l'installation photovoltaïque

IV.7-DEFAUTS LES PLUS FREQUENTS RENCONTRES DANS UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE

Un défaut est défini comme un état anormal ou une anomalie au niveau du composant d'équipement ou du sous équipement .Il peut conduire à une défaillance du système.

Au cours de son fonctionnement, une installation PV peut être éventuellement soumise à différents défauts et conditions de fonctionnement anormales. Les défauts et les anomalies apparus varient d'une installation à une autre en fonction de sa conception, installation, opération et maintenance [80]

Généralement les générateurs PV sont considérés fiables par rapport aux autres systèmes, mais comme tous procédés, un système PV peut être exposé à plusieurs pannes provoquant le dysfonctionnement de ce dernier, plusieurs études ont constaté que la fiabilité des systèmes PV est fortement dépendante du matériel utilisé pour la construction des panneaux PV, de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire. Un système PV peut avoir plusieurs défauts que ce soit les défauts de types construction, ou les défauts matériels et électriques causés par les conditions climatiques. A ce titre, nous pouvons citer les défauts affectant un champ PV et leurs conséquences

sur la productivité de ce dernier. Les défauts collectés ont été classifiés selon la fonction des différents composants constituant l'installation PV. Six groupes de défauts ont été formés [80]

IV.7.1- DEFAUTS DANS LE GENERATEUR PV [80]

Dans le générateur photovoltaïque on trouve:

Tableau IV.5 : Exemples de défauts rencontrés dans les générateurs photovoltaïques

Défauts	Conséquences
▪ Dégradation des modules par vandalisme	▪ Diminution des performances et non fonctionnement de l'installation
▪ Mauvaise orientation et inclinaison des modules ou Inclinaison trop faible	▪ Ombrage, diminution des performances, Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons et problème d'étanchéité.
▪ Module mal ou pas ventilé, mal fixé ou non câblée	▪ Echauffement, Déplacement du module, diminution des performances, Perte d'étanchéité et détérioration des cellules
▪ Corrosion du cadre des modules et tempête	▪ Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, Module arraché et cassé
▪ Foudre et foudre sur l'installation	▪ Détérioration et destruction des Modules
▪ Pénétration de l'humidité et ombrage partiel (feuille d'arbre, déjections)	▪ Diminution des performances du champ
▪ Important courant de fuite et échauffement des modules par la boîte de connexion	▪ Hot spot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre et détérioration des cellules

IV.7.2. DEFAUTS DANS LA BOITE DE JONCTION [80]

Les défauts rencontrés dans la boîte de jonction sont :

Tableau IV.6 : Exemples de défauts rencontrés dans la boîte de jonction.

<i>Défauts</i>	<i>Conséquences</i>
Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre
Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre
Boîte de jonction sans presse-étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts et rupture du circuit électrique
Presse-étoupe en caoutchouc et infiltration d'eau par les vis de fixation	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes et incendie
Boîte de jonction non repérée, déconnexion des soudures et liaison sans protection	Problème pour contrôle et maintenance, arc électrique, incendie, diminution des Performances et destruction de la liaison
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes et incendie

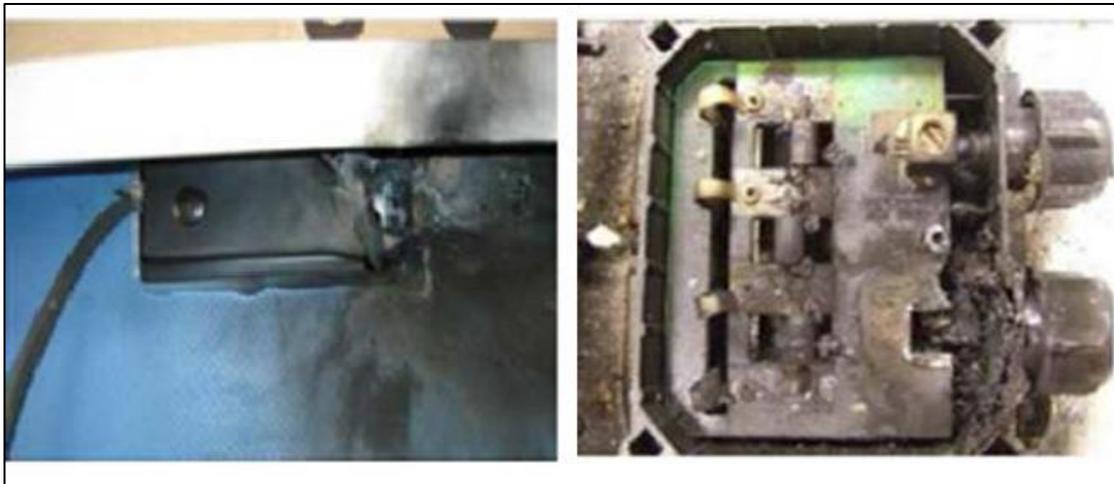


Figure IV.9 : Exemples de défauts rencontrés dans la boîte de jonction.

