



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des sciences de la matière

MEMOIRE

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Intitulé

Étude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des modules photovoltaïque dans la région d'Adrar

Présenté par :

Melle. Bahraoui Souad

Melle. Bazzine Yamina

Soutenu publiquement le 2019/06/24

Devant le jury :

Président :	TIGRINE RACHID	Pr	UNIV-Adrar
Promoteur :	MAOUEDJ RACHID	M. R. A	URER-MS. Adrar
Examineur :	BOUDAOUH LAHOUIARIA	MCA	UNIV-Adrar

Année Universitaire : 2018/2019

الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّؤُوفِ الرَّحِيمِ والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين وبعد: أهدي ثمرة هذه السنين إلى من أقف لهما وحدهما عرفانا وحباً وطاعة بعد الله ورسوله، إلى نور شارق يعانق راية تكويني إلى حب ساطع يملأ كأس الحنيني ...

إلى من نذرت عمرها في أداء رسالة صنعتها من أوراق الصبر، وطرزتها في ظلام الدهر على سراج الأمل، بلا فتور أو كلل، رسالة تعلم العطاء كيف يكون العطاء، وتعلم الوفاء كيف يكون الوفاء، إلى الغالية التي لا نرى النور إلا من عينها، أمي الحبيبة أهديك هذه الرسالة جزاك الله خيراً. وأمد في عمرك بالصالحات فأنت زهرة الحياة ونورها.

إلى اليد التي أزالته من امامنا اشواك الطريق، ورسمت المستقبل بخطوط من الأمل والثقة، إلى الذي لا تكفيه الكلمات والشكر والعرفان، إلى مثلي الأعلى وقدوتي في الحياة، أبي الحبيب اطل الله في عمره، والبسه ثوب الصحة والعافية ومتعني ببره ورد جميله.

إلى أصحاب القلوب الرقيقة الطاهرة والنفوس البريئة إلى اخوتي، رياحين حياتي "فاطمة، ميلود، مصطفى، عائشة، مسعودة،

وعبد الرحمان"، كما لا أنسى براعيمهم الصغار "رانيا، ريتاج، عثمان، حسام، عماد، مصعب، وعفيفة". إلى رفيق دربي إلى من سار معي الحلم خطوة بخطوة، بذرناه معاً وحصدناه معاً، ورسم أمل خطوة مشيتها " كينة عبد الغني " جزاك الله خيراً.

إلى جميع الأساتذة الذين ساهموا في تعليمي، من المرحلة الابتدائية إلى المستوى الجامعي، وأخص بالذكر الدكتور "رشيد معوج" لما قدمه لنا من جهد ونصح ومعرفة طيلة هذا الإنجاز.

إلى من تقاسمت معي هذا العمل المتواضع زميلتي: بحراري سعاد.

إلى من تذوقت معهم أجمل اللحظات، إلى من جعلهم الله اخوتي في الله، صديقاتي بالحي الجامعي.

إلى كل أفراد عائلتي، أعمامي، زوجاتهم، وأولادهم.

إلى كل من نساه القلم ولم ينسأه القلب.

يمينة

الاهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.....اهدي ثمرة هذا العمل
الى من احمل اسمه بكل فخر.....الى من افتقده في حياتيالى روح ابي
الطاهرة

الى ملاكي في الحياةالى معنى الحب والى معنى الحنان
والتفاني.....الى بسمه الحياة وسر الوجود.....الى من كان دعائها سر
نجاحي وحنانها بلسم جراحي

الى اغلى الحبايب.....امي الحبيبة

الى رفيق دربي من يجمع بين سعادتي و حزني زوجي
الى من علمونى علم الحياة.....الى من اظهروا لى ما هو اجمل من الحياة
اخوتي

الى شمعة ونور حياتي ابنتي.....وصال
الى جميع افراد عائلتي بحراوي... سودي
إلى من تقاسمت معي هذا العمل المتواضع وزميلتي بازين يمينة

إلى جميع الأساتذة الذين ساهموا في تعليمي، من المرحلة الابتدائية الى المستوى
الجامعي، وأخص بالذكر الدكتور "رشيد معوج" لما قدمه لنا من جهد ونصح ومعرفة
طيلة هذا الإنجاز

إلى من تذوقت معهم أجمل اللحظات، الى من جعلهم الله اخوتي في الله، صديقاتي
الى كل محب العلم والمعرفة

سعاد

Remerciement

Nous remercions en premier lieu le dieu pour le courage qu'il nous a donné afin de réaliser ce travail.

Nous voudrions exprimer notre plus vif remerciement à notre encadreur Docteur Maouedj Rachid pour ses conseils qui ont été précieux tout au long de ce travail, pour ses explications et ses remarques judicieuses pour la réalisation de ce travail.

Nous présentons notre chaleureux remerciement aux membres de jury qui ont consulté notre travail, et aussi aux enseignants pour leur aides et orientation durant nos études.

Nos derniers remercient et ce ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I :	Rayonnement solaire
I.1. Introduction	3
I.2. Situation géographique de l'Algérie.....	3
I.3. Mouvement Terre- Soleil	3
I.3.1. Mouvement de rotation.....	4
I.3.2. Mouvement de translation.....	4
I.4. La distance terre – soleil.....	5
I.5. Correction de distance.....	6
I.6. Équation du temps	7
I.7. Repérage d'un site sur la surface terrestre.....	7
I.8. Les coordonnées du soleil	7
I.8.1. Coordonnées équatoriales.....	8
I. 8.1.1. La déclinaison du soleil δ	8
I.8.1.2. L'angle horaire du soleil H	8
I.8.2. Coordonnées horizontales.....	9
I.8.2.1. La hauteur du soleil h	10
I.8.2.2. L'azimut du soleil a	10
I.9. Orientation d'un capteur	11
I.9.1. La hauteur du capteur γ	11
I.9.2. Azimut du capteur α	11
I.10. Durée d'ensoleillement D_{IS} d'un capteur (α, γ)	11
I.11. Durée du jour.....	12
I.12. Spectre du rayonnement solaire.....	14
I.13. Puissance solaire reçue par terre	14
I.14. Modélisation du rayonnement solaire	16
I.14.1. Rayonnement direct	16

I.14.2. Rayonnement diffus.....	17
I.14.3. Rayonnement global	17
I.14.4. L'albédo du sol.....	18
I.15. Appareils de mesure.....	19
I.15.1. Mesure de la durée d'ensoleillement et du rayonnement solaire.....	19
I.15.2. Mesure de la vitesse et de la direction du vent.....	22
I.16. Conclusion	23
I.17. Références.....	24

Chapitre II :

L'énergie solaire photovoltaïque

II.1. Introduction.....	27
II.2. Histoire de l'énergie solaire.....	27
II.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	28
II.3.1. Les avantages	28
II.3.2. Les inconvénients.....	28
II.4. Le fonctionnement des panneaux solaires.....	29
II.5. La Technologie Photovoltaïque	31
II.5.1. Procédé de fabrication	31
II.5.2. Modules et cellules photovoltaïques.....	31
II.5.3. Critères de choix d'une installation solaire	36
II.5.4. Système solaire.....	37
II.5.5. Applications.....	37
II.5.5.1. Pompage photovoltaïque.....	37
II.5.5.2. L'éclairage photovoltaïque.....	39
II.6. Les paramètres qui influent sur le rendement d'un panneau solaire.....	41
II.6.1. Influence de la température sur le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque.....	41
II.6.2. Influence de la 'intensité de la radiation lumineuse.....	43
II.7. Les différents types des systèmes énergétiques solaires	44
II.7.1. Système photovoltaïque autonome.....	44
II.7.2. Système photovoltaïque raccordée au réseau électrique.....	45
II.8. Conclusion.....	45

II.9. Références.....	45
Chapitre III :	L'énergie solaire thermique
III.1. Introduction.....	48
III.2. La conversion photo thermique.....	48
III.3. Différents Type des capteurs solaires.....	49
III.3.1 Le capteur solaire à eau.....	49
III.3.2. Le capteur solaire à air	50
III.4. Applications.....	51
III.4.1. Les distillateurs solaires.....	51
III.4.1.1. Les dispositifs de distillation pour le dessalement de l'eau saumâtre.....	51
III. 4.1.1.1. Les distillateurs à simple effet.....	51
III.4.1.1.2. Les distillateurs à multiple effet.....	52
III.4.2. Le chauffe-eau solaire.....	53
III.4.3. Les séchoirs solaires	54
III.4.3.1. Les séchoirs solaires directs.....	54
III.4.3.2. Les séchoirs solaires indirects.....	55
III.5. Conclusion.....	55
III.6. Références.....	56
Chapitre IV :	Traitement des données et interprétation des résultats
IV.1. Introduction	57
IV.2. Description technique du système PV/T.....	57
IV.3. Description du système PV/T	57
IV.4. Banc d'essai	57
IV.4.1. Modules Isophoton I-75/12	58
IV.4.2. Acquisition de données	59
IV.4.3. Thermocouple de type « K ».....	60
IV.4.4. Capteur de courant et capteur de tension.....	60
IV.4.5. Système de refroidissement	60
IV.4.6. Une charge	61
IV.5. Caractéristiques géographique et météorologique du site d'Adrar.....	61

IV.6. Résultats Expérimentale et Discussions.....	61
IV.6.1. La variation de l'éclairement globale.....	61
IV.6.2. Distribution de la température dans les panneaux Photovoltaïques	63
IV.6.3. La variation de la puissance des panneaux photovoltaïques	65
IV.7. Étude expérimentale de la dégradation des modules PV en milieu saharien.....	67
IV.8. Conclusion.....	69
Conclusion général	70

Liste des figures

Chapitre I	Rayonnement solaire	
Figure I.1 : carte géographique de l'Algérie.....		3
Figure I.2 : Mouvement de la terre autour du Soleil		4
Figure I.3 : Distance Terre-Soleil		5
Figure I.4 : Distance Terre-Soleil en fonction du numéro du jour de l'année N		5
Figure I.5 : Les variations annuelles de la correction de distance en fonction du numéro du jour		6
Figure I.6 : Déclinaison solaire.....		8
Figure I.7 : Angle horaire du soleil		9
Figure I.8 : Les coordonnées Horizontales.....		10
Figure I.9 : Spectre du rayonnement solaire		14
Figure I.10 : Évolution annuelle de la constante solaire corrigée		16
Figure I.11 : Rayonnement direct.....		17
Figure I.12 : Rayonnement diffus		17
Figure I.13 : composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale = Direct + Diffus + Albédo.....		18
Figure I.14 : Héliographe de Campbell stokes.....		19
Figure I.15 : Un pyranomètre muni d'un cache		19
Figure I.16 : Un pyranomètre d'Eppley		20
Figure I.17 : Un pyréliomètre pour la mesure du rayonnement solaire direct		20
Figure I.18 : L'albédomètre pour la mesure de l'albédo du sol		21
Figure I.19 : Anémomètre.....		22
Figure I.20 : Girouette.....		23
Figure I.21 : Capteur de température.....		23
Chapitre II	L'énergie solaire photovoltaïque	
Figure II. 1 : Association des cellules solaire PV.....		29
Figure II. 2 : principe de conversion photovoltaïque		30
Figure II.3 : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite d'une cellule photovoltaïque).....		30
Figure I.4 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un système photovoltaïque au silicium cristallin.....		31
Figure I.5 : La fabrication du module photovoltaïque.....		32
Figure II.6 : Cellule mono cristalline		33
Figure II.7 : Cellule poly cristalline.....		33
Figure II.8 : Cellules amorphe.....		34
Figure II.9 : Cellule solaire organique.....		36
Figure II.10 : Les divers éléments d'un système photovoltaïque.....		37
Figure II. 11 : Schéma synoptique simplifié d'un système de pompage PV.....		38
Figure II. 12 : Pompe centrifuge.....		39
Figure II. 13 : Pompes volumétriques.....		39
Figure II. 14 : Configuration d'un système photovoltaïque avec la fonction stockage et transformation.....		40
Figure II.15 : Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs du la température $I=f(V)$		42

Figure II.16 : Caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs de températures $P=f(V)$	42
Figure II.17: Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de radiation solaire $I=f(V)$; $T=25^{\circ}\text{C}$	43
Figure II.18 : Caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs de radiation solaire $P=f(V)$; $T=25^{\circ}\text{C}$	43
Figure II.19 : Système photovoltaïque autonome	44
Figure II.20 : Types des systèmes connectés au réseau	45

Chapitre III

L'énergie solaire thermique

Figure III.1 : Les étapes de la conversion photo thermique	49
Figure III.2 : Chauffage d'une piscine à l'aide d'un capteur sans vitrage.....	49
Figure III.3 : Capteur à air	50
Figure III.4 : Capteur a air utilisé en climatisation " Mur Trombe- Michel "	50
Figure III.5 : Le principe de construction d'un distillateur solaire simple.....	51
Figure III.6 : Distillateur solaire sphérique	52
Figure III.7 : Coupe transversale du distillateur à double compartiments adapté à la distillation alcoolique	52
Figure III.8 : Schéma d'une installation de chauffage de l'eau par l'énergie solaire.....	53
Figure III.9 : Séchoirs solaires directs simple.....	54
Figure III.10 : Séchoirs solaires de type indirect.....	55

Chapitre IV

Traitement des données et interprétation des résultats

Figure IV.1 : Photos du prototype de capteur PV/T étudié.....	58
Figure IV.2: Modules testés ISOPHOTON I-75/12 (1, 2, 3).....	58
Figure IV.3 : Photos de l'acquisition de données de type FLUKE.....	59
Figure IV.4 : Photos des thermocouples de type « K ».....	60
Figure IV.5 : Photo du capteur de courant et capteur de tension.....	60
Figure IV.6: Photo du Circuit hydraulique de refroidissement.....	61
Figure IV.7: Photo du Circuit hydraulique de refroidissement.....	61
Figure IV.8: L'évolution de l'éclairement solaire (Expérimental).....	62
Figure IV.9: Distribution de la température expérimentale pendant les journées de l'acquisition, en fonction du temps.....	64
Figure IV.10: Évolution de la puissance des panneaux PV	66
Figure IV.11: Banc Expérimental.....	67
Figure IV.12 : Caractéristique expérimentale (Courant-Tension I-V et Courant-Puissance I-P) du module 250W sur le site d'Adrar.....	68

Liste des tableaux

Chapitre II	L'énergie solaire photovoltaïque	
Tableau II.1 : comparatif des différentes technologies		35
Chapitre IV	Traitement des données et interprétation des résultats	
Tableau IV.1 : Caractéristiques du module solaire « Isophoton I-75/12 ».....		59
Tableau IV.2 : Données géographiques du site d'Adrar.....		61
Tableau IV.3 : Comparaison entre les températures maximum des panneaux PV.....		64
Tableau IV.4: Comparaison entre les puissances maximales des trois panneaux.....		66
Tableau IV.5: Caractéristiques des modules photovoltaïques 250W.....		67
Tableau IV.6: Dégradation des modules PV.....		68

Nomenclatures et Abréviations

Pr	La rotation de la terre	H
Vr	Vitesse linéaire de rotation	km/s
c(N)	La correction de distance	W /m ²
TSM	Temps solaire moyen	jour
TSV	Le temps solaire vrai	jour
Φ	La latitude du lieu	(°)
λ	La longitude du lieu	(°)
Δ	L'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial	(°)
DE	Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.	(°)
I0	Constante solaire	
D _{IS}	La durée d'insolation durée d'enseillement d'un capteur	Heur
T _c	Température de la cellule	°C
T _a	La température ambiante.	°C
H _{in}	L'irradiation solaire sur le plan incliné.	W/m ²
T PV1	Température de la face arrière du premier panneau	°C
T PV2	Température du deuxième panneau (sans nettoyage)	°C
T PV3	Température du troisième panneau constituant le capteur hybride.	°C
T _a	Température ambiante	W
P PV1	Puissance du premier panneau	W
P PV2	Puissance du deuxième panneau (sans nettoyage)	W
P PV3	Puissance du troisième panneau constituant le capteur hybride.	W
P _{max}	Puissance maximale	W
Direct	Rayonnement solaire direct.	W/m ²
Diffus	Rayonnement solaire diffus.	W/m ²
G _i	Rayonnement solaire global incliné.	W/m ²

INTRODUCTION GENERALE

**Etude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des
modules photovoltaïque dans la région saharien**

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. En effet, la grande préoccupation du monde actuel est d'atténuer cette pollution par l'adaptation des sources d'énergie classiques à des critères très sévères et par l'utilisation des énergies renouvelables. Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se reconstitue assez rapidement pour être considérée comme inépuisable. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). Le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle sa source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée [1].

Parmi la nouvelle source potentielle d'énergie, la conversion PV est extrêmement prometteuse. En effet les cellules solaires pouvant fournir de l'énergie au système dont les niveaux de puissance s'étalent des milliwatts aux mégawatts. Ils sont fiables, statiques et ne nécessitent pas maintenance [2].

En ce qui concerne notre pays, L'Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la sante, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie. La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'externe sud ou elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée est présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie [3].

L'objectif de ce travail en première partie est d'installé à L'URER-MS dans des conditions réelles (milieu saharien) des modules PV pour la production de l'électricité avec des batteries pour le stockage d'énergie. Et en deuxième partie l'étude expérimentale de l'effet des

paramètres climatiques de la région d'Adrar (température, rayonnement, poussière...) sur la caractéristique thermique et électriques des modules PV.

Le présent travail compte quatre chapitre, le première chapitre est consacré à l'étude du rayonnement solaire l'ensemble de caractéristiques de la ressource local en énergie solaire.

Le deuxième chapitre on connu l'énergie solaire PV en généralement et quelques notions sur le principe conversion PV, la différente technologie des cellules PV, et certains domaines d'utilisation.

Le troisième chapitre porte sur une description détaillée des éléments essentiels des systèmes photothermique, elle concerne la présentation de différent type de capteurs solaire ainsi que la différente application.

Le quatrième chapitre nous avons présenté quelques résultats obtenus lors de l'analyse des caractéristiques thermique et électrique de quelque module photovoltaïque testés à Adrar, cette localité du Sahara est caractérisée par un fort potentiel de l'éclairement solaire, température, et poussière.

Notre travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

Référence :

- [1] Z. Nakoul, « Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur PV. Application aux sites Tlemcen et Bouzaréah », mémoire de magister, université de Tlemcen, 2010.
- [2] I. Maatallah, N. Bouallaoui, « Etude l'impact des conditions climatique sur les paramètres de performance de module PV dans un site saharien », mémoire de master, université d'Adrar, 2018.
- [3] B. Ben Abdelkarim, A. Ben Atillah, « Etude et simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière...) sur les modules solaires en couches minces en région saharien », laboratoire énergie, environnement et système d'information, 2016.

CHAPITRE I

RAYONNEMENT SOLAIRE

I.1. Introduction :

Contrairement aux autres sources d'énergie, les énergies renouvelables permettent de produire, avec une technologie généralement peu complexe, une énergie « décentralisée » et générant peu d'impacts sur l'environnement : l'énergie solaire est une des énergies les plus facilement exploitables ; elle est en outre inépuisable.

L'exploitation du rayonnement solaire concentré à l'aide de champs de miroirs, les centrales solaires thermodynamiques à concentration permettent de chauffer des fluides à des températures susceptibles. Associées à des systèmes de stockage de la chaleur, elles peuvent être utilisées non seulement pour la production d'électricité 24 heures sur 24, mais aussi pour le chauffage, le dessalement de l'eau ou la fabrication d'hydrogène.

I.2. Situation géographique de l'Algérie :

L'Algérie est un pays d'Afrique du nord bordé au nord par la mer méditerranée (1200Km), à l'est par la Tunisie (965Km) et Libye (982Km), au sud par le Niger (956Km), au sud-ouest par le Mali (1,376Km) et Mauritanie (463Km), à l'ouest par Maroc (1,559Km) et le Sahara-Occidental (42Km). Sur le continent africain, l'Algérie est le premier pays par sa superficie (2 381 741Km²), dont les quatre cinquièmes sont occupés par le Sahara [1].



