



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

*Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïques par
l'installation d'un système de refroidissement par l'eau des
modules PV*

Présenté par :

Melle. ERRAHMANI Aziza

Melle. BEN ATHMANE Nora

Soutenu publiquement le 25/06/2019.

Devant le jury :

Président : OMARI Boumidiene **M.A.A** **Université d'Adar**

Promoteur : MAOUEDJ Rachid **M.R.A** **URER-MS Adrar**

Examineur : BELABBACI Mohammed **M.A.B** **Université d'Adar**

Année Universitaire : 2018/2019

بسم الله الرحمن الرحيم

(وقل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

صدق الله العظيم

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلى بطاعتك .. ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك .. ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك .. ولا تطيب الجنة إلا برويتك " الله جل جلاله "

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين " سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم "

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من أحمل أسمه بكل افتخار.. * والدي * العزيز أرجو من الله أن يرحمه و ينير قبره في الجنة إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان و التفاني .. إلى بسمه الحياة وسر الوجود

إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أغلى الحبايب * أمي * الحبيبة

إلى والدي الثاني وسندي في الحياة خالي * الحاج طيب * .. أرجو من الله أن يبارك في عمرك

كما لا يسعنا إلا أن نخص بأسمى

عبارات الشكر و التقدير الدكتور *رشيد معوج * لما

قدمه لنا من جهد و نصح و معرفة طيلة انجاز هذا البحث.

إلى من رافقوني منذ أن حملتو حقائب صغيرة ومعهم سرت الدرب خطوة بخطوة ولا يزالوا يرافقوني حتى الآن .. عائلتي الكريمة .

إلى حبايب قلبي أخي * محمد الزاوي * وأختي *كريمة * حفظهما الله ورعاهما وأختي حبيبيتي * سعاد * أرجو من الله أن يتغمدها برحمته الواسعة.

إلى الملائكة الصغار * محمد أيوب * و * محمد أشرف *

إلى من تحلو بالإخاء وتميزوا بالوفاء والعطاء إلى ينابيع

الصدق الصافي إلى من معهم سعدت ، وبرفقتهم في دروب الحياة الحلوة

والحزينة سرت إلى من كانوا معي على طريق النجاح والخير

إلى من عرفت كيف أجدهم وعلموني أن لا أضيعهم

صديقاتي " * نورة * سهام * سعيدة * أسماء * كلثوم * "

اهدأ: عزيزة الرحماني

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(وقل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

صدق الله العظيم

إلهي لا يطيب الليل إلا بشرك ولا يطيب النهار إلى بطاعتك .. ولا تطيب
اللحظات إلا بذكرك .. ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك .. ولا تطيب الجنة إلا برويتك
"الله جل جلاله"

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين
"سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم"

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى
من أحمل أسمه بكل افتخار .. والذي المرحوم

أرجو من الله تعالى ان يرحمه ويجعل قبره روضة من رياض الجنة ان شاء الله
إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان و التفاني .. إلى
بسمة الحياة وسر الوجود

إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أغلى الحبايب
أمي الحبيبة

كما لا يسعنا إلا أن نخص بأسمى

عبارات الشكر والتقدير الدكتور رشيد معوج " لما

قدمه لنا من جهد ونصح ومعرفة طيلة انجاز هذا البحث .

واقول لك استاذي الفاضل وفقك الله لما تحبه وترضاه وان يجعل كل هذه الجهود التي بذلتها من اجلنا في
ميزان حسناتك وحسنات والديك ان شاء الله

إلى من رافقوني منذ أن حملتو حقايب صغيرة ومعهم سرت الدرب خطوة بخطوة

ولا يزالوا يرافقوني حتى الآن .. عائلتي الكريمة .

إلى الإخوة "عبد الكريم* مصطفى* رضوان" والأخوات *نسيمة* وزجها وأطفالها حفظهما الله تعالى،
امنة*رحمة*.

كما لا أنسى جدتي العزيزة بارك الله في عمرها ان شاء الله وكذلك زوجات اخي كل من فتيحة ووسيلة
وأطفالهما وأخص بالذكر

" مونية، هاجر، ابتهاج " حفظهما المولى تعالى.

إلى من تحلو بالإخاء وتميزوا بالوفاء والعطاء إلى ينابيع الصدق الصافي إلى من

معهم سعدت، وبرفقتهم في دروب الحياة الحلوة والحزينة

سرت إلى من كانوا معي على طريق النجاح والخير

إلى من عرفت كيف أجدهم وعلموني أ لا أضيعهم صديقاتي

" وخاصة عزيزة، أسماء . زينب "

إهداء: بن عثمان نورة.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I

Rayonnement solaire

1. Introduction	4
2. Situation géographique de l'Algérie.....	4
3. Mouvement Terre- Soleil	4
3.1. a. Mouvement de rotation.....	4
3.2. b. Mouvement de translation.....	5
4. La distance terre – soleil.....	5
5. Correction de distance.....	6
6. Equation du temps	7
7. Repérage d'un site sur la surface terrestre.....	8
8. Les coordonnées du soleil	9
8. a. Coordonnées équatoriales.....	9
8. a.1. La déclinaison du soleil δ	9
8. a.2. L'angle horaire du soleil H.....	10
8. b. Coordonnées horizontales.....	11
8. b.1. La hauteur du soleil h.....	12
8. b.2. L'azimut du soleil a.....	12
9. Orientation d'un capteur	13
a. La hauteur du capteur γ	13
b. Azimut du capteur α	13
10. Durée d'ensoleillement D_{IS} d'un capteur (α, γ).....	14
11. Durée du jour.....	15
12. Spectre du rayonnement solaire.....	17
13. Puissance solaire reçue par terre	18
14. Modélisation du rayonnement solaire	19
a. Rayonnement direct	19
b. Rayonnement diffus.....	20
c. Rayonnement global	20
d. L'albédo du sol.....	21
15. Appareils de mesure.....	22
15.1. Mesure de la durée d'ensoleillement et du rayonnement solaire.....	22
15.2. Mesure de la vitesse et de la direction du vent.....	24
16. conclusion.....	26
17. Références.....	26

Chapitre II

L'énergie solaire photovoltaïque

1. Introduction.....	28
2. Histoire de l'énergie solaire.....	28
3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	29
a. Les avantages	29
b. Les inconvénients.....	30
4. Le fonctionnement des panneaux solaires.....	30

5. La Technologie Photovoltaïque	32
5.1. Procédé de fabrication	32
5.2. Modules et cellules photovoltaïques.....	33
5.3. Système solaire.....	36
5.4. Applications.....	37
5.4.1. Pompage photovoltaïque.....	37
5.4.2. L'éclairage photovoltaïque.....	40
6. Les paramètres qui influent sur le rendement d'un panneau solaire.....	41
6.1. Influence de la température sur le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque.....	41
6.2. Influence de la 'intensité de la radiation lumineuse.....	42
7. Les différents types des systèmes énergétiques solaires	43
7.1. Système photovoltaïque autonome.....	43
7.2. Système photovoltaïque raccordée au réseau électrique.....	44
8. Conclusion.....	44
9. Références.....	45

Chapitre III

L'énergie solaire thermique

1. Introduction.....	47
2. La conversion photo thermique.....	47
3. Type des capteurs solaires thermiques.....	48
3.1. Le capteur solaire à eau.....	49
3.2. Le capteur solaire à air	50
4. Applications.....	50
4.1. Les distillateurs solaires.....	51
4.1.1. Les dispositifs de distillation pour le dessalement de l'eau saumâtre..	51
4.1.1. a. Les distillateurs à simple effet.....	51
4.1.1. b. Les distillateurs à multiple effet.....	54
4.2. Le chauffe-eau solaire.....	56
4.3. Les séchoirs solaires.. ..	58
4.3.1. Les séchoirs solaires directs.....	58
4.3.2. Les séchoirs solaires indirects.....	59
5. Conclusion.....	61
6. Références.....	62

Chapitre IV

Traitement des données et interprétation des résultats

1. Introduction.....	63
2. Description du système PV/T.....	63
2.1. Description technique du système PV/T.....	63
2.2. Dimensions du capteur solaire hybride PV/T.....	63
3. Banc d'essai.....	64
3.1. Panneau photovoltaïque.....	65
3.2. Acquisition de données.....	65
3.3. Thermocouple de type « K ».....	66
3.4. Capteur de courant et capteur de tension.....	66
3.5. Une charge.....	67
3.6. Système de refroidissement.....	67
4. Caractéristiques géographique et météorologique du site d'Adrar	68
5. Résultats et Discussions.....	68

5.1. La variation de l'éclairement globale.....	68
5.2. Distribution de la température dans le capteur Photovoltaïque PV/T.....	70
6. Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	76

Liste des figures

CHAPITRE I	Rayonnement solaire	
Figure I.1 : Mouvement de la terre autour du Soleil.....		5
Figure I.2: Distance Terre –Soleil.....		6
Figure I.3 : Distance terre-soleil en fonction du numéro du jour de l'année N		7
Figure I.4 : Les variations annuelles de la correction de distance en fonction du jour dans l'année.....		7
Figure I.5 : Evolution de l'équation du temps au cours de l'année.....		8
Figure I.6 : Coordonnées terrestres.....		9
Figure I.7: Déclinaison solaire.....		9
Figure I.8 : Angle horaire du soleil.....		11
Figure I.9: Les coordonnées Horizontales.....		12
Figure I.10 : Hauteur (h) ; azimut(a) du soleil.....		13
Figure I.11: Durée du jour en fonction du numéro du jour N de l'année pour le site d'Adrar.....		16
Figure I.12: L'heure de coucher et de lever du soleil en fonction du numéro du jour N de l'année pour le site d'Adrar.....		16
Figure I.13 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....		17
Figure I.14 : Représente l'évolution annuelle solaire corrigée.....		19
Figure I.15 : Rayonnement Direct.....		19
Figure I.16 :a) Rayonnement Diffus b) L'éclipse solaire totale mettant en évidence le rayonnement diffus de la couronne solaire.....		20
Figure I.17: Rayonnement Global.....		21
Figure I.18: Pyranomètre d'Eppley.....		23
Figure I.19 : Pyrhéliomètre.....		23
Figure I. 20: L'héliographe de Campbell-Stockes.....		24
Figure I.21 : Bilanmètre.....		24
Figure I.22. L'anémomètre.....		25
Figure I.23. La Girouette.....		25
 CHAPITRE II	 L'énergie solaire photovoltaïque	
Figure II.1:Fonctionnement d'une cellule PV.....		31
Figure II.2: Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.....		31
Figure II.3: Limites du système pour l'analyse du cycle de vie.....		32
Figure II.4: Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.....		33
Figure II.5: Cellule photovoltaïque.....		33
Figure II.6 : Module photovoltaïque.....		34
Figure II.7: Cellule monocristalline.....		35
Figure II.8: Cellule poly cristalline.....		35
Figure II.9 : Modules photovoltaïques fabriquées en Silicium amorphe.....		36
Figure II.10: Module couche mince.....		36
Figure II.11 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.....		36
Figure II.12: Système Photovoltaïque.....		37
Figure II. 13 : Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.....		37
Figure II.14: Pompe à piston (Jack pump) pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau.....		38
Figure II.15 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique.....		39

Figure II.16 : Pompe submersible centrifuge à étages multiples.....	39
Figure II.17 : Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	40
Figure II.18: Eclairage public.....	40
Figure II.19 : Système d'éclairage public photovoltaïque autonome.....	41
Figure II.20 : Caractéristique P-V du module PV du selon la température.....	42
Figure II.21 : Caractéristique I-V du selon la température selon la température.....	42
Figure II.22 : Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.....	43
Figure II.23 : Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement.....	43
Figure II.24: Installation photovoltaïque autonome.....	43
Figure II.25 : Installation photovoltaïque couplée au réseau.....	44

CHAPITRE III

L'énergie solaire thermique

Figure III.1: Les principaux composants et des matériaux la conception du capteur thermique.....	48
Figure III.2: Chauffage d'une piscine a l'aide d'un capteur sans vitrage.....	49
Figure III.3: Capteur plan à air.....	50
Figure III.4: La pompe solaire.....	51
Figure III.5:La piscine solaire.....	51
Figure III.6:Distillateur solaire.....	51
Figure III.7: Distillateur à simple effet avec un seul capteur.....	52
Figure III.8: Distillateur solaire à simple effet avec deux capteurs.....	52
Figure II.9: Distillateur solaire-eau.....	53
Figure III.10: Distillateur solaire sphérique à balayage.....	53
Figure III.11: Distillateur à film capillaire avec un seul étage.....	54
Figure III.12: Distillation à multiple effet.....	55
Figure III.13: Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact).....	56
Figure III.14: Le chauffe-eau à thermosiphon.....	57
Figure III.15: Chauffe-eau stockeur.....	58
Figure III.16.a: Schéma du séchage solaire en plein air.....	59
Figure III.16.b: Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle.....	60
Figure III.16.c: Schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée.....	60
Figure III.17: Schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle.....	61

CHAPITRE IV

Traitement des données et interprétation des résultats

Figure IV.1 : Photos du prototype de capteur PV/T étudié.....	64
Figure IV.2 : Photos du panneau photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12.....	65
Figure IV.3 : Photos de l'acquisition de données de type FLUKE.....	66
Figure IV.4 : Photos des thermocouples de type « K ».....	66
Figure IV.5: Photo du capteur de courant et capteur de tension.....	67
Figure IV.6: Photo de la lampe à courant continue.....	67
Figure IV.7: Photo du Circuit hydraulique de refroidissement.....	68
Figure IV.8: L'évolution de l'éclairement solaire (Expérimental).....	69
Figure IV.9: La température expérimentale dans les différents panneaux : T PV1 (panneau utilisé comme un témoin) et T PV2 (panneau sans nettoyage), panneau PV3 du capteur hybride PV-T et la Température ambiante Ta.....	71
Figure IV.10: Evolution de la puissance des trois panneaux P PV1, P PV2 et P PV3.....	73

Liste des Tableaux

CHAPITRE I	Rayonnement solaire	
Tableau I.1 : Durée de jour, lever et coucher du soleil maximale et minimale sur le site d'Adrar.....		17
Tableau I.2: Les valeurs de l'albédo selon la surface du sol.....		22
CHAPITRE III	L'énergie solaire thermique	
Tableau III.1: Eléments fondamentaux d'un capteur solaire.....		49
CHAPITRE IV	Traitement des données et interprétation des résultats	
Tableau IV.1: Dimensions du capteur solaire hybride PV/T.....		63
Tableau IV.2 : Caractéristiques du module solaire « Isophoton I-75/12 ».....		65
Tableau IV.3: Données géographiques du site d'Adrar.....		68
Tableau IV.4: Comparaison entre les températures maximales des trois panneaux et la température ambiante		71
Tableau IV.5: Comparaison entre les puissances maximales des trois panneaux.....		73

NOMENCLATURES ET ABREVIATIONS

P_r	Période	Heure
V_r	Vitesse linéaire de rotation	km/s
φ	Latitude	(°)
P_t	Période de la rotation	jours
V_t	Vitesse de la translation	Km/s
δ	La déclinaison du soleil	(°)
H	L'angle horaire de solaire	(°)
TSV	Temps solaire vrai	Heure
NZ	Nadir-Zénith	
h	Hauteur du soleil	(°)
a	L'azimut du soleil	(°)
γ	La hauteur du capteur	(°)
α	Azimut du capteur	(°)
D_{IS}	Durée d'ensoleillement	Heure
C	La vitesse de propagation	ms ⁻¹
h	La constante de Planck	JS ⁻¹
λ	La longueur d'onde	µm
σ	La constante de Stephan	w/m ² k ⁴
I_b	Rayonnement direct	W/m ²
i_d	Rayonnement diffus	W/m ²
I_G	Rayonnement global	W/m ²
BOS	Balance Of System	—
HMT	Hauteur Manométrique Totale	—
n	Le nombre d'effets	—
m_e	La masse de l'eau de mer admise	kg
m_s	La masse de l'eau douce produite	kg
C_p	La chaleur spécifique de l'eau de mer	J/Kg.K
ΔT	L'écart entre la température d'ébullition et la température de l'eau de mer à l'entrée de l'enceinte	°K
ΔH_{vap}	La chaleur de vaporisation moyenne de l'eau	W/m ² .k
ECS	Eau Chaude Sanitaire	—
P	Pression motrice due au phénomène de thermosiphon	Pa
g	La gravité =9,81	m/s ²
H	Hauteur entre le milieu du capteur et le milieu du ballon	m
$\rho_1; \rho_2$	Masse volumique de l'eau en fonction de sa température	Kg/m ³
PV	Photovoltaïque	-
PV-T	Capteur solaire hybride photovoltaïque thermique	-
P_{max}	Puissance maximale	W
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
V_{oc}	Tension en circuit ouvert	V
I_{op}	Courant Optimum	A
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	°C
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

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les chocs pétroliers successifs observés depuis les années 70 ont démontrés les risques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables. Aussi la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire. De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement.

Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde [1].

Compte tenue de l'épuisement des énergies usuelles conventionnelles et leur impact négatif sur l'homme et la nature il devient impératif d'utiliser des énergies propres non polluantes et gratuites comme les énergies renouvelables [2].

Les énergies renouvelables peuvent être classées en trois grandes familles, l'énergie d'origine mécanique (la houle, celle du vent), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...etc.); sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est celle en provenance du soleil, transformée ensuite par l'environnement terrestre. Parmi les différentes sources citées, deux retiennent l'attention pour leur important potentiel, l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

Dernièrement un grand développement à petite échelle d'énergies renouvelables telles que les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques, éoliennes, piles à combustibles ...etc a été enregistré. Cela a conduit à une combinaison des systèmes des différentes sources d'énergies, ces systèmes sont appelées aussi les systèmes hybrides et ils sont utilisés pour fournir plusieurs besoins énergétiques. Parmi ces différents types de systèmes hybrides, on va étudier dans ce travail le système hybride photovoltaïque thermique appelé communément le capteur solaire hybride PV/T.

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son

rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement.

Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour le rendement des capteurs solaires photovoltaïques et plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur. Il y'a eu aussi l'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison du système photovoltaïque avec un système thermique pour former le capteur hybride PV/T qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur.

Le rendement électrique du capteur hybride PV/T pourrait même s'améliorer avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire si un système est placé pour extraire de la chaleur des cellules solaires, ce qui va le refroidir en même temps [3].

L'objectif de notre travail est d'étudier expérimentalement le capteur hybride et le refroidissement du module solaire par l'eau pour augmenter son efficacité électrique, étudiez également l'effet de la température sur les propriétés thermiques et électriques du capteur, déterminez la température dans différentes parois du système et enfin comparez les performances avec le module PV sans refroidissement.

Ce travail a été organisé et structuré en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre nous avons fait une présentation de la situation géographique de l'Algérie et aussi on a parlé sur les points suivants: mouvement et la distance de Terre-Soleil, correction de distance, équation du temps, les coordonnées du soleil, orientation d'un capteur, spectre du rayonnement solaire, modélisation du rayonnement solaire et nous terminions avec une présentation des appareils de mesure du rayonnement et de la température.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur: l'énergie solaire photovoltaïques, histoire de l'énergie solaire, la constitution des cellules photovoltaïques, la technologie photovoltaïque, leurs principes de fonctionnement, les avantages et inconvénients de l'énergie solaire PV et nous terminions par une présentation des différents applications des systèmes énergétiques solaires PV.

Le troisième chapitre présente un bref aperçus sur les différents types de capteurs solaires thermiques, ainsi que leurs différentes applications : distillateurs solaires, chauffe-eau solaire et les séchoirs solaires.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la présentation des différentes étapes de la réalisation, l'installation et l'expérimentation de notre système hybride PV-T. Les résultats obtenus sur des tests expérimentaux du système seront discutés et interprétés.

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

Références bibliographie :

[1] Zohra Ben hachani; " Elaboration d'un modèle de dimensionnement d'un système hybride (Solaire-Eolien) alimentant une ferme dans la région des Aurès ". Mémoire de Master, Université Hadj Lakhdar – Batna, 2011/2012.

[2] Bouhediba Malika; " Simulation thermique d'une maison solaire pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ". Mémoire de Master ; Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2011-2012.

[4] Khelifa Abdelkrim; " Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT ". Mémoire de Doctorat, L'université Hadj Lakhdar. Batna 1, 2017.

1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va décrire la position du soleil source de l'énergie solaire par rapport à la terre et les différents paramètres qui peuvent influencer sur l'énergie incidente sur terre comme le mouvement terre-soleil, le mouvement de la terre autour de l'axe des pôles, le mouvement apparent du soleil et la situation géographique du lieu et aussi les caractéristiques du capteur.