IV.7.3- DEFAUTS DANS LE SYSTEME DE CABLAGE [80]

Les défauts rencontrés dans le système de câblage est données comme suite:

Tableau IV.7 : Exemples de défauts rencontrés dans le système de câblage

Défauts	Conséquences
Mauvais dimensionnement des Câbles ou boîte de connexion décollée	Chute de tension > 3%, échauffement et connexion des cellules en série endommagée
Connexion desserrée ou cassée et toron	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction de diodes et boucle électromagnétique
Principe de câblage en goutte d'eau non respecté et absence de graisse de Silicone	Mauvais câblage et humidité
Mauvais câblage ou câbles non fixés	Court-circuit, claquage des diodes anti-retour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur et boucle de câblage
Câbles d'arrivée des sous champs entamés lors du dénudé ou câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert et arc électrique Faux contacts, circuit ouvert et arc électrique
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert et à arc électrique.



Figure IV.10 : Exemples de défauts rencontrés dans le système de câblage.

IV.7.4- DEFAUTS DANS LE SYSTEME DE PROTECTION [80]

Les différents défauts qu'on trouve dans le système de protection sont comme suite :

Tableau IV.8 : Exemples de défauts rencontrés dans le système protection.

<i>Défaut</i>	<i>Conséquences</i>
Protections inappropriées ou mal dimensionnées	Court-circuit, hot spot, incendie et arrêt de l'installation
Interrupteur, disjoncteur inapproprié et vieillissement des disjoncteurs	Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture et non fonctionnement.
Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes ou sous dimensionnement de diodes de by-pass ou diode mal connectée	Echauffement, Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction, Non fonctionnement des diodes et absence de protection contre les courants inverses
Interrupteur, disjoncteur inapproprié Et vieillissement des disjoncteurs	Problème de sécurité et dysfonctionnement en cas de pluie
Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret ou Armoire électrique posée à même le sol à l'extérieur	Non déclenchement et tension entre neutre et terre
Disjoncteur différentiel non conforme norme	Non fonctionnement des diodes, court-circuit, hot spot et non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension

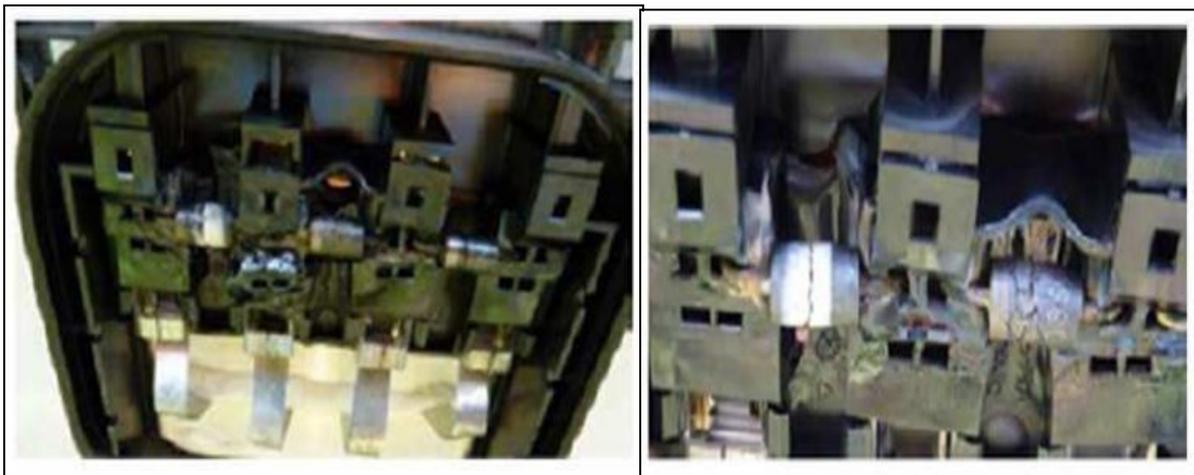


Figure IV.11 : Exemples de défauts rencontrés dans le système protection.