Figure I.1 : Carte géographique de l'Algérie [1].

I.3. Mouvement Terre-Soleil :

Il est bien approprié d'étudier le mouvement Terre-Soleil car c'est la conséquence directe de l'existence des saisons, jours et nuits qui influencent de façon non négligeable l'énergie solaire captée sur terre. Nous présentons dans la figure I.2 un schéma relatif au mouvement Terre-Soleil et quelques axes et orientations permettant de repérer les principales périodes de l'année [2].

I.3.1. Mouvement de rotation :

La terre tourne autour de son axe de rotation (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme étant la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu. Le jour solaire est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de: $P_r=23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h}$. Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est : $V_r \approx 0,465 \text{ km/s}$; elle est variable en fonction de la latitude φ telle que:

$$V_r(\varphi) = V_r (\cos (\varphi)) \quad \text{I.1}$$

Les saisons n'existent pas si la terre se tenait droit sur son orbite, mais le fait que son axe de rotation est penché d'un angle $23,27^\circ \approx 23,45^\circ$ avec un mouvement de révolution de la terre, le pôle Nord et le pôle Sud vont pouvoir successivement se dorer à la lumière [2, 3].

I.3.2. Mouvement de translation :

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne au tour du soleil en $P_t = 365 \text{ jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25 \text{ jours}$. La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [4]. Elle est légèrement aplatie et correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne avec une vitesse moyenne $V \approx 29,77\text{Km/s}$ Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons [3].

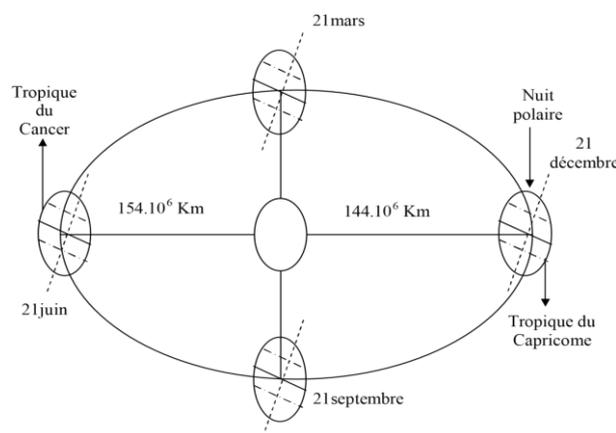


Figure I.2 : Mouvement de la terre autour du Soleil [5].

I.4. La distance Terre – Soleil :

La variation de la distance Terre-Soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante [6] :

$$d(N) = 1 - 0,017 \cos\left(\frac{360}{365} \times (N - 2)\right) \quad \text{I.2}$$

N : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier. C-à-dire il varie de là 365 ou 366 selon l'année [1] :

- Année civile : N=365 jours
- Année bissextile : N=366 jours

D_{TS} (min)= 0,983 UA vers le 2 janvier (Périhélie).

D_{TS} (max)= 1,017 UA vers le 5 juillet (Aphélie)

La distance Terre-Soleil d(N) varie peu au cours de l'année plus au moins de 1.65%. Elle est la plus faible vers le début de janvier et la plus longue le début juillet [7].

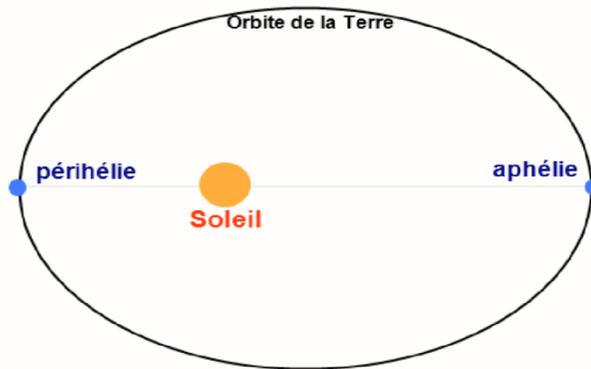


Figure I.3 : Distance Terre-Soleil [8].

- Périhélie : est le point de l'orbite terrestre le plus rapproché du Soleil.
- L'aphélie : est le point de l'orbite le plus éloigné du Soleil.

La variation de la distance Terre- Soleil en fonction du jour de l'année est représentée par la figure I.4.

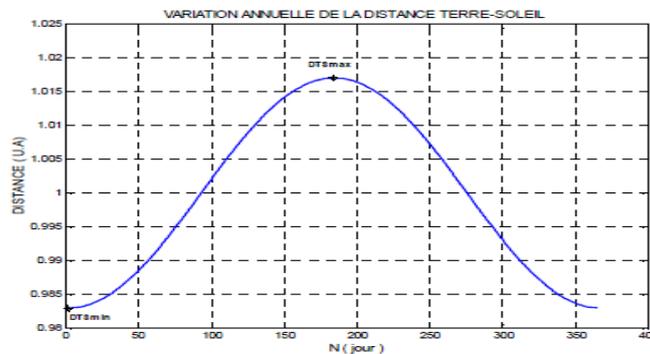


Figure I.4 : Distance Terre-Soleil en fonction du numéro du jour de l'année N [1,6].

I.5. Correction de distance :

Le rayonnement émis par le Soleil est isotrope et il est de puissance constante. La puissance reçue (en dehors de l'atmosphère) sur un plan, de surface unité, perpendiculaire aux rayons solaire est donc inversement proportionnelle au carré de la distance au Soleil.

Soit I_0 la puissance reçue, dans les conditions décrites ci-dessus, à la distance de 1 UA du Soleil, et I la puissance reçue à la distance d , quelconque (exprimée en UA), selon la relation suivante [1] :

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{d}{1}\right)^2 \quad \text{I.3}$$

I_0 est la constante solaire.

Par définition, la correction de distance, $c(N)$, est :

$$c(N) = \frac{I}{I_0} \quad \text{I.4}$$

On déduit l'expression $c(N)$, d restant proche de 1 dans le cas de la terre.

$$c(N) = 1 + 0,034 \cdot \cos\left[\frac{360}{365}(N - 2)\right] \quad \text{I.5}$$

La variation de correction distance Terre-Soleil en fonction du jour de l'année est représentée par la figure I.5 :

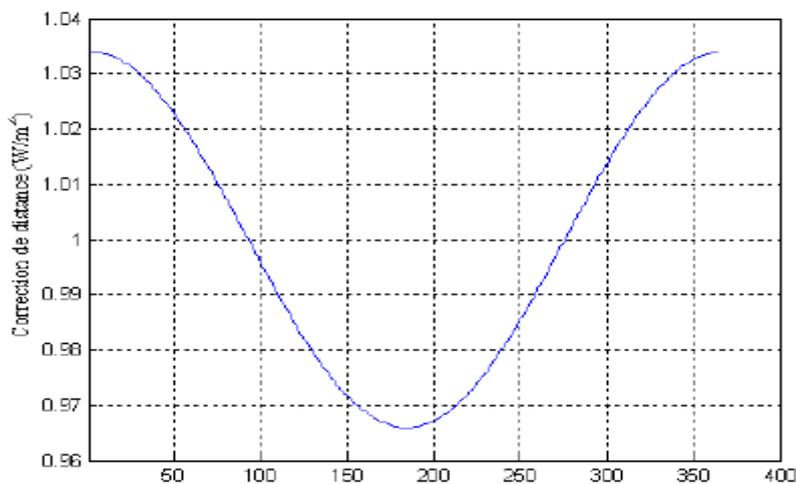


Figure I.5 : Les variations annuelles de la correction de distance en fonction du numéro du jour dans l'année [1,6].

I.6. Équation du temps :

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour de l'année considérée [9]. Cet écart porte le nom d'équation du temps et donné par [6].

$$ET = TSM - TSV \quad I.6$$

Avec :

TSV : Temps Solaire Vrai, là où le soleil croise le méridien de l'observateur à midi [10].

TSM : Temps Solaire Moyen c'est le temps qui " s'écoule " à vitesse constante de la Terre sur son orbite au cours de l'année (celui mesuré par les horloges).

La variation de ET durant l'année est donnée par la formule suivante :

$$ET = 0,258 \cos x - 7,416 \sin x - 3,648 \cos 2x - 9,228 \sin 2x \quad I.7$$

Avec :

$$x = \frac{360(N - 1)}{365 \cdot 25}$$

Où ET : est donné en minutes

L'angle x est défini en fonction du numéro du jour dans l'année N . Le décompte commence à partir du 1^{er} janvier où $N=1$.

I.7. Repérage d'un site sur la surface terrestre :

Pour repérer un site donné S sur la surface terrestre on définit deux grandeurs [11] :

- **La latitude du lieu ϕ :** qui représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur ϕ varie entre -90° et $+90^\circ$ tel que [$\phi > 0$ vers le Nord et $\phi < 0$ vers le Sud].
- **La longitude du lieu λ :** c'est l'angle que fait le méridien de Greenwich avec la projection du méridien de lieu sur le plan équatorial.

I.8. Les coordonnées du soleil :

Pour bien définir les coordonnées du soleil, il convient de spécifier un certain nombre de direction de référence, ou elle varie à chaque instant de la journée de deux manières, par deux systèmes de coordonnées différents [11] :

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

I.8.1. Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du Soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre par deux angles (δ , H) [12].

I.8.1.1. La déclinaison du soleil δ :

On appelle déclinaison δ l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 Mars et 21 Septembre), maximale au solstice d'été (21 Juin) et minimale au solstice d'hiver (21 Décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation [7] :

$$\delta = 23,45 \sin 5[0,986 \times (284 + j)] \quad \text{I.8}$$

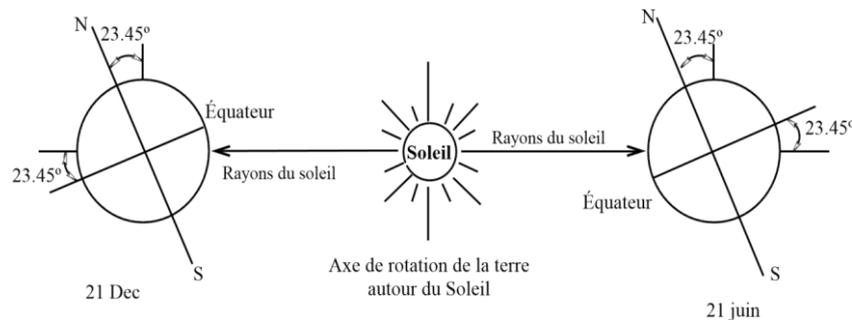


Figure I.6 : Déclinaison solaire [8].

L'erreur du soleil δ est de 0.1° aux solstices et 0.8° aux équinoxes.

δ Varie entre deux valeur extrêmes : $-\delta_0 < \delta < +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23.45^\circ$.

On prend :

- Equinoxes de printemps : $\delta=0$, 21 Mars
- Solstice d'été : $\delta= +23.45^\circ$, 22 Juin
- Equinoxes d'automne : $\delta=0$, 23 Septembre
- Solstice d'hiver : $\delta= -23.45^\circ$, 22 Décembre
- Approche maximale : Périhélie, 2 Janvier
- Approche minimale : Aphélie, 2 Juillet

I.8.1.2. L'angle horaire du soleil H :

L'angle horaire (H) étant l'angle forme par le plan méridien passant par le centre du Soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai, l'angle horaire est donné par l'équation [9,13].

$$H = 15 \cdot (TSV - 12) \quad \text{I.9}$$

TSV : Temps solaire vrai donne par l'expression :

Avec :

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{ET + 4\lambda}{60} \right)$$

$$ET = 9,87 \sin 2N' - 7,35 \cos N' - 1,5 \sin N' \quad \text{I.10}$$

$$N' = \frac{360}{365} \cdot (N - 81)$$

$DE = +1$ pour l'Algérie.

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

TSV : Temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

TL : Temps légal = temps donné par un montre.

ET : Correction de l'équation de temps.

λ : Longitude du lieu.

L'angle horaire H varie de -180° à $+180^\circ$.

On prend

$H > 0$ après midi.

$H < 0$ le matin.

$H = 0$ midi TSV.

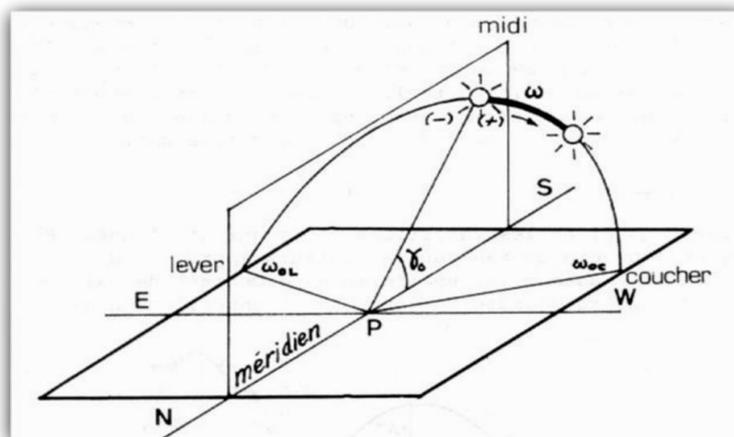


Figure I.7 : Angle horaire du soleil [8].

I.8.2. Coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu.

Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimuta [12].

I.8.2.1. La hauteur du soleil h :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [2, 12] :

$$\sin h = \cos \delta \cos \varphi \cos H + \sin \varphi \sin \delta \quad \text{I.11}$$

h : varie entre -90° et $+90^\circ$.

On prend

$h > 0$ le jour

$h < 0$ la nuit

$h = 0$ aux lever et coucher

I.8.2.2. L'azimut du soleil a :

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère Nord) ou Nord (dans l'hémisphère Sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la Terre au Soleil [2,4,12] .

$$\sin a = \cos \delta \sin H / \cos h \quad \text{I.12}$$

a : varie entre -180° et $+180^\circ$.

On prend :

$h > 0$ vers l'Ouest

$h < 0$ vers l'Est

$h = 0$ direction du Sud

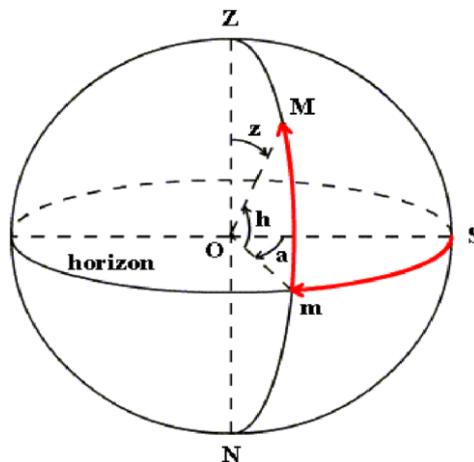


Figure I.8 : Les coordonnées Horizontales [8].

I.9. Orientation d'un capteur :

L'orientation d'un capteur quelconque est définie par deux angles (γ , α) :

I.9.1. La hauteur du capteur γ :

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal [3,6].

γ Varie entre -90° et $+90^\circ$:

$$\gamma > 0 \quad \text{plan tourné vers le haut}$$

$$\gamma < 0 \quad \text{plan tourné vers le bas}$$

$$\gamma = +90^\circ \quad \text{plan horizontal tourné vers le haut}$$

$$\gamma = -90^\circ \quad \text{plan horizontal tourné vers le bas}$$

$$\gamma = 0 \quad \text{plan vertical}$$

I.9.2. Azimut du capteur α :

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du Sud.

A varie entre -90° et $+90^\circ$:

$$\alpha > 0 \quad \text{vers l'Ouest}$$

$$\alpha < 0 \quad \text{vers l'Est}$$

$$\alpha = 0 \quad \text{plan Sud}$$

$$\alpha = -90^\circ \quad \text{plan Est orienté vers le Nord}$$

$$\alpha = 180^\circ \quad \text{plan Nord orienté vers le Nord}$$

$$\alpha = +90^\circ \quad \text{plan Ouest orienté vers l'Ouest}$$

I.10. Durée d'ensoleillement DIS d'un capteur (α , γ) :

La durée d'insolation (D_{IS}) est la durée effective d'ensoleillement d'un capteur mesurée par héliographe et définie à partir d'un seuil minimum ($\approx 250 \text{ w/m}^2$).

Pour un plan (α , γ), un lieu ϕ et un jour donné, i est uniquement fonction de l'angle horaire H , on exprimera donc $\cos i$ en faisant bien apparaître la variable [3, 9].

$$\cos(i) = A \cdot \sin(H) + B \cdot \cos(H) + C \quad \text{I.13}$$

Avec :

$$A = A' \cos(\delta) \quad A' = \sin(\alpha) \cos(\gamma) \quad \text{I.14}$$

$$B = B' \cos(\delta) \quad B' = \cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \cos(\varphi) \quad \text{I.15}$$

$$C = C' \sin \delta \quad C' = -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \sin(\varphi) \quad \text{I.16}$$

$$i = \pm 90^\circ \Rightarrow \cos(i) = 0$$

$$\Rightarrow A \cdot \sin(H) + B \cdot \cos(H) + C$$

La résolution de cette équation nous donne deux solutions une pour le lever et l'autre pour le coucher :

$$HL' = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) - \arccos\left(\frac{-C'}{D'} \operatorname{tg}(\delta)\right)$$

$$HC' = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) + \arccos\left(\frac{-C'}{D'} \operatorname{tg}(\delta)\right) \quad \text{I.17}$$

Avec :

$$D' = \sqrt{A'^2 + B'^2}$$

$$\rho(\alpha) = \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha$$

La durée d'ensoleillement d'un capteur est donnée par :

$$\text{DIS} = \frac{H2 - H1}{15} \quad \text{I.18}$$

Avec :

$$H1 = HL' \quad \text{Si } |HL'| \leq |HL|$$

$$H1 = HL \quad \text{Si } |HL'| \geq |HL|$$

$$H2 = HC' \quad \text{Si } |HC'| \leq |HC|$$

$$H2 = HC \quad \text{Si } |HC'| \geq |HC|$$

I.11. Durée du jour :

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur h du soleil nulle sont appelés : le lever et le coucher du soleil [9, 14].

La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire comme suit :

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos H \cdot \cos \varphi + \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad \text{I.19}$$

Avec :

δ : Déclinaison du soleil.

H : L'angle horaire du soleil.

φ : Latitude du lieu.

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \varphi (\cos H + \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi)$$

On pose :

$$T = -\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad \text{I.20}$$

Alors l'équation (I.19) devient comme suit :

$$\sin h = \cos \delta \cos \varphi (\cos H - T)$$

Le cas des deux points « pôles » étant écartés, la résolution de, $\sin h = 0$. est équivalent à la résolution de $\cos H = T$

$$\cos H = T \Rightarrow \cos H = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi = T$$

Si $|T| > 1 \Leftrightarrow |\varphi| + |\delta| > 90^\circ$

($\sin h$) Ne peut pas être nul. Quel que soit H. On ne peut pas parler de lever ou de coucher du Soleil dans ce cas. Si T est négatif : $T < -1 \Leftrightarrow |\varphi + \delta| > 90^\circ$

$$\Leftrightarrow \sin h > 0$$

$$\Leftrightarrow h > 0.$$

Le Soleil est toute la journée au-dessus de l'horizon : “ Jour polaire”

Si T est positif : $T > -1 \Leftrightarrow |\varphi + \delta| < 90^\circ$

$$\Leftrightarrow \sin h < 0$$

$$\Leftrightarrow h > 0.$$

Le soleil est toute la journée au-dessous de l'horizon : “Nuit polaire”

Si $|T| \leq 1 \Leftrightarrow |\varphi| + |\delta| \leq 90^\circ$

L'équation $\sin h = 0$ à deux racines, un pour le lever et l'autre pour le coucher.

