

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

**GADRI OUSSAMA**

**YAICHI SAID**

Thème :

# Étude et analyse d'un système photovoltaïque

Soutenu publiquement

Le : 12/06/2022

Devant le jury :


M <sup>r</sup> BENAOUADJ Mahdi	MCB	Président	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> BENMIR Abdelkader	MCB	Examineur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> DJAFOUR Ahmed	Professeur	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> Kouache Ahmed Zouhir	Doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022



## DÉDICACES

*A mon Très Cher père Yacine et ma très Chère Mère  
Hakima pour leur sacrifice, et qui n'ont jamais cessé  
de m'encourager que Dieu me les garde*



*A Ma très chère sœur (Chaima)*



*A Mes très frères  
(Abd El ouadoud, Med Mekki, Bachir, Haroun)  
Aussi*

*À mes chers, Ouahid et Meriam, et les petits,  
Nassim, Fares et Dorsaf*


*A mon amie Nadjet*



*A Ma chères familles **Gadri et Adi***



*Pour nos très chers amis et camarades  
A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à  
maintenant surtout nos enseignants du département  
génie électrique Ouargla*



G. OUSSAMA





## *Dédicaces*

*Elle s'est sacrifiée pour moi, et elle n'a épargné aucun effort pour toujours rendre ma mère bien-aimée heureuse Fatima.*

*Nous marchons sur les chemins de la vie, et celui qui contrôle notre esprit reste sur tous les chemins que nous empruntons ; Son bon visage et ses bonnes actions, il n'a pas lésiné sur moi toute sa vie cher père Ahmed.*

*À mes sœurs et amis et à tous ceux qui se tenaient à côté de moi et m'ont aidé avec tout ce qu'ils avaient et de bien des façons.*

*Je vous présente cette recherche et j'espère que vous serez satisfait*

*Y. Saïd*

# REMERCIEMENTS

*Avant tout nous tenons à remercier ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant Ces longues années d'étude.*

*Nous tenons à remercier vivement Prof. Djafour Ahmed, notre encadreur, qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.*

*Et Nous voudrions remercier spécialement Mr. Kouache Ahmed Zouhir,*

*Co-encadreur de cette mémoire, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et sa qualité humaine.*

*Nous tenons également à remercier M<sup>r</sup> BENAOUADJ Mahdi pour nous avoir fait l'honneur de présider*

*Le jury de cette mémoire.*

*Nos vifs remerciements aussi M<sup>r</sup> BENMIR Abdelkader pour avoir accepté d'être*

*Examineur de ce travail.*

*Et tous les enseignants de département de Génie électrique.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, Qui nous ont toujours soutenue et encouragée*

*Au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Merci à tous.*

**LISTE DES ACRONYMES**

LES ACRONYMES	LES DEFINITIONS
SIA	Silicium amorphe
STC	Conditions d'essai standard
PMU	L'unité de gestion de l'alimentation
LAGE	Laboratoire de génie électrique,
PEM	Membrane d'échange de protons
NOCT	Nominal Operating Cell Température

## LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Définitions	Unités
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxygène	[-]
<b>H<sup>+</sup></b>	Protons	[-]
<b>e<sup>-</sup></b>	Électron	[-]
<b>H<sub>2</sub>O</b>	L'eau	[-]
<b>H<sub>2</sub></b>	Hydrogène	[-]
<b>ΔG</b>	Changement d'énergie libre	[J]
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant de saturation de la diode	[A]
$\frac{K \cdot T_c}{q}$	Potentiel thermodynamique	[J]
<b>V<sub>co</sub></b>	Tension du circuit ouvert	[V]
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit	[A]
<b>N<sub>s</sub>, N<sub>p</sub></b>	Nombre de cellules	[-]
<b>ID</b>	Courant de saturation de la diode.	[A]
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo courante, ou courant généré par l'éclairement (G)	[A]
<b>T<sub>c</sub></b>	Température de jonction	[K]
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série	[Ohm]
<b>R<sub>sh</sub></b>	Résistances shunt	[Ohm]
<b>I<sub>0</sub></b>	Courant de diode	[A]
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo courant créer par la cellule	[A]
<b>K</b>	Constant de Boltzmann	[J K <sup>-1</sup> ]
<b>A</b>	Facteur d'idéalité de la jonction	
<b>PV</b>	Photovoltaïque	[-]
<b>ΔG</b>	Energie libre de Gibbs	[J]
<b>Q</b>	Le débit d'hydrogène	[l/h]
<b>R<sub>b</sub></b>	Trigonométrie sphérique	[Rad]
<b>GH</b>	L'irradiation globale horizontale	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>Gr</b>	La composante réfléchie de l'irradiation solaire	
<b>H<sub>rt</sub></b>	Rayonnement réfléchi	[W/m <sup>2</sup> ]