2. Situation géographique de l'Algérie :

L'Algérie est le pays le plus étendu des pays Africains (2 381 741 km²). Il est situé entre le 18° et le 38° parallèle de la latitude Nord et entre le 9° de longitude Ouest et 12° de longitude Est. Le Méridien International d'origine (0° Greenwich) passe près de la ville de Mostaganem. L'Algérie est un vaste pays caractérisé par un climat typique pour chaque région. Ainsi, l'Algérie du Nord est méditerranéenne dans sa presque totalité avec 1600 km de côtes, où s'installe un climat doux et pluvieux en hiver, chaud et sec en été. Quant à la région saharienne, elle se distingue par une aridité extrême, interrompue de temps à autre par des pluies exceptionnelles et imprévisibles. L'amplitude thermique, à la fois entre le jour et la nuit, est saisonnière et très importante dans ces régions. Elle a une incidence directe sur les activités agricoles et pastorales de l'homme (O.N.S, 2015) [1].

3. Mouvement Terre- Soleil :

Le mouvement de chacun d'eux peut être décomposé en mouvement de rotation et mouvement de translation [2].

3.1.a . 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 de la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de $P_r = 23h 56mn 04s \approx 24h$.

Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est $V_r \approx 0,465Km/s$, elle est variable en fonction de latitude φ telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r (Cos (\varphi)) \quad (01)$$

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 $23^{\circ}27' \approx 23,45^{\circ}$ avec un mouvement de révolution, le pôle Nord et le pôle Sud vont pouvoir successivement se dorer à la lumière [3].

3.2.b. 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 $Pt = 365 \text{ jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25 \text{ jours}$. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de $1,49675 \cdot 10^8 \text{ km}$ (1 AU). Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet. Voir figure I.1.

La terre tourne avec une vitesse moyenne $Vt \approx 29,77 \text{ Km/s}$ [vitesse maximale en hiver $30,27 \text{ Km/s}$ et minimale en été $29,27 \text{ Km/s}$]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons. Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [4].

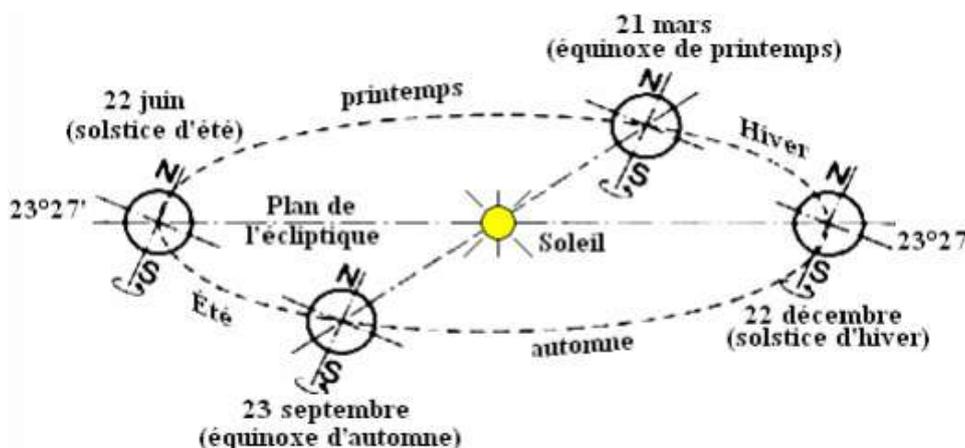


Figure I.1 : Mouvement de la terre autour du Soleil [5].

4. La distance Terre -Soleil :

Distance Terre-Soleil Le soleil est situé à une distance moyenne de $149\,598\,000 \text{ km}$ de la terre. Cette distance varie peu au cours de l'année ($\pm 1.65 \%$) car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée ($e = 0.017$), d'où la terre suit une révolution elliptique autour du soleil (en réalité elle est légèrement circulaire). La période de révolution est définie à une

année. L'angle entre l'axe de rotation de la terre et le plan éclipstique est de 66.55° , ce qui donne un angle de 23.45° entre l'équateur et le plan de l'éclipstique [6].

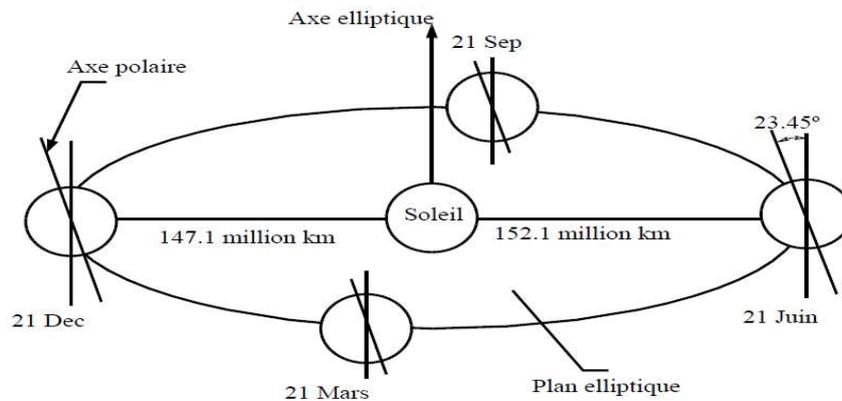


Figure I.2: Distance Terre –Soleil [6].

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 solaires 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 1UA du soleil, et I la puissance reçue à la distance d , quelconque (exprimée en UA) selon la relation suivante [3] :

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

I_0 : est la constante solaire.

Par définition, la correction de distance, $c(N)$, est: $c(N) = \frac{I}{I_0}$ (3)

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

$$C(N) = 1 + 0.034 \cdot \cos \left[\frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad (4)$$

Les variations de la distance terre-soleil au cours de l'année sont représentées par la figure I.3.

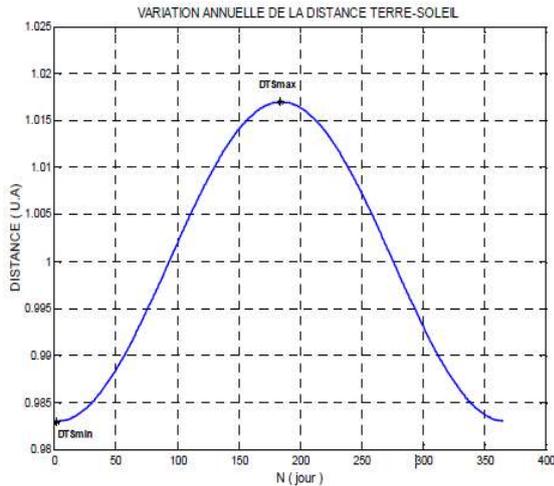


Figure I.3 : Distance terre-soleil en fonction du numéro du jour de l'année N [3].

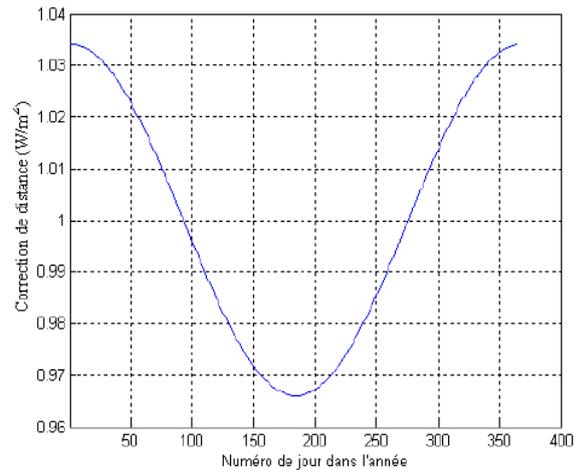


Figure I.4 : Les variations annuelles de la correction de distance en fonction du jour dans l'année [3].

6. Equation du temps :

La différence entre l'heure moyenne, telle qu'elle se trouve déterminée par le temps moyen, et l'heure vraie, telle qu'elle résulte du temps solaire, s'appelle l'équation du temps [7].

$$\text{Équation du temps} = \text{Temps solaire moyen} - \text{Temps solaire vrai}$$

L'équation du temps est la résultante de deux effets :

a) L'équation du centre due à l'excentricité de l'orbite terrestre (la trajectoire de la terre est une ellipse que l'on veut ramener à un cercle sur la sphère céleste).

b) La réduction à l'équateur due à l'obliquité de l'écliptique (la terre ne tourne pas dans son plan équatorial autour du soleil) puisque l'on mesure le passage du soleil au méridien du lieu par rapport au plan équatorial terrestre dans lequel il faut donc le ramener. Ainsi, l'équation du temps donne le nombre de minutes après le midi moyen pour que l'on soit au midi vrai, par exemple : si l'équation du temps est égale à +8 minutes, alors il sera midi vrai à 12h 8m du temps moyen [7].

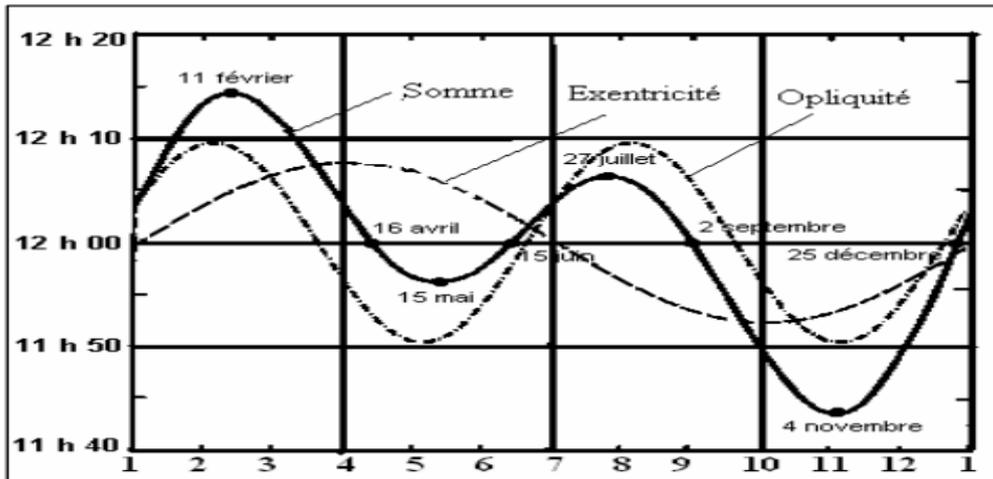


Figure I.5 : Evolution de l'équation du temps au cours de l'année [7].

- L'excentricité (équation du centre).
- L'obliquité (réduction à l'équateur).

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

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

- a) **La latitude θ** : est l'angle avec le plan équatorial que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu, elle varie entre $+90^\circ$ au pôle Nord et -90° au pôle Sud [8].
- b) **La longitude φ** : C'est l'angle φ formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et $+180$ (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes [9].
- c) **L'altitude** : C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence [9].

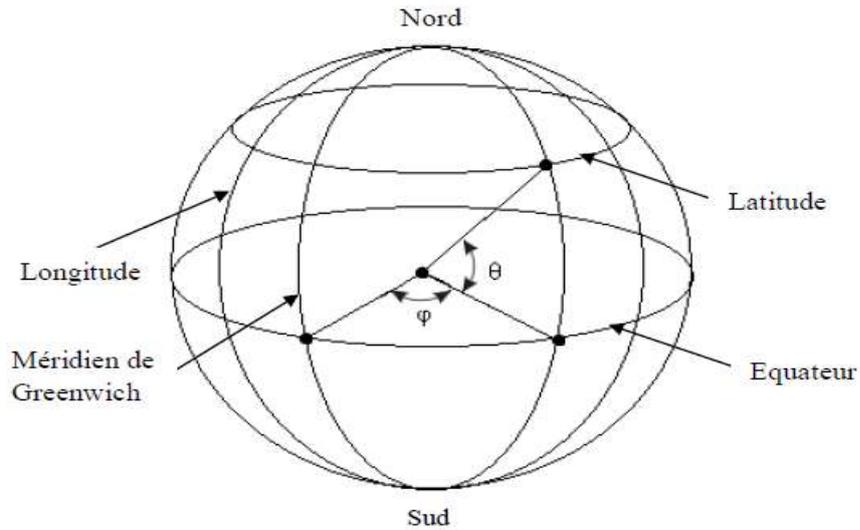


Figure I.6 : Coordonnées terrestres [9].

8. Les coordonnées du soleil :

8. a. Coordonnées équatoriales :

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles (δ , H) [6].

8. a.1. La déclinaison du soleil δ :

La déclinaison solaire est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons [6].

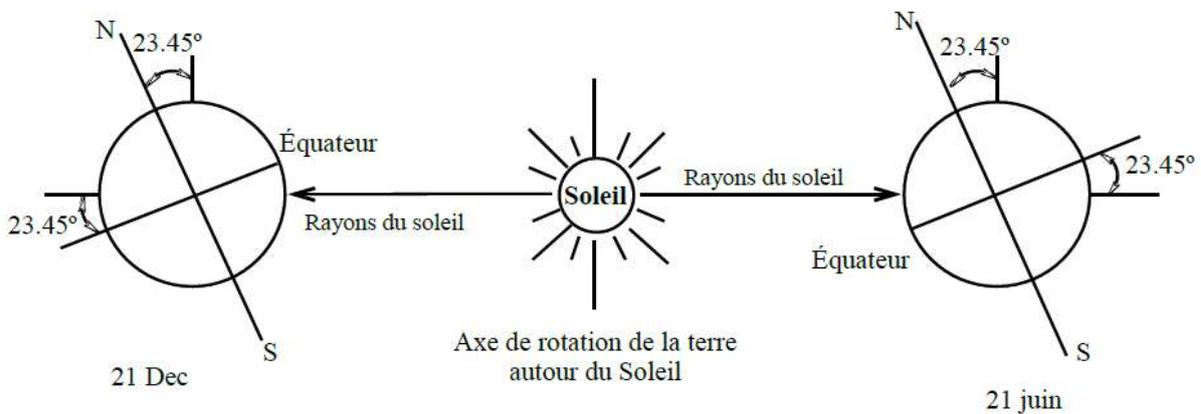


Figure I.7: Déclinaison solaire [6].

Equinoxe de printemps :	21 Mars	$\delta = 0.$
Solstice d'été :	22 Juin	$\delta = + 23^{\circ} 27'.$
Equinoxe d'automne :	23 Septembre	$\delta = 0.$
Solstice d'hiver :	22 Décembre	$\delta = - 23^{\circ} 27'.$
Approche maximale :	Périhélie	2 Janvier
Approche minimale :	Aphélie	2 Juillet

Entre ces 4 points remarquables, δ prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation :

$$\sin \delta = 0.4. \sin t \quad \text{ou} \quad t = N \frac{360}{365} \quad (5)$$

Avec N, nombre de jours écoulés depuis l'équinoxe de printemps

Ou par l'équation de Cooper (1969),

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (\text{En degrés}) \quad (6)$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier.

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des Équinoxes (0.4 degré / jour) alors qu'elle est pratiquement stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver [6].

8. a.2.L'angle horaire de solaire H :

L'angle horaire (encore noté AH) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en degrés [6].

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad (7)$$

Où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures.

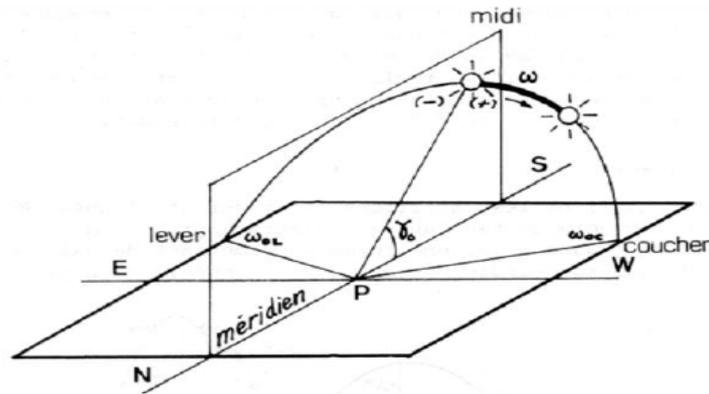


Figure I.8 : Angle horaire du soleil [10].

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de 15° , soit encore 4mn de temps par degré de longitude.

A la latitude de 45° , une mn de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur [6].

8. b. Coordonnées horizontales:

Le plan fondamental est l'horizon astronomique ; la perpendiculaire en 0 à ce plan est verticale nadir-zénith (NZ) [6].

Soit un astre M. Le demi plan passant par la droite NZ et l'astre M s'appelle le vertical de l'astre M ; il coupe la sphère céleste suivant le demi grand cercle NMZ et le grand cercle horizon en m. Sur ce grand cercle horizon la direction OS du sud est déterminée (Voir sphère céleste).

On appelle azimut de M l'angle $a = SOm$ ou l'arc Sm ; il se compte de 0 à 360° dans le sens rétrograde, c'est à dire dans le sens du mouvement diurne. Tous les astres situés sur un même vertical ont même azimut.

On appelle hauteur de l'astre M l'angle $h = mOM$ ou l'arc mM du vertical. Les hauteurs se comptent à partir de l'horizon, de 0 à $+90^\circ$ vers le zénith si M se trouve au-dessus de l'horizon, de 0 à -90° vers le nadir si M est au-dessous. a et h sont les coordonnées horizontales locales de M [6].

On remplace quelquefois h par son complément algébrique, la distance zénithale z . Dans tous les cas on a (figure I.9) : $h + z = 90^\circ$

Ces coordonnées se mesurent facilement et avec précision mais varient avec le lieu d'observation et pour un lieu donné varient d'un instant à l'autre (a varié de 360° en 24 h).

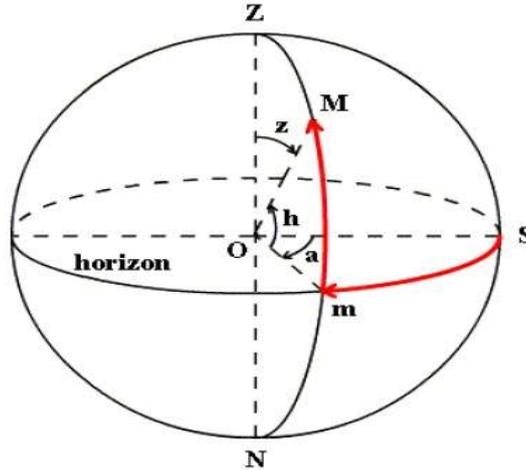


Figure I.9: Les coordonnées Horizontales [6].

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes [6, 9] :

8. b.1. Hauteur du soleil h :

C'est hauteur (h) formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil.

Il est donné par la relation [6] :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (8)$$

φ , δ et ω sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire. De la hauteur h , on peut déduire les heures de lever et de coucher de soleil (Figure I.10).

8. b.2. L'azimut du soleil a :

La position du soleil est exprimée en fonction de l'angle azimut solaire a , l'angle que fait la Projection de la direction du soleil avec la direction du sud, cet angle est mesuré positivement vers l'ouest (figure I.10) [6].

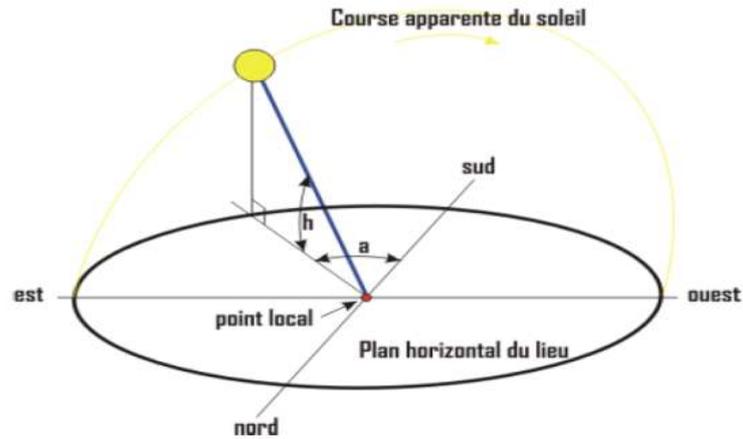


Figure I.10 : Hauteur (h) ; azimut(a) du soleil [6].

Relation entre l'azimut, l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \tag{9}$$

9. Orientation d'un capteur :

Un capteur quelconque est défini par deux angles, la hauteur du capteur et l'azimut du capteur, notés respectivement (α, γ) [11].

9 .a .La hauteur du capteur γ :

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal.

Varie entre -90° et $+90^\circ$:	{	$\gamma > 0$	Plan tourné vers le Haut
		$\gamma < 0$	Plan tourné vers le bas
		$\gamma = +90^\circ$	Plan horizontal tourné vers le haut
		$\gamma = 0$	Plan vertical

9. b. Azimut du capteur α :

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

α Varie entre -180° et $+180^\circ$	{	$\alpha > 0$	Vers l'Ouest
		$\alpha < 0$	Vers l'Est
		$\alpha = 0$	Plan Sud
		$\alpha = -90^\circ$	Plan Est orienté vers l'Est
		$\alpha = \pm 180^\circ$	Plan Nord orienté vers le Nord
		$\alpha = +90^\circ$	Plan Ouest orienté vers l'ouest

L'inclinaison β du capteur par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90^\circ - \gamma$$

L'énergie reçue par un capteur dépend de son orientation et de son angle d'incidence i .