Le coucher correspond à la valeur positive HC et le lever à la valeur négative HL .

$HC = \operatorname{arc} \cos(-\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi)$

$$HL = -HC \quad \text{I.21}$$

$$Dj = \frac{HC-HL}{15} = \frac{2}{15} \cdot \operatorname{Arc} \cos T \quad \text{I.22}$$

Avec :

$$T = -tg\delta \cdot tg$$

I.12. Spectre du rayonnement solaire :

Le spectre de rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K [15].

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueur d'onde ou (couleurs). La lumière Solaire est en effet composée de tous sortes de rayonnements de couleurs différentes caractérisées par leur gamme de longueur d'onde [16].

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde dont 98% d'énergie est comprise entre $\lambda = 0,25\mu m$ et $\lambda = 4\mu m$ le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde est :

Pour $0,25\mu m < \lambda < 0,4\mu m$: c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour $0,4\mu m < \lambda < 0,8\mu m$: c'est le domaine du visible, il représente 47,5% de l'énergie totale émise par le soleil.

Pour $0,8\mu m < \lambda < 4\mu m$: c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45,5% de l'énergie totale émise par le soleil.

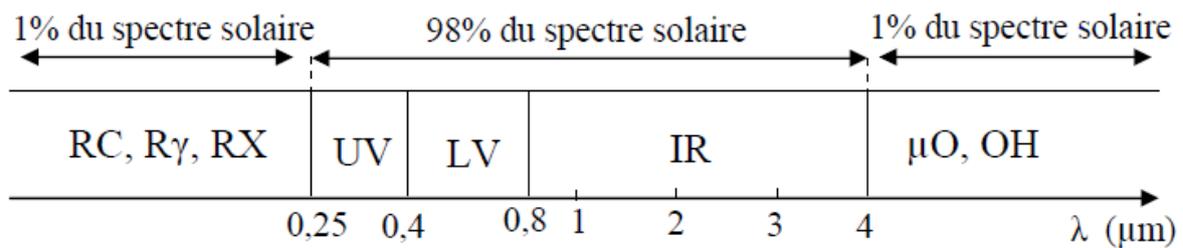


Figure I.9 : Spectre du rayonnement solaire [11].

I.13. Puissance solaire reçue par Terre :

Le soleil est considéré comme un corps noir de rayon $r = R_s$ porté à la température $T = T_s$. La puissance du soleil rayonnée par unité de temps est donnée par la loi de Stephan [1,17] :

$$W_s = \sigma \cdot T_s^4 \quad [W_s] = \frac{W}{m^2} \quad \text{I.23}$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ = la constante de Stephan.

La puissance rayonnée par toute la surface du soleil et par seconde :

$$P_S = W_S \cdot (4\pi R_S^2)$$

$$\sigma \cdot T_S^4 \cdot (4\pi R_S^2) \quad \text{I.24}$$

En supposant que la terre est démunie d'atmosphère et qu'il n'y a aucune absorption dans l'univers, une surface d'un m^2 placée perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit une puissance W_T donnée par la relation suivante :

$$W_T = \frac{(\sigma T_S^4 \cdot 4\pi R_S^2)}{4\pi D_{TS}^2} = \frac{\sigma T_S^4 R_S^2}{D_{TS}^2} \quad \text{I.25}$$

$$[W_T] = W/m^2$$

D_{TS} : varie en fonction du jour de l'année selon la relation :

$$D_{TS} = 1 - 0,017 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad \text{I.26}$$

- Lorsque $D_{TS} = 1$. U. A (aux équinoxes), la puissance recue par m^2 de la terre W_T (hors atmosphère) est appelée « constante solaire » notée I_0 .

Les mesures d' I_0 hors atmosphère (sur 10 ans) ont donné une valeur moyenne :

$$I_0 = (1367 \pm 7) W/m^2 \text{ Au lieu de } I_0 = (1353 \pm 21) W/m^2 \text{ adapté en 1971.}$$

- Lorsque $D_{TS} \neq 1$. U. A, la puissance recue par m^2 de la terre W_T (hors atmosphère) est notée I , elle est donnée par la relation :

$$I = 1367 \left[1 + 0,034 \cos \frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad \text{I.27}$$

Lors des fortes activités solaires, caractérisées par l'apparition des taches solaires et des éruptions chromosphériques, les rayonnements émis par le soleil peuvent s'écarter notablement de leurs valeurs habituelles. Ces variations apparaissent sensibles surtout pour les rayonnements de très courtes longueurs d'ondes. Dans le domaine du rayonnement électromagnétique, relatif aux applications solaires, ces variations sont considérées comme négligeables.

La figure I.10, représente l'évolution annuelle de la constante solaire corrigée.

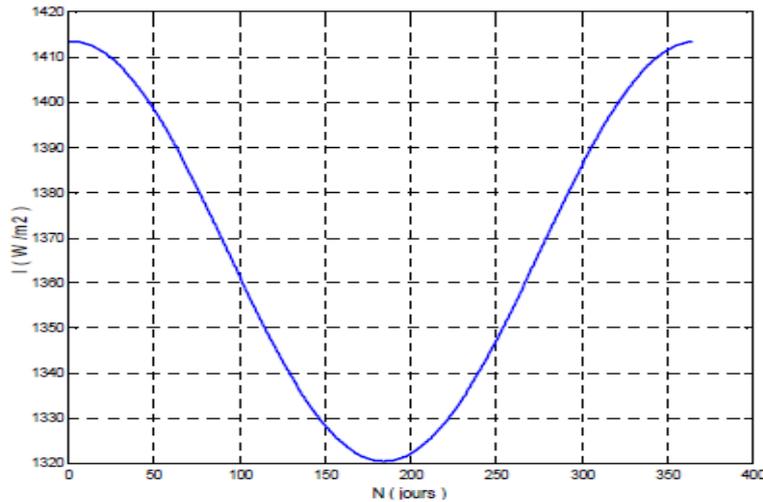


Figure I.10 : Évolution annuelle de la constante solaire corrigée

De la Figure I.10, nous remarquons que le maximum est obtenu au mois de janvier avec une valeur 1413W/m^2 , le minimum est estimé au début de juillet de 1320W/m^2 .

I.14. Modélisation du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuation aléatoire en traversant l'atmosphère : réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et diffusion par les aérosols [12].

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse, c'est-à-dire isotrope. L'autre partie, dite directe, est anisotrope. On subdivise le rayonnement solaire parvenant au sol en les composantes principales qui sont :

I.14.1. Rayonnement direct :

Rayonnement parvenant au sol sous un angle solide limite au seul disque solaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide [5]. Il peut être mesuré au moyen d'un pyrhéliomètre que l'on installe de façon que sa surface réceptrice soit orientée perpendiculairement aux rayons solaire, sur un support à la hauteur d'un mètre et demi du sol. Son axe de rotation doit être parallèle à celui de la terre [18].

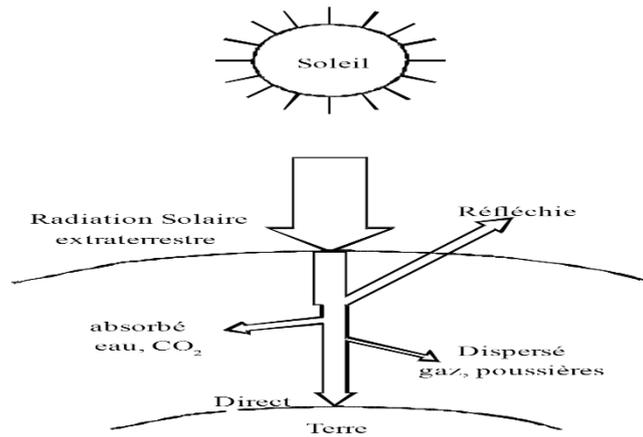


Figure I.11 : Rayonnement direct [8].

I.14.2. Rayonnement diffus :

Rayonnement diffus par les composants de l'atmosphère parvenant de la totalité du ciel à l'exception du disque solaire [5]. Il s'agit du rayonnement de l'atmosphère dont la longueur d'ondes varie de 0,3 à 5 microns, diffusé par les aérosols, les gouttelettes et la vapeur d'eau vers le sol, reçue sur une surface horizontale. Le mécanisme de la diffusion est dû au changement d'indice optique du milieu traversé par les rayons solaire [18]. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil [19].

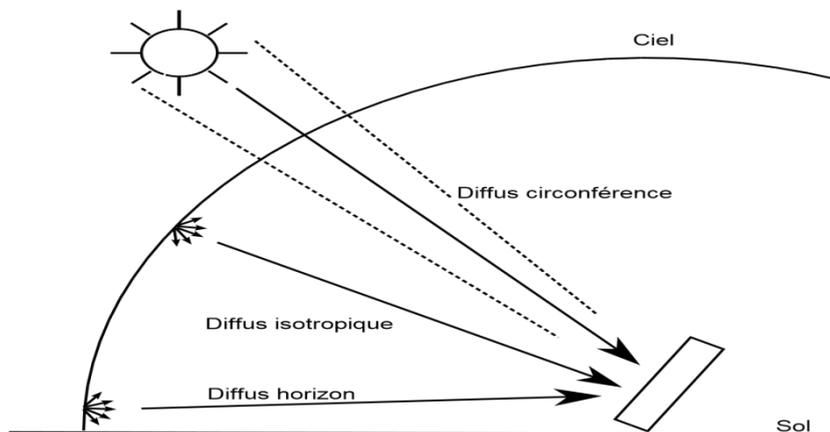


Figure I.12 : Rayonnement diffus [8].

I.14.3. Rayonnement global :

Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus [5].

$$G = S + D.$$

Avec : G : rayonnement global
 S : Rayonnement diffus
 D : Rayonnement direct

Le rayonnement solaire global est mesuré avec le même instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire diffus. La différence n'est autre que de mettre la thermopile de pyranomètre en position ouverte vers le ciel et le soleil [18].

I.14.4. L'albédo du sol :

Albédo est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface sur l'énergie solaire incidente [20]. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [21].

$$alb = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}} \quad \text{I.28}$$

Certaines matières ont un albédo très variable, comme les nuages. En revanche, les corps solides ont bien souvent des albédos fixes qui caractérisent leur composition chimique. Par exemple :

- La lave à un albédo de 0,04.
- L'albédo du sable varie entre 0,25 et 0,30.
- L'albédo de la glace entre 0,30 et 0,50.
- L'albédo de la neige (épaisse et fraîche) a son albédo qui peut atteindre jusqu'à 0,90.
- L'albédo moyen terrestre est de 0,2, toutes surfaces confondues [17].

Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul [20].

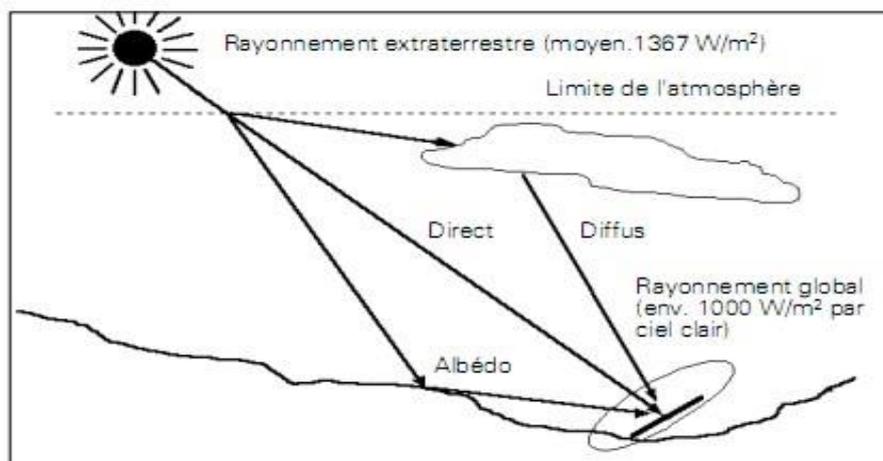


Figure I.13 : composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale = Direct + Diffus +Albédo [22].

I.15. Appareils de mesure :

I.15.1. Mesure de la durée d'ensoleillement et du rayonnement solaire :

- **L'héliographe :**

L'héliographe c'est un appareil simple mesure la durée d'insolation (les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct est supérieur à 120 W/m^2 [6].

Dans l'héliographe de Campbell-stokes, une sphère de verre concentre le rayonnement direct en un point qui brûle un papier spécial. En se déplaçant le point brûlé décrit le mouvement apparent du soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnel à la durée d'insolation. L'héliographe de Jordan utilise du papier photographique. On utilise maintenant des héliographes automatiques constitués de cellule photovoltaïque disposées sur un bande cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de la trajectoire apparente du soleil. Un dispositif électronique totalise les intervalles de temps d'ensoleillement, il faut veiller à ce que chaque héliographe est le même seuil, c'est-à-dire l'éclairement direct minimal enregistré [17].



Figure I.14 : Héliographe de Campbell-stokes [23,24].

- **Le pyranomètre :**

Le pyranomètre mesure le rayonnement Globale (direct et diffus) provenant d'un demi-espace (angle solide 2π) généralement, ils sont placés horizontalement. Ils sont parfois appelés solarimètres [19].

Un pyranomètre comprend deux anneaux concentriques en argent, une thermopile et un système d'enregistrement de la force électromotrice. Quand l'instrument est exposé à la

radiation solaire, une différence de température mesurée entre les anneaux noirs et les anneaux blancs. Cette différence de température est détectée par la thermopile qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant est de l'ordre du mouvement, il est converti par un facteur de calibrage en un flux en W/m^2 . Pour mesurer uniquement le rayonnement diffus c'est-à-dire éliminer le rayonnement direct, on ajoute un cache (bande métallique circulaire) orienté suivant la saison pour suivre la déclinaison et cacher le disque solaire [6].

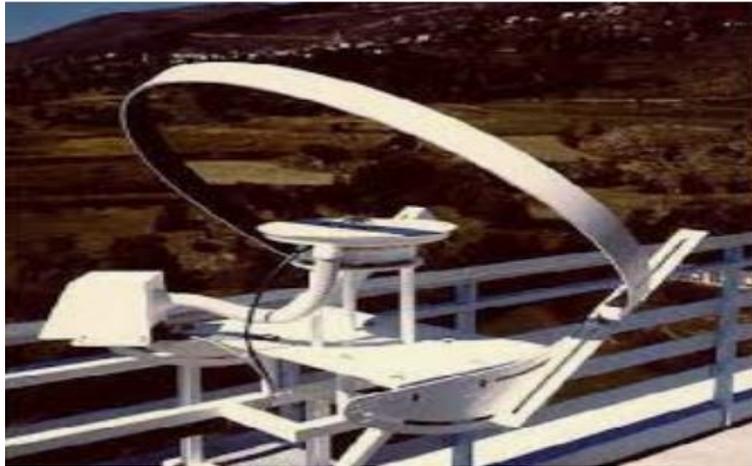


Figure I.15 : Un pyranomètre muni d'un cache [23, 25].



Figure I.16 : Un pyranomètre d'Eppley [25].

- **Le pyréliomètre :**

Le pyréliomètre mesure le rayonnement direct (c'est-à-dire le rayonnement d'une petite partie du ciel contenant tout le soleil) en incidence normale, on les appelle aussi actinomètres [19].

Il comporte un disque noir placé à la base d'un tube dont l'axe est aligné avec la direction des rayonnements direct est nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

La radiation diffusée peut être déterminée par la soustraction de la radiation directe et la radiation globale

La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à $5,7^\circ$ (le diamètre apparent du soleil est de $0,5^\circ$). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil [25].



Figure I.17 : Un pyréliomètre pour la mesure du rayonnement solaire direct [6, 23].

- **L'albédomètre :**

L'albédomètre est formé de deux pyranomètres identiques opposées: un dirigé vers le haut (ciel) l'autre vers le bas terre), le premier qui est dirigé vers le haut mesure le rayonnement global (direct+ diffus) incident sur le sol et le deuxième qui est dirigé vers le bas mesure le rayonnement global réfléchi par le sol.

L'albédo présente la fraction du rayonnement global réfléchi par le sol par rapport au rayonnement global incident. Il est possible d'obtenir le rayonnement net en calculant la différence entre le rayonnement global incident et le rayonnement global réfléchi.



Figure I.18 : L'albédomètre pour la mesure de l'albédo du sol [6]

I.15.2. Mesure de la vitesse et de la direction du vent :

- **Anémomètre :**

L'anémomètre est un instrument destiné à la détermination de la vitesse du vent [17].



Figure I.19 : Anémomètre.

- **Girouette :**

Dispositif généralement métallique, la plupart du temps installé sur un toit, constitué d'un élément rotatif monté sur un axe vertical fixe. Sa fonction est de montrer la direction du vent [17].



Figure I.20 : Girouette.

- **Capteur de température :**

Il sert à de déterminer la température de l'air sous abri (température ambiante).



Figure I.21 : Capteur de température

I.16.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les atténuations du rayonnement solaire. Il est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet $0,2\mu m$ à l'infrarouge lointain $2,5\mu m$. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de $1350W/m^2$ 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 phénomène d'absorption et diffusion dans l'eau, et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint $1000W/m^2$ du fait de l'absorption dans l'atmosphère. Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol.

I.17. Références :

- [1] R. Maouedj, « Etude des performances d'un système hybride (photovoltaïque-eolienne), pour la production de l'électricité. Application au site d'Adrar », thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [2] C. Zidani, « Conception et modélisation des systèmes photothermiques. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques », thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [3] Z. Nakoul, « Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur PV. Application aux sites Tlemcen et Bouzaréah », mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [4] M. Hadj Belkacemi, « Modélisation et étude expérimentation d'un capteur solaire non vitre et perforé », mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2011.
- [5] A. Bouras, « Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire », mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [6] K. Bekraoui, Z. Azizi, « Modélisation et analyse du rayonnement solaire sur plan incliné sur site d'Adrar », mémoire de master, Université Ahmed Draya Adrar, 2013.
- [7] L. Boucetta, « Estimation du rayonnement solaire à l'aide du modèle de l'atlas solaire de l'Algérie », mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [8] S. Mouhous-Chouchi, « Etude statique de rayonnement solaire sur un plan incliné », mémoire de magister, université Abo Bekr Belkaid, Tlemcen, 2012.
- [9] B. Fellah, « Système hybride photovoltaïque-eolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [10] F. Salma, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister, université Ferhat Abbas-Setif.

- [11] H. Belghitri, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [12] M. H. Zergat, « Effet de la forme de toiture sur le confort thermique », mémoire de master professionnel Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [13] Z. Benhachani, « Elaboration d'un modèle de dimensionnement d'un système hybride (solaire-éolien) alimentation une ferme dans la région des Aurès » mémoire de magister, université Hadj Lakhdar – Batna, 2011.
- [14] A. Tayebi, Z. Belhadj, « Installation et expérimentation d'un système hybride photovoltaïque-éolien pour la production d'électricité », mémoire de master, université d'Adrar, 2013.
- [15] A. Gueridi, « Dimensionnement d'un système hybride pour subvenir aux besoins de l'université de Chlef », mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2011.
- [16] I. Maatallah, N. Bouallaoui, « Etude l'impact des conditions climatique sur les paramètres de performance de module PV dans un site saharien », mémoire de master, université d'Adrar, 2018.
- [17] F. Marzougui, M. Ben Laichi, « Réalisation et expérimentation d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique PV-T », mémoire de master, Université d'Adrar, 2018.
- [18] R. Berramdane, « Modélisation et expérimentation d'un distillateur solaire », mémoire de master, Université d'Adrar, 2013.
- [19] Z. Bardjlaghi, M. Bahadj, « Etude, conception et calcul d'une installation solaire thermique de chauffe-eau pour application domestique », mémoire de fin d'études, Université Africaine-Adrar, 2011.
- [20] C. Benbouza, « production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie », mémoire de magister, Université Constantine1, 2014.
- [21] M. Amar, « Réalisation et expérimentation d'un chauffe-eau en milieu saharien, mémoire de master, Université d'Adrar, 2013.
- [22] Bendjamaa Ibrahim, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, 2012.
- [23] M. Fayçal Chafiheddine, « Modélisation du rayonnement solaire à l'échelle journalière et horaire. Application aux région de moyenne latitude », mémoire de master, université d'Adrar, 2012.
- [24] M. Othmani, « performance des modules PV dans les conditions du climat Saharien », mémoire de master, université d'Adrar, 2012.