<b>Hdt</b>	Rayonnement diffusé à travers un ciel clair sur une surface inclinée	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>H<sub>dt</sub></b>	Rayonnement diffusé à travers un ciel clair sur une surface inclinée	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>Hbt</b>	Rayonnement direct transmis pendant une atmosphère pure sur une surface inclinée	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>Htt</b>	Rayonnement total reçu (incident) sur une surface inclinée	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>TL</b>	Coefficient de turbulence de l'air	
<b>Ma</b>	Masse d'air	[m <sup>3</sup> ]
<b>Qa</b>	Rayonnement total hors de l'atmosphère.	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>TSM</b>	Le Temps Solaire Moyen	[h]
<b>H</b>	Hauteur angulaire du soleil.	[Km]
<b>Δ</b>	Déclinaison du soleil	[Rad]
<b>TL</b>	Temps Légal	[h]
<b>Λ</b>	Longitude du lieu	[Km]
<b>ΔL</b>	Correction de l'équation du temps	[h]
<b>TU</b>	Temps Universel	[h]
<b>TSV</b>	Temps Solaire Vrai	[h]
<b>Tmax</b>	Température maximum	[C°]
<b>Tmin</b>	Température minimale	[C°]

# **Sommaire**



<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE -I- Gisement solaire</b> .....	1
I.1 Introduction .....	3
I.2 Energie solaire en Algérie .....	3
I.3 Spécification du site d’Ouargla .....	5
I.4 Principes de calcul de l’énergie solaire.....	6
I.4.1 Position du soleil .....	6
I.4. 2 Déclinaison solaire.....	7
I.4. 3 Angle horaire ( $\omega$ ).....	8
I.4. 4 Azimut h.....	9
I .4. 5 la hauteur du soleil (h) .....	10
I.4. 6 Temps solaire .....	10
I.4 .6 .1 Le Temps salaria Vrai (TSV) .....	10
I.4 .6. 2 Le Temps Solaire Moyen (TSM).....	10
I.4 .6.3 Temps Universal (TU) .....	10
I.4.6.4 L’équation du Temps (Et).....	11
I.5. Modèle de calcul de l’irradiation globale sur une surface incliné .....	11
I.6 Modèle de calcul de l’inclinaison optimale.....	12
I.7 Conclusion.....	13
<b>CHAPITRE -II- Systèmes solaires photovoltaïques</b> .....	<b>14</b>
II.1 Introduction.....	15
II.2 La production photovoltaïque .....	15
II.3 Les semi-conducteurs .....	17
II.4 Principe de fonctionnement des cellules solaires.....	17
II.5 Différentes technologie.....	19
II.5.1 Le silicium .....	19
II.5.1.1 Silicium monocristallin .....	19
II.5.1.2 Le silicium multicristallin (Polycristallin) .....	19
II.5.1.3 Les couches minces .....	20
II.5.1.4 Cellules organiques et plastique .....	21
II.6 Grandeurs caractéristiques d’une cellule solaire.....	21
II.6.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) .....	22
II.6.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).....	22
II.6.3 Puissance optimale.....	24