Parmi les capteurs recevant une énergie instantanée, journalière et annuelle élevée, on trouve :

- **Le capteur TEL** : est un capteur orienté face au sud (hémisphère Nord), il est incliné d'un angle $\beta = \varphi$ par rapport à l'horizontale. Ses coordonnées sont :

$$\alpha = a, \quad \gamma = 90 - \varphi \quad \text{et} \quad i=0 \text{ uniquement aux équinoxes et à 12h TSV.}$$

- **Le capteur 1 axe** : est un capteur qui suit le soleil en azimut et généralement il est incliné d'un angle $\beta = \varphi$ par rapport à l'horizontale ses coordonnées sont :

$$\alpha = a, \quad \gamma = 90 - \varphi \text{ et } i=0 \text{ uniquement aux équinoxes.}$$

- **Le capteur 2 axes** : est un capteur qui suit le soleil en site et en azimut, il est perpendiculaire aux rayons solaires à chaque instant de la journée. Ces coordonnées sont :

$$\alpha = a, \quad \gamma = \text{heti} = 0 \quad [11].$$

10. Durée d'ensoleillement D_{IS} d'un capteur (α, γ) :

Le jour solaire est l'intervalle de temps nécessaire pour que le soleil complète un cycle autour d'un observateur fixe sur terre. La durée du jour solaire (S_0) n'est pas nécessairement de 24 heures ; elle varie tout au long de l'année et elle dépend de la latitude géographique (φ), de l'emplacement et de la déclinaison solaire (δ). Les levers et couchers du soleil définissent le jour et la nuit. On dit que le soleil se couche ou se lève lorsque la hauteur du centre du soleil au-dessous de l'horizon devient nulle. Nous allons donc négliger l'effet de la réfraction et le rayon du disque solaire. Dans ce cas, la durée astronomique d'ensoleillement est [12] :

$$S_0 = \frac{2}{15} \operatorname{acos}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (10)$$

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. La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire [13].

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos H \cdot \cos \varphi + \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (11)$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante [13] :

$$\operatorname{Sinh} = \operatorname{Cos} \delta \cdot \operatorname{Cos} \varphi (\operatorname{Cos} H + \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi) \quad (12)$$

On pose : $T = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi$

Alors l'équation précédente devient comme suit :

$$\operatorname{Sin} h = \operatorname{Cos} \delta \cdot \operatorname{Cos} (\operatorname{Cos} H - T)$$

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

$$\operatorname{Cos} H = T \quad \Leftrightarrow \quad \operatorname{cos} H = -\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi = T$$

$$\text{*si } |T| > 1 \Leftrightarrow |\varphi| + |\delta| > 90^\circ$$

($\operatorname{Sin} h$) 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 : $T < -1 \Leftrightarrow |\varphi + \delta| > 90^\circ$
 $\Leftrightarrow \operatorname{Sin} h > 0$
 $\Leftrightarrow h > 0$.

Le soleil est toute la journée au-dessus de l'horizon : « *jour polaire* »

- Si T est positif ; $T > -1 \Leftrightarrow |\varphi + \delta| < 90^\circ$
 $\Leftrightarrow \operatorname{Sin} h > 0$
 $\Leftrightarrow h > 0$.

Le soleil est toute la journée au-dessous de l'horizon : « *Nuit polaire* »

$$\text{*Si } |T| \leq 1 \Leftrightarrow |\varphi| + |\delta| \leq 90^\circ$$

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

Le coucher correspond à la valeur positive H_C et le lever à la valeur négative H_L .

$$\begin{cases} H_C = \arccos(-\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi) \\ H_L = -H_C \end{cases}$$

$$D_J = \frac{H_C - H_L}{15} = \frac{2}{15} \arccos T \tag{13}$$

Avec $T = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi$

La variation de la durée du jour au cours de l'année pour le site d'Adrar est illustrée par la figure I.11.

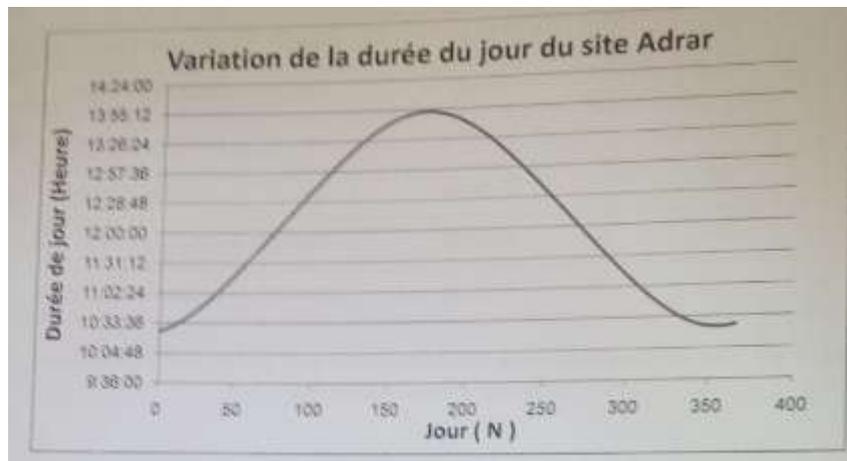


Figure I.11: Durée du jour en fonction du numéro du jour N de l'année pour le site d'Adrar.

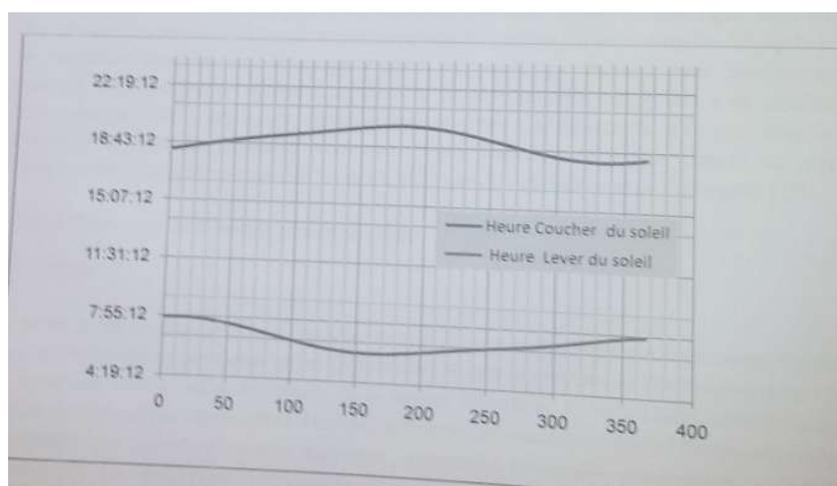


Figure I.12: L'heure de coucher et de lever du soleil en fonction du numéro du jour N de l'année pour le site d'Adrar [13].

	Heure : Minute : Second	Numéro de jour N
Durée de jour max (Djmax)	13:52:54	172
Durée de jour min (Djmin)	10:13:06	356
Durée de jour max (TLLmax)	07:52:32	11
Durée de jour min (TLLmin)	06:04:43	160
Durée de jour max (TLCmax)	20:00:06	183
Durée de jour min (TLCmin)	18:05:37	335

Tableau I.1 : Durée de jour, lever et coucher du soleil maximale et minimale sur le site d’Adrar [13].

12. Spectre du rayonnement solaire :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L’énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d’onde λ elle est donnée par la formule suivante :

$$E=h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{13}$$

Où :

h : La constante de Planck. Égale à $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ JS}^{-1}$

C : La vitesse de propagation égale à $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

La figure I.13 représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L’énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en [14] :

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

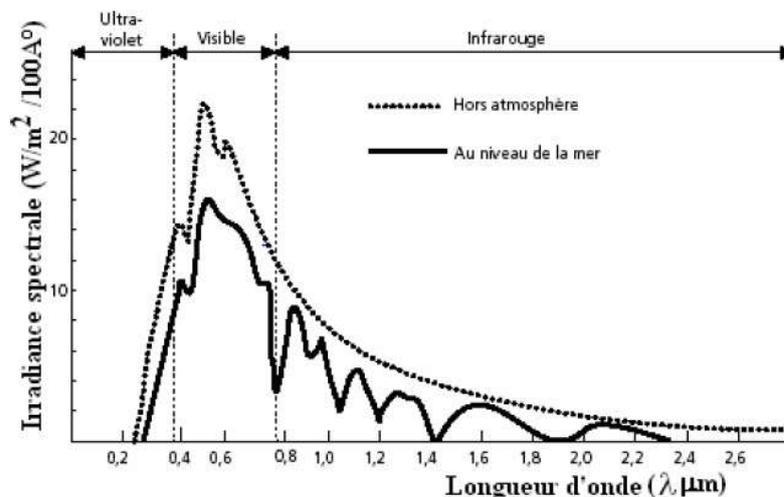


Figure I.13 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

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 surface est par unité de temps est donnée par la loi de Stephan [3] :

$$W_s = \sigma \cdot T_s^4 \quad [W_s] = W/m^2 \quad (14)$$

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ k}^4 =$ la constante de Stephan.

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

$$\begin{aligned} p_s &= w_s \cdot (4\pi R_s^2) \\ &= \sigma \cdot T_s^4 \cdot (4\pi R_s^2) \end{aligned} \quad (15)$$

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 :

$$W_T \frac{(\sigma T_s^4 \cdot 4\pi R_s^2)}{4\pi D_{TS}^2} = \frac{\sigma T_s^4 R_s^2}{D_{TS}^2} \quad (16)$$

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

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

$$D_{TS} = 1 - 0.017 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad (17)$$

- Lorsque $D_{TS} = 1$.U.A (aux équinoxes). La puissance reçue par m^2 de la terre W_T atmosphère est appelée "constante solaires" notée I_0
Les mesures de I_0 hors atmosphère (sur 10 ans) ont donné une valeur moyenne :
 $I_0 = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$ au lieu de $I_0 = (1353 \pm 21) \text{ W/m}^2$ adapté en 1971.
- Lorsque $D_{TS} \neq 1$.U.A, la puissance reçue par m^2 de la terre W_T (hors atmosphère) est notée I , elle est donnée par la relation (18) :

$$I = 1367 \left[1 + 0.034 \cos \frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad (18)$$

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.14 représente l'évolution annuelle solaire corrigée

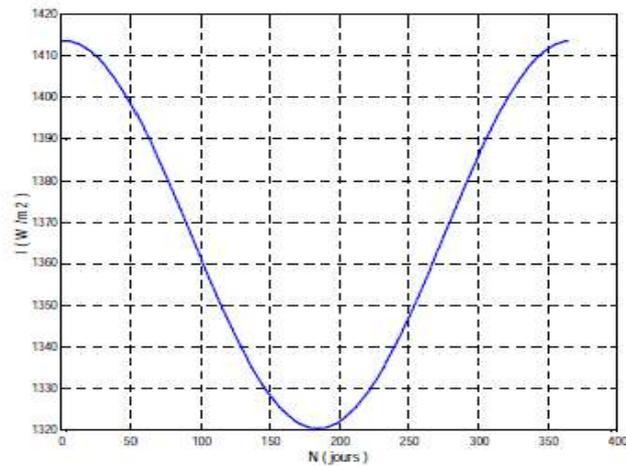


Figure I.14 : Représente l'évolution annuelle solaire corrigée.

De la figure I.14, nous remarquons que le maximum est obtenu au mois de janvier avec une valeur 14130 W/m^2 , le minimum est estimé au début de juillet de 1320 W/m^2 .

14. Modélisation du rayonnement solaire :

a. Rayonnement direct I_b :

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil.

C'est le rayonnement qui arrive directement du disque solaire au niveau du sol sans subir des modifications. Il peut être mesuré par un pyréliomètre. Si I est le rayonnement direct, dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement s'écrit [5]:

$$I_b = I \cdot \sin(h) \quad (19)$$

Avec : h : hauteur du soleil.

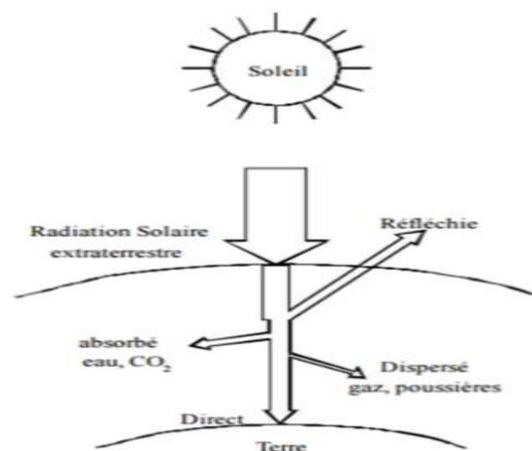


Figure I.15 : Rayonnement Direct

b. Rayonnement diffus i_d :

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. Ou C'est le rayonnement qui arrive au niveau au sol après avoir subi des collisions avec les constituants atmosphériques

Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil

On en distingue :

- Le rayonnement diffus isotropique provenant de toute la voûte céleste.
- Le rayonnement diffus circonférence provenant de la couronne solaire.
- Le rayonnement diffus horizon provient d'une mince bande d'horizon due à une accumulation d'aérosols dans les basses altitudes [6].

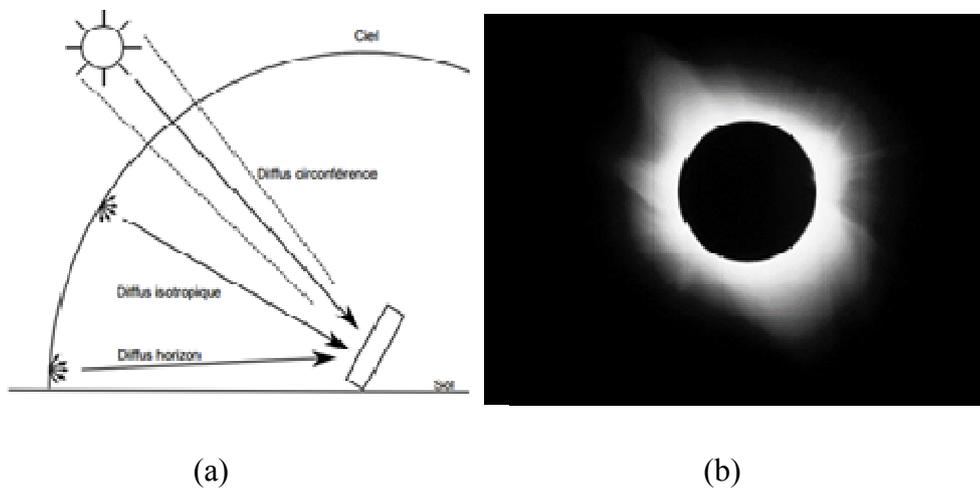


Figure I.16 :a) Rayonnement Diffus b) L'éclipse solaire totale mettant en évidence le rayonnement diffus de la couronne solaire [5]

c. Rayonnement global :

a) Rayonnement Global sur une surface horizontale :

Pour un rayonnement incident I_b faisant un angle h avec l'horizontale, le rayonnement Global I_G est la somme du rayonnement direct I_b et du rayonnement diffus I_d [15].

$$I_G = I_b \cdot \sin(h) + I_d \quad (20)$$

Le rayonnement diffus peut être estimé par la relation [19] :

$$I_d = C \cdot I_b \quad (21)$$

Où

C: est un coefficient de diffusion du ciel. Les valeurs de C sont tabulées et sont fonction de paramètres climatiques.

b) Le rayonnement Global sur une surface inclinée :

Le rayonnement solaire global $I_G(B)$ sur une surface arbitraire ayant une inclinaison (b) par rapport à l'horizontale et un angle azimutal δ est la somme des composantes directe $I_b(B)$ diffuse

$I_d(B)$ et réfléchi par le sol $I_r(B)$ du rayonnement solaire [5].

$$I_G(B) = I_b(B) + I_d(B) + I_r(B) \quad (22)$$

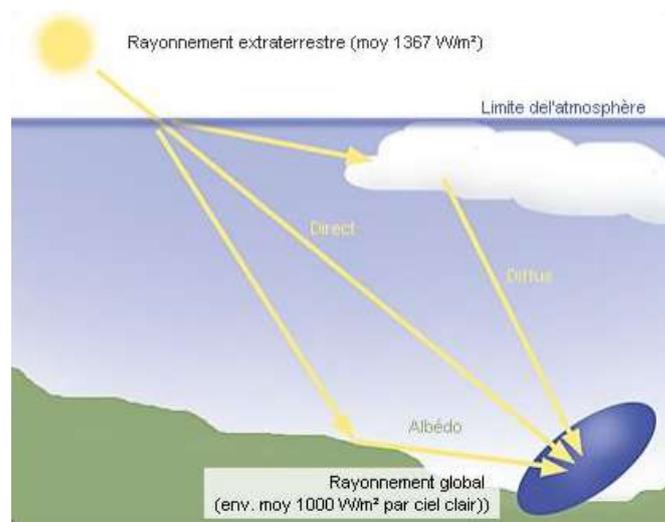


Figure I.17: Rayonnement Global [5]

d. L'albédo du sol :

Le rayonnement réfléchi est à prendre en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée. Il est directement proportionnel au rayonnement global. Le sol réfléchit une partie de l'éclairement qu'il reçoit en fonction de sa nature [5].

- Sol cultivé 10 à 25%
- Neige 60 à 90%
- Sable 30 à 40%

Albédo: c'est le rapport du rayonnement incident diffusé ou réfléchi sur le rayonnement incident. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

$$L'albédo Alb = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie reçu}}$$

Il y a quelques valeurs de l'albédo selon la surface du sol:

Tableau I.2: Les valeurs de l'albédo selon la surface du sol

Surface du sol	Albédo
Surface d'eau	0.03à 0.1
Forêt	0.05à0.2
Sol cultivé	0.07à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1à 0.3
Sol nu	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5à0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

Mesure de rayonnement solaire sur la surface de la terre

De façon générale, la mesure de flux global d'irradiation s'effectue dans les stations météorologiques sur le plan horizontal à l'aide d'un pyranomètre. Cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie qui convertit le rayonnement reçu en chaleur puis en électricité. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global: elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série.

La composante directe de l'irradiation solaire peut être mesurée par le même instrument en lui ajoutant une large couronne blanche qui protège la thermopile de la lumière diffusée par le sol et qui joue en même temps le rôle d'écran thermique.

En ce qui concerne la mesure de la composante diffuse, le pyranomètre doit être muni d'une bande pare-soleil. Cette bande est munie d'un écran annulaire qui est une bande circulaire axée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial [16].

15. Appareils des mesures :

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

Pyranomètre :

C'est l'appareil le plus utile puisqu'il évalue, à l'aide d'une thermopile, l'ensemble du rayonnement solaire (direct+diffus) sur une surface donnée et sur un large spectre de 0,3 à 3[μm] de longueur d'onde. Son globe de verre lui confère une grande acceptante angulaire,

proche de la demi-sphère (il collecte les rayons venant de toutes les directions, même les rayons rasants).

Il peut également mesurer la part diffuse du rayonnement, on masque alors le rayonnement direct avec un cache en forme d'arceau qui suit la trajectoire du soleil pour éliminer la contribution directe du rayonnement [16].



Figure I.18: Pyranomètre d'Eppley [5].

***Le pyréliomètre:**

C'est un instrument destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil [5].



Figure I.19 : Pyréliomètre [5].

L'héliographe :

Qu'est l'instrument dont l'origine est la plus ancienne. Il donne la durée d'insolation ou plus exactement la période du jour pendant laquelle le rayonnement solaire a dépassé un certain seuil. C'est sur un papier qui se déplace que le rayonnement solaire, concentré à l'aide de

dispositif optique, laisse son empreinte en le brûlant sur une longueur qui donne la durée du jour. Cet appareil n'est pas très intéressant pour le photovoltaïque, car il ne renseigne pas sur l'intensité du rayonnement [16].



Figure I. 20: L'héliographe de Campbell-Stockes

*Pyrradiomètre différentiel ou Bilanmètre :

Mesure le bilan du rayonnement total, différence entre le rayonnement total descendant et le rayonnement total ascendant (rayonnement solaire et atmosphérique renvoyés vers l'espace [5].



Figure I.21 : Bilanmètre

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

La mesure du vent comprend deux grandeurs à savoir, la vitesse et la direction du vent. Pour mesurer la vitesse du vent on se sert d'un anémomètre.

- **Anémomètre :**

L'anémomètre est un instrument qui se compose de 3 petites coupelles hémisphériques, disposées à l'extrémité de bras métalliques espacés de 120° (Figure I.22). Un compteur relié à l'axe de rotation permet de lire la vitesse et de l'enregistrer suivant les modèles [17].



Figure I.22. L'anémomètre

Aussi, il est à noter que la vitesse du vent peut être exprimée en milles, en kilomètres par heure, en mètres par seconde ou en nœuds.

- **Girouette:**

Par ailleurs, pour connaître **la direction des vents** on se sert d'une girouette (Figure I.23), souvent associée à l'anémomètre. Lorsque le vent change de direction, il pousse sur la grosse partie de la flèche (l'arrière) jusqu'à ce qu'elle soit alignée avec le vent (parallèle au vent). Cela a pour conséquence de faire pointer la flèche dans la direction d'où provient le vent. On se réfère alors aux quatre principaux points cardinaux pour juger de la direction d'où vient le vent. On place habituellement la girouette à 10 m du sol [17].