[25] A. Touahri, « Etude du rayonnement solaire en vue de l'optimisation des systèmes photovoltaïques », mémoire de master, université d'Adrar, 2013.

CHAPITRE II

L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

**Etude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des
modules photovoltaïques dans la région saharienne**

II.1. Introduction :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps 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.

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques.

II.2. Histoire de l'énergie solaire :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Edmond Becquerel en **1839** [1].

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique [2].

1883 : La première cellule solaire fonctionnelle fut construite par Charles Fritts. Mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation [3].

1930 : Les premières vraies cellules sont apparues avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium [3].

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie solaire photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

1995 : Des programmes d'installation des toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 [2].

En juillet **2013** : Le groupe Algérien Condor Electroniques, lance la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W et à des prix compétitifs.

Dans le cadre de la concrétisation du programme national Algérien des énergies renouvelables, un projet de 400 MW en photovoltaïque a été lancé, faisant partie du programme complémentaire de production de l'électricité, prévu pour l'été 2014. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux et dans la région du sud-ouest, ainsi que dans la région du grand sud. Dans la dizaine d'années qui viendront, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW. L'objectif à **2030** est de 12000 MW en énergies renouvelable pour la consommation interne d'électricité. La puissance photovoltaïque installée cumulée dans le monde a atteint 138,9 GW à la fin **2013** [4].

1. II.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire [5] :

2. II.3.1. Les avantages :

- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas des pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

II.3.2. Les inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel 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 système augmente.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

II.4. Le fonctionnement des générateurs solaires :

Le générateur solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sortie que de module, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les module pour obtenir une puissance optimales [6].

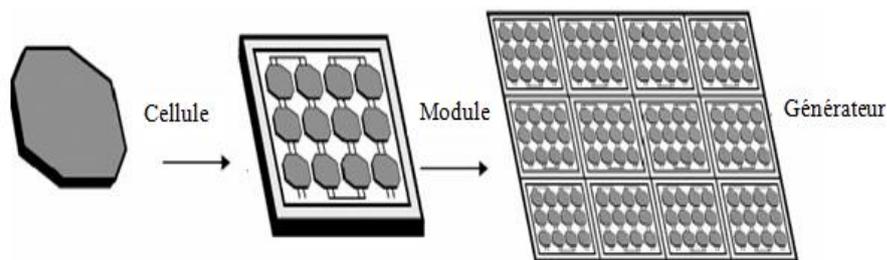


Figure II. 1 : Association des cellules solaire PV [7].

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants (Figure II.2) :

- 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 de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

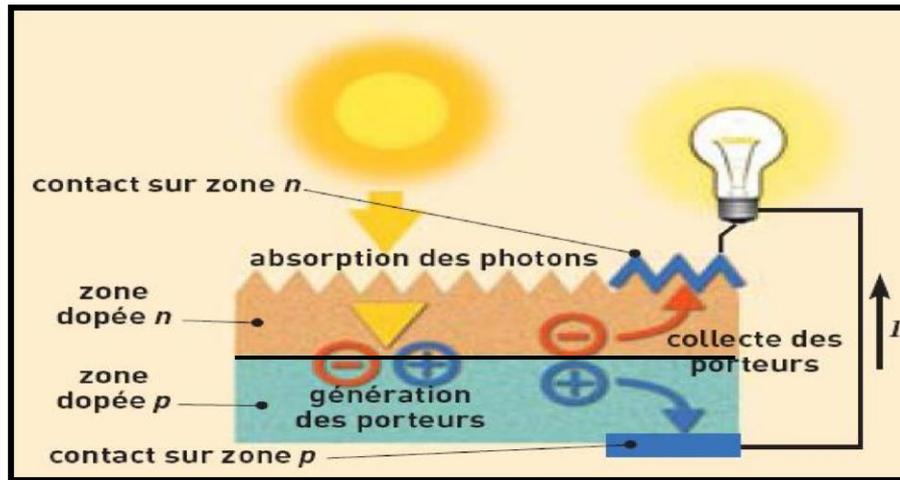


Figure II. 2 : principe de conversion photovoltaïque [8, 9].

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, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure II.3.

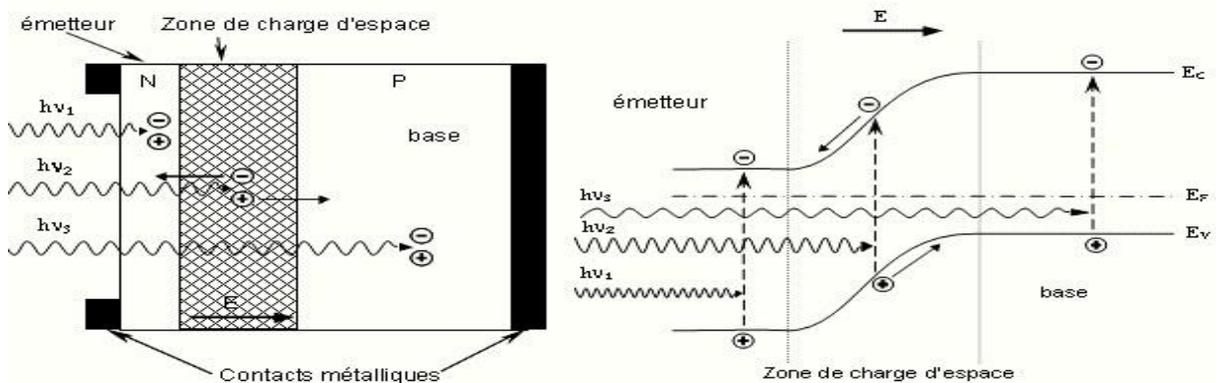


Figure II. 3 : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite d'une cellule photovoltaïque)

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photons porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion ;

- Dans la zone de charge d'espace, le pair électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura une photo courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant I_{ph} . Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [7, 10].

II.5. La Technologie Photovoltaïque :

II.5.1. Procédé de fabrication :

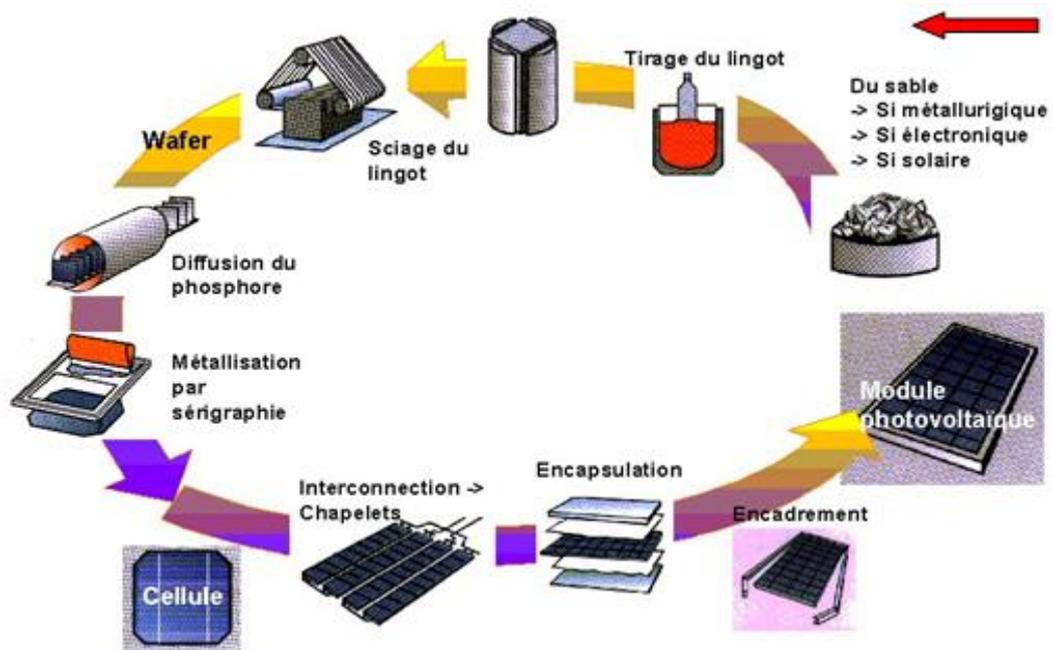


Figure I. 4 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un système photovoltaïque au silicium cristallin [11].

II.5.2. Modules et cellules photovoltaïque :

Le module PV c'est l'ensemble de cellule solaire, il suffit de connecter en série plusieurs cellules (selon la technologie utilisée, la tension produite par la cellule varie entre 0,5 et 1,5 V) [12].

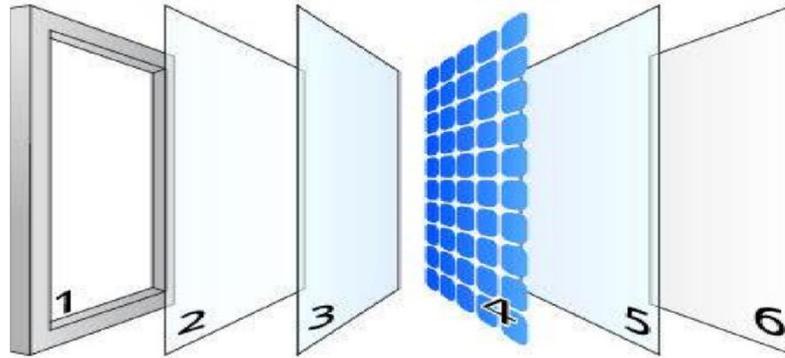


Figure I. 5 : La fabrication du module photovoltaïque [13].

Plaque avant transparente prismatique (optimisation de la réception des rayons solaires)

- 1- Feuille d'EVA (L'éthylène-acétate de vinyle ou EVA (en anglais : éthylène-vinyle acétate) est issu de la copolymérisation de l'éthylène avec l'acétate de vinyle)
- 2- Cellules de silicium interconnectées
- 3- Feuille d'EVA
- 4- Plaque servante de substrat arrière (Tedlar ou verre)

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettent à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [14].

Les technologies des cellules solaires se divisent en grandes familles :

a. Cellules en Silicium

a.1. Silicium cristallin :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux PV. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication [14].

On dénombre 3 types différents :

- **Le silicium monocristallin** : est un matériau de très haute pureté. Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, permet la fabrication de cellules conventionnelles à haut rendement mais il est très coûteux [10].

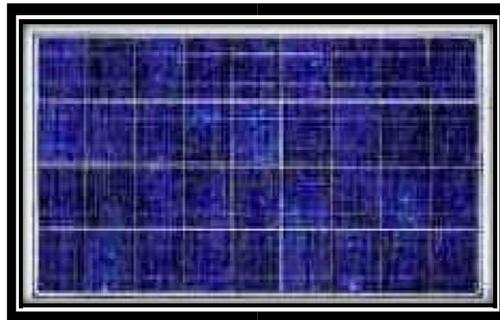


Figure II. 6 : Cellule mono cristalline [15].

- **Le silicium poly cristallin** : est fabriqué principalement à partir de sources de matériau moins raffinées. C'est le matériau qui conduit au coût le plus faible au watt crête [10].

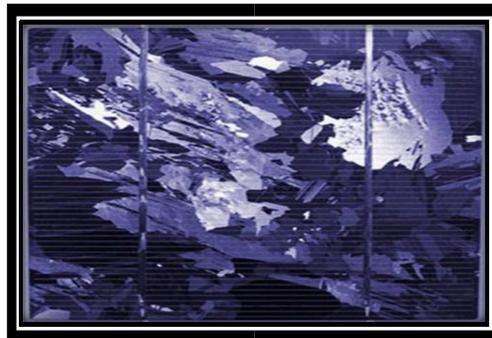


Figure II. 7 : cellule poly cristalline [15].

- **Le silicium en ruban :** cette solution séduisante consiste à produire directement des plaques minces ($< 200\mu m$) de silicium multi cristallin. Cependant cette technique n'a pas réussi à s'imposer, en raison notamment de la moins bonne qualité du silicium obtenu et des vitesses de tirage trop faible. Cependant les meilleures cellules produites présentant des rendements de conversion moyens d'environ 14% [10].

a.2. Silicium amorphe :

Les modules PV amorphe ont un cout de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas cout en utilisant peu de matière première [16].

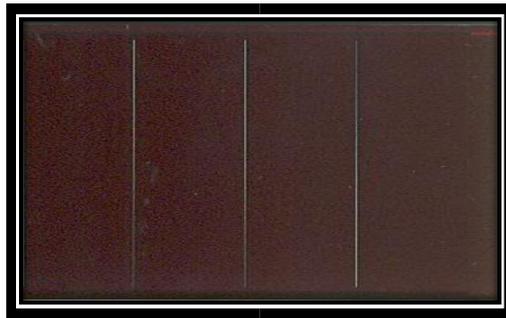


Figure II. 8 : cellules amorphe [15].

Tableau II.1 : comparatif des différentes technologies [17] :

Technologie	Monocristallin	Polychristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> - Très bon rendement : 14 à 20 %. - Durée de vie : importante (30 ans) - Coût de fabrication : élevé. - Puissance : 100 à 150 Wh/m². - Rendement faible Sous un faible éclairement. - Perte de rendement avec l'élévation de la température. - Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal - Couleur bleue uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement : 11 à 15 %. - Durée de vie : importante (30 ans). -Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins. - Puissance : 100 Wh/m². - Rendement faible sous un faible éclairement. - Perte de rendement avec l'élévation de la température. - Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. - Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés car les différents cristaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible : 5 à 9 %. - Durée de vie : assez importante (20 ans) - Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies - Puissance : 50 Wh/m². - Fonctionnement correct avec un éclairement faible. - Peu sensible aux températures élevées. -Utilisables en panneaux souples. - Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. - Rendement faible en plein soleil. - Performances diminuant avec le temps. -Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43 %	47	10

b. Les autres modules photovoltaïques composites et organiques :

Les cellules solaires à base de matériaux organique ou de polymère sont caractérisées par leur faible cout, matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, dispositifs souples...il existe aujourd'hui des cellules PV organique dont le rendement de conversion dépasse la barre des 10% [18].

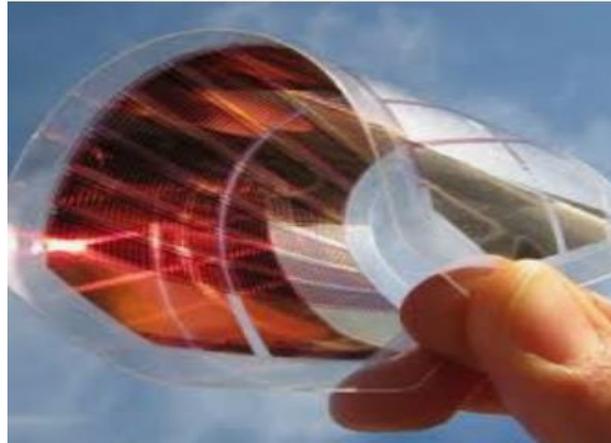


Figure II.9 : cellule solaire organique [2].

II.5.3. Critères de choix d'une installation solaire [19] :

On peut dénombrer les-critères d'ordre technique, civique, de confort et financier :

- **Critères technique :**
 - Disponibilité d'une énergie utile.
 - En débit et en qualité suffisants.
 - A l'endroit et au moment voulus.
- **Critères civiques :**
 - Economie d'énergie importée.
 - Substitution des énergies renouvelables aux énergies fossiles.
 - Respect de la sécurité publique et privée.
 - Respect de la sauvegarde de l'environnement.
- **Critères de confort :**
 - Facilité d'exploitation.
 - Réduction de l'encombrement.
- **Critères de moindre cout :**
 - A l'acquisition et l'installation.
 - A l'entretien.

- Au fonctionnement.

II.5.4. Système solaire photovoltaïque [20] :

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur PV, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un système d'orientation ou de suivi,
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- Un convertisseur CC/CA (courant continu a courant alternatif)
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

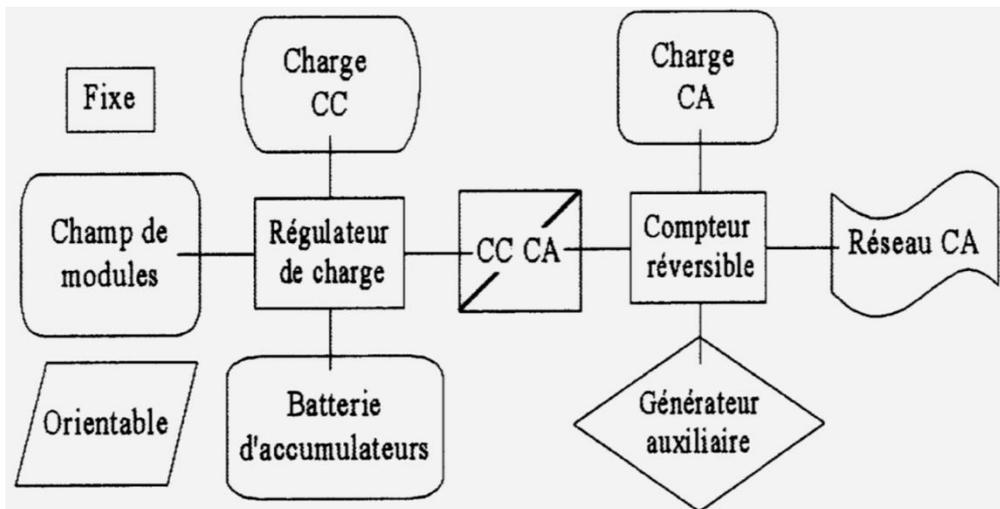


Figure II.10 : Les divers éléments d'un système photovoltaïque.

II.5.5. Applications :

II.5.5.1. Pompage photovoltaïque :

Un pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batteries. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules. La pompe sans batterie, plus communément appelée « pompe au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [21].

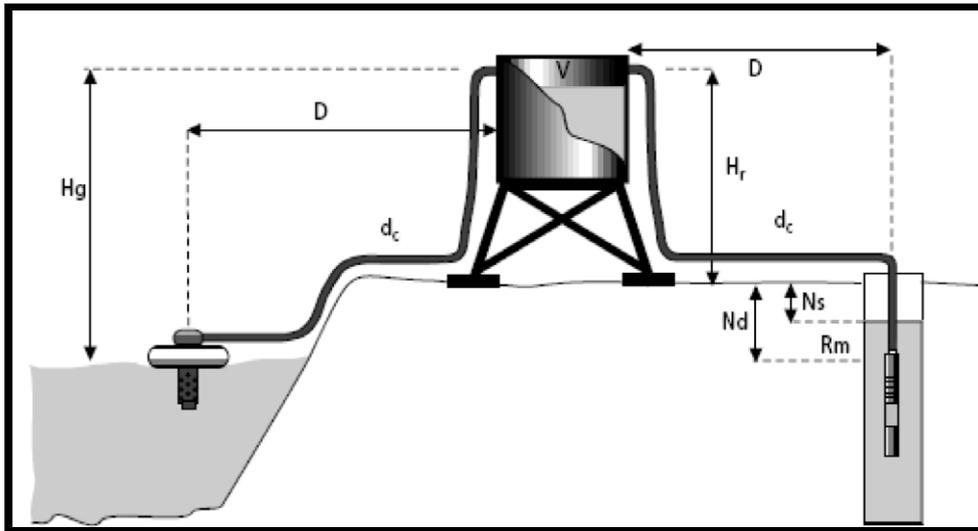


Figure II. 11 : Schéma synoptique simplifié d'un système de pompage PV [4].