II.6.4 Facteur de forme FF .....	24
II.6.5 Le rendement .....	25
II.7 Association des cellules .....	25
II.7.1 Association des cellules en série : .....	25
II.7.2 Association de cellules en parallèle : .....	26
II.8 Modélisation et caractérisation d'une module photovoltaïque .....	26
II.8.1 Modèle a une diode .....	27
II.8.2 Modèle à deux diodes .....	28
II.8.2 simulation de la caractéristique du modèle NeMo®54P.....	29
II.9 Caractéristiques électriques.....	30
II.9 .1 Courbes de la caractéristique du module NeMo®54P :.....	31
B. Courbe de la caractéristique P-V.....	31
II.9.2 Influence d'éclairement sur le module.....	32
II.9.3 Influence de la température sur le module NeMo®54P.....	33
II.10 Conclusion .....	35
<b>CHAPITRE -III- Analyse expérimentale sur la production d'hydrogène vert .....</b>	<b>36</b>
III.1 Introduction.....	37
III.2 Intégration des modules PV avec l'électrolyseur.....	37
III.3 Electrolyseurs PEM.....	37
III.4. Description de système.....	38
III.5 Description technique de l'unité de gestion de l'alimentation PMU .....	40
III.6. Résultats des expériences .....	40
III.6.1 La température et l'éclairement.....	40
III.6.2 Résultats de batterie .....	43
III.6.3 Electrolyseur.....	45
III.6.4 Production d'hydrogène .....	46
III.6.5 Convertisseur DC/DC .....	46
III.6.6 Convertisseur DC/AC .....	49
III.6.7 Volume d'Hydrogène.....	51
III.6.8 Le rendement de l'électrolyseur .....	51
III.7 Améliore de volume d'hydrogène produit.....	52
III.6 Conclusion .....	56
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>58</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>59</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>62</b>

## LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES DES FIGURES	PAGES
<b>CHAPITRE I</b>		
<b>Figure I.1</b>	Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu	4
<b>Figure I.2</b>	Mouvement de la terre autour de soleil	6
<b>Figure I.3</b>	Variation annuelle de la déclinaison du soleil	7
<b>Figure I.4</b>	Angle hoarier	8
<b>Figure I.5</b>	Variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai	9
<b>Figure I.6</b>	Coordonnées horizontale	9
<b>CHAPITRE II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV	17
<b>Figure II.2</b>	Fonctionnement des cellules photovoltaïque	19
<b>Figure II.3</b>	Cellules photovoltaïques classiques utilisent deux couches de matériaux semi-conducteurs	19
<b>Figure II.4</b>	Photos de cellules monocristallines et multicristalline	20
<b>Figure II.5</b>	Silicium amorphe	21
<b>Figure II.6</b>	Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe)	21
<b>Figure II.7</b>	Cellule solaire tout organique sur substrat souple	22
<b>Figure II.8</b>	Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.	23
<b>Figure II.9</b>	Différents régimes selon la puissance d'éclairement	25
<b>Figure II.10</b>	Caractéristiques résultantes d'un groupement de $N_s$ cellules en série	27
<b>Figure II.11</b>	Caractéristiques résultant d'un groupement de $N_p$ cellules en parallèle	27
<b>Figure II.12</b>	Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque	28

<b>Figure II.13</b>	Modèle deux diodes d'une cellule photovoltaïque	29
<b>Figure II.14</b>	Caractéristique I-V du panneau solaire	32
<b>Figure II.15</b>	Caractéristique P-V du panneau solaire	33
<b>Figure II.16</b>	Effet de l'éclairement solaire sur la courbe I-V (T=30C°)	33
<b>Figure II-17</b>	Effet du l'éclairement solaire sur la courbe P-V (T=30C°)	34
<b>Figure II-18</b>	Effet de la température ambiante sur la courbe I-V (E=800w/m <sup>2</sup> )	35
<b>Figure II-19</b>	Effet de la température ambiante sur la courbe P-V (E= 800 W/m <sup>2</sup> )	36
<b>CHAPITRE III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Système de production d'hydrogène solaire	39
<b>Figure III.2</b>	Profil quotidien de L'irradiation solaire et de la température ambiant	40
<b>Figure III.3</b>	Courant du module en fonction du temps	41
<b>Figure III.4</b>	Puissance de la radiation solaire en fonction du temps	42
<b>Figure III.5</b>	Puissance du radiation solaire et panneau solaire en fonction du temps	43
<b>Figure III.6</b>	Courant et la Tension des batteries en fonction du temps	44
<b>Figure III.7</b>	Puissance de la batterie en fonction du temps	44
<b>Figure III.8</b>	Puissance d'entrée et de sortie d'électrolyseur en foction de temps	45
<b>Figure III.9</b>	Production d'hydrogène en fonction de temps	46
<b>Figure III.10</b>	Puissance du système en fonction du temps.	47
<b>Figure III.11</b>	Courant continu du system en fonction du temps	47
<b>Figure III.12</b>	Tension de sortie du convertisseur DC/ DC en fonction du temps	48
<b>Figure III.13</b>	Puissance convertisseur en fonction du temps.	49
<b>Figure III.14</b>	Courant d'entrée et sorte du convertisseur DC/ AC en fonction du temps	50
<b>Figure III.15</b>	Tension sorte convertisseur DC/ AC en fonction du temps	50
<b>Figure III.16</b>	Volume de l'hydrogène en fonction du temps	51