IV.7.5- DEFAUTS DANS L'ONDULEUR [80]

Les défauts rencontrés dans l'onduleur :

Tableau IV.9- Exemples de défauts rencontrés dans l'onduleur

<i>Défauts</i>	<i>Conséquences</i>
Dégradation à cause la chaleur ou d d'isolement	Détérioration de l'onduleur et des Connexions
Faux contact et fusible fondu	Arrêt de l'onduleur
Surtension ou onduleur non mise à	Déconnexion de l'onduleur et disjonctif différentiel non actif
onduleur sous dimensionné ou sur- dimensionné	Destruction de l'onduleur et Perte de puissance avec diminution des perfor
Onduleur installé dans un lieu non étanche ou mal fixé	Panne et chute de l'onduleur
Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances
Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible ou Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Pas d'information sur le fonctionnement et perte des données

IV.7.6- DEFAUTS DANS LE SYSTEME D'ACQUISITION [80]

Les défauts rencontrés dans le système d'acquisition:

Tableau III.10 : Exemples de défauts rencontrés dans le système d'acquisition

<i>Défauts</i>	<i>Conséquences</i>
Coupure de courant ou défaut de paramétrage	Perte de données et enregistrement de fausses données
Sonde d'ensoleillement non câblée et mauvais câblage des shunts de mesure	Mesure impossible ou erronée
Non configuré pour l'acquisition des données ou acquisition de données vierge	Pas de donnée enregistrée ou aucune information enregistrée
Carte électronique mal positionnée	Touches inactives et défaut de Commande
Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code	Lecture des données par l'exploitant impossible
Bornier de mesures et de sonde de température trop proches	Câblage difficile, risque de court-circuit
Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt	Fiabilité des données

IV.8. MARGES DE SECURITE DES SYSTEMES A UNE ENERGIE PV UTILISANT LES DONNEES METEOROLOGIQUES

Comme mentionné précédemment, les données climatiques ont un impact important sur l'efficacité des cellules photovoltaïques, et jusqu'à présent plusieurs études sont toujours en cours dans ce domaine pour atteindre des rendements plus élevés que les cellules photovoltaïques.

Mais en me connectant directement avec des experts du domaine au cours de stage pratique, j'ai pu obtenir des marges de sécurité applicable. Avant de déterminer les marges il faut faire une étude bien précise sur le site choisis : la surface, les données géologique et surtout les données météorologique.

On peut résumer ces marges de sécurité en :

- Dans les hauteurs où la température diminue et le mouvement du vent augmente, l'utilisation de panneaux poly-cristallins est meilleure que monocristalline et cela est dû au fait que la valeur du potentiel de puissance maximale est plus faible dans les panneaux poly-cristallins.

- Dans les zones de haute altitude où la température d'érosion est basse et la vitesse du vent augmente, des plaques peuvent être utilisées un panneau solaire composé de 30 à 32 cellules monocristallines. Cela fera fonctionner les panneaux solaires entre (13.5 et 14.4) volts dans ces conditions et rendra ainsi la tension maximale de point de fonctionnement proche de la tension de la batterie dans les derniers étages qui expédier. Il permet également des économies de 11 % à 17 % sur le coût de 36 panneaux solaires monocristallins cellule. Les panneaux solaires composés de 33-34 cellules poly*cristallines peuvent également être utilisés dans des conditions climatiques mentionné lui-même. Cela permettra d'économiser jusqu'à 8% sur le coût des panneaux 36 cellules.

- Dans des conditions climatiques à haute température, il est préférable d'utiliser des panneaux solaires monocristallins car la tension d'alimentation maximale reste proche de 14 volts dans des conditions chaudes. En conditions chaudes, on note que les cellules poly-cristallines peuvent faire chuter la tension d'alimentation maximale à 12 volts et ainsi faire fonctionner sur la courbe V-I du panneau solaire à droite du point de fonctionnement maximal, ce qui entraîne une diminution importante de la puissance générée par le panneau solaire. Celle-ci peut être traitée à l'aide de plaques avec un nombre de cellules supérieur à 36 cellules, selon l'importance de l'augmentation de température.