➤ **Les différentes pompes utilisées dans les systèmes de pompages [4] :**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon :

- ✓ Leur principe de fonctionnement : soit de type centrifuge ou volumétrique.
- ✓ Emplacement physique de la pompe : par rapport à l'eau pompée la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.
- La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètre (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.
- Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface, la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur.

❖ **Les pompes centrifuges :**

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse.

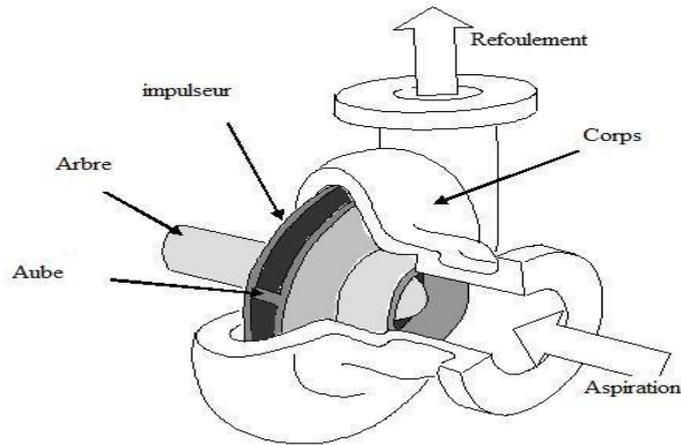


Figure II. 12 : Pompe centrifuge

❖ Les pompes volumétriques :

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.)

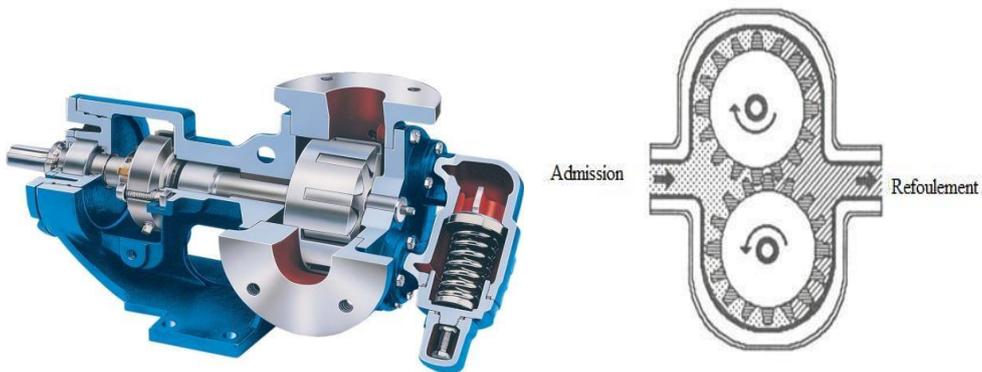


Figure II. 13 : Pompes volumétriques.

II.5.5.2. L'éclairage photovoltaïque [22] :

Le cas simple d'un système photovoltaïque d'éclairage public utilise uniquement les panneaux PV et les batteries avec un système de conversion. Le système est présenté dans la figure

II.14. Dans cette configuration, les panneaux PV charge les batteries pendant la journée et ils fournissent l'énergie nécessaire pour la charge pendant la nuit.

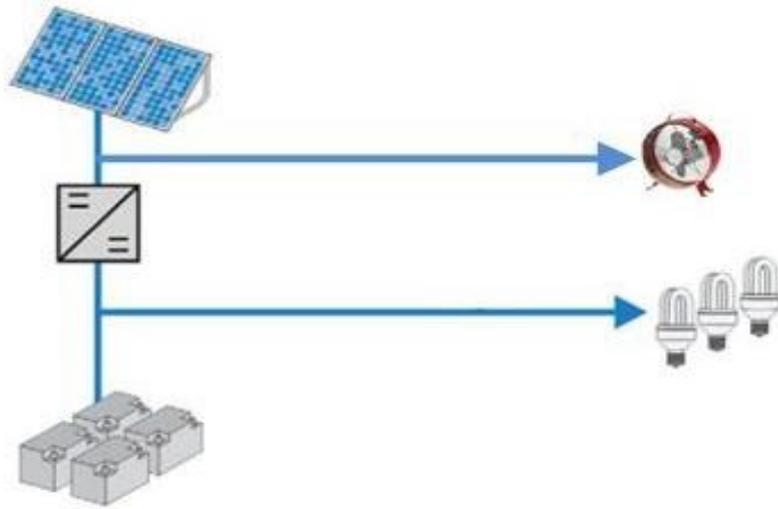


Figure II. 14 : Configuration d'un système photovoltaïque avec la fonction stockage et transformation.

- **Les batteries :**

La batterie au plomb est couramment associée aux systèmes solaires fixes. Dans cette application, ce type correspond bien avec le système, et le poids important de cette batterie n'a aucune influence dans les applications stationnaires. En outre, son efficacité est de 80%.

- **Les lampes :**

Les lampes LED avec température de couleur de 3,500 à 4,200 K sont rendu plus de lumière naturelle que le jaune des lampes au sodium ou des lampadaires vert fluorescent. En outre, aucun rayonnement UV ou IR est émis par les lampes LED.

Aujourd'hui, la plupart des lampes de rue (pour éclairage public) sont de la technologie remplie de gaz supporter une moyenne de 12.000 h de fonctionnement (moins de 3 ans).

- **Convertisseurs électriques :**

Les convertisseurs continu-continu sont nécessaires. Le premier est utilisé pour obtenir la puissance maximale de module PV utilisant un MPPT (Maximum Tracking Power Point algorithm) raison de la nature non linéaire de cette source. De toute évidence, une connexion directe entre le PV et la batterie fonctionne également. Cependant, il n'y a aucune garantie que le PV de fournir la puissance maximale. Pour l'application de l'éclairage de rue, il faut remarquer que la connexion directe entre PV et les LED ne serait jamais nécessaire, car ils ne seront pas fonctionner simultanément.

- **Les modules photovoltaïques :**

Pour les cellules photovoltaïques, trois technologies silicium commercialisées sont actuellement disponibles : l'amorphe, poly cristallin et monocristallin .la technologie poly cristallin est souvent préféré pour son faible coût, 400 DA / W. La technologie monocristalline atteint 15% de rendement contre 10% pour la poly cristallin mais la production de cellules monocristallines besoin de 3 fois plus d'énergie que les cellules poly cristallines qui ne peuvent pas être ignorés à partir d'un point de vue environnemental.

II.6. Les paramètres qui influent sur le rendement d'un panneau solaire :

II.6.1. Influence de la température sur le rendement d'un panneau solaire PV :

L'influence de la température est importante et à des conséquences sur la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbe n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur, c'est pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a) [23] :

$$T_c = T_a + H_{in} \left(\frac{NOCT - 20}{1000} \right) \quad \text{II.1}$$

Avec :

T_a : La température ambiante (°C).

H_{in} : L'irradiation solaire sur le plan incliné (w/m^2).

$NOCT$: est la température de fonctionnement de la cellule qui est définie comme la température de la cellule lorsque le module fonctionne sous les conditions suivantes :

Irradiation Solaire : 1000 W/m².

Distribution Spectrale : AM1.5.

Température Ambiante : 20 °C.

Vitesse du vent : > 1 m/s.

La Figure II.15 montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre.

Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [20].

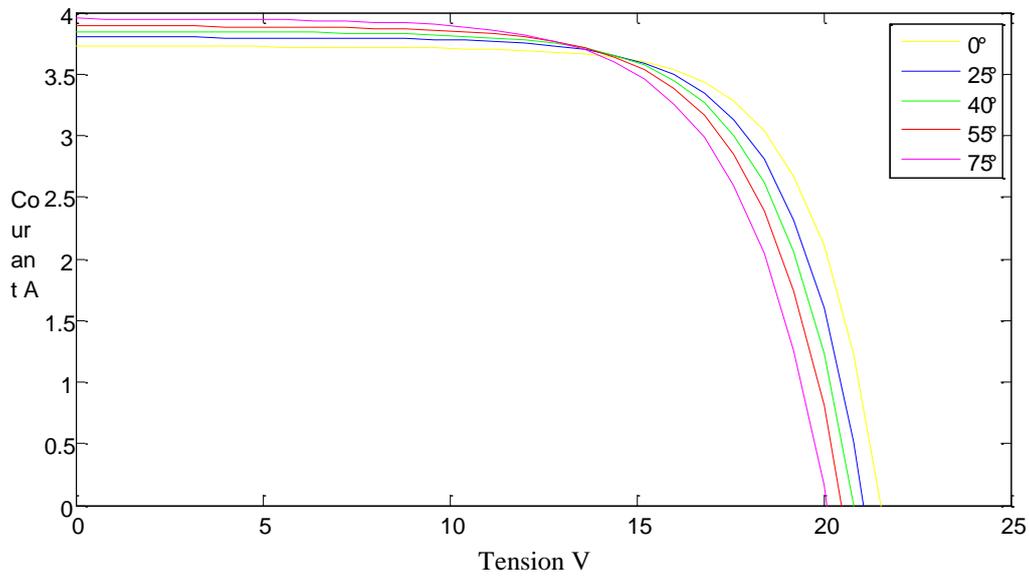


Figure II.15 : Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la température $I=f(V)$.

La figure II.16 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

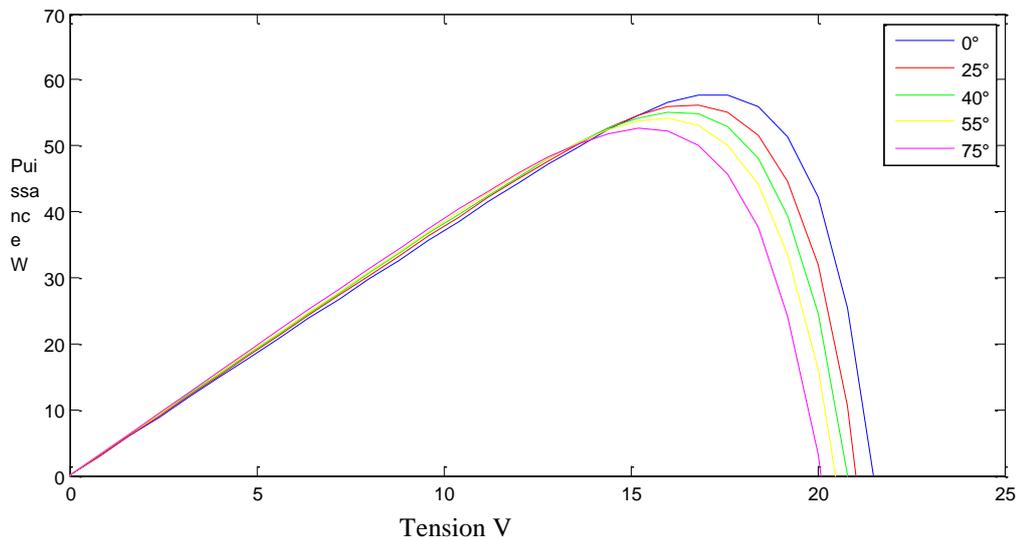


Figure II.16 : Caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs de températures $P=f(V)$.

II.6.2. Influence de la 'intensité de la radiation lumineuse :

La figure II.17 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) [20].

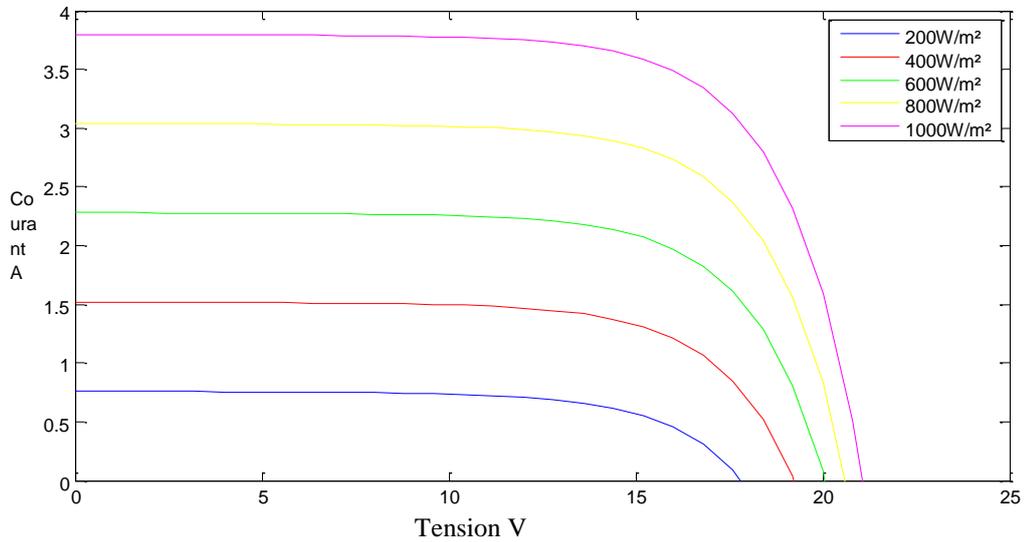


Figure II.17 : Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de radiation solaire $I=f(V)$; $T=25^{\circ}C$.

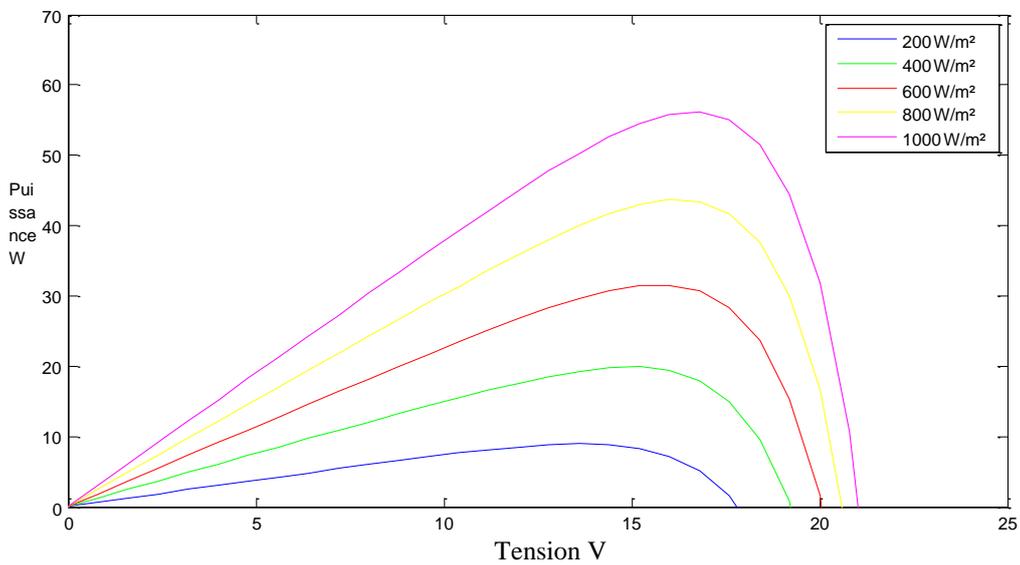


Figure II.18 : Caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs de radiation solaire $P=f(V)$; $T=25^{\circ}C$

II.7. Les différents types des systèmes énergétiques solaires :

On rencontre deux types de systèmes photovoltaïques, les systèmes **autonomes**, et les systèmes **connectés à un réseau**. Premier type est indépendant du système de distribution d'électricité.

II.7.1. Système photovoltaïque autonome :

Ce sont des systèmes PV complètement indépendants d'autre source d'énergie et qui alimentent l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, les systèmes autonomes exigent des batteries pour stocker l'énergie.

Ils servent habituellement à alimenter la maison en site isolé, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [24].

Cette installation se compose de [25] :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Un régulateur de charge.
- Une ou plusieurs batteries.
- Un onduleur.

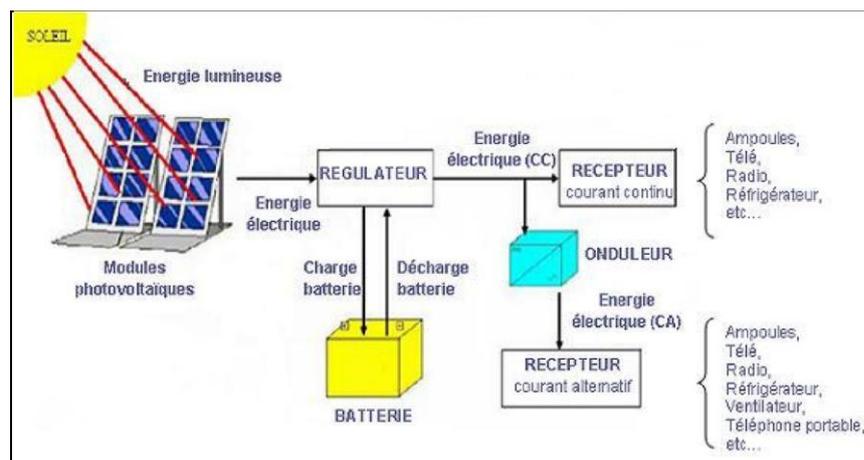


Figure II.19 : Système photovoltaïque autonome [26].

II.7.2. Système photovoltaïque raccordée au réseau électrique :

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings.

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs [27].

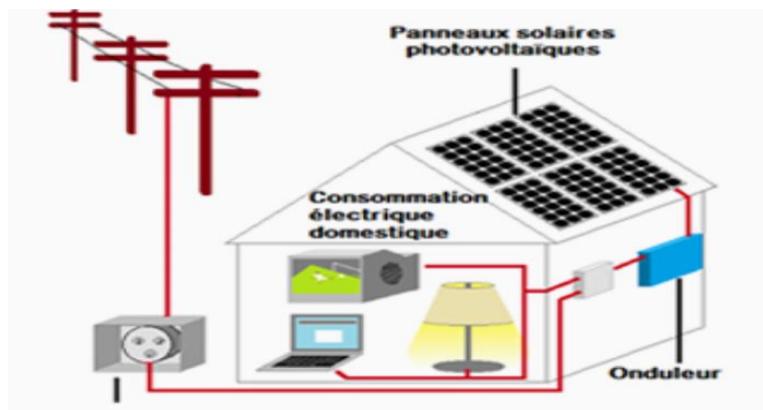


Figure II.20 : Types des systèmes connectés au réseau [26].

II.8. Conclusion :

Le monde de conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque, ce chapitre nous a permis d'explorer le fonctionnement de panneau solaire, des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque.

II.9. Référence :

- [1] A. Guechari, R. Benaïssa, « Modélisation et validation de la performance de modèle à quatre paramètres de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque », mémoire de master, université d'Adrar, 2013.
- [2] K. Larbi, A. M'khadmi, « Utilisation de photovoltaïque en éclairage public, application au site d'Adrar », mémoire master, Université d'Adrar, 2014.