Figure I.23. La girouette.

16. Conclusion:

L'irradiation solaire globale pour un site donné est fonction de plusieurs facteurs ; astronomiques et météorologiques. Dans ce chapitre on a parlé de ces facteurs astronomiques et de leurs définitions. Elle est influencée par deux principaux paramètres, en premier lieu on trouve les constituants de l'atmosphère, qu'ils soient permanents ou ceux dont la composition varie largement avec les activités de l'homme, et en second c'est le mouvement de la terre, alors il est important de faire une étude préliminaire du climat pour un site donné avant tout expose d'exploitation de l'énergie solaire.

Références bibliographiques :

- [1] <https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/Kaddouri-Laib.Pdf?idmemoire=3734>.
- [2] site internet de l'Energie Information Administration du gouvernement US, <http://www.eia.doe.gov/>, [Agence Internationale de l'Energie, <http://www.iea.org/>]
- [3] Maouedj Rachid; " Etude des performances d'un système hybride (photovoltaïque-éolien), pour la production de l'électricité. Application au site d'Adrar ". Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. 2013.
- [4] Nazila Kahina, Hannachi-Belkadi; " Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie ". L'université Paris Est, France 2008.
- [5] Karimi Siham; " Contribution à l'analyse des performances du système PV raccordé au réseau sous différentes conditions climatiques dans un milieu saharien ". Université d'Adrar 2017/2018.
- [6] Samira Mouhous-Chaouchi; " Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné ". Mémoire de Magister. Université Abou Bekr Belkaid. 2011/2012.
- [7] NIA Mohamed; " Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire ". Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2010, Page 27.
- [8] Nadji Nedjemeddine; " Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique ". Mémoire de Master. Université Badji Mokhtar Annaba, 2017/2018.
- [9] Meziani Fariza; " Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG ". Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri. Tizi Ouzou. 2011.
- [10] Miss Oum Mohammed, Hamidat Abderrahmane; " Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie". Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef. 2010-2011.

- [11] Sidiyakoub Ahmed Amin; " Conception et Modélisation d'un four solaire multifibres sphérique et cylindrique ". Université, Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen .24 juin 2015. Page 22.
- [12] Chafika Zidani; " Conception et modélisation des systèmes photothermique. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques ". Mémoire de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Décembre 2012. Page 13.
- [13] Tayebi Abdel basset, Belhadj Zohra; " Installation et expérimentation d'un système hybride photovoltaïque-éolien pour la production de l'électricité ". Mémoire de Master, Université d'Adrar, 17/11/2013. Page 33.
- [14] M. Iqbal; Une introduction au rayonnement solaire, AcadémiePress, New York. 1983.
- [15] Debili Narimene; " Etude de optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque ". Mémoire de Magister. Université Constantine 2014/2015.
- [16] Amara Karima; " Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ". Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2014/2015.
- [17] Berrached Sid Ahmed; " Analyse technico-économique des systèmes de conversion d'énergie éolienne appliquée sur la région de Tlemcen ". Mémoire de Master, Université de Tlemcen Abou Bekr Belkaid, 2015/2016. Page 23.

1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'utilisation d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce chapitre présente le principe du fonctionnement des cellules photovoltaïques et aussi les différentes technologies des cellules PV.

On commencera par brève rappelle sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Nous présenterons ensuite la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque et ces applications. A la fin on termine par conclusion.

2. Historique de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et des saisons, elle est donc indirectement à l'origine de richesses énergétiques tels que le charbon, le pétrole ou encore le gaz. L'énergie solaire est utilisée depuis de nombreux siècles par exemple pour se chauffer.

Le fonctionnement des panneaux solaires thermiques est basé sur le phénomène par lequel les objets touchés par les rayons du soleil se réchauffent ; la chaleur ainsi produite peut être recueillie et conservée pour une utilisation ultérieure. Les corps clairs reflètent la lumière alors que les corps sombres l'absorbent en se réchauffant. Faisons un bref parcours historique au fil des siècles pour voir comment l'énergie solaire a pu être exploitée avant d'arriver à la technologie actuelle [1].

Plus de 17 siècles plus tard, en 1561, Adam Lonitzer évoque un procédé utilisé par les alchimistes utilisant l'énergie du soleil concentrée dans le but d'élaborer des parfums.

En 1615, Salomon de Gauss construit une pompe solaire, utilisant de l'air chauffé avec le rayonnement solaire.

Dans les années 1780, il invente un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du Soleil, qu'il nomme « hélio thermomètre », il utilise l'effet de serre obtenu par un vitrage placé au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé ; il crée ainsi les premiers capteurs solaires thermiques à basse température.

1839 : le physicien français Edmond becquerel l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

Au cours des années 1980, la technique PV terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts [2].

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.

La science qui traite la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954 avec la réalisation des premières cellules PV au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone Laboratoires, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie, les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard.

En 1905, Albert Einstein émet l'hypothèse que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre ainsi la création d'un courant électrique [3].

1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000Km en Australie [4].

3. Avantages et Inconvénients d'une l'énergie solaire :

a. Les avantages [5,6] :

- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.
- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés.
- L'énergie solaire photovoltaïque nécessite peu de maintenance.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales arides et isolées.
- Les modules solaires peuvent couvrir les toits et les façades et contribuer ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable [7].
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt [5].

- 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 [6].

b. Inconvénients :

- Les fabrications 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 (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [3].
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru la fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur [8].

4. Le fonctionnement des panneaux solaires :

a). Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants (figure II.1) [9] :

- 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.

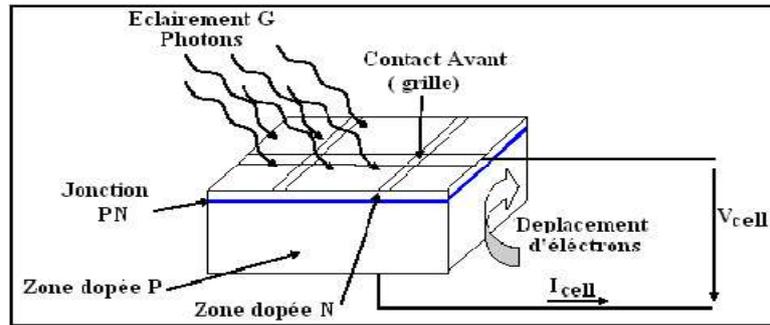


Figure II.1:Fonctionnement d'une cellule PV.

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.2) :

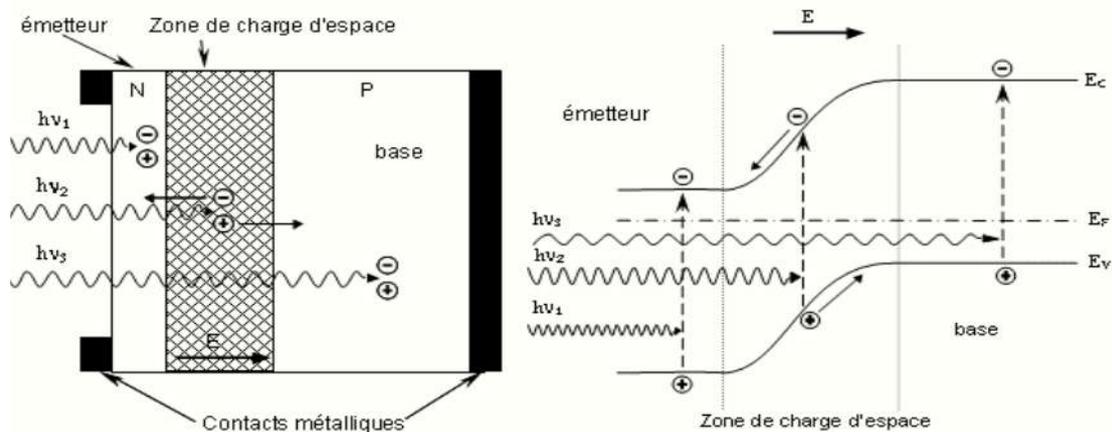


Figure II.2: Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.

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 créés par les photons incidents sont dissociés 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 [10]. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant I_{ph} . Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [9].

5. La Technologie Photovoltaïque :

5.1. Procédé de fabrication des cellules photovoltaïques:

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés: des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques [11].

La figure II.3: présente l'enchaînement de ces étapes, de même qu'elle pose les limites du système étudié dans l'analyse du cycle de vie.

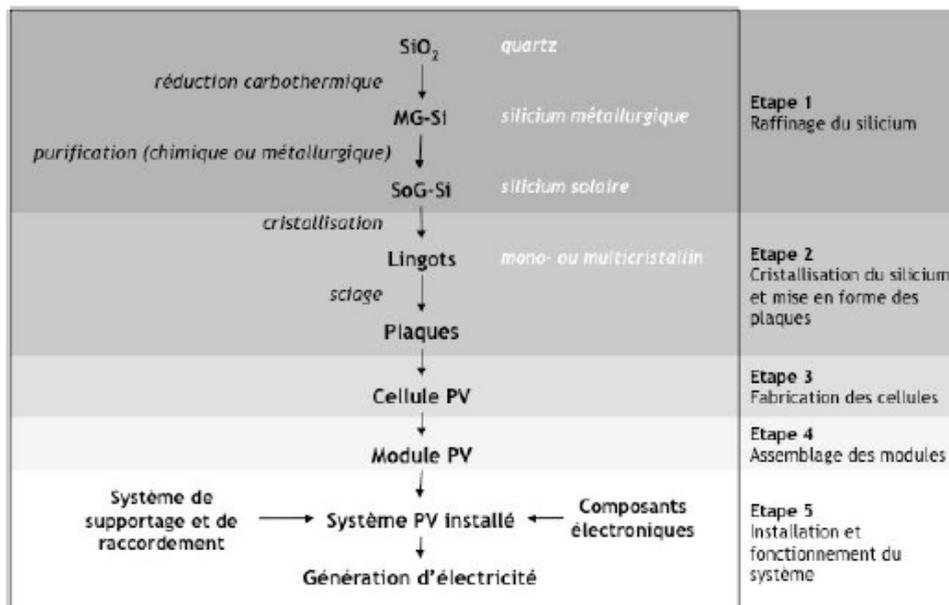


Figure II.3: Limites du système pour l'analyse du cycle de vie [12]

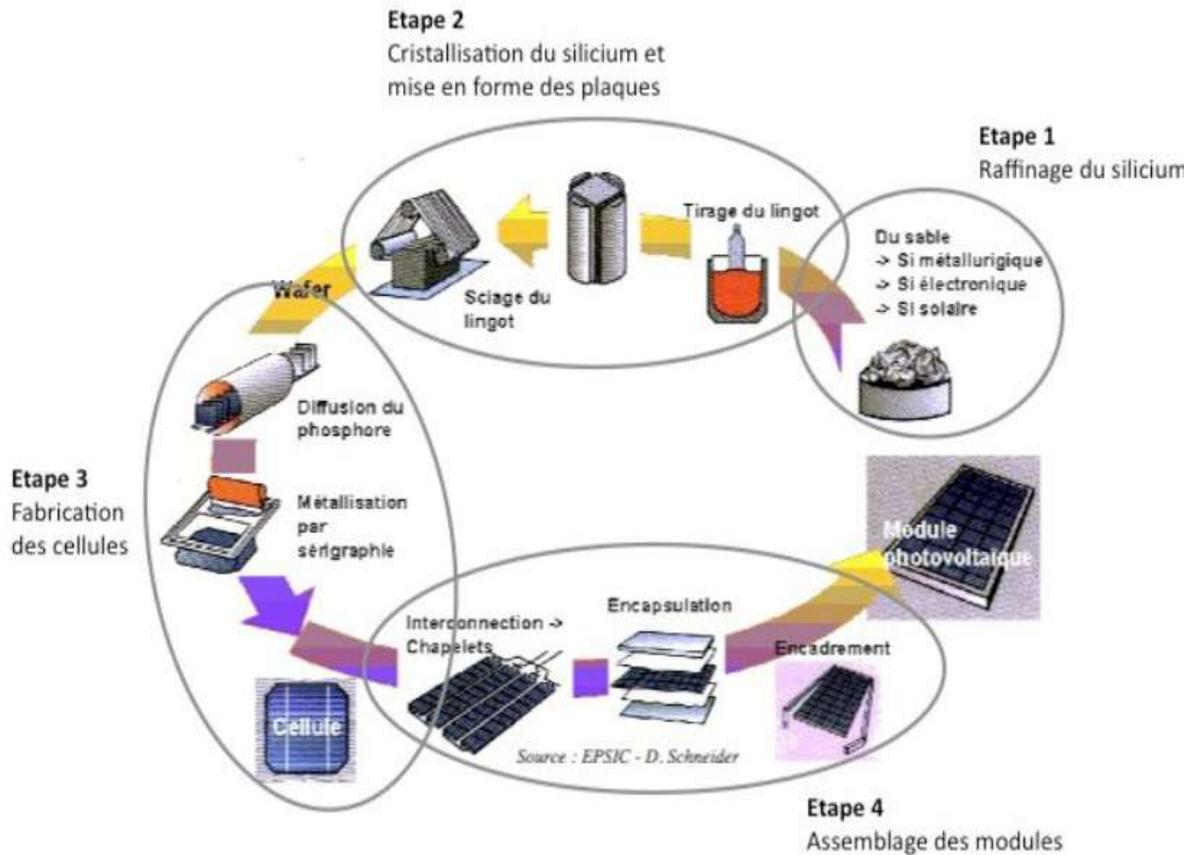


Figure II.4 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin [12].

5.2. Modules et cellules photovoltaïques :

Cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque (photopile) forme l'élément de base du générateur photovoltaïque, c'est une méthode optoélectronique de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est réalisée à base de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium.

Les différentes technologies [13] :



Figure II.5 : Cellule photovoltaïque

b). Le module photovoltaïque :

L'association mixte de plusieurs cellules photovoltaïque forme un module (appelé aussi panneau solaire) [14].

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque (générateur photovoltaïque) d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [13].



Monocrystallines Multi cristallines Couche mince

Figure II.6 : Module photovoltaïque

1. Les cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Figure II.9).

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Le silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [15].

Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans) [16].



Figure II.7 : Cellule monocristalline

2. Les cellules poly-cristallines :

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20% en labo.

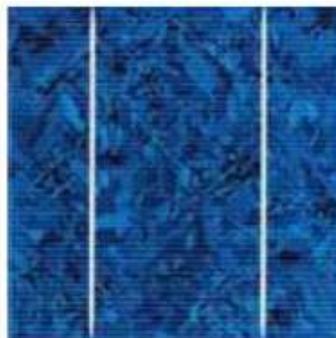


Figure II.8 : Cellule poly cristalline [16]

3. Couche mince (Amorphe) :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût 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 (Figure II.9).

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [17].



Figure II.9 : Modules photovoltaïques fabriqués en Silicium amorphe.



Figure II.10: Module couche mince [18]

5.3. Système solaire photovoltaïque :

Un système photovoltaïque comporte plusieurs parties, il se compose d'un champ de modules PV et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs (charge, injection dans le réseau). Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules PV et la charge finale [2].

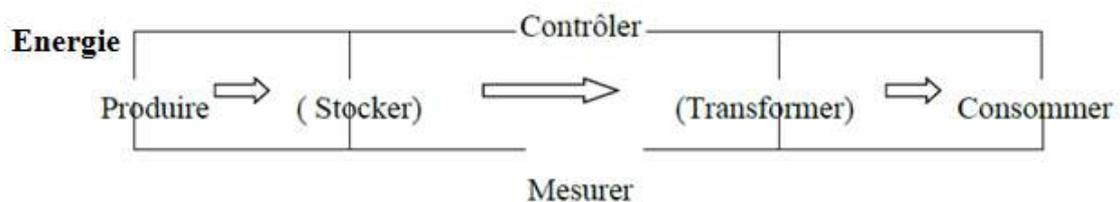


Figure II.11 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.

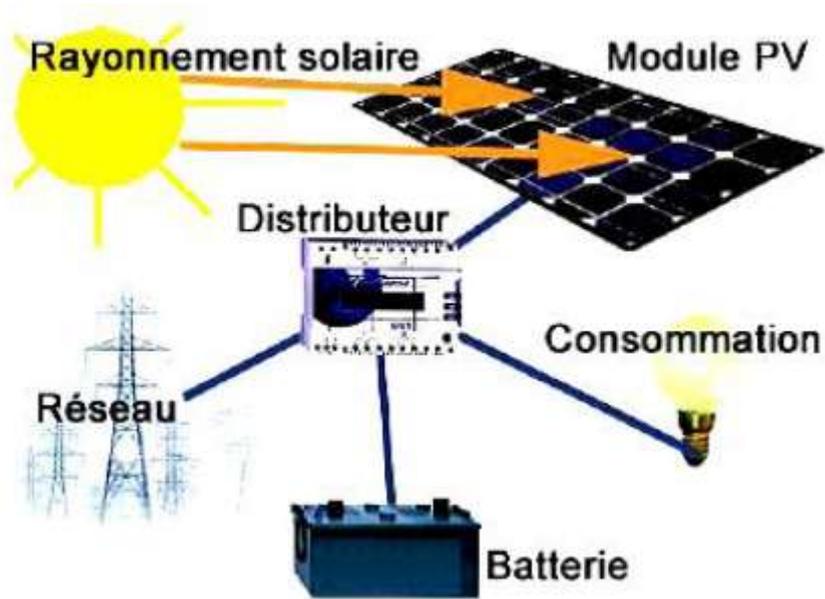


Figure II.12 : Système Photovoltaïque [18].

5.4. Applications :

5.4.1. Pompage photovoltaïque :

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un sous-système de pompage (moto-pompe) et un réservoir d'eau (figure II.13). Le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution adoptée par rapport au stockage électrochimique de l'énergie dans les batteries. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation [17].

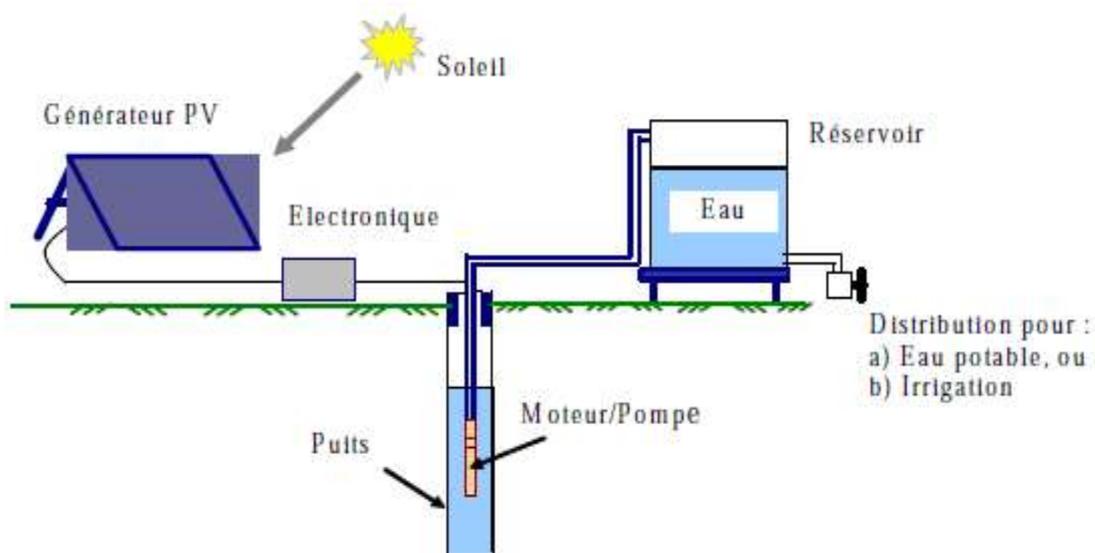


Figure II. 13 : Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.

- **Les types de pompes :**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge [19].

a) Les pompes volumétriques :

Les pompes volumétriques transmettent l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres). L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multi-pales.