- Il est recommandé d'augmenter la capacité de stockage dans des conditions climatiques élevées, notamment si les panneaux utilisés sont poly-cristallins et que le nombre de cellules est inférieur à 36 cellules. Cela est dû au fait que l'augmentation de la capacité de stockage réduit le taux de charge, ce qui entraîne une diminution de la tension de la batterie pendant le processus de charge, et donc la poursuite du processus de charge à basse tension, ce qui empêche le fonctionnement de l'énergie solaire. panneaux à droite du point de capacité maximale.

- Lors de l'augmentation de la capacité de stockage pour répondre à la diminution de la tension de charge en raison de la température élevée des cellules solaires, il est nécessaire de régler les contrôleurs utilisés à une tension proche de 14 volts afin que le processus de charge

se poursuive sans atteindre la séparation tension lorsque les batteries sont pleines, ce qui endommage les batteries en raison d'une surcharge.

- Si la fonction de charge autorégulatrice repose sur l'utilisation de diodes, un plus grand nombre de diodes doit être utilisé dans les régions froides, tout en réduisant la capacité de charge si possible. C'est jusqu'à ce que la tension de la batterie monte suffisamment pour que le point de fonctionnement des panneaux photovoltaïques fonctionne suffisamment à droite du point de capacité maximale lorsque le processus de charge est terminé et évite ainsi de surcharger les batteries.

- Le vent contribue au transfert de chaleur de la surface de la cellule vers l'environnement extérieur, ce qui entraîne une diminution de la température interne de la cellule et améliore ainsi son efficacité mais il faut choisir la bonne structure du support du panneau PV, il faut être inoxydable en aluminium ou en acier galvanisé à chaud avec une couche protectrice de 30 µm environ après perçage et soudage.

- Le support doit être conçu pour assurer un montage par ancrage en béton.

- Le support doit être confectionné de manière à assurer une bonne stabilité du générateur solaire face à des vents de vitesses importantes (120km/h).

- Le montage du support doit être conçu de manière à laisser un espace vide entre la base des modules et la surface d'installation d'au moins 30 cm.

- Pour éviter l'effet d'ombre il faut laisser un vide entre la construction et les panneaux Photovoltaïques. Cette distance est calculée par cette équation linéaire :

$$d = 2 \times l \quad \text{(IV.2)}$$

Où d : La distance.

l : La longueur de construction.

- La poussière reste le problème qui n'a pas une marge de sécurité avant installation donc jusqu'à présent il faut nettoyer régulièrement les panneaux soit avec un chiffon ou nettoyage photo catalyse.

- Il y a des études sur l'utilisation des vibrations pour nettoyage des panneaux Photovoltaïques automatiquement.

IV.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons décrits les effets des paramètres climatiques sur les systèmes à énergie PV qui ont une très grande influence sur le rendement et la durée de vie.

Aussi nous avons décrits d'une manière générale la sécurité de ce système. Ensuite nous avons cerné globalement les différents défauts et leurs conséquences.

Le plus important nous avons recensé les marges de sécurité des systèmes photovoltaïque à base des données climatiques.

CONCLUSION GENERALE

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables.

Les avantages de ces sources sont nombreux car elles sont généralement propres, sûres et, surtout, elles existent en quantités illimitées. La décentralisation des énergies renouvelables est également un facteur positif très important dans le développement de certaines régions et localités.

Ces sources d'énergie respectent l'environnement lors de leur fabrication, de leur fonctionnement et de leur durée de vie, ainsi que lors de leur démantèlement. Elles sont différentes aux énergies à combustibles des fossiles).

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil.

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique qui génère un courant continu à partir du rayonnement électromagnétique .l'énergie photovoltaïque est captée par les cellules photovoltaïques qui sont des composants électroniques qui génèrent l'électricité lorsqu'ils sont exposés la lumière.

Les insultions photovoltaïques connectées au réseau sont généralement constituées de plusieurs panneaux photovoltaïques dont le nombre peut varier de dix à plusieurs milliers.

Les systèmes Photovoltaïques sont considérés fiables par rapport à d'autres systèmes, mais comme tout procédé, un système Photovoltaïque peut être exposé à plusieurs pannes provoquant le dysfonctionnement de ce dernier.