- [3] I. Maatallah, N. Bouallaoui, « Etude l'impact des conditions climatique sur les paramètres de performance de module PV dans un site saharien », mémoire de master, université d'Adrar, 2018.
- [4]. Belaid Lalouni Sofia, Cours énergie solaire photovoltaïque, Maitres de conférences classe B, université A .Mira de Bejaia, 2014/2015.
- [5] S. Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister, université Ferhat Abbas-Setif.
- [6] K. Badhbouda, « Intégration d'un onduleur a cinq niveaux dans une chaine photovoltaïque » mémoire de master, université d'Adrar, 2015
- [7] M. Boussaid, « Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules photovoltaïque », mémoire de magister, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, 2012.
- [8] H. Mouhammed-kraroubi, « Structure oxyde/métal/ oxyde destinée à remplacer les oxydes transparents conducteurs classique dans les cellules solaire par effet PV », mémoire de master, université d'Adrar, 2013.
- [9] M. Othmani, «Performances des modules PV dans les conditions du climat saharien », mémoire de master, université d'Adrar, 2012.
- [10] H. Hassini-Belkhipi, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride eolien-photovoltaïque », mémoire de magister, université de Tlemcen, 2010.
- [11] C. Zaida, Z. Mahdjoubi, « Etude de l'apport des couches antireflets et de la texturisation aux performances des cellules solaires en silicium cristallin », mémoire de master, université d'Adrar, 2016.
- [12] C. Ben bouza, « Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie », mémoire de magister, université Constantine1, 2014
- [13] T. Ben aoun, S. Mouissi, « Etude d'un système couplant un générateur photovoltaïque et un charge électrolytique, mémoire de master, université de Ouargla, 2015.
- [14] A. Habiballah, B. Mameri, « Etude de faisabilité techno-économique de la filière photovoltaïque raccordée au réseau d'Adrar », mémoire de master, université d'Adrar, 2014.
- [15] A. Keddi, A Foudou, « Traitement de l'image thermique pour la détection des zones défectueuses des panneaux solaire photovoltaïques », mémoire de master, université d'Adrar, 2014.
- [16] B. Fellah, « Système hybride (PV-EOLIN), de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », mémoire de magister, université de Tlemcen, 2012.
- [17] A. Bounaceur, « Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie », mémoire de master, université de Ouargla, 2015

- [18] A. Gueridi, « Dimensionnement d'un système hybride pour subvenir aux besoins de l'université de Chlef », mémoire de magister, université de Chlef, 2011.
- [19] A. Dahmani, « Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque. Application aux sites de moyenne latitude », mémoire de master, Université d'Adrar, 2013.
- [20] A. Litim, Z. Abid, « Application de la logique floue pour la poursuite du point de puissance maximale d'une générateur photovoltaïque », mémoire de master, université de Saida, 2017.
- [21] W. Abbassi, S. Boulal, « Etude techno-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Adrar, mémoire de master, université d'Adrar, 2017.
- [22] F. Zaoui, « Utilisation des énergies influence de la température sur les performances du module PV », thèse de doctorat, université de Biskra, 2016.
- [23] Z. Ben hachani, « Elaboration d'un modèle de dimensionnement d'un système hybride (solaire-éolien) alimentât une ferme dans la région des autres », mémoire de magister, université de Batna, 2012.
- [24] Z. Nakoul, « Optimisation d'une centrale solaire à base d'une générateur PV. Application aux sites Tlemcen et Bouzaréah », mémoire de magister, université de Tlemcen, 2010.
- [25] M. Abed, M. Badjedi, « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome par les algorithmes génétiques », mémoire de master, université d'Adrar, 2013.
- [26] I. Bendjamaa, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, université d'Adrar, 2012.
- [27] Y. Meddour, Z. Yazı, « Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique », mémoire de master, université de Ouargla, 2015.

CHAPITRE III

L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

**Etude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des
modules photovoltaïque dans la région saharien**

III.1. Introduction :

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). Les usages thermiques de l'énergie solaire recencent un réel intérêt, moins pour des raisons économiques-la filière solaire est en phase de développement- que pour leurs capacités réduire l'émission de gaz à effet de serre.

Sur le plan technique, c'est tout d'abord au niveau de l'enveloppe des bâtiments qu'il faut intervenir. Allié à une bonne isolation et une maîtrise des pertes dues au renouvellement d'air, les apports solaires directs par les ouvertures des bâtiments constituent une voie économique et sûre.

Le deuxième axe d'intervention consiste à utiliser des systèmes de production d'eau chaude, de chauffage, voire de climatisation, qui utilisent l'énergie solaire associée à une énergie conventionnelle.

Les chercheurs rêvent toujours de bâtiment énergétiquement autonome, ses constructions qui entretiendront les relations équilibrées avec les réseaux auxquels elles seront reliées. Ainsi les installations solaire photovoltaïque produisent dans la journée une quantité d'électricité équivalent à la consommation et le solaire thermique sera mis à contribution. Ces nouveaux « bâtiments à énergie positive » s'imposèrent par la volonté des consommateurs, et donc des gouvernements qui intégreront cette démarche dans les réglementations régissant les nouvelles constructions. Cela se traduira par une plus grande fusion de l'énergie solaire avec l'architecture associée à une croissance des marchés et à une baisse continue de prix.

III.2. La conversion photo thermique :

C'est la transformation du rayonnement solaire en chaleur. L'absorption du rayonnement se fait par le corps par une couche dont l'épaisseur est approximativement de $1\mu\text{m}$. L'énergie photonique ($E_n = h\nu$) se transforme en agitation moléculaires et dont en chaleur (se propage dans tous le corps) ce qui se traduit dans la plus part du temps par une augmentation de température de ce corps. Cependant, un apport de chaleur peut également provoquer un changement d'état.

Les convertisseurs photothermiques sont des capteurs solaires conçu pour convertir l'énergie des rayonnements solaire (la chaleur) capter par une surface appelé surface absorbante en énergie calorifique, cette énergie est transférer à travers la paroi de la surface absorbante vers un fluide caloporteur (liquide ou gaz) pour l'exploiter [1].

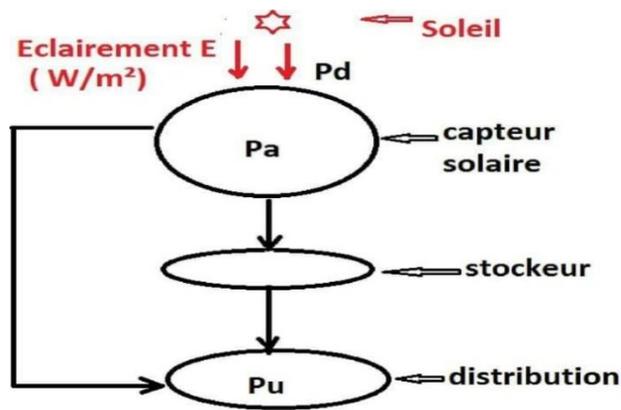


Figure III.1 : Les étapes de la conversion photo thermique [2].

III.3. Différents types de capteurs :

Le capteur solaire thermique qui absorbe le flux solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur (air, eau) [3].

III.3.1. Le capteur solaire à eau :

Dans le capteur solaire thermique « à eau », l'eau circule dans des tubes [3]. Ces capteurs sont composés d'un simple absorbeur constitué d'un réseau de tubes accolés soit en plastique soit en caoutchouc de couleur noire. L'eau à chauffer circule dans les tubes. La température pouvant être atteinte (sans vent) environ $45^{\circ}C$. Le rendement est de l'ordre de 30% [1, 4].

Usage du capteur solaire à eau :

- Préchauffage des eaux sanitaire dans les centrales de chauffe.
- Chauffage des piscines.

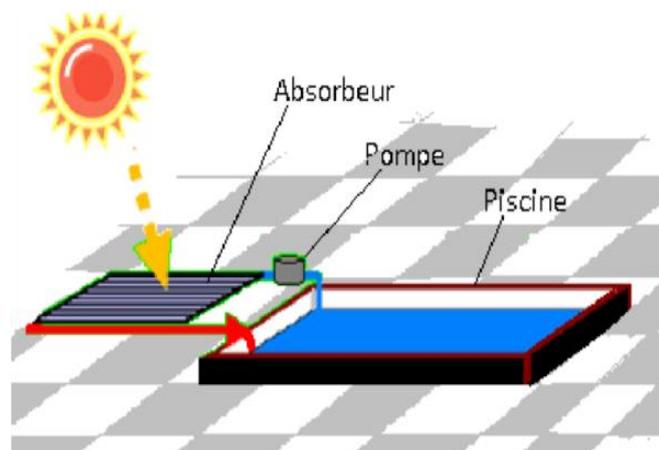


Figure III.2 : Chauffage d'une piscine à l'aide d'un capteur sans vitrage [1].

Il est à remarquer qu'à ce niveau thermique le stockage de l'eau chaude est très efficace.

III.3.2. Le capteur solaire à air :

Dans le capteur solaire thermique « à air », c'est de l'air qui circule et qui s'échauffe au contact des absorbeurs [3].

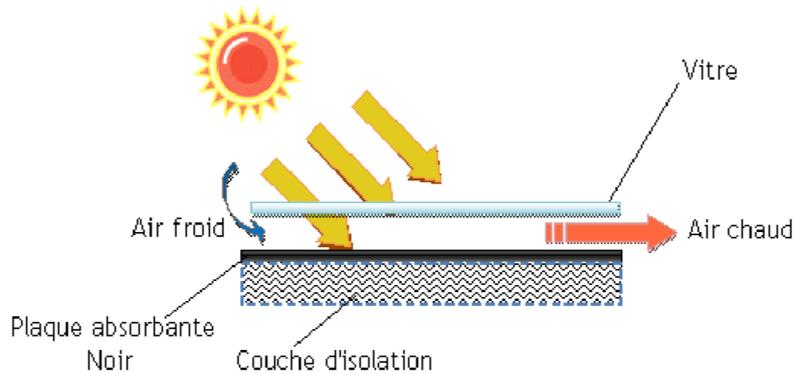


Figure III.3 : Capteur à air [3].

Sous un vitrage, une plaque noire exposée aux rayons solaires s'échauffe d'autant plus qu'un isolant arrête les pertes arrière de chaleur. A cause de la différence de température entre l'ambient et l'intérieur du capteur l'air circule entre le verre et la tôle noire (Absorbeur) et s'échauffe [4].

L'échauffement de l'air peut atteindre 20 à 40°C de plus que la température ambiante, le rendement du capteur est de l'ordre de 40 à 50 % en fonction des dimensions du capteur [1].

Usage du capteur solaire à air :

- Le séchage agricole.
- L'habitat solaire par utilisation de l'air chaud (Mur Trombe Michel...

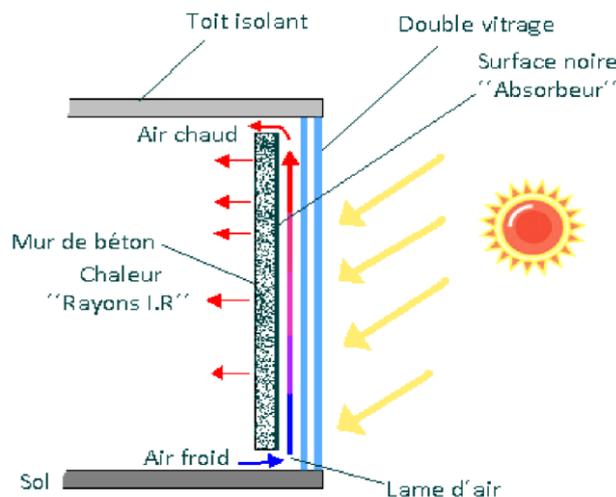


Figure III.4 : Capteur a air utilisé en climatisation " Mur Trombe- Michel " [1].

III.4. Applications:

III.4.1. La distillation solaire :

III.4.1.1. Les dispositifs de distillation pour le dessalement de l'eau saumâtre [5] :

Le dessalement des eaux saumâtres ou des eaux de mer par distillation solaire est une opération très utilisée dans les régions arides.

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer l'eau saumâtre.

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont :

- Distillation solaire à simple effet.
- Distillation solaire à multiples effets.

III.4.1.1.1. Les distillateurs à simple effet :

Ce sont les distillateurs les plus utilisés dans le monde, le distillateur est constitué d'un bassin peint en noir pour capter le maximum de radiation solaire, rempli d'eau et couvert d'une vitre transparente aux rayons; cette dernière est inclinée pour que la vapeur condensée dans sa face intérieure coule vers une gouttière qui est placée en bas, généralement ce type est simple à construire et à maintenir mais son efficacité reste inférieure à celle d'un distillateur à multiple effets [6].

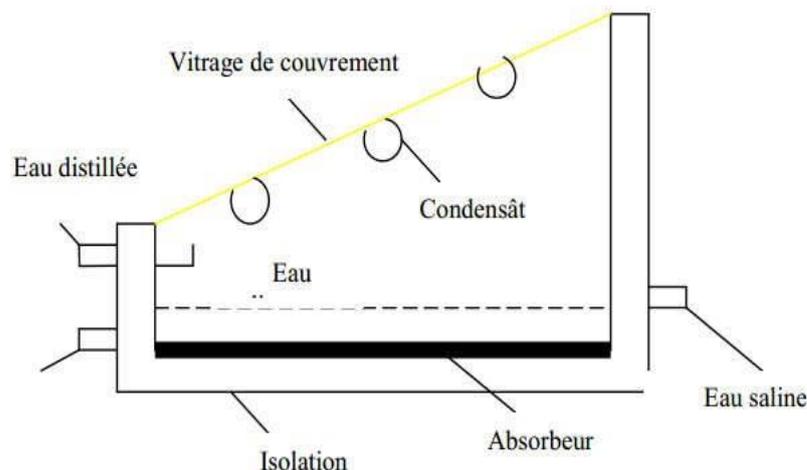


Figure III.5 : Le principe de construction d'un distillateur solaire simple [5].

- ✓ Un distillateur à vitre sphérique est représenté ci-dessous.

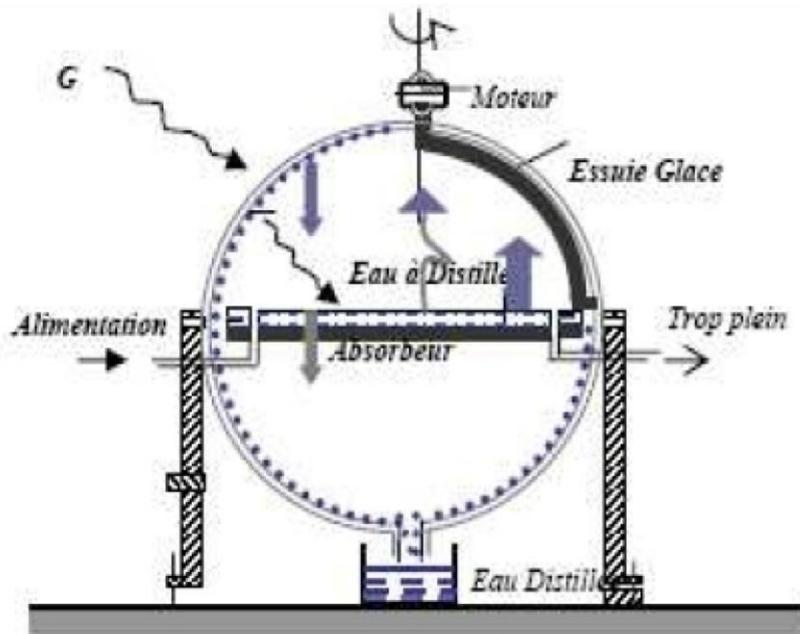


Figure III.6 : Distillateur solaire sphérique [7].

III.4.1.1.2. Les distillateurs à multiple effet :

Un distillateur à double compartiments est représenté ci-dessous. Il est adapté à la distillation alcoolique.

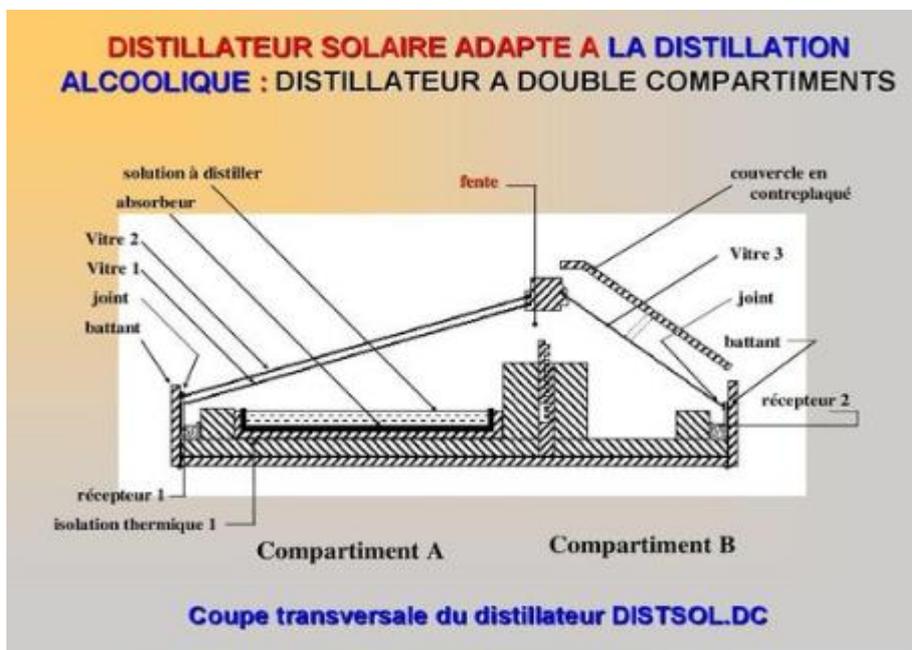


Figure III.7 : Coupe transversale du distillateur à double compartiments adapté à la distillation alcoolique [7].

III.4.2. Le chauffe-eau solaire :

Le chauffe-eau solaire thermique est un moyen simple, écologique, durable, fiable et économique pour chauffer l'eau à usage domestique. C'est un élément de substitution aux divers moyens utilisés, tels que le chauffe-eau électrique ou le chauffe-eau à gaz. Le chauffe-eau solaire permet de chauffer l'eau grâce à la conversion thermique du rayonnement solaire, ce qui le rend écologique et propre. De plus, l'utilisation du soleil pour la production de l'eau chaude permet de préserver les énergies non renouvelables telles que le pétrole, le gaz, ou le charbon, afin de les réserver à des usages pour lesquels il n'existe pas encore d'alternative durable et écologique [6].

Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaires [2] :

Dans certains cas, la circulation du fluide caloporteur (l'eau) est naturelle et le stockage est situé au-dessus du capteur solaire.

Le système comporte une boucle thermique avec un échangeur situé au cœur de ballon de stockage et le capteur est plan.

Dans d'autres cas, le ballon de stockage est situé au-dessous du capteur système ne comporte alors ni boucle thermique, ni échangeur.

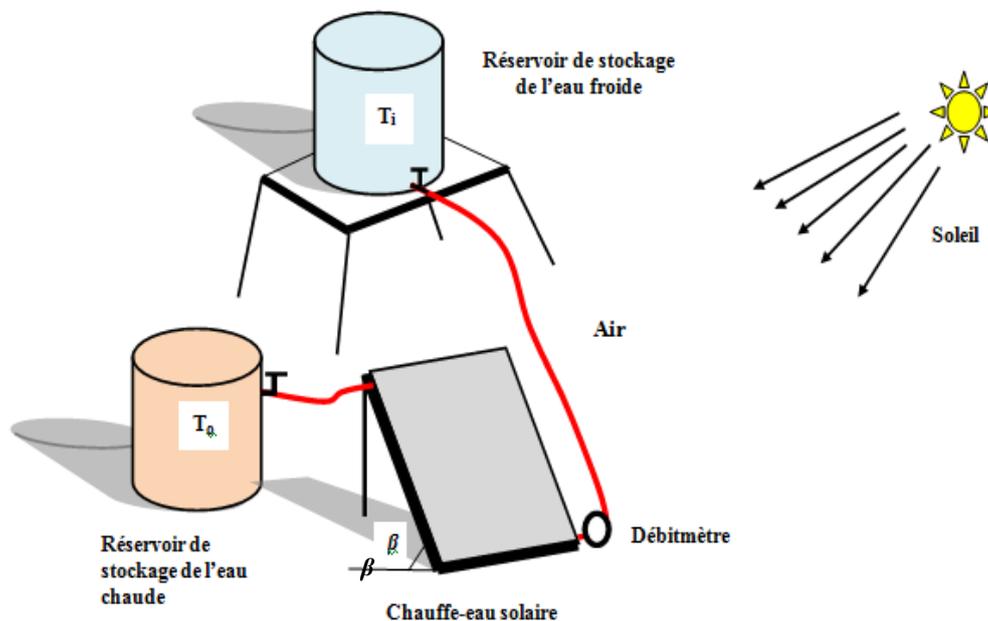


Figure III.8: Schéma d'une installation de chauffage de l'eau par l'énergie solaire [6].