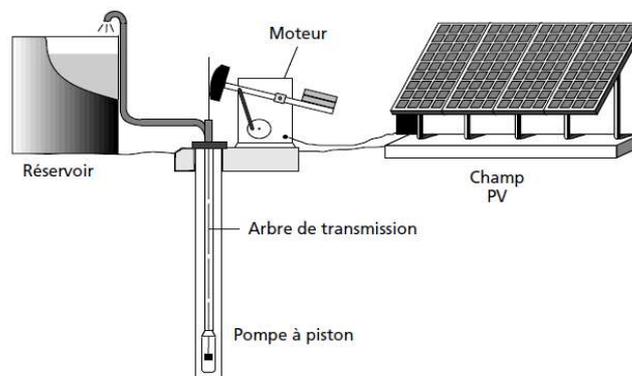
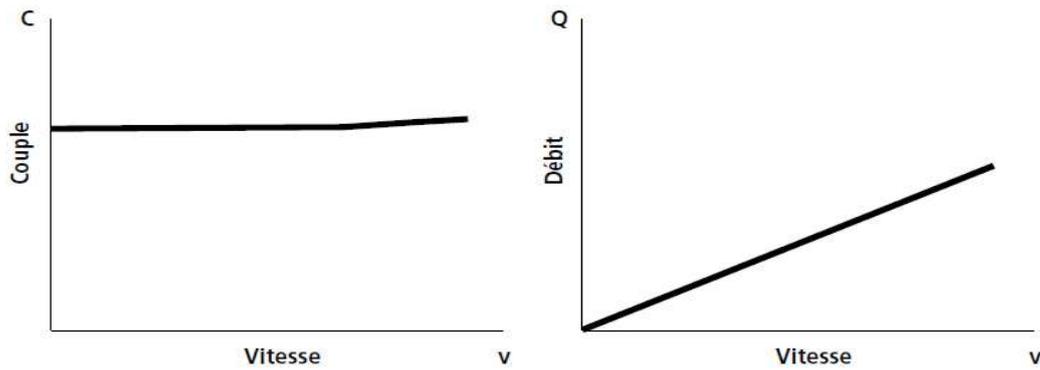


Figure II.14 : Pompe à piston (Jack pump) pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau



a) Le couple est pratiquement constant en fonction de la vitesse.

b) Le débit est proportionnel à la vitesse.

Figure II.15 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique [20].

b) 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.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage : La pompe tourne même par très faible ensoleillement (mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau) ;
- La puissance absorbée est bien adaptée aux modules solaires, fournissant un bon rendement global [17].

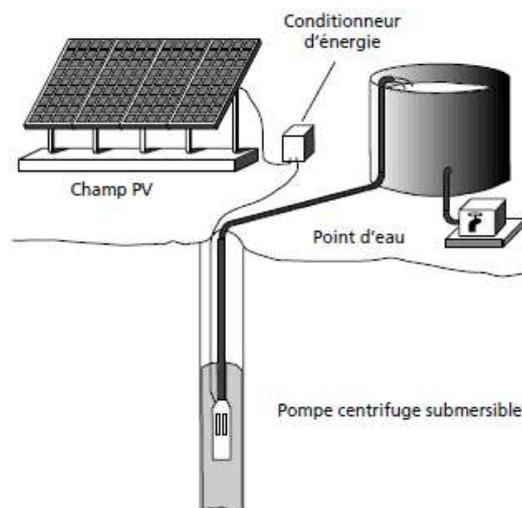


Figure II.16 : Pompe submersible centrifuge à étages multiples [18].

Notes : Cette pompe est utilisée plus couramment pour l'exhaure de l'eau domestique. Le moteur et la pompe s'installent dans le puits ou le forage, à l'abri de coups potentiels.

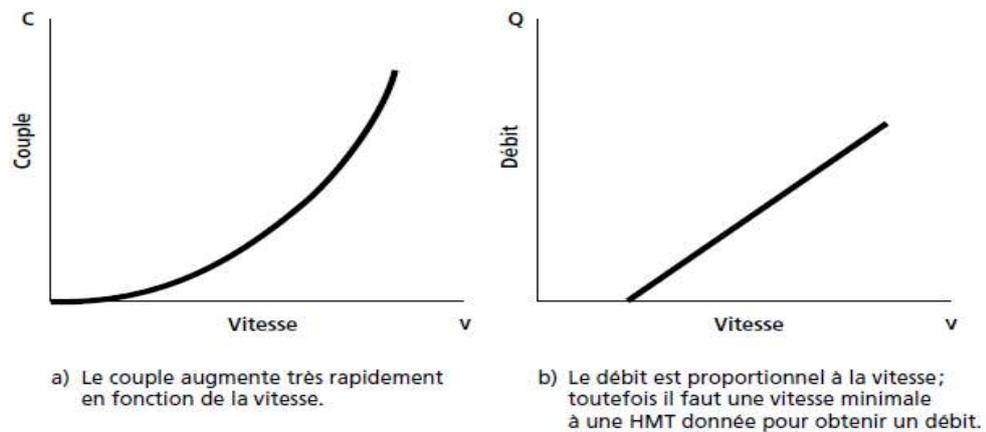


Figure II.17 : Caractéristiques d'une pompe centrifuge [20].

5.4.2. L'éclairage photovoltaïque :

a-Système d'éclairage public photovoltaïque autonome :

L'éclairage public solaire n'utilise pas l'énergie du réseau électrique. Il seulement il utilise l'énergie électrique produite naturellement par la conversion des rayons du soleil en courant électrique à partir du module photovoltaïque, cette énergie stockée dans des batteries puis restituée la nuit pour assurer l'éclairage, c'est pour ça l'éclairage public photovoltaïque autonome proposés comme solution pour les sites isolés [21].



Figure II.18 : Eclairage public

b-Description technique :

Le système d'éclairage public photovoltaïque complet comprend [17] :

- Un ou deux module(s) photovoltaïque(s) monocristallin ou poly cristallin dont la puissance totale est calculée spécifiquement en fonction :
 - L'irradiation solaire.
 - Le nombre d'heures de fonctionnement.
 - Le mode de fonctionnement (automatique, pleine puissance, réduction de flux, etc.)
- Un système de régulation de charge et de contrôle électronique du dispositif intégrant une détection crépusculaire et une programmation par plage horaire.
- Un dispositif électronique de gestion d'alimentation des LEDs.
- Deux batteries stationnaires au plomb d'une capacité de 100Ah chacune.
- Tous les câbles nécessaires au raccordement des différents composants du système.
- Un mât fuselé galvanisé.

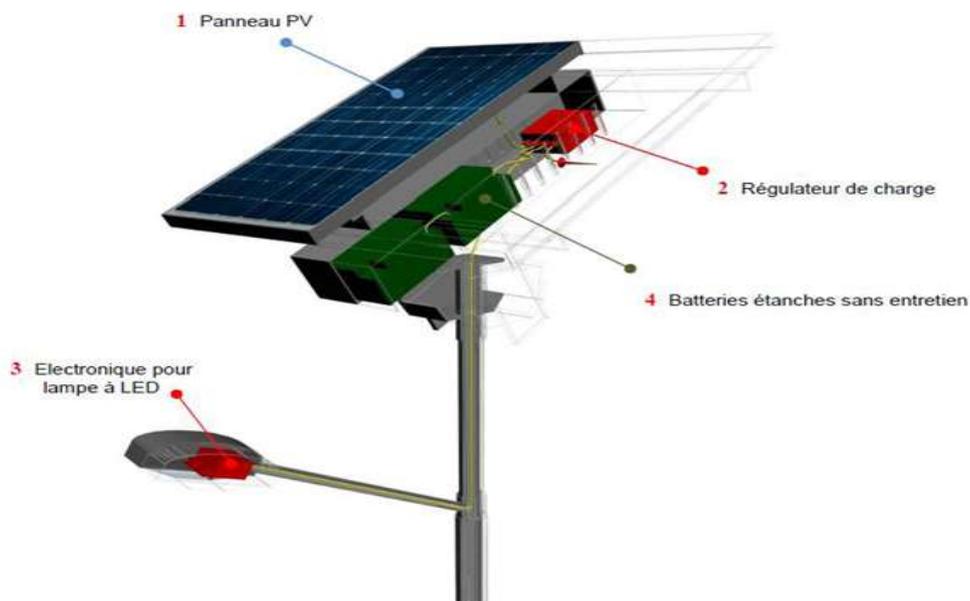


Figure II.19: Système d'éclairage public photovoltaïque autonome

6. Les paramètres qui influent sur le rendement d'un panneau solaire :**6.1. Influence de la température sur le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque :**

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 50°C, la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ est donnée par les figures (II.20 et II.21). On remarque que la température a une influence

négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte [5].

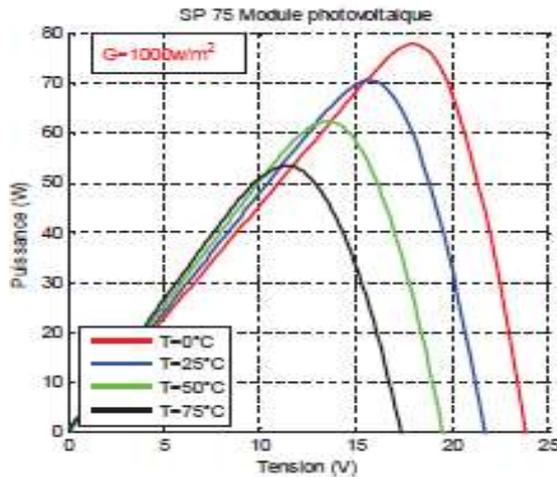


Figure II.20 : Caractéristique P-V du module PV du selon la température [22]

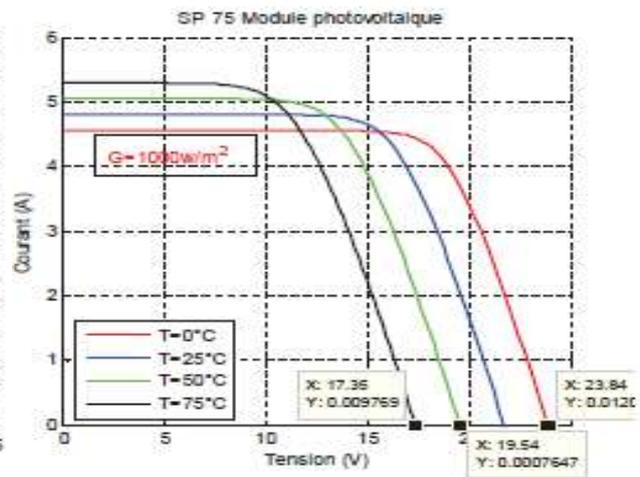


Figure II.21 : Caractéristique I-V du module PV du selon la température [22].

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

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ est donnée par les figures (II.22 et II.23). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25 °C[5].

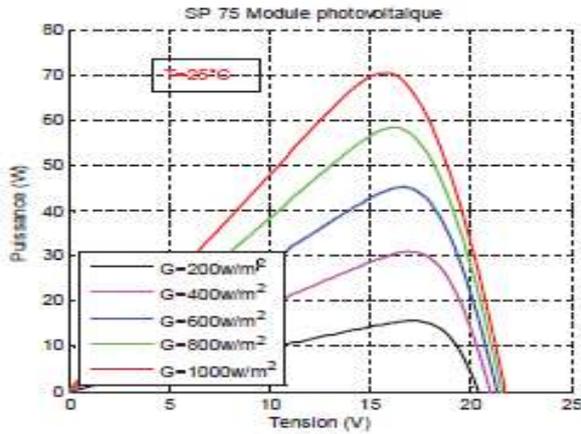


Figure II.22 : Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement [22].

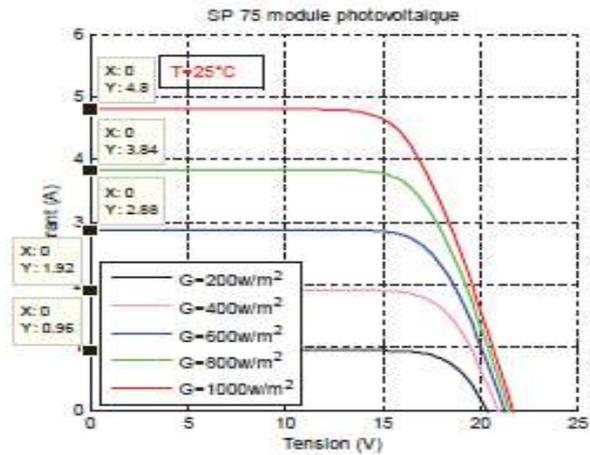


Figure II.23 : Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement [22].

7. Les différents types de systèmes photovoltaïques :

7.1 Système PV autonome :

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps.

Aussi, l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments [2] :

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

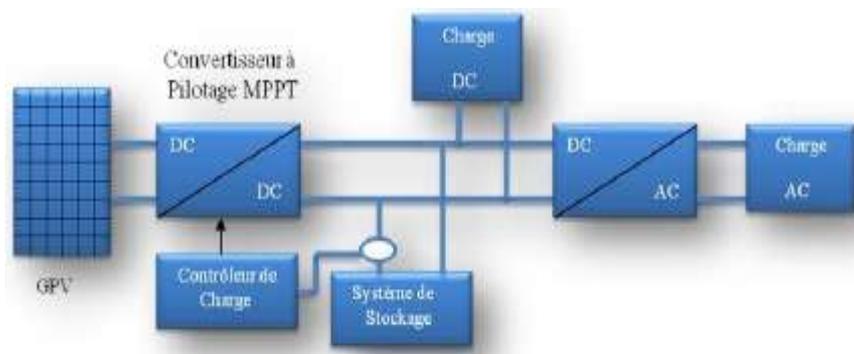


Figure II.24 : Installation photovoltaïque autonome

7.2. Système PV connecté directement au réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau permettent la décentralisation de la production sur ce réseau électrique (Figure II.25). L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Au fil du temps, les systèmes PV connectés au réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production.

Cette mise en commun des productions permet aussi un sous-dimensionnement des équipements de production complémentaire. Ces transferts éliminent la nécessité d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [2].

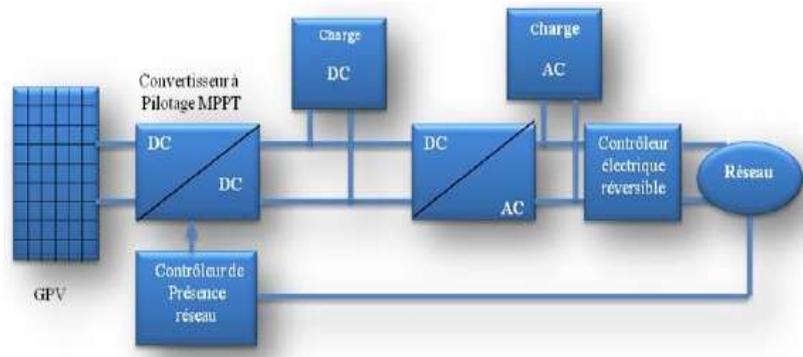


Figure II.25 : Installation photovoltaïque couplée au réseau

8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche générale sur l'énergie solaire photovoltaïque; ensuite on a présenté les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire, la technologie photovoltaïque. Aussi on a montré bien l'influence de la température et de l'éclairement sur le rendement d'un panneau solaire PV.

Nous avons aussi décrit les différentes applications des systèmes énergétiques solaires PV.

9. Références

- [1] Talamali Donia, Mougari Nour el islam; " Simulation des performances d'un chauffe-eau Solaire ". Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara. Boumerdes, 2015/2016
- [2] Khenfer Riad; " Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques ". Thèse de Doctorat, 05 Mars 2015.
- [3] Kaddi Abdelhamid, Foudou Abderrahmane ; " Traitement de l'image thermique pour la détection des zones défectueuses des panneaux solaire photovoltaïques ". Mémoire de Master, université d'Adrar, 2013/2014, page 03.
- [4] Larbi Karim, M'khadmi Aissa; " Utilisation de photovoltaïque en éclairage public application au site Adrar ". Mémoire de Master, université d'Adrar, 30 novembre 2014, page 26.
- [5] Slama Fateh; " Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ". Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas. Setif. 01/04/2011
- [6] Ben moussa Fouad; " Optimisation des paramètres d'un modèle électrique d'une cellule photovoltaïque ". Mémoire de Magister, Université Amira-Bejaia, 16/12/2015.
- [7] Debili Narimene; " Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque". Mémoire de Magister, Université Constantine I, Année 2014/2015.
- [8] Belfedhal Abdelmalek; " Etude et simulation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique a la région d'Adrar ". Mémoire de Magistère, Université Ahmed Daïa. Adrar.2013/2014.
- [9] Boussaid Mohammed; " Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques ". Mémoire de Magister, Université Abou-BakrBelkaïd. Tlemcen, 2011-2012.
- [10] Amara Karima; " Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ". Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2014/2015. Page 02.
- [11] Belaid Lalouni Sofia; " Cours Energie Solaire Photovoltaïque ". Université Amira de Bejaia, 2014/2015.
- [12] www.carbonelorraine.com.
- [13] Zenakhi Asma; " Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT ". Mémoire de Master, 14 /06/2016.
- [14] Degla Mohammed, Larbi Ben Ahmed Bachir; " Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque ". Mémoire Master, Université Kasdi Mer bah Ouargla, 2016/2017, Page 09.

- [15] Ferrah Billel; " Etude d'un système Hybride (photovoltaïque-éolien) ". Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014/2015.
- [16] Nakoul Zakia; " Optimisation d'une centrale solaire a base d'un générateur PV, application aux sites Tlemcen et Bouzaréah ". Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 04 juillet 2010.
- [17] Amokrane Karima; " Etude des Performances des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ". Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 23 Novembre 2008, Page 26.
- [18] Ben Cherif Mohammed; " Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension ". Mémoire de Doctorat, Université Abou-BekrBelkaid Tlemcen, Page 8.
- [19] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy; " Le Pompage Photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ". IEPF/Université d'Ottawa/EIER/Crepa, 1998.
- [20] Toumi Nabil; " Etude d'une pompe à eau solaire pour alimenter un chantier pétrolier ". Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2012/2013.
- [21] Benkherif Abdelbacet, Seddiki Benyoucef; " Etude technico économique d'un système photovoltaïque en site isolé par Pvsyst ". Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2017 /2018.
- [22] Othmane Benseddik, Fathi Djaloud; " Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ". Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah- Ouargla, 2011/2012.

1. Introduction:

L'une des manières d'utilisation et de l'exploitation de l'énergie solaire est la transformation de cette énergie sous forme chaleur. Cette technique est donc appelée solaire thermique. On peut de cette manière utiliser l'énergie solaire pour le chauffage, le séchage ou la distillation de l'eau. Une autre application consiste à concentrer le rayonnement Solaire pour obtenir des hautes températures et produire ainsi de l'énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine thermique (turbine à gaz ou à vapeur): c'est la technique solaire thermodynamique.

Dans ce chapitre on étudie la conversion solaire thermique, ces types et ces applications.

2. La conversion photo thermique:

La conversion photo thermique est actuellement la plus facile à mettre en œuvre et la plus répandue. Toutes ces applications sont réalisées suivant deux types de procédés; soit les capteurs plans soit les capteurs à concentration selon la température demandée. Donc la conversion photothermique consiste à une transformation directe du rayonnement solaire, alors se type de conversion est la première voie. L'effet photothermique comme le décrit Charles Genaudeau est l'histoire de deux couleurs qui ne figurent pas dans l'arc-en-ciel: le Noir et le Blanc, la première absorbe la totalité de la lumière alors que la seconde la réfléchit. Lorsque le rayonnement de la lumière du soleil (photons ou grains de lumière) franchit un obstacle transparent (verre ou plastique) et qu'il arrive sur une surface enfermée dans un caisson et si cette dernière aux propriétés physiques d'un corps noir, il est entièrement absorbé. La surface ou "absorbeur" s'échauffe et réémet dans les grandes longueurs d'onde $2 < \lambda < 10 \mu\text{m}$. Ce rayonnement ne peut ressortir et se trouve piégé dans le caisson " une serre" le transparent, alors devient un "corps blanc". On peut augmenter l'énergie captée par l'utilisation d'un double vitrage et/ou de surfaces sélectives (dépôts de multicouches soigneusement choisies) qui présentent un intérêt surtout pour les surfaces captatrices à haute température, ou encore des structures cellulaires anti rayonnantes. Par ailleurs une isolation arrière et latérale est primordiale afin de limiter les pertes par transmission vers l'extérieur. On peut également placer l'absorbeur sous vide. La conversion thermique est actuellement la plus facile à réaliser et à mettre en œuvre, donc la plus répandue. Elle est réalisée suivant deux types de procédés; soit les capteurs plans soit les capteurs à concentration [1].

3. Type des capteurs solaires thermiques:

Les capteurs solaires sont caractérisés par leur mouvement (stationnaire, à poursuite simple et à poursuite double) et par leur température opératoire. Les capteurs stationnaires ont une position fixe et ne suivent pas la position du soleil dans le ciel. On en distingue trois types [2]:

- Capteur plan
- Capteur parabolique compose
- Capteur à tube sous vide

Dans ce qui suit, on présentera les détails du capteur plan utilisé dans ce travail, la figure III.1 montre un capteur plan typique.

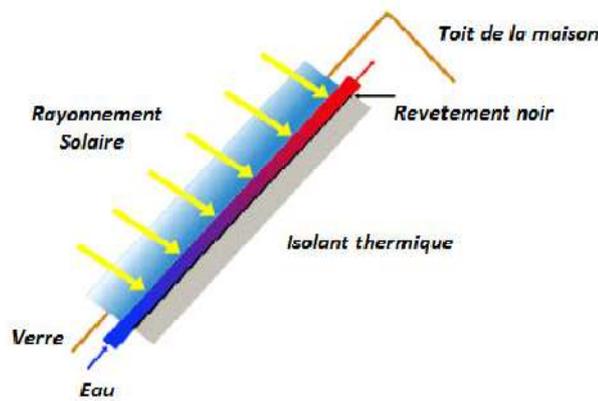


Figure III.1: Les principaux composants et des matériaux la conception du capteur thermique [2].