Plusieurs études ont montré que la fiabilité des systèmes Photovoltaïques est fortement dépendante du matériel utilisé pour la construction des panneaux Photovoltaïques, de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire.

Dans ce travail nous avons Contribué à l'étude de quelques marges de sécurité fondamentales d'un système à énergie photovoltaïque avec Une description d'une manière générale la sécurité de ce système. Ensuite nous avons cerné globalement les différents défauts et leurs conséquences et de donner les marges de sécurité des systèmes à une énergie photovoltaïque utilisant les données météorologiques.

Le domaine du génie industriel s'intéresse à cette énergie car bientôt toutes les industries se tourneront vers l'utilisation de l'énergie photovoltaïque car sa source est gratuite.

Donc cette recherche nous a donné l'opportunité à découvrir le monde de l'énergie photovoltaïque, son utilisation, ses avantage ainsi que ses quelques inconvénient qu'elle peut présenter.

L'ingénieur de ce secteur, ne doit pas seulement superviser ou diriger, il doit aussi penser au bon fonctionnement des installations photovoltaïques et profiter le maximum de cette énergie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : M. Lopez, “ Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée ”, Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [2] : O. Gergaud, “ Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et associé à un Accumulateur ”, Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [3] : BENSACI Wafa Modélisation et Simulation d'un système Photovoltaïque adapté pour une commande MPPT’, Master en Génie électrique, 2011/2012
- [4]: M. Muralikrishnan and V. Lakshminarayana, “Hybrid (*Solar and Wind*) Energy System for Rural Electrification ”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, No. 5, October 2008.
- [5]: Tom Markvart & Luis Castaner, "Handbook of Photovoltaics : Fundamentals and Applications", ELSEVIER, 2003
- [6]: B.S. Borowy and Z. M. Salameh, “*Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996
- [7]:H.Yang, W.Zhou, L.Lu and Z.Fang, “ *Optimal Sizing Method for Stand Alone Hybrid Solar–Wind System with LPSP technology by using Genetic Algorithm* ”, Solar Energy 82, pp. 354-367, 2008.
- [8] : FEDDAOUI Omar « Contribution à l’Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables » Mémoire de Magister, Université de Souk Ahras-2013 / 2014.
- [9] : Ibrahim YASSINE « Système Hybride Photovoltaïque –Eolien-Diesel sans Stockage » titre d’Ingénieur de l’université Libanaise Faculté de Génie – Branche III, Spécialité : Génie Electrique- Liban 2012/2013
- [10] : Zouak Belgacem, « Etude de l’évolution des caractéristiques des matériaux thermodynamiques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité », Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, (2012).
- [11] Laurence Serra, « Barrières à l’implantation de projets d’énergie renouvelable dans les communautés hors réseau des régions Nordiques canadiennes », Mémoire de Magister, Université Sherbrooke, Canada, (2011).
- [12]: <https://www.fauxtouvoir.com/energies-renouvelables>.
- [13]: F. Brihmat, “*L’étude Conceptuelle d’un Système de Conditionnement de puissance pour une Centrale de hybride PV/Eolien* ”, Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [14]: M. Adel, “ *Les vrais défis de l’Algérie* ”, Portail Algérien des Energies Renouvelables, Septembre 2012.
- [15]: F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed and H. Benalla, “ Modélisation, Simulation et Contrôle d’une Turbine Eolienne à Vitesse Variable basée sur la Génératrice Asynchrone à double alimentation ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14 N°1, pp. 109-120, 2011.
- [16]: ABBAD IMANE «Simulation de l’effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairement) sur le rendement d’une cellule solaire » Mémoire de Master, Université Larbi Ben M’Hidi / Oum El Bouaghi(2019).
- [17] :Ivana Tadić Knežević « Les énergies renouvelables : analyse terminologique » Mémoire de Master UNIVERSITÉ DE ZAGREB (2015).
- [18]:World Energy Council. <http://www.worldenergy.org>.
- [19] : A. Mirecki, “ Etude comparative de Chaînes de Conversion d’Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance ”, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.