III.4.3. Les séchoirs solaires :

Le séchage est, soit un de moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé dans le monde rural et dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire. Les séchages qui fonctionnent avec des combustibles fossiles nécessitent et consomment beaucoup d'énergie. Le prix du pétrole va grandissant ces dernières années et va apparemment continuer sa flambée, il est donc important de développer un système de séchage gratuit en énergie [8]. Il existe plusieurs critères pour classes les séchoirs solaires, parmi les plus importants on cite le séchage direct et le séchage indirect [9].

III.4.3.1. Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaire directs sont des dispositifs simple, ils sont conçus de façon à laisser pénétrer le rayonnement solaire directement dans l'armoire de séchage ou il est converti en chaleur par le produit à sécher lui-même et les diverses parois qu'il rencontre. Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel du au réchauffement, ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur du fait de la rusticité des modèles.

➤ **Avantage :**

- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

➤ **Inconvénient :**

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, décoloration.
- Les produits ne sont pas mieux protégés de l'attaque des poussières, des insectes, des animaux et la pluie.

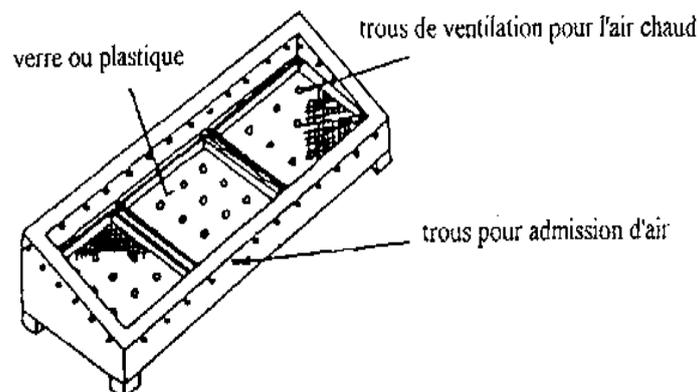


Figure III.9 : Séchoirs solaires directs simple.

III.4.3.2. Les séchoirs solaires indirects :

Ce type des séchoirs est souvent plus compliqué que le séchoir direct. Il se compose de deux parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur et une chambre de séchage qui contient le produit. L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques. Ce type de séchoirs peut être réalisé à des échelles diverses et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire.

➤ **Avantage :**

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des poussières, des insectes, des animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel (solaires directs simple).
- Le produit est protégé contre radiation du soleil directe.
- Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (les vitamines A et C).

➤ **Inconvénient :**

- Rapidité de séchage très variable suivent les conditions climatique et la conception du séchoir.
- Plus compliqué à réaliser.

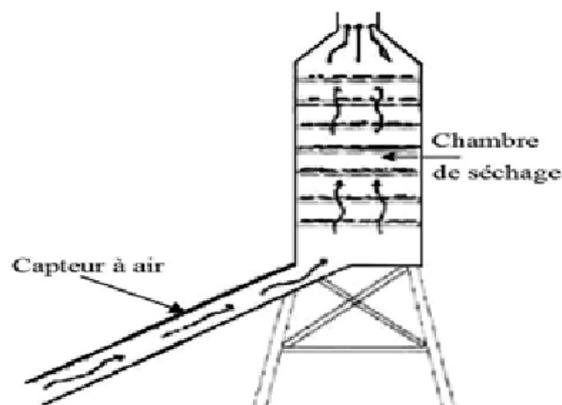


Figure III.10 : Séchoirs solaires de type indirect.

III.5. Conclusion :

Ce chapitre est consacré en premier lieu à la définition de la conversion photothermique et aussi à la description des différentes applications de l'énergie solaire thermique et leurs principes de fonctionnement.

III.6. Référence :

- [1] L. Bouragbi, « Étude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire », mémoire de magister, université d'Annaba, 2008.
- [2] F. Merzogui, M. Benlaichi, « Réalisation et expérimentation d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique », mémoire de master, université d'Adrar, 2018.
- [3] A. Sidiyakoub, « conception et modalisation d'un four solaire multifibres sphérique et cylindrique », université de Tlemcen, 2015.
- [4] L. Zéghamri, A. Haida, « Etude analytique et expérimentale des deux configurations d'un capteur plan destiné au chauffe-eau solaire : application au climat d'Adrar », mémoire de master, université d'Adrar, 2015.
- [5] O. Hamrat, « Influence de débit de refroidissement sur les performance d'un distillateur solaire actif avec chambre de condensation séparée, approche expérimentale », mémoire de master, université de Khemis Miliana, 2017.
- [6] M. H. Sellami, « Etude et amélioration des technique de distillation solaire dans la région sud-est Algérien (Ouargla) », thèse de doctorat, université de Ouargla, 2014.
- [7] M. Zerouli, « Contribution à l'optimisation des performances d'un distillateur solaire », mémoire de magistère, université de Batna, 2012.
- [8] L. Kaddouri, « Contribution à l'amélioration des performances d'un capteur solaire destiné au séchage solaire », mémoire de master, université d'Adrar, 2018.
- [9] A. Reggadi, M. Babahadj, « contribution à l'amélioration de fonctionnement d'un capteur solaire : 'utilisation d'un MCP' », mémoire de master, université d'Adrar, 2018.

CHAPITRE IV

Traitement des données et interprétation des résultats

IV.1. Introduction :

La dégradation dans le temps des performances électriques des modules photovoltaïques peut affaiblir leur capacité de fonctionnement en raison des conditions climatiques de la région.

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats expérimentaux et l'analyse des données d'un capteur PV-T et aussi l'étude de la dégradation des modules photovoltaïques qui ont été exposés au soleil pendant une période de 05 ans de fonctionnement à l'unité des énergies renouvelables dans un milieu saharien (Adrar).

IV.2. Description technique du système PV/T

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

IV.3. Description du système PV/T :

Nous avons réalisé un prototype, un capteur hybride photovoltaïque thermique à l'équipe de Potentialité Energétique Solaire et Eolienne EPSE à l'Unité de recherche en énergies renouvelables en milieu.

Ce capteur hybride de nouvelle conception est constitué essentiellement d'un module photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12 » en technologie monocristallin et un vitre avec une épaisseur de 4 mm collé au-dessous du module photovoltaïque.

Un fluide caloporteur « l'eau » peut circuler à l'intérieur entre la face arrière du panneau photovoltaïque et la vitre pour l'extraction de la chaleur absorbé par les cellules solaires.

IV.4. Banc d'essai :

La performance d'un module photovoltaïque dépend principalement de l'énergie solaire irradiante, température ambiante, facteurs environnementaux tels que vent, humidité, irradiation non uniforme due à l'ombrage partiel et en particulier l'accumulation de poussière de sable due aux tempêtes de sable dans les zones désertiques.

L'étude expérimentale a pour objet de déterminer l'effet des facteurs climatiques (température, rayonnement, poussières) sur la puissance électrique produite par le panneau PV. Par exemple, nous avons utilisé trois panneaux PV, le premier panneau PV1 étant utilisé comme un témoin et le deuxième panneau PV2 utilisé au cours des testes sans nettoyage pour étudié l'influence des dépôts de poussière sur les caractéristiques du module et troisième

panneau PV3 pour réaliser le capteur PV-T hybride et nous avons étudié le comportement des trois modules PV.



<

Figure IV.1 : Photos du prototype de capteur PV/T étudié

Toutes les essais expérimentaux ont été réalisés à l'équipe de Potentialité Energétique Solaire et Eolienne EPSE à l'Unité de recherche en énergies renouvelables en milieu (URER-MS).Adrar.

IV.4.1. Modules Isophoton I-75/12 :

Les modules photovoltaïques Isophoton I-75/12 (1, 2, 3) sont utilisés dans ces expériences



Figure IV.2: Modules testés ISOPHOTON I-75/12 (1, 2, 3)

Tableau IV.1 : Caractéristiques du module solaire « Isophoton I-75/12 ».

Caractéristiques électriques		
Puissance maximale Pmax	(Wc)	75
Courant de court-circuit Icc	(A)	4,67
Tension en circuit ouvert Voc	(V)	21,6
Courant Optimum Iop	(A)	4,34
Courant Optimum Iop	(A)	17,3
Coefficients de température		
Coefficient de la variation du courant en fonction de la température		0.06 % / °c
Coefficient de la variation de la tension en fonction de la température		0.36 % /°c
Caractéristiques mécaniques		
Type de cellules	monocristallin	
Nombre de cellules	36	
Dimensions	1224,0 × 545,0 × 39,5mm (21,5 × 48,2 × 1,6 pouces)	
Poids	9,0 kg	

IV.4.2. Acquisition de données :

Nous avons utilisé une acquisition de données de type FLUKE Hydra data logger.



Figure IV.3 : Photos de l'acquisition de données de type FLUKE

IV.4.3. Thermocouple de type « K »

Le thermocouple de type « K » pour mesurer les températures :

- T PV1 : Température de la face arrière du premier panneau.
- T PV2 : Température du deuxième panneau (sans nettoyage).
- T PV3 : Température du troisième panneau constituant le capteur hybride PV-T.
- Ta : Température ambiante.



Figure IV.4 : Photos des thermocouples de type « K »

IV.4.4. Capteur de courant et capteur de tension

- Un capteur de courant pour mesurer le courant électrique à la sortie des trois panneaux PV1, PV2 et PV3.
- Un capteur de tension pour mesurer la tension aux bornes trois panneaux PV1, PV2 et PV3.



Figure IV.5 : Photo du capteur de courant et capteur de tension

IV.4.5. Système de refroidissement :

Circuit hydraulique qui assure l'entrée et la sortie du fluide caloporteur entre la face arrière du panneau photovoltaïque et la vitre au-dessous du module.



Figure IV.6: Photo du Circuit hydraulique de refroidissement

IV.4.6. Une charge :

Chaque panneau photovoltaïque est raccordé avec deux batteries solaires, 12 Volt et deux lampes à courant continu de type Steca solsum energy saving lamp.



Figure IV.7: Photo de la lampe à courant continu et des batteries

IV.5. Caractéristiques géographiques du site d'Adrar :

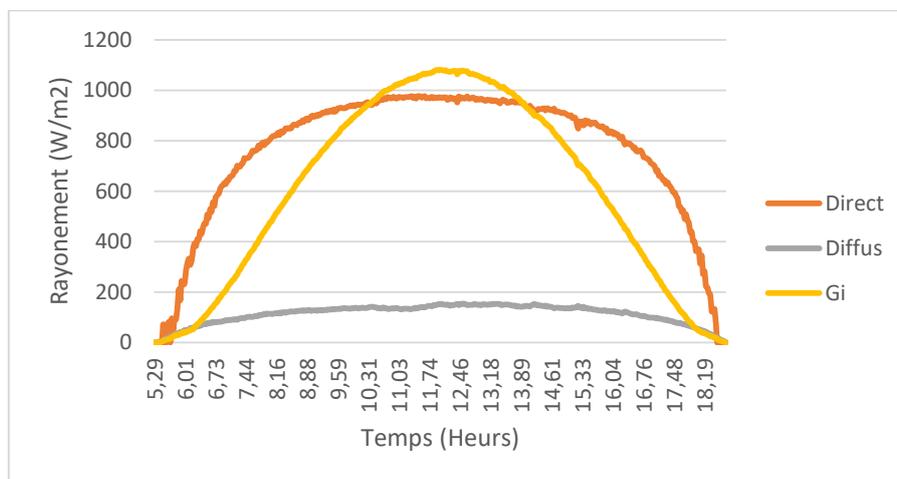
Tableau IV.2 : Données géographiques du site d'Adrar

Site	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Situation topographiques
Adrar	27° 49' N	00° 17' W	263	Sahara

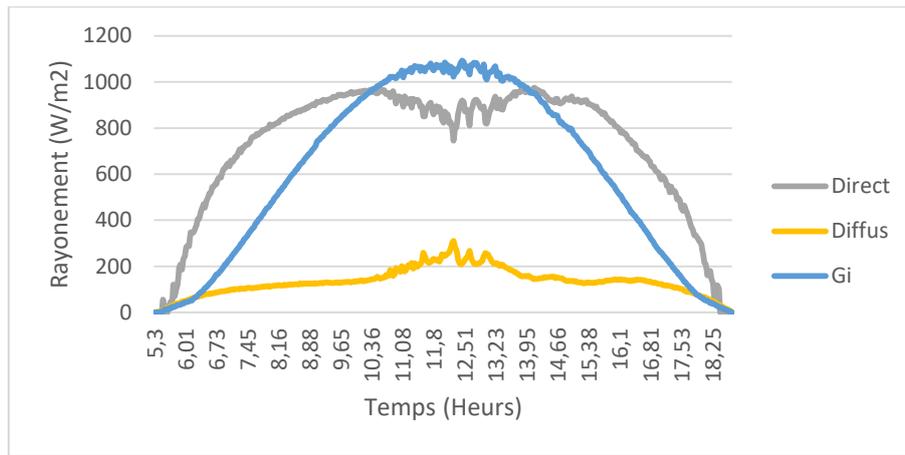
IV.6. Résultats Expérimentale et Discussions :

IV.6.1. La variation de l'éclairement globale :

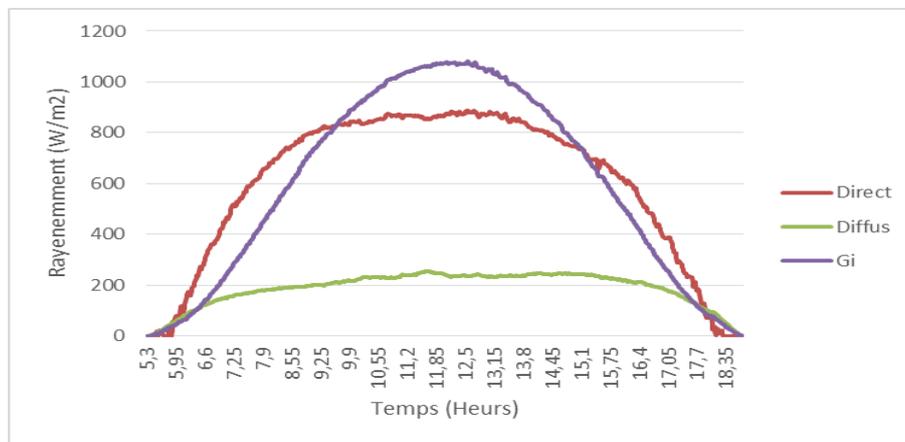
La figure IV.8 montre l'allure du rayonnement solaire direct, diffus et global incliné pendant les journées du 09/05/2019 au 11/05/2019.



09/05/2019



10/05/2019



11/05/2019

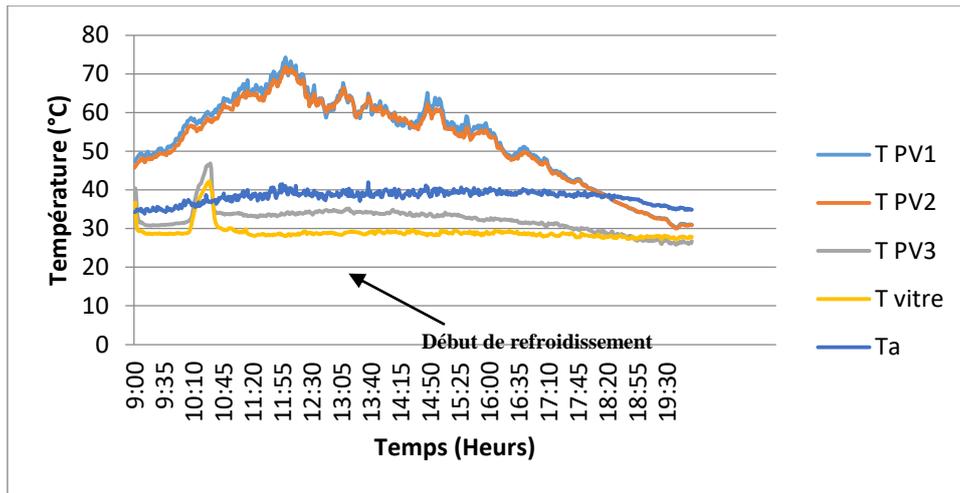
Figure IV.8: L'évolution de l'éclairement solaire (Expérimental)

Avec :

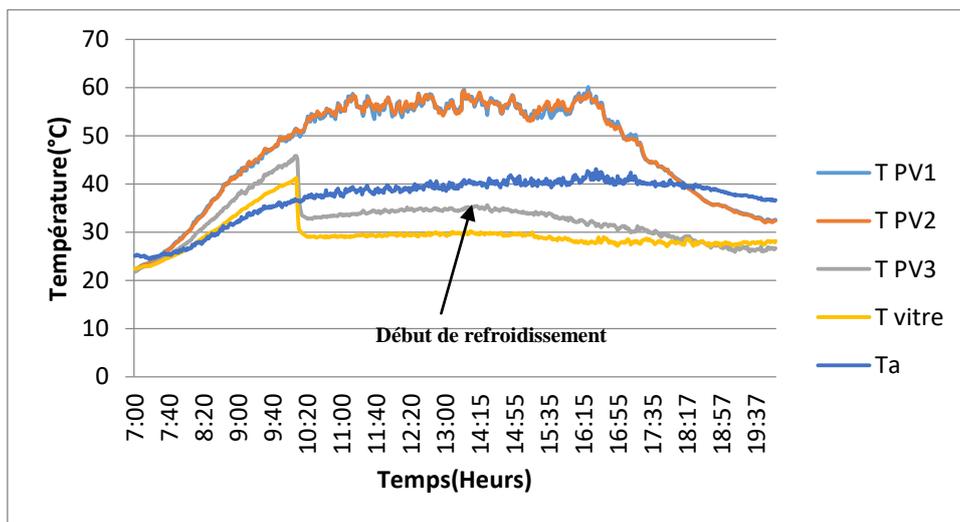
- Direct : rayonnement solaire direct.
- Diffus : rayonnement solaire diffus.
- Gi : rayonnement solaire global incliné.

IV.6.2. Distribution de la température dans les panneaux Photovoltaïques :

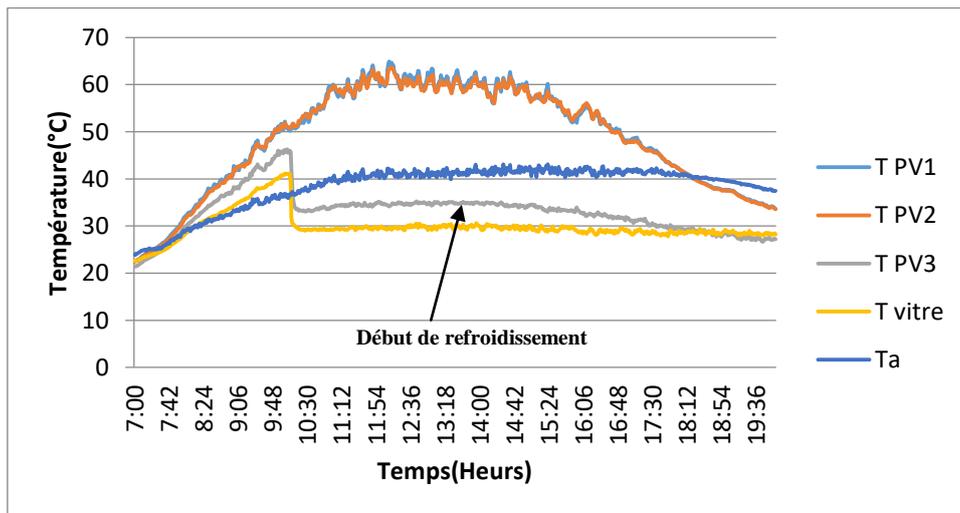
Nous avons mesuré la température au niveau de chaque panneau PV1, PV2, PV3. La figure IV.8 montre la distribution de la température en fonction du temps.