Quand l'énergie solaire passe à travers la couverture transparente et entre en contact avec la surface noire de l'absorbeur, une grande partie est absorbée et transférée au fluide circulant dans les tubes vers le ballon de stockage ou vers d'autres utilisations. La partie arrière de l'absorbeur est généralement constituée d'une couche isolante qui réduit les pertes par conduction. Les tubes peuvent être soudés à la plaque absorbante ou ils peuvent faire partie intégrale de la plaque.

Un capteur thermique se compose des éléments fondamentaux suivants [2] :

Couverture	Transparente: crée un effet de serre au-dessus de la plaque absorbante: en général un verre trempé dit solaire, présentant une faible teneur en fer pour permettre un haut degré de transmission lumineuse;	1. simple vitrage 2. panneau solaire composé 3. plaques ou feuilles en matière plastique
Absorbeur	Noire: permet la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique transportée par le fluide;	1. Métaux (Cu, Al, Fe) 2. Plastique (polypropylène, polyéthylène)
Transporteur de chaleur	Fluide: le fluide caloporteur qui évacue la chaleur jusqu'à l'extérieur du capteur;	1. Eau 2. Air
Isolation	Matériau: réduit la déperdition de chaleur par la face arrière et les côtés du capteur;	1. Polyuréthane 2. Laine minérale 3. Laine de fibres de Verre
Boîte (Box)	Matériau: contient tous les éléments constitutifs fragiles du capteur comme les tubes, la plaque absorbante...	1. Aluminium 2. Acier galvanisé 3. Plastique 4. Bois

Tableau III.1: Eléments fondamentaux d'un capteur solaire [2].

3.1. Le capteur solaire à eau:

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°C. Le rendement est de l'ordre de 30%.

- Usage: préchauffage des eaux sanitaire. Chauffage des piscines [3].

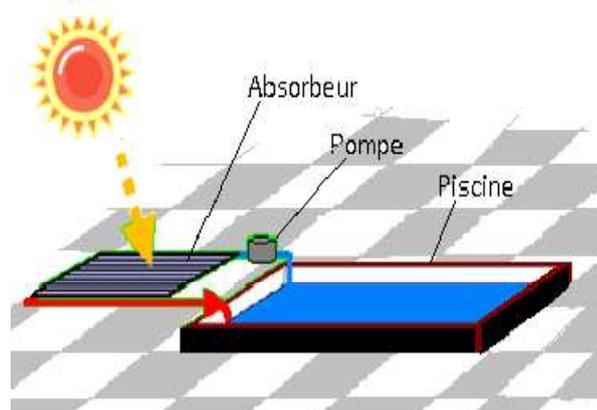


Figure III.2: Chauffage d'une piscine a l'aide d'un capteur sans vitrage [7].

Il est à remarquer qu'à ce niveau thermique le stockage de l'eau chaude est très efficace [3].

3.2. Le capteur solaire à air:

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air, on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur.

Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est l'avantage par rapport aux capteurs à liquide [4].

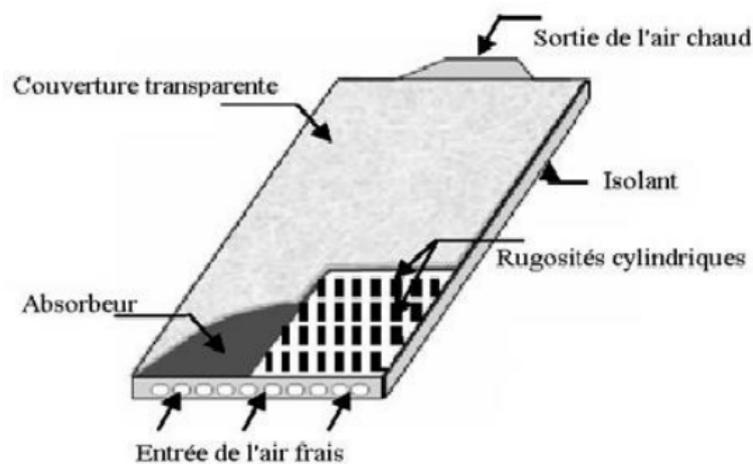


Figure III.3: Capteur plan à air [4].

4. Applications:

Les applications de l'énergie solaire sont nombreuses et variées dans divers domaines tels que [5]:

- La production d'eau chaude sanitaire
- Le chauffage et climatisation des bâtiments
- Le chauffage des piscines et des serres
- Le séchage des produits agricoles des animaux
- Les cuisinières solaires
- Le pompage de l'eau
- Fournaise solaire
- La production d'électricité
- La production de sel par l'évaporation de l'eau de mer
- La distillation de l'eau

- L'éclairage naturel des édifices
 - Réfrigérateur solaire
- * Il s'agit d'utiliser l'énergie solaire, il est donc essentiel d'en connaître quelques notions de gisement solaire [5].



Figure III.4: La pompe solaire.



Figure III.5: La piscine solaire.

4.1. Les distillateurs solaires:

L'eau à distiller se trouve dans un bac à fond noir (Absorbeur). Au-dessus on dispose un vitrage (couverture) incliné. L'eau se condense sur la face inférieure du vitrage. On recueille le condensat dans une rigole placée latéralement. Le rendement moyen est de 4 à 5 litres d'eau distillée par m^2 et par jour [3].

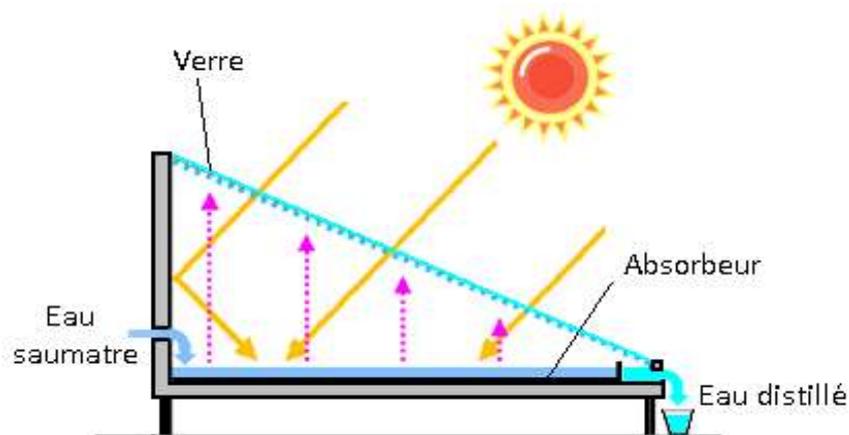


Figure III.6: Distillateur solaire [7].

4.1.1. Les dispositifs de distillation pour le dessalement de l'eau saumâtre:

4.1.1.a. Les distillateurs à simple effet:

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu est le distillateur type bassin. Il existe plusieurs modèles de ce type [6].

- **Distillateur à pente unique:**

Le distillateur à pente unique incliné d'un angle.

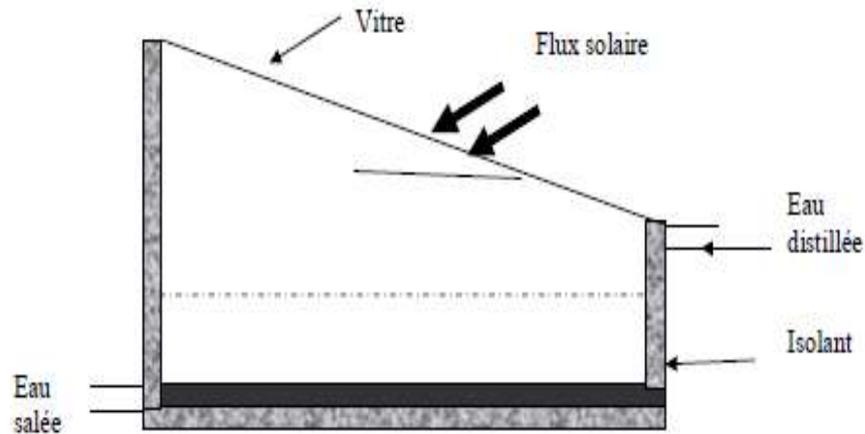


Figure III.7: Distillateur à simple effet avec un seul capteur [6].

- **Distillateur solaire à double pente:**

C'est un distillateur à double capteurs où chacun d'eux est incliné d'un angle, son avantage est d'exposer, un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation.

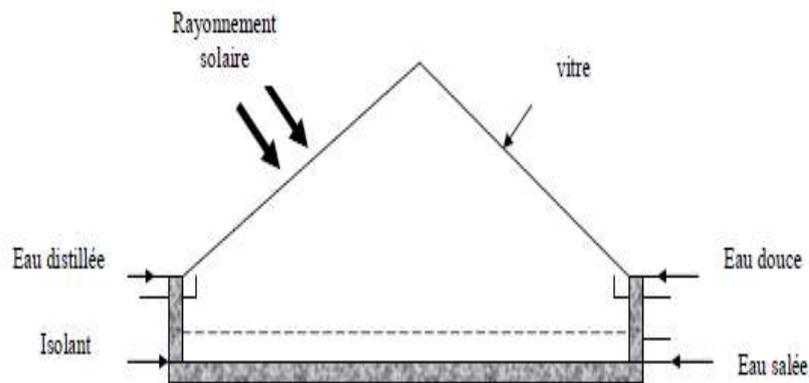


Figure III.8: Distillateur solaire à simple effet avec deux capteurs [6].

- **Distillateur solaire terre- eau:**

C'est un distillateur contenu dans le sol. Il est similaire au distillateur à doubles pentes, sauf que le sol remplace le bassin noir.

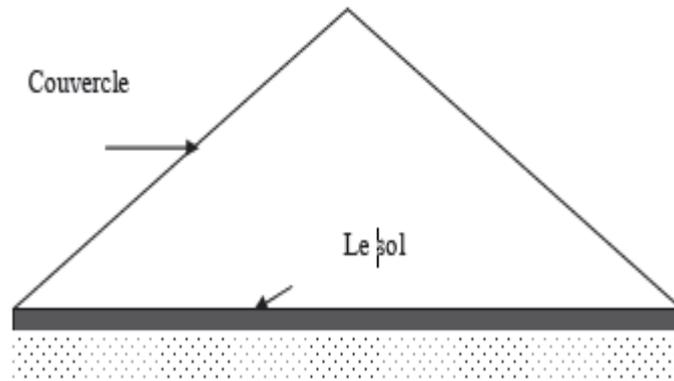


Figure II.9: Distillateur solaire-eau [6].

- **Distillateur sphérique à balayage:**

C'est un distillateur en plexiglas ou autres matériaux plastique transparents reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, une demi-sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part; et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi sphère inférieure qui sert à récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [6].

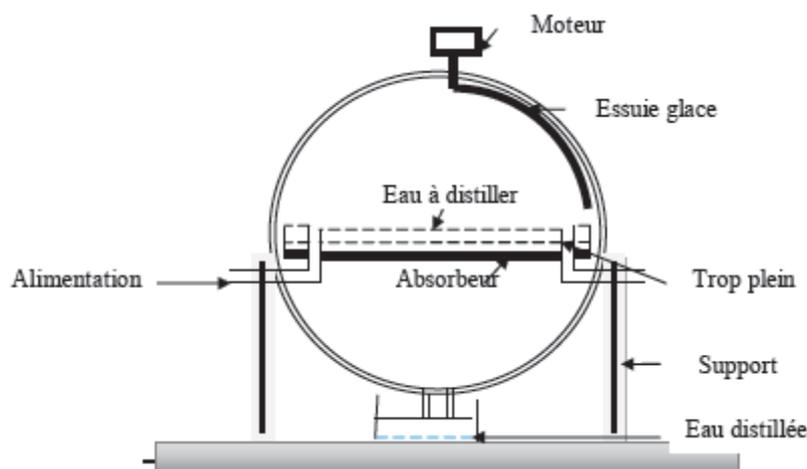


Figure III.10: Distillateur solaire sphérique à balayage [6].

- **Distillateur solaire à film capillaire:**

Le distillateur solaire à film capillaire se compose comme suit:

D'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension inter faciales nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air [6].

Ce distillateur est composé des éléments suivants: le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi

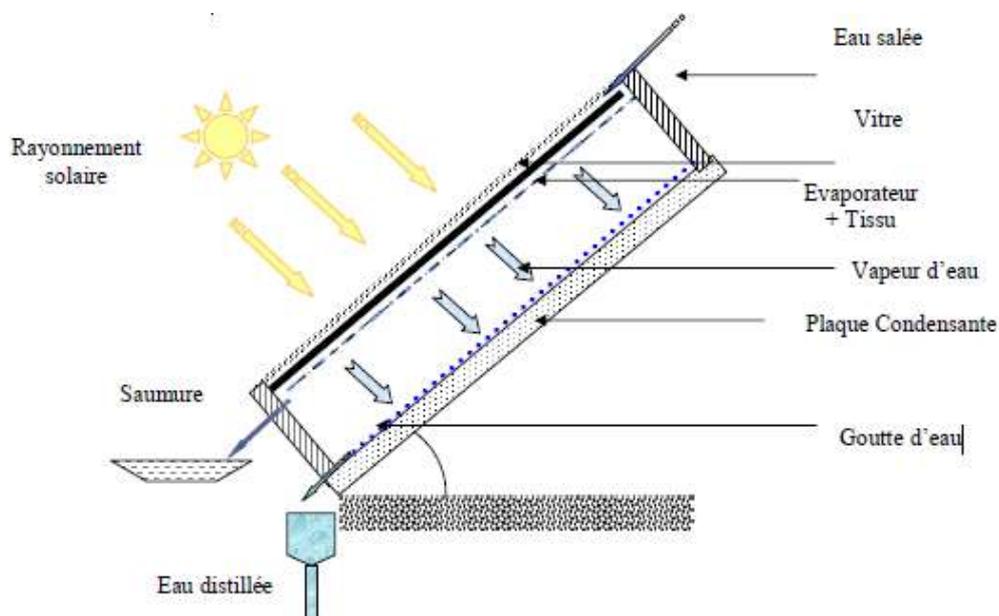


Figure III.11: Distillateur à film capillaire avec un seul étage [6].

4. 1. 1. b. Les distillateurs à multiple effet:

La distillation à multiple effet se produit dans une série d'évaporateurs et utilise le principe de réduction de la pression dans les cellules, qui permet la vaporisation de l'eau de mer, sans fournir de chaleur supplémentaire après le premier effet. L'eau de mer est chauffée dans le premier corps d'évaporation par des tubes alimentés par la vapeur d'une source extérieure. La vapeur émise par ébullition dans ce corps (effet) sert à évaporer l'eau dans le deuxième corps. La vapeur de chauffe condensée dans le premier corps est récupérée sous forme d'eau douce à la sortie du deuxième corps. La consommation d'énergie de la distillation à effet multiple s'exprime par [9] :

$$Q = m_e c_p \Delta T + \frac{m_s \Delta H_{vap}}{n} \quad (1)$$

n : est le nombre d'effets;

m_e et m_s : sont respectivement la masse de l'eau de mer admise et la masse de l'eau douce produite ;

c_p : la chaleur spécifique de l'eau de mer ;

ΔT : l'écart entre la température d'ébullition et la température de l'eau de mer à l'entrée de l'enceinte;

ΔH_{vap} : la chaleur de vaporisation moyenne de l'eau dans les différents corps [9].

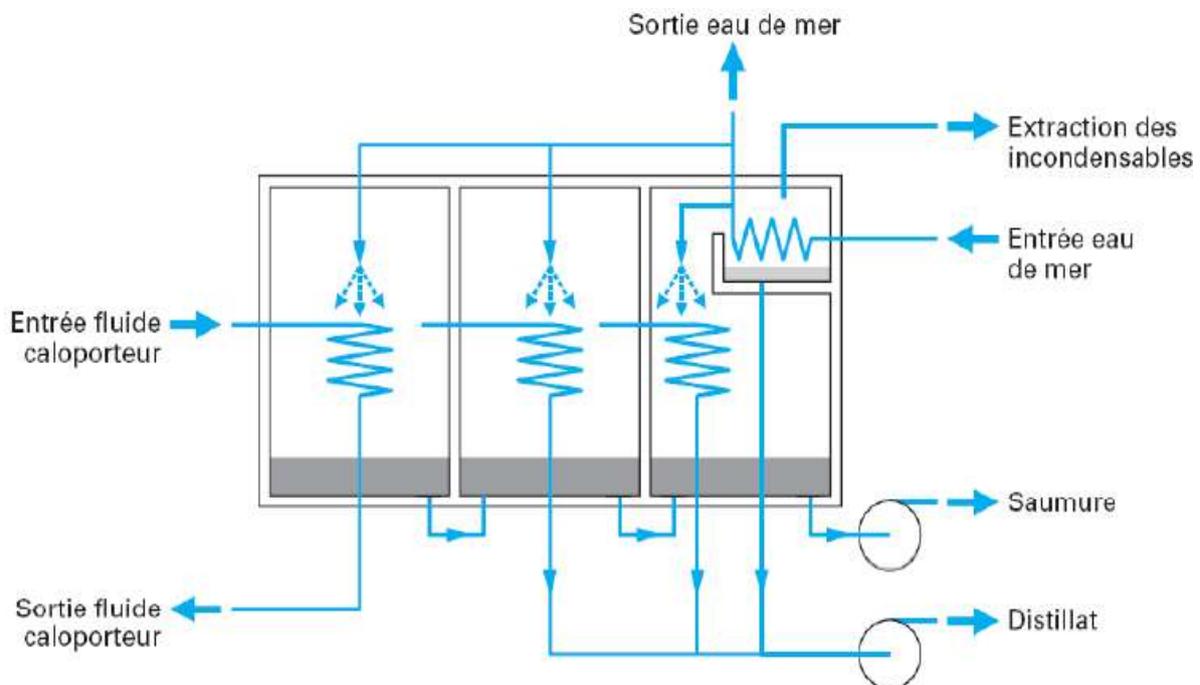


Figure III.12: Distillation à multiple effet [9].

Dans une unité de dessalement par distillation à multiple effet, la vapeur émise peut être comprimée pour produire une chaleur suffisante à l'évaporation. Deux méthodes sont utilisées: la compression mécanique et la thermo-compression. Dans le cas où aucune source extérieure de chaleur n'est disponible, la vapeur produite dans le dernier corps est comprimée dans un compresseur centrifuge et alimente ainsi le serpentin du premier corps. C'est la compression mécanique. Dans le procédé par thermo-compression, un apport de vapeur (30 bars) est requis. Cet apport de vapeur alimente un éjecteur à vapeur qui permet d'aspirer la vapeur produite dans le dernier corps. Les deux vapeurs sont mélangées et sortent de l'éjecteur avec une pression plus élevée. La vapeur obtenue est alors alimentée dans le

serpentin du premier corps. La thermo-compression permet ainsi d'abaisser la consommation d'énergie en récupérant l'enthalpie de vaporisation de la vapeur produite dans le dernier corps. La température maximale de fonctionnement d'une unité de distillation à multiple effet est entre 60 et 63 °C, ce qui réduit la vitesse de corrosion et permet l'utilisation d'aciers inoxydables standards [9].

4.2. Le chauffe-eau solaire:

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné à fournir partiellement ou totalement de l'eau chaude sanitaire (ECS) [10].

On distingue plusieurs types de chauffe-eau solaire, selon le type de l'installation:

- **Le Chauffe-eau solaire monobloc:**

Les Capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et placés à l'extérieur. Ils peuvent être installés en toiture, sur terrasse ou au sol et fonctionnent sans électricité.

Le fluide, plus chaud dans les capteurs que dans le ballon, et donc moins dense, s'élève naturellement jusqu'à ce dernier, situé dans la partie supérieure du chauffe-eau. C'est l'effet thermosiphon.

Ce système est simple et peu coûteux. Mais le ballon se refroidit plus rapidement, même s'il est bien isolé. Il peut servir à préchauffer l'eau qui alimente un équipement classique existant. Ce chauffe-eau est compact et bien adapté à la pose sur supports inclinés, en toiture terrasse. Il se prête moins bien à la fixation sur un toit en pente [12].



Figure III.13: Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact).

- **Le chauffe-eau solaire à “thermosiphon”:**

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce aux différences de température. Pour ce

faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l'art afin de faciliter la thermo circulation. Ce type de chauffe-eau solaire est très simple les risques de pannes sont faibles. Les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées sont excellentes. La circulation naturelle par thermosiphon d'eau résulte de la différence entre la densité de l'eau contenue dans l'absorbeur et celle dans le ballon.

$$p(m) = g \cdot H \cdot (\rho_1 - \rho_2)$$

P : pression motrice due au phénomène de thermosiphon (Pa) ou (mmCE)

g : la gravité =9,81 (m/s²)

H: différence de hauteur entre le milieu du capteur et le milieu du ballon (m).