- [20] : C. Darras, “ Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE”, Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [21] : Abouchemala Mohamed et Bekai Youcef « Les énergies renouvelables en Algérie » Mémoire de Master, Université Oran2 IMSI(2017).
- [22] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_solaire_passive
- [23]- Renewable In Global Energy Supply. *An IEA Fact Sheet. International Energy Agency.*
- [24]:] <https://www.explorateurs-energie.ch/les-9-energies/lenergie-hydraulique>.
- [25] : S. Haffen, “ *Caractéristiques Géothermiques du Réservoir Gréseux du Buntsandstein d’Alsace*”, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, Septembre 2012.
- [26] :Belloufi .Y, «Modélisation d’un échangeur air/sol dont le but de rafraichissement des locaux». Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider. Biskra(2012).
- [27]: World Energy Council. <http://www.worldenergy.org>.
- [28]: Renewables in Global Energy Supply. An IEA Fact Sheet. International Energy Agency
- [29] : Centre National d’Information et de Ressources sur le Photovoltaïque (*France*).
- [30]: <http://deschampsdidier71.free.fr/Les%20produits/panneaux.html>.
- [31] : Bidi Manel « Conception d’une centra le photovoltaïque pour recharge de voitures » Mémoire de Master Université de M’ sila (2018).
- [32]:<http://www.energies-renouvelables.org/accueil-systemes-solaires.asp>.
- [33] : La grenelle de la mer, “ *Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer*”, Année 2009.
- [34] :T. Zhou, “ *Commande et Supervision Energétique d’un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d’Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l’Intégration dans le Système Electrique d’un Micro Réseau* ”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [35]: F. M. González-Longatt, “*Model of Photovoltaic Module in Matlab* ”, 2nd Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, 2005.
- [36] :G. Grandi and G. Sancineto, “*Hardware Modeling of Photovoltaic Panels* ”, Department of Electrical Engineering, University of Bologna, 2003.
- [37] ; Jacques Bernard : « Energie Solaire » Mai 2007].
- [38]: Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John, Wiley & Sons Ltd, 2003
- [39]: F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003
- [40]:R.A. Messenger, J. Ventre, "Photovoltaic Systems Engineering (Second Edition)", CRC Press,2004
- [41] :F.A. Farret, M. Godoy Simoes, "Integration of Alternative Sources of Energy", John Wiley & Sons Ltd, 2006
- [42] :S. M. Ait-Cheikh, «*Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [43] : M. Adouane, «*Etude et conception d’une stratégie de commande d’un onduleur connecté au réseau électrique*», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [44] : Salam Fatah, "Modélisation d’un système multi générateur photovoltaïque interconnecté au réseau électrique", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Setif-UFAS, (2011).
- [45] : BENYAGOUB LALIA KHIRI KARIMA « Etude avancée de procédé de stockage de l’énergie solaire » Mémoire de Master, Filière : Maintenance en Instrumentation, Spécialité: Mesure-Analyse-Qualité, 2016.
- [46] : Le ministère de l’Energie et des Mines“ *Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique* ”, Algérie, Mars 2011.

- [47] :S. Petibon, “ *Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l’Energie pour les Applications Photovoltaïques* ”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [48] : Anne LABOURET-Michel VILLOZ : « Energie Solaire Photovoltaïque, le Manuel du Professionnel » Janvier 1993].
- [49] : STAMBOULI «Cours optoélectroniques-USTO : 2006 »
- [50] : Claude ACKET-Jacques VAILLANT « Les énergies Renouvelables »
- [51] : Jacques Bernard : « Energie Solaire » Mai 2007].
- [52] : Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, L’Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem,(2017).
- [53] : TOUAMA Tariq et HAFIDI Nouh « Commande d’un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque » Mémoire du Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA (2018)
- [54] : F. Chekired, « *Etude et implémentation d’une commande MPPT neuro-floue sur FPGA*», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [55] : DJERIOU SALIM « Simulation d’un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » thèse de magister en électrotechnique Option : machines électriques- université Ferhat Abbas de setif - 2011
- [56] :Djerrar Mohammed Al Amine « Etude comparative des dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïques » Mémoire de Master, Filière : Génie Industrielle, Spécialité: Mesure-Analyse-Qualité - Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, Université d’Oran 2Mohamed Ben Ahmed- 2016.
- [57] : R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.
- [58] : A. Oi, *Design and simulation of photovoltaïque water pumping système*, Thèse de Magister de l’université California, USA, Septembre 2005.
- [59] M. Angel, “ *Conception et Realisation de Modules Photovoltaïques Electroniques* ”, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
- [60] : Fatiha Ghaleb et Kamel Eddine Bendjabar et Souad Haouari Polycopié des travaux pratique « lumière et cellule solaire » Faculté physique Université Oran 1(2014)
- [61] : J. Zhao, A. Wang, P. Campbell and M. A. Green, “ *A 19.8% Efficient Honeycomb Multicrystalline Silicon Solar Cell with Improved Light Trapping* ”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 46, No. 10, October 1999.
- [62] : H. Hassini, “ *Modelisation, Simulation et Optimisation d’un Systeme Hybride Eolien-Photovoltaïque* ”, Memoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [63]: <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques/>
- [64] : B. Brousse, “ *Réalisation et Caractérisation de Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues par Dépôt Physique* ”, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Décembre 2004.
- [65] : “ *Physique et Technologie des Composants de Puissance* ”, Université de Bordeaux.
- [66] : “ *Définition de Semi-conducteur* ”, EDF ENR, Energies Nouvelles Reparties.
- [67]: A. G. Moacyr, P. Leonardo, G. Luigi and A. Carlos, “ *Research on Photovoltaics: Review, Trends and Perspectives* ”, Power Electronics Conference (COBEP), Brazil 2011.
- [68]: <http://tpe-panneauxphotovoltaïques.e-monsite.com/pages/panneaux-photovoltaïques/>
- [69] :J. T. Bialasiewicz and E. Muljadi, “ *RPMSrm-Based Modeling of Photovoltaic Panels as Energy Sources in Renewable Energy Systems* ”, IECON 02, IEEE 2002 28th Annual Conference, vol.4, pp. 3360-3365, Novembre 2002.
- [70]: G. B. Shrestha and I. Goel, “ *A study on Optimal Sizing of Stand-Alone Photovoltaic Stations* ”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 4, December 1998.