9 /05/2019



10/05/2019



11/05/2019

Figure IV.9: Distribution de la température expérimentale pendant les journées de l'acquisition, en fonction du temps.

Tableau IV.3: Comparaison entre les températures maximales des panneaux PV.

		09/05/2019	10/05/2019	11/05/2019
Temps		11:59	16:21	12:10
MaxTPV1	(°C)	74,29	60,11	64,86
MaxTPV2	(°C)	71,87	59,24	63,61
MaxTPV3	(°C)	46,89	45,83	46,23
T Vitre	(°C)	42,26	41,20	41,12
Ta	(°C)	41,97	43,10	43,10
TPV 2 – TPV1	(°C)	-2,42	-0,87	-1,25
TPV 3– TPV1	(°C)	-27,4	-14,28	-18,63
TPV 3– TPV2	(°C)	-24,98	-13,41	-17,38
Ta- TPV1	(°C)	-32,32	-17,01	-21,76
Ta- TPV2	(°C)	-29,9	-16,14	-20,51
Ta- TPV3	(°C)	-4,92	-2,73	-3,13

Le Tableau IV.3 présente une comparaison entre les valeurs maximales de la température ambiante et des panneaux PV (1, 2, 3) dans les trois jours des testes. D'après le tableau on constate que :

- **Le 09/05/2019 :**

- La température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 74,29 °C et la température au niveau du panneau (sans nettoyage) PV2 est 71,87°C avec une différence 2,42 °C.
- La température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 74,29°C et la température au niveau du panneau constituant le capteur hybride PV3 est 46,89 °C avec une différence 27,4°C.

- **Le 10/05/2019 :**

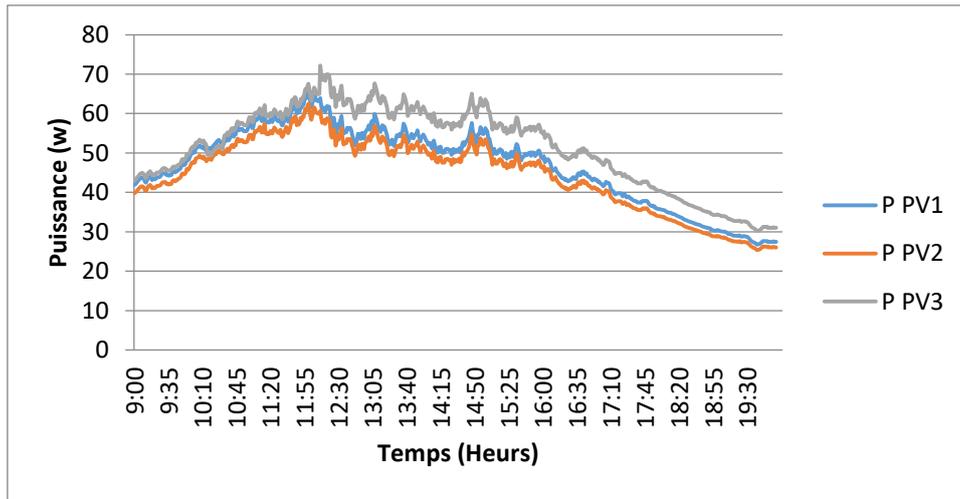
- La température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 60,11 °C et la température au niveau du panneau (sans nettoyage) PV2 est 59,24°C avec une différence 0,87 °C.
- La température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 60,11°C et la température au niveau du panneau constituant le capteur hybride PV3 est 45,83°C avec une différence 14,28°C.

- **Le 11/05/2019 :**

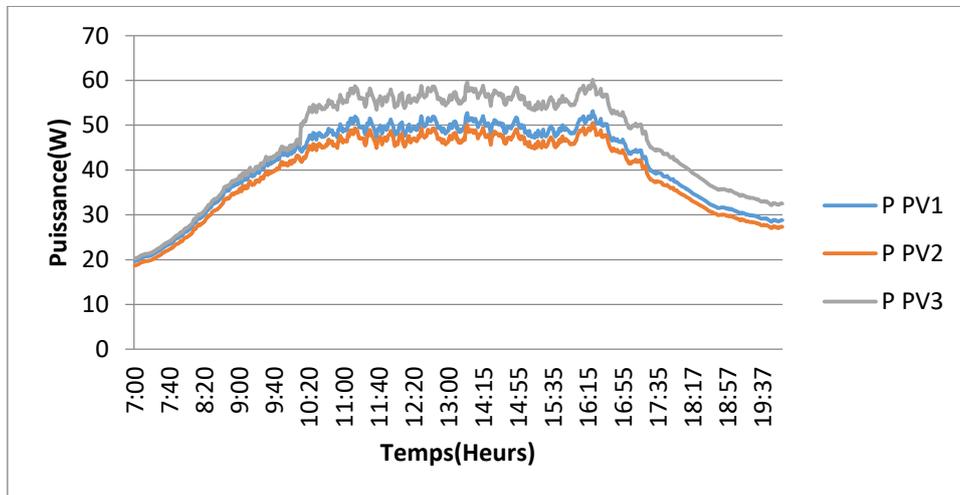
- La température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 64,86 °C et la température au niveau du panneau (sans nettoyage) PV2 est 63,61°C avec une différence 1,25 °C.

- La température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 64,86°C et la température au niveau du panneau constituant le capteur hybride PV3 est 46,23°C avec une différence 18,63°C.
- La température maximale au niveau du panneau PV1, PV2 est très élevée par rapport à la température ambiante et TPV3.

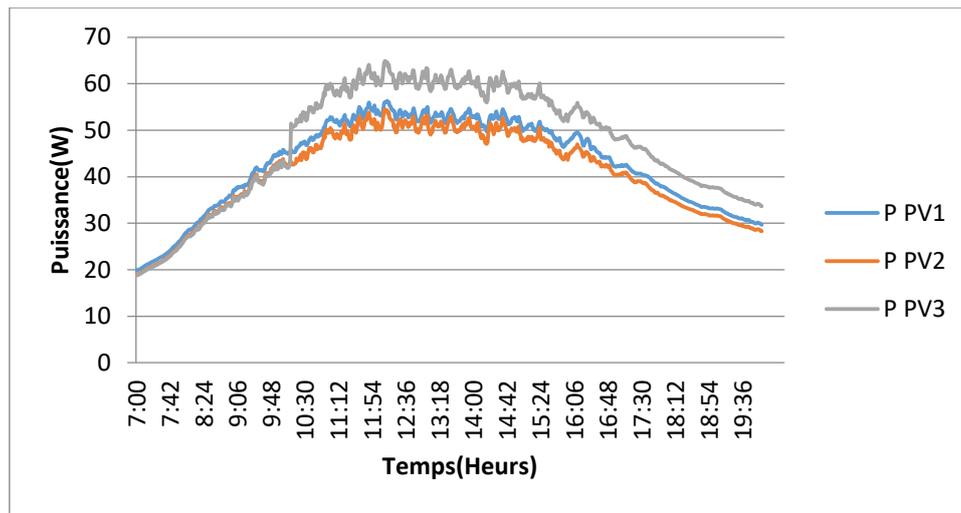
IV.6.3. La variation de la puissance des panneaux photovoltaïques :



9/05/2019



10/05/2019



11/05/2019

Figure IV.10: Évolution de la puissance des panneaux PV

Tableau IV.4: Comparaison entre les puissances maximales des trois panneaux.

		09/05/2019	10/05/2019	11/05/2019
Temps		11:59	16:21	12:13
P Max pv 1	(W)	65,75	53,19	56,29
P Max pv 2	(W)	62,43	50,51	54,50
P Max pv 3	(W)	72,19	60,11	64,86
PPV 2 – PPV1	(W)	-3,32	-2,68	-1,79
PPV 3– PPV1	(W)	6,44	6,92	8,57
PPV 3– PPV2	(W)	9,76	9,60	10,36

On constate que :

- Le **09/05/2019** : la puissance maximum au niveau du panneau PPV1 atteinte 65.75 W, la puissance au niveau du panneau PPV2 est 62.43 W et la puissance au niveau du panneau PPV3 est 72,19 W avec une différence PPV3 – PPV1 = 6,44 W.
- Le **10/05/2019** : la puissance maximum au niveau du panneau PPV1 atteinte 53.19 W, la puissance au niveau du panneau PPV2 est 50.51 W et la puissance au niveau du panneau PPV3 est 60.11 W avec une différence PPV3 – PPV1 = 6.92 W.
- Le **11/05/2019** : la puissance maximum au niveau du panneau PPV1 atteinte 65.29 W, la puissance au niveau du panneau PPV2 est 54.50 W et la puissance au niveau du panneau PPV3 est 64,86 W avec une différence PPV3 – PPV1 = 8,57 W.

En remarque que la puissance produite du panneau PV3 constituant le capteur hybride est supérieur à celle du panneau PV1 et PV2, et la puissance produite du panneau PV2 (sans nettoyage) est inférieur à celle du panneau PV1.

IV.7. Etude expérimentale de la dégradation des modules PV en milieu saharien

Tableau IV.5: Caractéristiques des modules photovoltaïques 250W.

Parameters		Poly-crystalline ET-P660250WW
Puissance maximale	[Pmax]	250
Rendement du Module ρ	[%]	15.37
Tension de circuit ouverte Vco	[V]	37.47
Courant de court-circuit Icc	[A]	8.76
Courant au point de puissance maximale (Ipm)	[A]	8.24
Tension au point de puissance maximale (Vpm)	[V]	30.34



Figure IV.11: Banc Expérimental

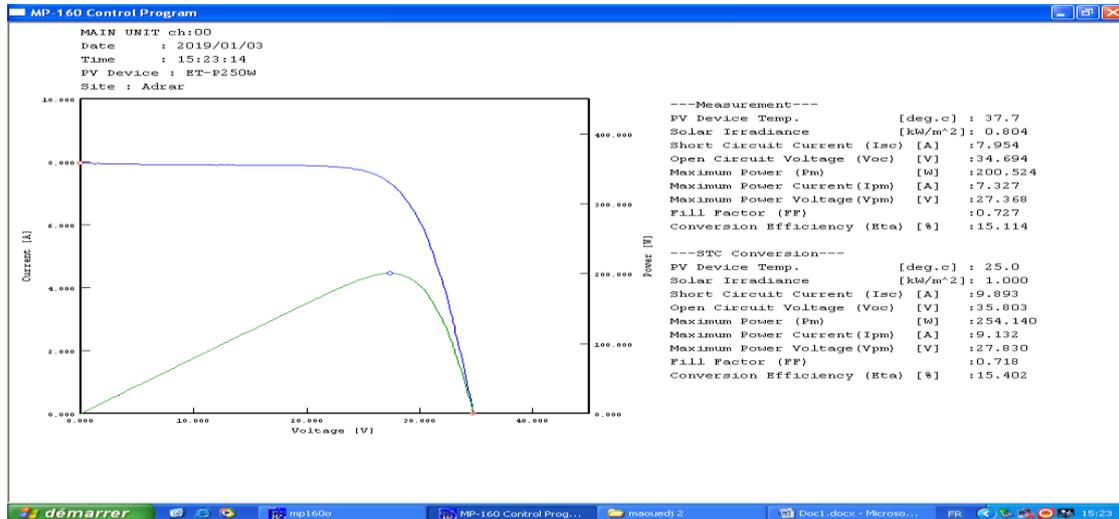


Figure IV.12 : Caractéristique expérimentale (Courant-Tension I-V et Courant-Puissance I-P) du module 250W sur le site d'Adrar.

Le tableau IV.6 résume quelques performances de deux modules 250 ont été testés sur le site d'expérimentation.

Tableau IV.6: Dégradation des modules PV.

Module N°	Paramètres	Valeurs initiales	Valeurs réelles	Dégradation totale (%)	Taux de dégradation (%) / an
01	I _{cc}	8,76	8,593	-1,91	-0,38
	V _{co}	37,47	36,765	-1,88	-0,38
	P _{max}	250	231,579	-7,37	-1,47
	I _{pm}	8,24	7,976	-3,20	-0,64
	V _{pm}	30,34	29,035	-4,30	-0,86
	ρ	15,37	14,035	-8,69	-1,74
02	I _{cc}	8,76	8,747	-0,1	-0,03
	V _{co}	37,47	36,812	-1,8	-0,35
	P _{max}	250	234,822	-6,1	-1,21
	I _{pm}	8,24	8,162	-0,9	-0,19
	V _{pm}	30,34	28,772	-5,2	-1,03
	ρ	15,37	14,232	-7,4	-1,48

Les valeurs présentées au Tableau IV.6 montrent une réduction des performances des modules PV testés par rapport aux valeurs initiales donné par le constructeur. Le rendement a diminué par 8,69 % pour le premier panneau et 7,4% par le deuxième panneau après 05 ans de fonctionnement dans le climat d'Adrar (région Saharien).

IV.8. Conclusion :

Le but essentiel de ce chapitre est l'étude de la dégradation des propriétés thermiques et électriques des modules photovoltaïques installés dans des conditions environnementales réelles (température, humidité, rayonnement, poussières). Pour cette raison, nous avons proposé un système basé sur un capteur hybride photovoltaïque thermique PV-T réalisé par un panneau photovoltaïque « Iso photon I-75/12 » et un circuit hydraulique qui assure l'entrée et la sortie du fluide caloporteur « l'eau » entre la face arrière du panneau photovoltaïque et la vitre au-dessous du module et le refroidissement du panneau.

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus pour les mesures enregistrées pendant les jours de test. Nous avons constaté que la puissance de panneau photovoltaïque PV3 du capteur hybride PV-T est supérieure à celle des autres panneaux PV1 (utilisé comme un témoin) et PV2 (utilisé au cours des testes sans nettoyage) et la puissance de panneau photovoltaïque PV2 est inférieure à celle du panneau PV1.

Les résultats obtenus lors de l'analyse des caractéristiques I-V de deux modules photovoltaïques testés dans les conditions réelles du milieu saharien (région d'Adrar)

montrent que le taux moyen de la dégradation des modules après six ans (05 ans) de fonctionnement ne dépasse pas 09 %.

Nous avons conclu que la dégradation des caractéristiques des modules photovoltaïques peut être due à l'exposition à la radiation après une longue période de fonctionnement, température élevée du panneau spécialement dans la saison de l'été et l'accumulation de la poussière.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à étudier l'évaluation des paramètres physique et les performances électriques des modules PV exposés au soleil pendant une longue période de temps à l'unité de recherche énergie renouvelable URERMS. Adrar sous l'effet des facteurs climatiques. Cette localité du Sahara est caractérisée par un fort potentiel de l'éclairement solaire, la température et la poussière. Des testes expérimentaux ont été mis en place afin d'effectuer les relevés graphiques des caractéristiques thermique et électrique des modules photovoltaïques dans les conditions réelles de fonctionnement.

Dans la première partie du travail, nous avons proposé un système basé sur un capteur hybride photovoltaïque thermique PV-T réalisé par un panneau photovoltaïque « Iso photon I-75/12 » et un circuit hydraulique qui assure l'entrée et la sortie du fluide caloporteur « l'eau » entre la face arrière du panneau photovoltaïque et la vitre au-dessous du module et le refroidissement du panneau.

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus pour les mesures enregistrées pendant les jours de test. Nous avons constaté que la puissance de panneau photovoltaïque PV3 du capteur hybride PV-T est supérieure à celle des autres panneaux PV1 (utilisé comme un témoin) et PV2 (utilisé au cours des testes sans nettoyage) et la puissance de panneau photovoltaïque PV2 est inférieure à celle du panneau PV1.

Dans la deuxième partie du travail, Nous avons analysé les caractéristiques I-V de deux modules photovoltaïques testés dans les conditions réelles du milieu saharien (région d'Adrar). Les résultats obtenus montrent que le taux moyen de la dégradation des modules après six ans (05 ans) de fonctionnent ne dépasse pas 09 %.

Nous avons conclu que la dégradation des caractéristiques des modules photovoltaïques peut être due à l'exposition à la radiation après une longue période de fonctionnement, température élevée du panneau spécialement dans la saison de l'été et l'accumulation de la poussière.

Étude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des modules photovoltaïque dans la région d'Adrar

Résumé : L'Algérie dispose d'un grand potentiel en énergies renouvelables dont, en particulier, le solaire photovoltaïque avec une durée d'ensoleillement estimée à 3500 heures/an. L'exploitation de ce potentiel s'est nettement améliorée ces dernières années avec l'évolution des technologies de conversion et de conditionnement. Néanmoins, les constructeurs ne tiennent pas suffisamment compte des conditions environnementales réelles (température, humidité, irradiation UV, poussière, etc...) dans lesquelles les modules photovoltaïques sont installés. Les caractéristiques techniques des modules PV sont données dans les conditions standards de test (STC) correspondant à une température de 25°C et un ensoleillement de 1000W/m² avec une durée de vie tournent autour de 25 ans, qui sont bien différentes des conditions réelles notamment dans les sites Sahariens. L'objectif de ce travail en premier partie est d'installer à l'URER-MS dans des conditions réelles (milieu saharien) des modules PV pour la production de l'électricité avec des batteries pour le stockage d'énergie. Et en deuxième partie, l'étude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques de la région d'Adrar (température, rayonnement, poussière...) sur les caractéristiques thermique et électrique des modules PV.

Mots clés : Module photovoltaïque, rayonnement, dépôts de poussière, rendement.

Abstract: Algeria has great potential in renewable energies including, in particular, solar photovoltaic with duration of sunshine estimated at 3500 hours/year. The exploitation of this potential has improved significantly in recent years with the evolution of conversion and packaging technologies. However, the manufacturers do not take sufficient account of the real environmental conditions (temperature, humidity, UV irradiation, dust, etc.) in which the photovoltaic modules are installed.

The technical characteristics of the PV modules are given under standard test conditions (STC) corresponding to a temperature of 25 ° C and a sunshine of 1000W/m² with a lifespan around 25, which are very different from real conditions, especially in Saharans sites.

The objective of this work in the first part is to install at the URER-MS in real conditions (Saharan environment) PV modules for the production of electricity with batteries for energy storage. And in the second part, the experimental study of the effect of climatic parameters of the region of Adrar (temperature, radiation, dust ...) on the thermal and electrical characteristics PV modules.

Keywords: Photovoltaic module, radiation, dust deposits, yield

المخلص: تتمتع الجزائر بإمكانيات هائلة في الطاقات المتجددة بما في ذلك، على وجه الخصوص، الطاقة الشمسية الكهروضوئية مع فترة سطوع الشمس المقدر بنحو 3500 ساعة في السنة. لقد تحسن استغلال هذه الإمكانيات بشكل ملحوظ في السنوات الأخيرة مع تطور تقنيات التحويل والتغليف. ومع ذلك، والبنائين لا تأخذ في الاعتبار بشكل كاف الظروف البيئية الفعلية (درجة الحرارة، والرطوبة، والأشعة فوق البنفسجية، الغبار، الخ ...) التي يتم تثبيت الوحدات الضوئية. وبالنظر إلى الخصائص التقنية للوحدات الكهروضوئية في ظروف الاختبار النظامية (STC) المقابلة لدرجات الحرارة من 25 درجة مئوية، وأشعة الشمس 1000 واط على المتر مربع مع العمر حوالي 25 عاما، والتي هي مختلفة تماما عن الظروف الحقيقية خاصة في المناطق الصحراوية.

الهدف من هذا العمل في الجزء الأول هو التثبيت في URER-MS في الظروف الحقيقية (البيئة الصحراوية) الوحدات الكهروضوئية لإنتاج الكهرباء وتخزينها في البطاريات. وفي الجزء الثاني، دراسة تجريبية لتأثير عوامل المناخ في منطقة أدرار (درجة الحرارة والإشعاع والغبار ...) على الخصائص الحرارية والكهربائية للوحدات الكهروضوئية.

كلمات البحث : وحدة الضوئية، الإشعاع، رواسب الغبار، الكفاءة.