<b>Figure III.17</b>	Rendement de PEM électrolyseur	52
<b>Figure III.18</b>	Puissances du panneau en fonction du temps	54
<b>Figure III.19</b>	Puissance de l'électrolyseur après l'amélioration en fonction du temps	55
<b>Figure III.20</b>	Production d'hydrogène en fonction du temps	55
<b>Figure III.21</b>	Comparaison Volume d'hydrogène en fonction du temps	56

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	TITRE	PAGE
<b>CHAPITRE I</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Répartition du potentiel solaire au niveau du territoire	5
<b>Tableau I.2</b>	Algérien Température d'Ouargla	5
<b>CHAPITRE II</b>		
<b>Tableau II.1</b>	Caractéristiques du NeMo <sup>®</sup> 54P	31
<b>CHAPITRE III</b>		
<b>Tableau III.1</b>	Rendement de module en fonction du temps	53

# **Introduction Générale**

## INTRODUCTION GENERALE

La contribution des ressources énergétiques renouvelables dans le processus de production d'électricité est devenue obligatoire. Les principales raisons derrière Ça sont : la rareté des combustibles fossiles, et l'augmentation au niveau de risques environnementales causés par la consommation énorme d'énergie fossile. Il existe de nombreuses ressources renouvelables capables de fournir une énergie propre et durablement [1].

De nos jours-là, l'exploration de la nouvelle énergie renouvelable a permis de l'exploiter rationnellement et qui représente une solution de remplacement par excellence, où l'avantage capitale de cette énergie qu'elle ne pollue guère les couches atmosphériques et qui permet une production mondiale d'énergie propre et non nuisible à savoir (l'hydraulique, photovoltaïque, éolienne, géothermique, biomasse). L'énergie solaire est celle qui répond aux besoins mondiaux pour l'obtention de l'électricité autonome d'une manière ou autre. Cette dernière arrivant à la surface de notre planète verte serait 10 fois plus grande que celle consommées et plutôt un pari sur l'avenir, une décision délibérée de recourir au moins en partie à une énergie plus respectueuse de l'environnement. Cette dotation nécessite des procédures de stockages qui doivent être fiables et propres ; l'hydrogène est la meilleure solution de cette opération. Ce composant peut être envisagé comme un vecteur énergétique au même titre que l'électricité en raison de l'absence de pollution lors de sa combustion. Il pourrait être la clef de voute concernant l'utilisation des énergies renouvelables, en permettant le stockage de cette énergie sous une forme chimique [2]. L'Hydrogène ( $H_2$ ) est un corps simple gazeux, se combine avec presque tous les éléments en y formant des hydrures, c'est un excellent réducteur. Sa fusion de noyaux libère une énergie considérable et pratiquement inépuisable (comme celle du soleil) [2]. L'objectif est de produire de l'hydrogène vert grâce à des panneaux solaires Alors le présent mémoire est divisé en quatre chapitres comme suit : Le premier chapitre est consacré à la présentation des spécifications géographiques et climatiques d'Ouargla, ensuite, le rayonnement solaire au niveau des panneaux solaires.

Ensuite Dans le deuxième chapitre, nous allons aborder les notions générales des systèmes photovoltaïques

Enfin Le chapitre trois est consacré à la technologie de production d'Hydrogène solaire ensuite, nous illustrons ses propriétés, son stockage et son usage. Aussi porte sur l'expérimentation d'un système PV prototype de production d'hydrogène solaire, la simulation, l'exposition et l'interprétation des résultats obtenus suite à l'étude des performances de ce système.