- [71]: G. Capizzi, F. Bonanno and G. M. Tina, “ *Experiences on the Design of Stand Alone Photovoltaic System by Deterministic and Probabilistic Methods* ”, Clean Electrical Power Conference(ICCEP), pp. 328-335, June 2011.
- [72]: F. Adamo, F. Attivissimo, A. Di Nisio, A. M. L. Lanzolla and M. Spadavecchia, “ *Parameters Estimation for a Model of Photovoltaic Panels* ”, Fundamental and Applied Metrology, pp. 6–11, Lisbon, Portugal 2009.
- [73]: S. Belakehal, “ *Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables* ”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Juin 2010.
- [74]: T. Tafticht, “ *Analyse et Commande D'un Système Hybride Photovoltaïque Éolien* ”, Thèse de Doctorat, Université du Québec, Décembre 2006.
- [75]: A. Sadek, “ *Implantation Expérimentale de l'MPPT pour un Système de Génération Hybride Solaire-Eolien* ”, Mémoire de Magistère, Université de Batna, Juillet 2009.
- [76]: A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud and I. Youm, “ *Etude et Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque* ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3 pp. 473-483, Année 2008.
- [77]: S. Rustemli and F. Dincer, “ *Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink* ”, Electronics and Electrical Engineering, No. 3(109), 2011.
- [78]: H. Can, D. Ickilli and K. S. Parlak “ *A New Numerical Solution Approach for the Real-Time Modeling of Photovoltaic Panels* ”, Power and Energy Engineering Conference Asia-Pacific, pp. 1-4, March 2012.
- [79]: M. Park and I. Yu, “ *A Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell* ”, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2004.
- [80]: Meghellet Hanine ,Hocine Lynda « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque » Mémoire Master Université Colonel Akli Mohand-Oulhadj Bouira (2017)
- [81]: R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.
- [82]: Comprendre l'énergie photovoltaïque, “ *Avantages et inconvénients du PV* ” : www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com.
- [83] F.Z. Zerhouni, M. Zegrar and A. Boudghène, “ *Amélioration de l'Adaptation d'un Générateur Photovoltaïque à une Charge avec Implémentation Pratique* ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 551-560, Année 2007.
- [84]: Souheyla Merad née Mamoun, « Dimensionnement d'une Installation Photovoltaïque d'un lieu peu fréquenté : Cas d'un Cabanon Situé à Marsat Ben M'Hidi (Tlemcen) », master LMD, L'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [85]: Boukhers Djamil, "Optimisations d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage" , Mémoire de Magister , Université Mentouri Constantine , (2007) .
- [86]: <https://www.ecolodis-solaire.com/>
- [87]: document « Maitriser le risque lié aux installations photovoltaïque ».