$\rho_1; \rho_2$: Masse volumique de l'eau en fonction de sa température (Kg/m³).

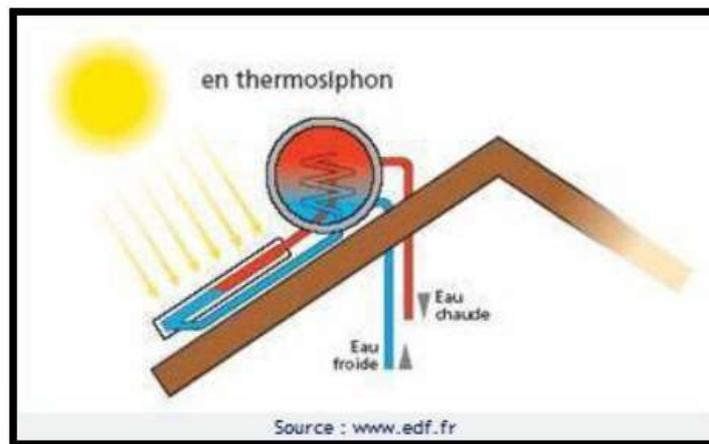


Figure III.14: Le chauffe-eau à thermosiphon [12].

- **Le Chauffe-eau stockeur :**

Le principe du chauffe-eau stockeur (ou auto-stockeur) est très ancien. Il est constitué d'un réservoir disposé dans un coffre isolant et protégé par une couverture transparente.

Pendant la période d'ensoleillement, la température du ballon, recouvert d'un revêtement absorbant noir, s'élève. Pour éviter que celle-ci ne diminue pendant la nuit, le revêtement est généralement du type « sélectif ». Avant que ces revêtements n'existent, il était courant de rencontrer des chauffe-eau munis d'un double vitrage ou d'un volet isolant qui était disposé sur le capteur, hors période d'ensoleillement. Ce type de chauffe-eau est bien adapté aux régions où le risque de gel n'existe pas et où la température ambiante nocturne est très élevée. C'est, en particulier, le cas des régions tropicales.



Figure III.15: Chauffe-eau stockeur [12].

4.3. Les séchoirs solaires:

4.3.1. Les séchoirs solaires directs:

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet de cheminée) (figure III.16.b), ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur (figure III.16.c), du fait de la rusticité des modèles [11].

Ce type de séchage présente deux avantages :

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,
 - Ils sont soumis à un effet de serre, au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement, les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels.
- Parmi les inconvénients de ce type d'appareil, on peut noter la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit, dues à la partie des ultra-violets transmise par la couverture, et au risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

Pour la construction de ces séchoirs, on dispose d'une gamme variée de possibilité. Les matériaux et techniques employés doivent être compatibles avec l'air chaud humide et les produits à sécher. S'il s'agit d'améliorer des procédés traditionnels, ceux-ci fourniront une base de solutions classiques et adaptées [11].

Ces appareils conviennent bien à une production artisanale, dispersée et diversifiée. Leur productivité est assez faible, de l'ordre de 5 à 10 kg de produits frais par mètre carré de claies. Les durées d'exposition, selon les conditions météorologiques locales et les produits à traiter, varient entre quelques heures, et trois à quatre jours.

Les bottes de séchage sont de petites unités, transportables, destinées le plus souvent à la cellule familiale, pour la conservation de ses produits. Des surchauffes peuvent y apparaître du fait de leur faible volume et du faible débit d'air qui les traverse en convection naturelle.

Les séchoirs "serres", sont une version à grande échelle des bottes de séchage; leur utilisation est à envisager lorsqu'il faut sécher une grande quantité de produits frais. Pour être efficaces, les surfaces de séchage doivent être limitées à quelques mètres carrés [11].

4.3.2. Les séchoirs solaires indirects:

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher (figure III.17).

L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé [11].

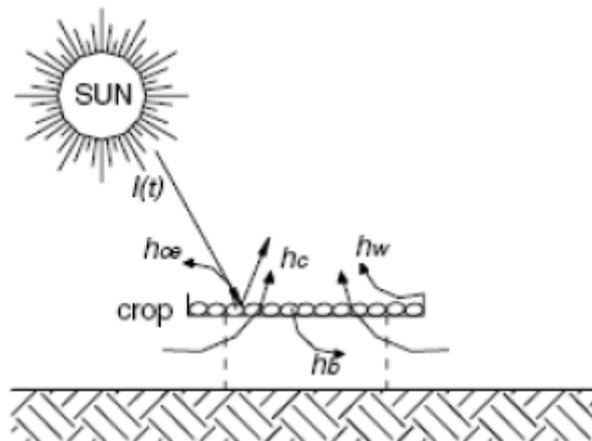


Figure III.16.a: Schéma du séchage solaire en plein air.

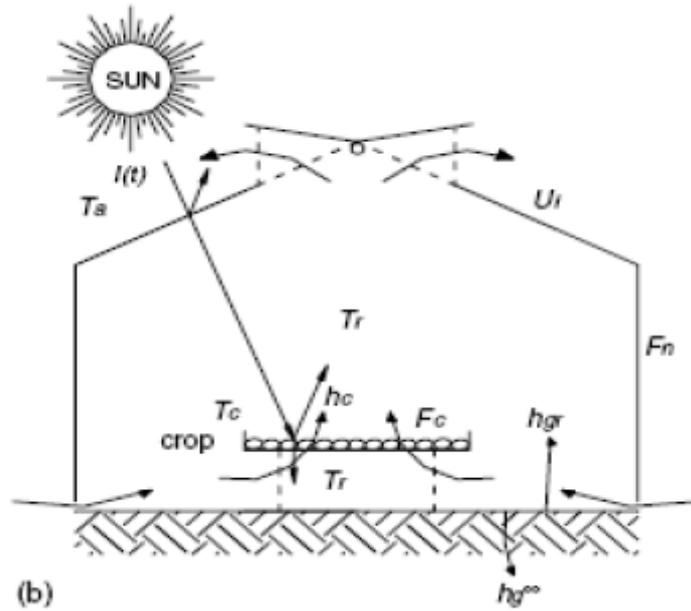


Figure III.16.b: Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle [11].

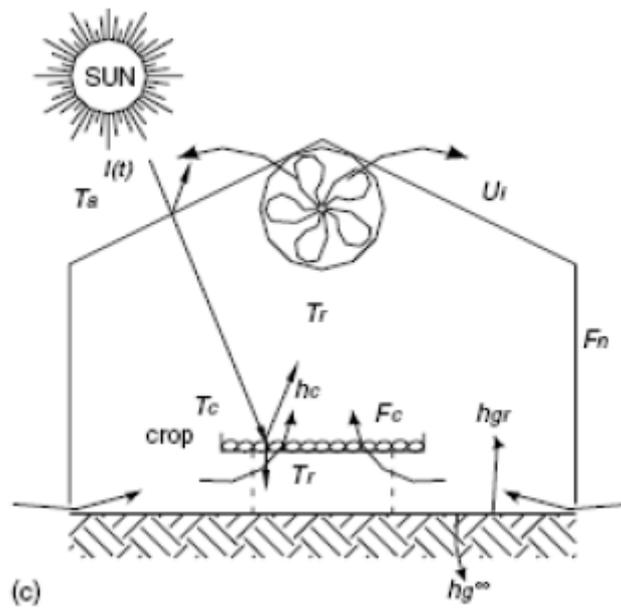


Figure III.16.c: Schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée [11].

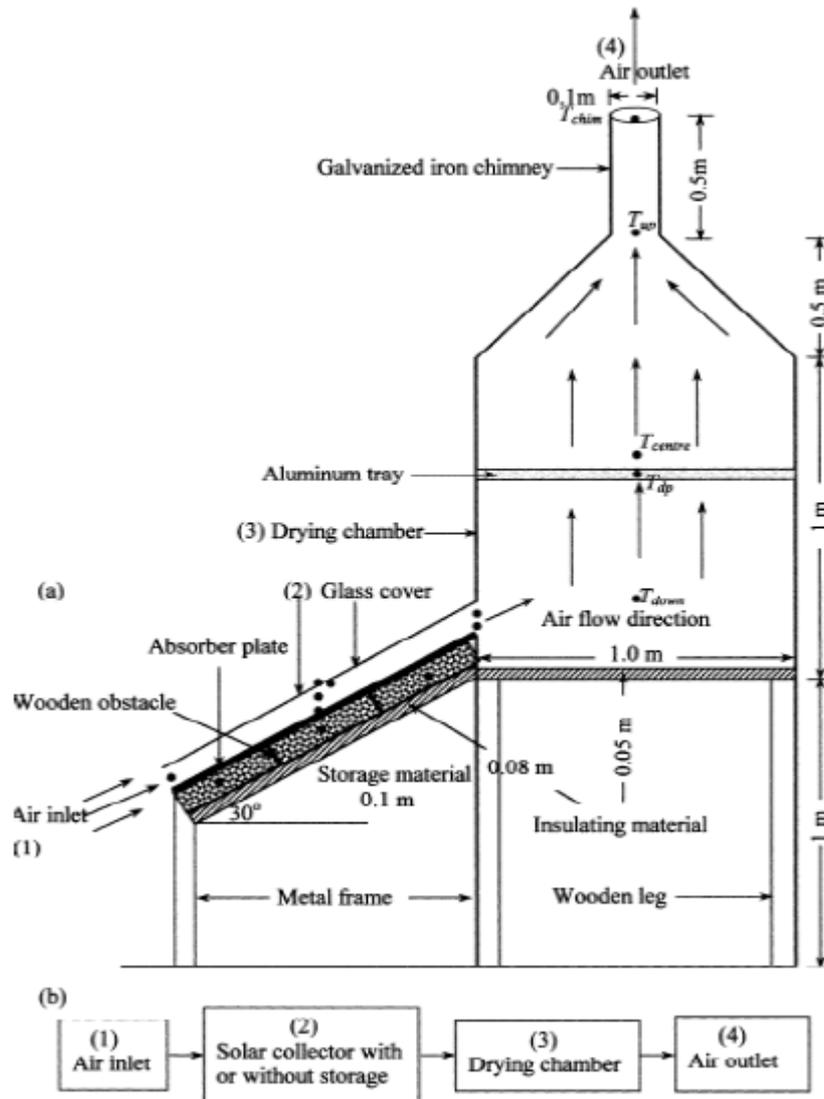


Figure III.17: Schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle [11].

Conclusion :

Les installations solaires peuvent être utilisées dans tous les climats pour produire de l'eau chaude, l'eau distillé et le séchage des produits, mais leurs performances annuelles sont proportionnelles à l'ensoleillement du lieu ou sont installés les capteurs solaires.

Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

6. Références:

- [1] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf>
- [2] Khelifa Abdelkrim; " Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT ". Thèse de doctorat. Université Hadj Lakhdar de Batna, 22/01/2017, Page 28
- [3] Zéghamri Leila, Haida Abdelkarim; " 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, 09/06/2015, Page 21.
- [4] Bouhediba Malika; " Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS) ". Mémoire de Master, Université Hassiba Benbouali de Chef, 2011-2012, Page 8.
- [5] Boualati Yamina; " Investigation sur la performance d'un distillateur solaire ". Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 04/05/2004, page 61.
- [6] Sotehi Oualid; " Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire ". Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 31/01/2009, Page 18.
- [7] Bouragbi Lakhdar; " Etude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire". Mémoire de Magisters, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2008.
- [8] Sotehi Oualid; " Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire ". Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 31/01/2009, Page 19.
- [9] Kaabi A.; " Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre ". Mémoire de doctorat, Université de Constantine, 2014, Page 16.
- [10] Bardjlaghi Zohra, Bahadj Meriem; " Etude, conception et calcul d'une installation solaire thermique de chauffe eau pour application domestique ". Université d'Adrar, Juin 2011, Page 21.
- [11] Boussalia Amar; " Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux". Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, 27/06/2010, Page 14.
- [12] Talamali Donia et Mougari Nour El Islam; " simulation des performances d'un chauffe-eau solaire ". Mémoire de Master ; Université de Boumerdes; 2015/2016; Page 28.

1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus lors de notre étude expérimentale et analysons les données. L'étude comparative des performances électriques et thermiques du notre capteur sont comparés avec celles du capteur photovoltaïque classique.

On va analyser et interpréter les résultats obtenus pour les mesures relevées dans les jours de testes.

2. 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 circuit hydraulique qui assure la circulation (système goutte à goutte) du fluide caloporteur « l'eau » sur la face avant du panneau photovoltaïque pour l'extraction de la chaleur absorbé par les cellules solaires.

2.1. Description technique du système PV/T

- Panneau photovoltaïque « Iso photon I-75/12 ».
- Boîte de jonction qui contient les deux pôles (+ et le -).
- Circuit hydraulique qui assure la circulation (système goutte à goutte) du fluide caloporteur « l'eau » sur la face avant du panneau photovoltaïque.

2.2. Dimensions du capteur solaire hybride PV/T

Le tableau suivant présente les dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude expérimentale :

Tableau IV.1: Dimensions du capteur solaire hybride PV/T

Longueur	1224,0 mm
Largeur	545.0 mm
Epaisseur	39.5 mm

3. Banc d'essai

L'étude expérimentale a pour but de déterminer l'influence de la température sur la puissance électrique produite par le panneau PV constituant le capteur hybride. Pour cela, nous avons utilisé trois panneaux PV de mêmes caractéristiques montés sur une seule structure, le premier panneau est 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 hybride et nous avons étudié le comportement des trois modules.



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

3.1. Panneau photovoltaïque

Panneau photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12 ».



Figure IV.2 : Photos du panneau photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12 »

Tableau IV.2 : 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

3.2. 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

3.3. Thermocouple de type « K »

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

- Température de la face arrière du premier panneau (utilisé comme un témoin)
- Température du deuxième panneau (sans nettoyage)
- Température du troisième panneau constituant le capteur hybride.
- Température ambiante.



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

3.4. Capteur de courant et capteur de tension

Un capteur de courant pour mesurer le courant électrique à la sortie du panneau PV et le capteur hybride.

Un capteur de tension pour mesurer la tension aux bornes du panneau PV et le capteur hybride.

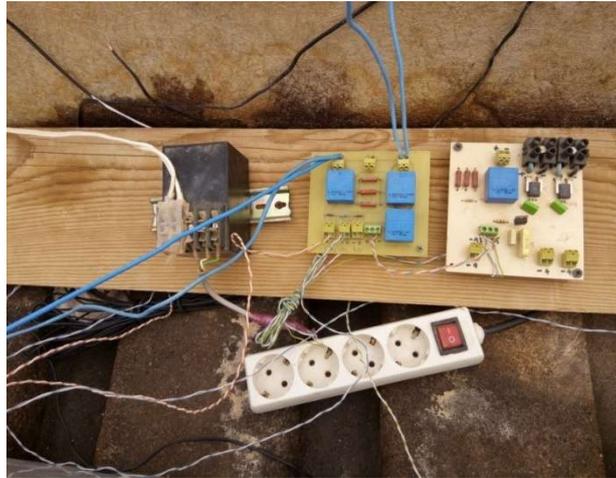


Figure IV.5: Photo du capteur de courant et capteur de tension

3.5. Une charge

Deux lampes à courant continue de type : 12 Volt, DC, Compact Fluorescent Bulb 30 Watt.



Figure IV.6: Photo de la lampe à courant continue

3.6. Système de refroidissement :

Circuit hydraulique qui assure la circulation (système goutte à goutte) du fluide caloporteur « l'eau » sur la face avant du panneau photovoltaïque.



Figure IV.7: Photo du Circuit hydraulique de refroidissement

4. Caractéristiques géographique et météorologique du site d'Adrar :

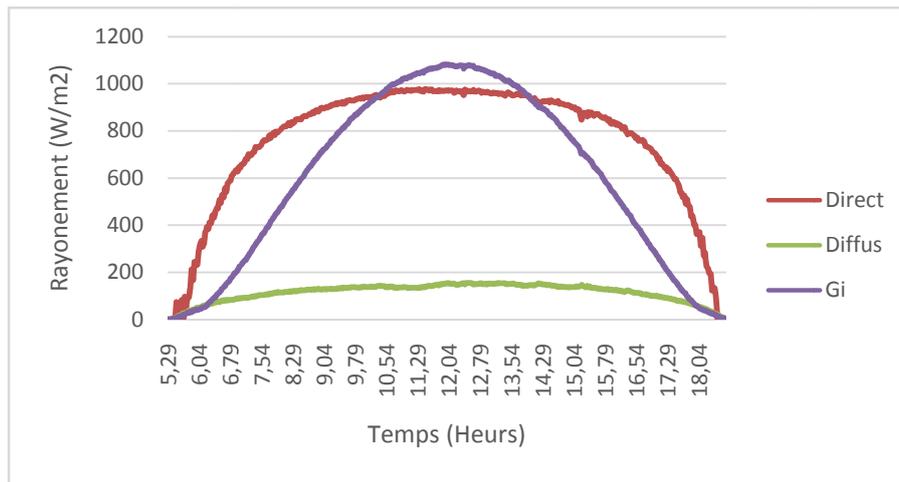
Tableau IV.3: Données géographiques du site d'Adrar

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

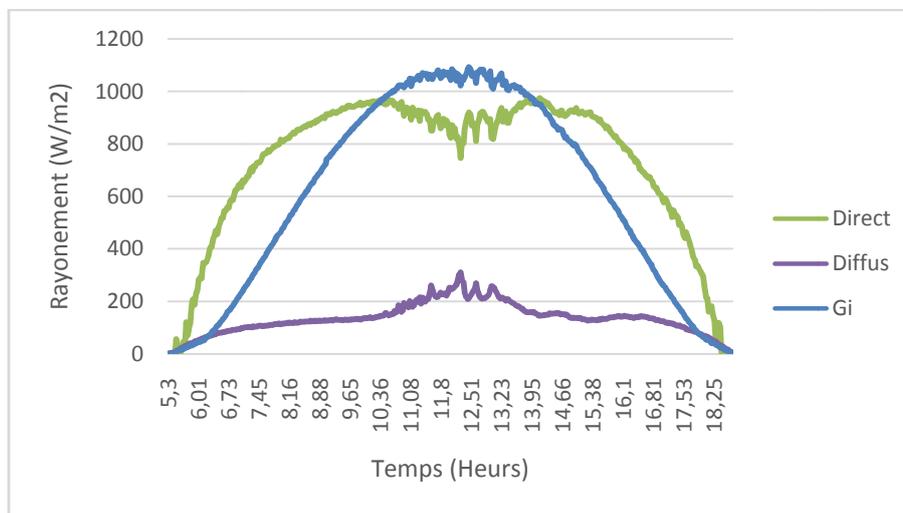
5. Résultats et Discussions

5.1. La variation de l'éclairement globale

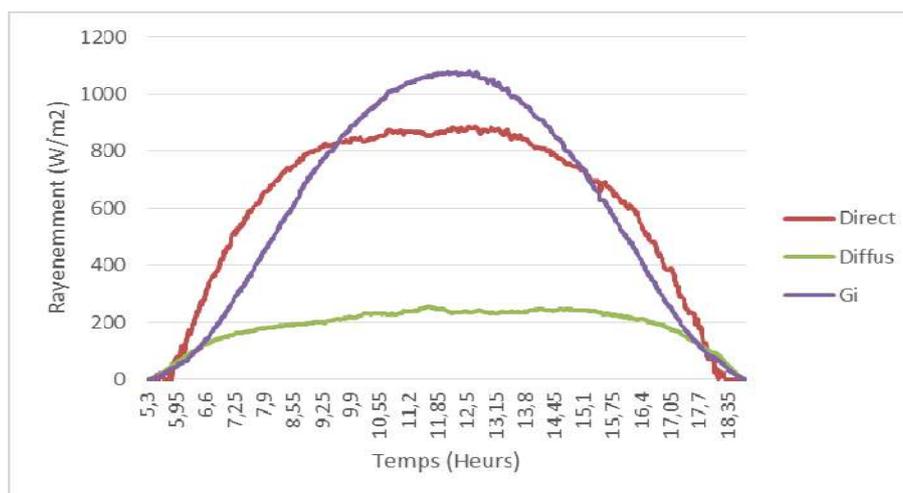
La figure IV.8 montre l'allure du rayonnement solaire direct, diffus et global incliné pendant les journées du 09/05/2019 au 11/05/2019.