# **CHAPITRE -I-**

## **Gisement solaire**

## I.1 Introduction

Le soleil est une source d'énergie presque inépuisable qui envoie à la Terre une énergie consommée environ 15000 fois plus de rayonnement chaque année que l'énergie humaine. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kW/m<sup>2</sup>. Les pics par mètre carré (kW/m<sup>2</sup>) sont répartis sur l'ensemble du spectre, des UV aux IR. Ces déserts de notre planète obtiennent plus d'énergie du soleil qu'ils n'en consomment en 6 heures. Depuis longtemps, l'homme cherche à capter l'énergie émise par le soleil, les étoiles le plus proche de la Terre. La plupart des utilisations sont directes, comme dans l'agriculture, Par photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et de chauffage, artisanat et industrie. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terre, quoique significativement atténuée lors du transit dans l'atmosphère, Une grande quantité atteint encore la surface du sol. On peut donc compter sur 1000 W/m<sup>2</sup> Dans les régions tempérées, lorsque l'atmosphère est peu polluée, jusqu'à 1400 W/m<sup>2</sup> dans la poussière ou l'eau. Par conséquent, le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend de plusieurs paramètres.

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- La période de l'année.
- L'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

Nous allons faire la lumière sur l'énergie renouvelable en raison de ses avantages et le moins de nuisances et de saleté, et donner une idée générale de celle-ci et de ses types et la transformer d'un phénomène physique en équations mathématiques. Notre premier chapitre a abordé les principes du calcul solaire, la position du soleil (angle, élévation, etc.) et le rayonnement solaire.

## I.2 Energie solaire en Algérie

L'Algérie occupe une position distinguée qui en fait l'un des pays les plus riches du monde en termes de gisements d'énergie solaire, et la durée d'ensoleillement sur l'ensemble du territoire national dépasse près de 2000 heures par an et peut atteindre 3900 heures en haute altitude. Plateaux et désert L'énergie disponible atteint quotidiennement sur une section transversale de 1 m<sup>2</sup> à 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit environ 1 700 kWh/m<sup>2</sup> par an dans le nord du pays, et 2 263 kWh/m<sup>2</sup> [3] dans le sud. En 2011, l'Algérie s'est lancée dans la construction de sa première centrale solaire dans la région de 'Hassi Ramel'. Cette centrale combinée produit environ 25 mégawatts, couplée à une turbine à gaz produisant environ 130 mégawatts. Le 29

décembre 2021, le ministère algérien de la transition énergétique et des énergies renouvelables, à travers la société "Shams", a lancé l'appel d'offres pour le projet d'énergie solaire à L'Algérie, qui vise à produire 1 000 mégawatts d'énergie solaire par an et s'est fixé pour objectif de produire au moins 22 000 mégawatts d'électricité grâce à des sources d'énergie renouvelables d'ici 2030 [4].

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7kWh/m<sup>2</sup>/jour [4]. Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m<sup>2</sup>/jour.
- Au Sud : 7,2 kWh/m<sup>2</sup>/jour