09/05/2019



10/05/2019



11/05/2019

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

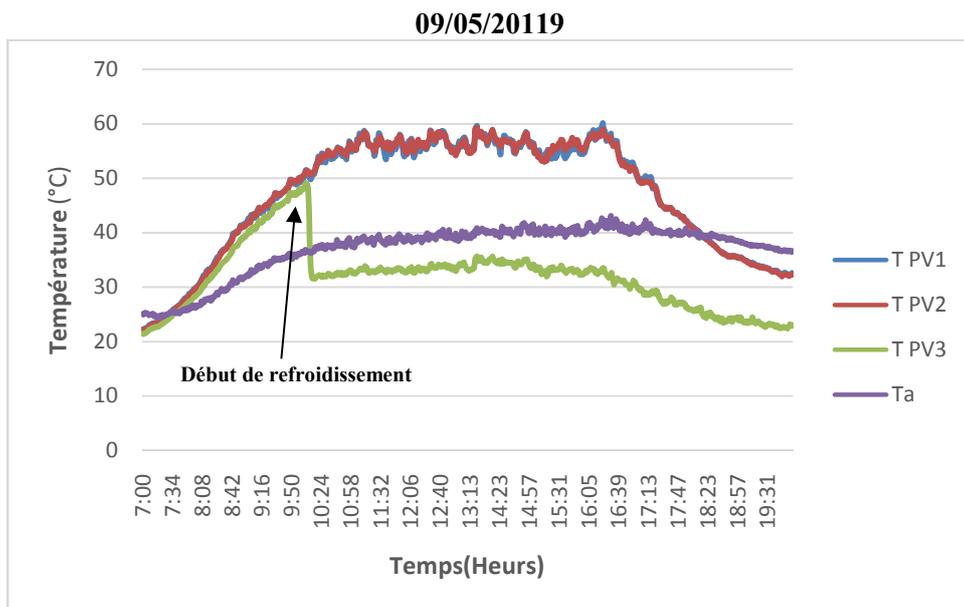
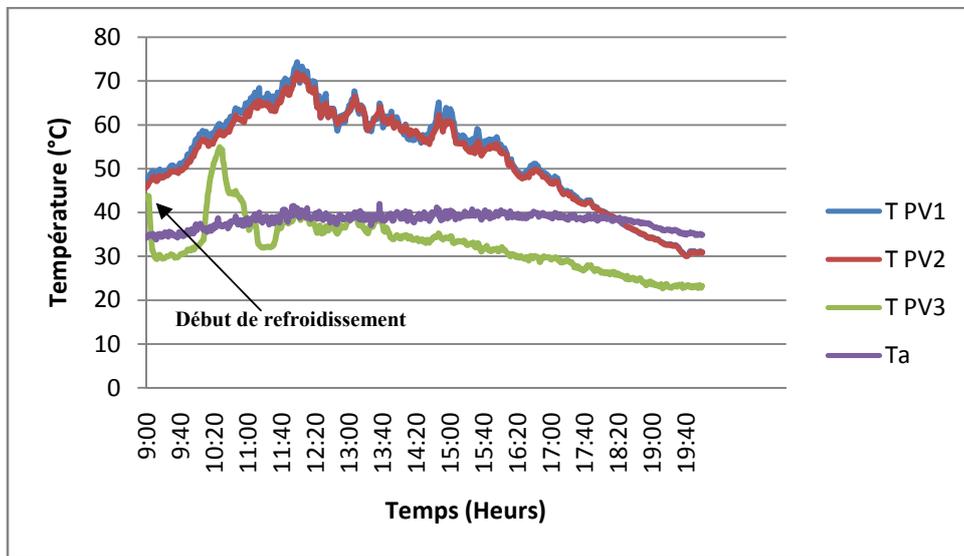
Avec :

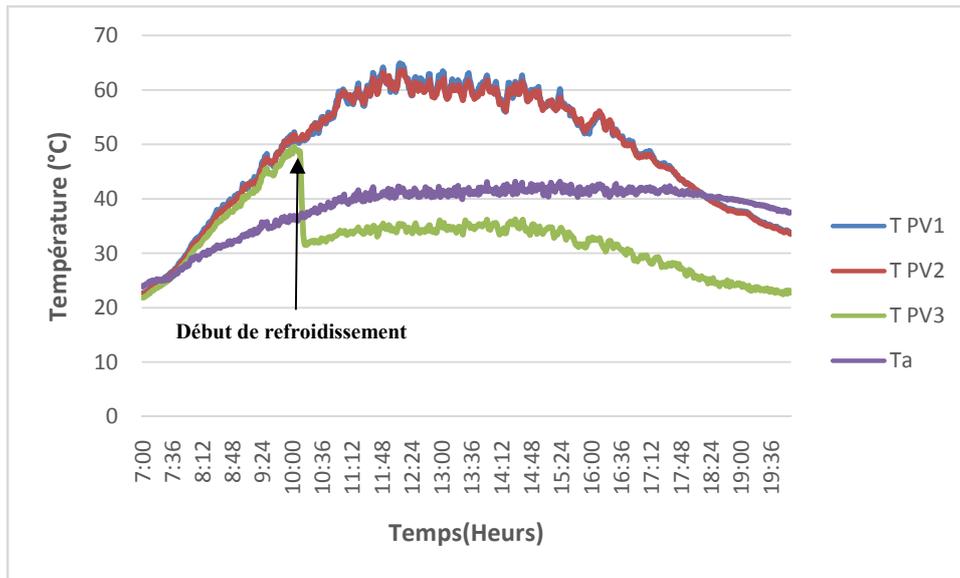
- Direct : rayonnement solaire direct.
- Diffus : rayonnement solaire diffus.
- Gi : rayonnement solaire global incliné.

On remarque que la courbe de l'éclairement solaire est lisse car le ciel pendant la journée est clair et l'éclairement dépasse 1000w/m^2 à 12 :00h.

5.2. Distribution de la température dans le capteur Photovoltaïque PV/T

Nous avons mesuré la température au niveau de la face arrière du chaque panneau PV1, PV2, PV3. La figure IV.9 montre la distribution de la température en fonction du temps.





11/05/2019

Figure IV.9: La température expérimentale dans les différents panneaux : T PV1 (panneau utilisé comme un témoin) et T PV2 (panneau sans nettoyage), panneau PV3 du capteur hybride PV-T et la Température ambiante Ta.

En remarque dans la figure IV.9 du 09/05/2019 à 10:00h que le débit de l’eau (fluide caloporteur) qui circule sur la face avant du panneau du capteur PV-T n’est pas stable (réseau public) qui a créé un problème dans le refroidissement du panneau et la température T PV3 augmente par plus de 20°C.

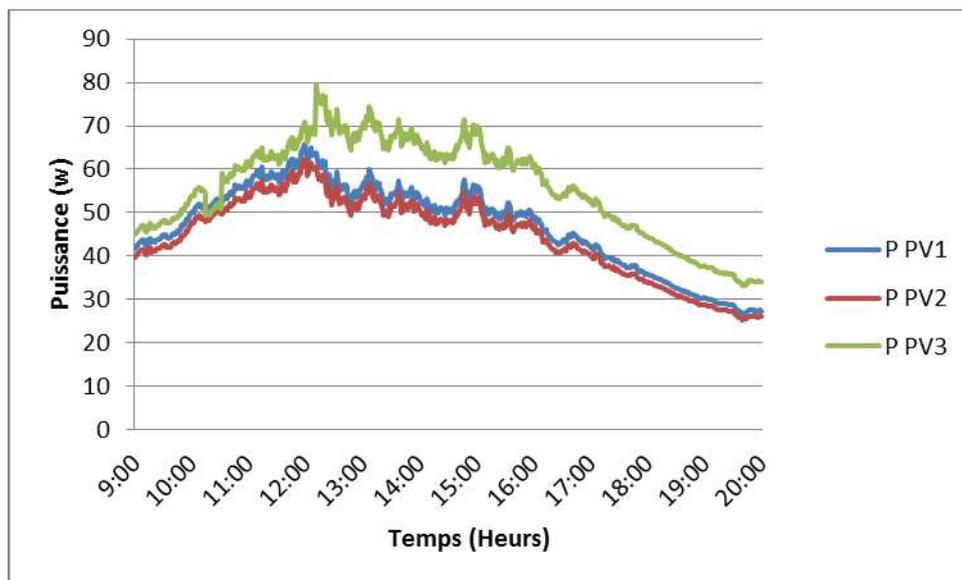
Tableau IV.4: Comparaison entre les températures maximales des trois panneaux et la température ambiante

	09/05/2019	10/05/2019	11/05/2019
Temps	11 :59	13 :56	12 :13
MaxTpv 1 (°C)	74.29	60.10	64.85
MaxTpv 2 (°C)	71.87	59.23	63.60
MaxTpv 3 (°C)	54.92	49.09	49.54
Ta (°C)	41.96	43.09	43.10
TPV 2 – TPV1 (°C)	-2.42	-0.85	-1.25
TPV 3– TPV1 (°C)	-19.37	-11.01	-15.31
TPV 3– TPV2 (°C)	-16.95	-10.14	-14.06
Ta- TPV2 (°C)	-32.33	-17.01	-21.75
Ta- TPV2 (°C)	-29.91	-16.14	-20.5
Ta- TPV3 (°C)	-12.96	-6	-6.44

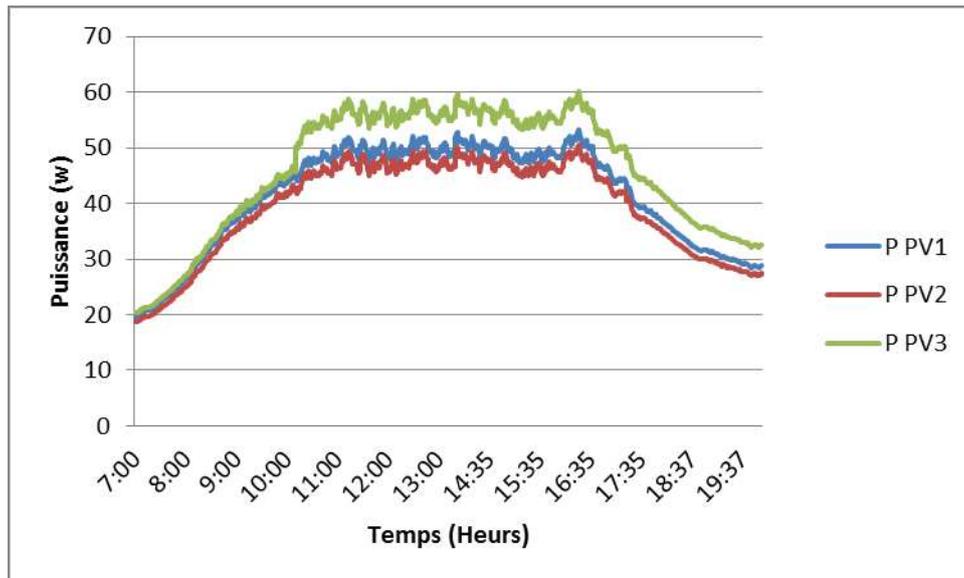
On constate que :

- Le **09/05/2019** : la température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 74.29 °C, la température au niveau du panneau PV2 est 71.87°C et la température au niveau du panneau PV3 est 54.92°C avec une différence $TPV3 - TPV1 = -19.37^\circ\text{C}$.
- Le **10/05/2019** : la température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 60.10 °C, la température au niveau du panneau PV2 est 59.23°C et la température au niveau du panneau PV3 est 49.09°C avec une différence $TPV3 - TPV1 = -11.01^\circ\text{C}$.
- Le **11/05/2019** : la température maximale au niveau du panneau PV1 atteinte 64.85 °C, la température au niveau du panneau PV2 est 63.60°C et la température au niveau du panneau PV3 est 49.54°C avec une différence $TPV3 - TPV1 = -15.31^\circ\text{C}$.

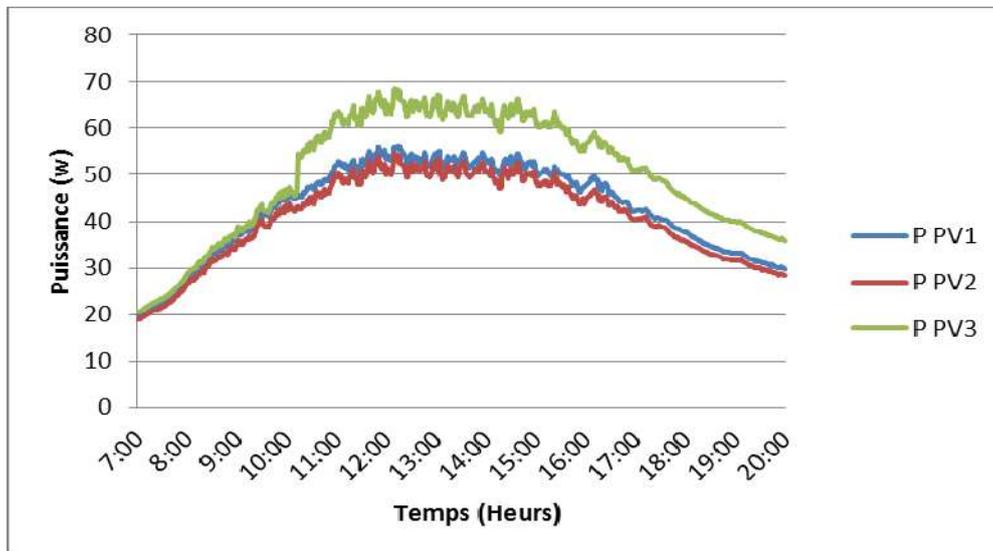
Le point maximum de température pour les différents panneaux est atteint entre 12:00h et 14:00h.



09/05/2019



10/05/2019



11/05/2019

Figure IV.10: Evolution de la puissance des trois panneaux P PV1, P PV2 et P PV3.

Tableau IV.5: Comparaison entre les puissances maximales des trois panneaux.

		09/05/2019	10/05/2019	11/05/2019
Temps		11 :59	13 :56	12 :13
MaxPpv 1	(W)	65.74	53.19	65.29
MaxPpv2	(W)	62.43	50.50	54.50
MaxPpv3	(W)	79.40	60.10	68.74
PPV 2 – PPV1	(W)	-3.31	-2.69	-10.79
PPV 3– PPV1	(W)	13.66	6.91	3.45
PPV 3– PPV2	(W)	16.97	9.6	14.24

On constate que :

- Le **09/05/2019** : la puissance maximum au niveau du panneau PPV1 atteinte 65.74, la puissance au niveau du panneau PPV2 est 62.42 et la puissance au niveau du panneau PPV3 est 79.40°C avec une différence $PPV3 - PPV1 = 13.66$.
- Le **10/05/2019** : la puissance maximum au niveau du panneau PPV1 atteinte 53.19, la puissance au niveau du panneau PPV2 est 50.50 et la puissance au niveau du panneau PPV3 est 60.10 avec une différence $PPV3 - PPV1 = 6.91$.
- Le **11/05/2019** : la puissance maximum au niveau du panneau PPV1 atteinte 65.29, la puissance au niveau du panneau PPV2 est 54.50 et la puissance au niveau du panneau PPV3 est 68.74 avec une différence $PPV3 - PPV1 = 3.45$.

En remarque que la puissance produite du panneau PV3 du capteur PV-T est supérieur a P PV1 et P PV2 et la puissance produite du panneau PV1 est supérieur à PV2.

6. Conclusion

Nous avons proposé un système de cogénération basé sur les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques destiné à approvisionner en énergie électrique et thermique et aussi une solution pour diminuer la température du panneau PV et l'amélioration de leur rendement.

En remarque que :

- La température du panneau T PV3 (panneau utilisé dans le capteur hybride) du capteur PV-T est inferieur à la température des deux autres panneaux T PV1 (panneau utilisé comme un témoin) et T PV2 (panneau utilisé au cours des testes sans nettoyage) et la température du panneau T PV2 est inferieur à la température du panneau T PV1.
- La puissance produite par le panneau PV3 du capteur PV-T est supérieur à la puissance produite par les deux autres panneaux PV1 et PV2, par contre la puissance produite par le panneau PV1 est supérieur à la puissance produite par le panneau PV2.

Les résultats obtenus montrent que le refroidissement du panneau diminué leur température de fonctionnement et augmente leurs puissance et par contre les dépôts de poussière sur le panneau diminué leur température de fonctionnement et aussi diminué leurs puissance. Ces résultats permettent de penser que le système de cogénération à base des nouveaux capteurs hybrides PV-T constitue un système énergétique complet pour l'alimentation en énergie électrique.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié le capteur hybride PV-T expérimentalement à travers la réalisation d'un prototype à l'unité de recherche URER-MS. Adrar. Le système PV-T est constitué par un panneau photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12 » et un système de refroidissement composé par un circuit hydraulique qui assure la circulation (système goutte à goutte) du fluide caloporteur « l'eau » sur la face avant du panneau photovoltaïque pour l'extraction de la chaleur absorbé par les cellules solaires et l'augmentation de son efficacité électrique.

Le but principal de ce travail était la réalisation, l'installation et l'expérimentation d'un capteur hybride pour étudié l'influence de la température sur les propriétés thermiques et électriques du capteur et la et enfin comparaison avec les performances des modules PV sans refroidissement.

En remarque que :

- La température du panneau T PV3 (panneau utilisé dans le capteur hybride) du capteur PV-T est inférieur à la température des deux autres panneaux T PV1 (panneau utilisé comme un témoin) et T PV2 (panneau utilisé au cours des testes sans nettoyage) et la température du panneau T PV2 est inférieur à la température du panneau T PV1.
- La puissance produite par le panneau PV3 du capteur PV-T est supérieur à la puissance produite par les deux autres panneaux PV1 et PV2, par contre la puissance produite par le panneau PV1 est supérieur à la puissance produite par le panneau PV2.

Les résultats trouvés expérimentalement montrent l'avantage du système PV-T et l'influence du refroidissement sur les caractéristiques thermiques et électriques du panneau constituant le capteur hybride et l'augmentation de leur production et de leurs efficacité globale par contre les dépôts de poussière sur le panneau diminué leur température de fonctionnement et aussi diminué leurs production et de leurs efficacité.

Les travaux futurs qui pourraient être envisagés à partir des résultats obtenus de cette recherche sont :

- Etude, réalisation et expérimentation d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique PV-T avec le refroidissement par un fluide caloporteur qui circule dans tuyauterie sous forme de serpentin.
- Une analyse technico-économique des différents capteurs hybride photovoltaïque-thermique PV-T.

Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïques par l'installation d'un système de refroidissement par l'eau des modules PV

Résumé: Le module solaire photovoltaïque génère de l'électricité en recevant le rayonnement solaire. La température des modules photovoltaïques augmentent lorsqu'ils absorbent les rayonnements solaires, ce qui diminue leur efficacité. Cet effet indésirable peut être partiellement évité en utilisant un système de refroidissement des modules PV. Une telle unité s'appelle capteur photovoltaïque - thermique (PV-T) ou capteur hybride (PV-T).

L'objectif de ce travail en premier partie est de concevoir un système de refroidissement par l'eau de la face avant du module solaire pour augmenter son efficacité électrique et extraire l'énergie thermique et qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur et en deuxième partie, l'étude de l'influence de la température sur les caractéristiques thermique et électrique du capteur et la détermination des températures aux niveaux des différentes parties et enfin comparer ces performances avec un module PV sans refroidissement.

Mots clés : Capteur solaire, modules photovoltaïque, thermique, système hybride, rendement thermique.

ملخص : يولد اللوح الشمسي الكهربائي عن طريق تلقي الإشعاع الشمسي. تزداد درجة حرارة الألواح الكهروضوئية عند امتصاصها الأشعة الشمسية ، مما يقلل من كفاءتها. يمكن تجنب هذا التأثير غير المرغوب فيه جزئياً باستخدام نظام تبريد اللوح الشمسي. يسمى هذا النظام بلاقط تنائي الاستعمال الكهروضوئي- الحراري (PV-T) أو نظام هجين (PV-T).

لهدف من هذا العمل في الجزء الأول هو تصميم نظام لتبريد المياه من مقدمة الوحدة الشمسية لزيادة كفاءتها الكهربائية واستخراج الطاقة الحرارية والتي ستولد الكهرباء في نفس الوقت و الحرارة وفي الجزء الثاني، دراسة تأثير درجة الحرارة على الخصائص الحرارية والكهربائية لهذا الاقط وتحديد درجات الحرارة على مختلف مستوياته وأخيراً مقارنة هذه النتائج بخصائص لوح PV بدون تبريد.

الكلمات المفتاحية : لاقط حراري ، ألواح كهروضوئية ، الحرارية ، نظام هجين ، الكفاءة الحرارية.

Abstract: The photovoltaic solar module generates electricity by receiving solar radiation. The temperature of photovoltaic modules increases when they absorb solar radiation, which decreases their efficiency. This undesirable effect can be partially avoided by using a PV module cooling system. Such a unit is called photovoltaic-thermal sensor (PV-T) or hybrid sensor (PV-T).

The objective of this work in the first part is to design a system of water cooling of the front of the solar module to increase its electrical efficiency and extract heat energy and that will generate electricity at the same time and in the second part, the study of the influence of the temperature on the thermal and electrical characteristics of the sensor and the determination of the temperatures at the levels of the different parts and finally compare these performances with a PV module without cooling.

Key words: Solar collector, photovoltaic modules, thermal, hybrid system, thermal efficiency.