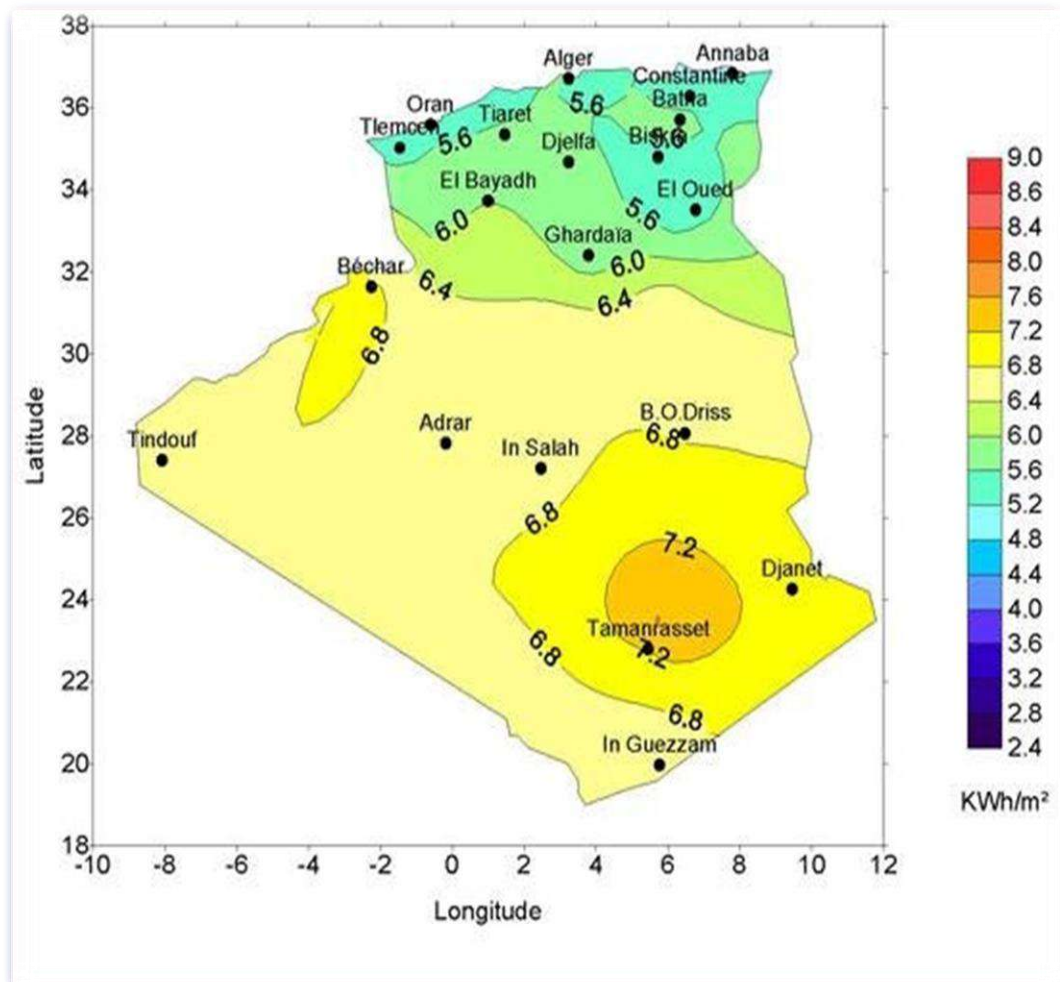


Figure I.1 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu [5]

Régions	Régions côtiers	Hauts plateaux	Sahara
<b>Superficie (%)</b>	4	10	86
<b>Durée moyenne d'insolation (h)</b>	2650	3000	3500
<b>Energie moyenne reçue</b>	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Répartition du potentiel solaire au niveau du territoire algérien [5]

### I.3 Spécification du site d'Ouargla

L'état d'Ouargla est situé au sud-est de l'Algérie, son emplacement est déterminé entre 5,33 degrés de longitude, 31,95 degrés de latitude et 138 mètres d'altitude. C'est le trentième État de la région administrative algérienne, et sa population atteint 129 402 personnes, et Ouargla est située à l'extrémité ouest d'un grand bassin désertique fermé, Elle dispose également d'un réseau routier très important d'environ 9200 km et compte quatre compagnies aériennes, quant aux communications, elle dispose d'un réseau de communication très important et dispose d'une antenne régionale pour la télévision. Le taux d'accès à l'électricité dans ses régions est de 99%.

Mois	Moyenne de $T_{min}$ (°C)	Moyenne de $T_{max}$ (°C)	$(T_{max} + T_{min}) / 2$ (°C)
<b>Janvier</b>	46	19.7	12.2
<b>Février</b>	6.5	21.4	13.9
<b>Mars</b>	10.3	26.3	18.3
<b>Avril</b>	14.8	31.4	23.1
<b>Mai</b>	19.7	35.4	27.7
<b>Juin</b>	24.4	40.8	32.6
<b>Juillet</b>	27.7	43.9	35.8
<b>Aout</b>	27.4	43.1	35.2
<b>Septembre</b>	23.1	83.3	30.7
<b>Octobre</b>	17.2	32.9	25.1
<b>Novembre</b>	10.0	24.7	17.4
<b>Décembre</b>	5.9	19.6	12.8

Tableau I.2 : Température sur la région d'Ouargla [6]

Avec :

$T_{min}$  : la température moyenne minimale

$T_{max}$  : la température moyenne maximale

## I.4 Principes de calcul de l'énergie solaire

### I.4.1 Position du soleil

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne au tour du soleil en  $P_t = 365 \text{ jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365.25 \text{ jours}$ . 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, Cette distance est minimale au début janvier et maximale au début de juillet La position du soleil dans le ciel. La terre tourne autour du soleil dans l'orbite du soleil dans l'orbite des étoiles. La rotation de la Terre sur son axe fait que les étoiles se déplacent dans le ciel à travers la grille aux latitudes à partir desquelles l'observation est faite. Le temps qu'une étoile particulière traverse le méridien céleste de l'observateur dépend de la longitude de la région à partir de laquelle elle est observée. Spécifique dans ce domaine [7].

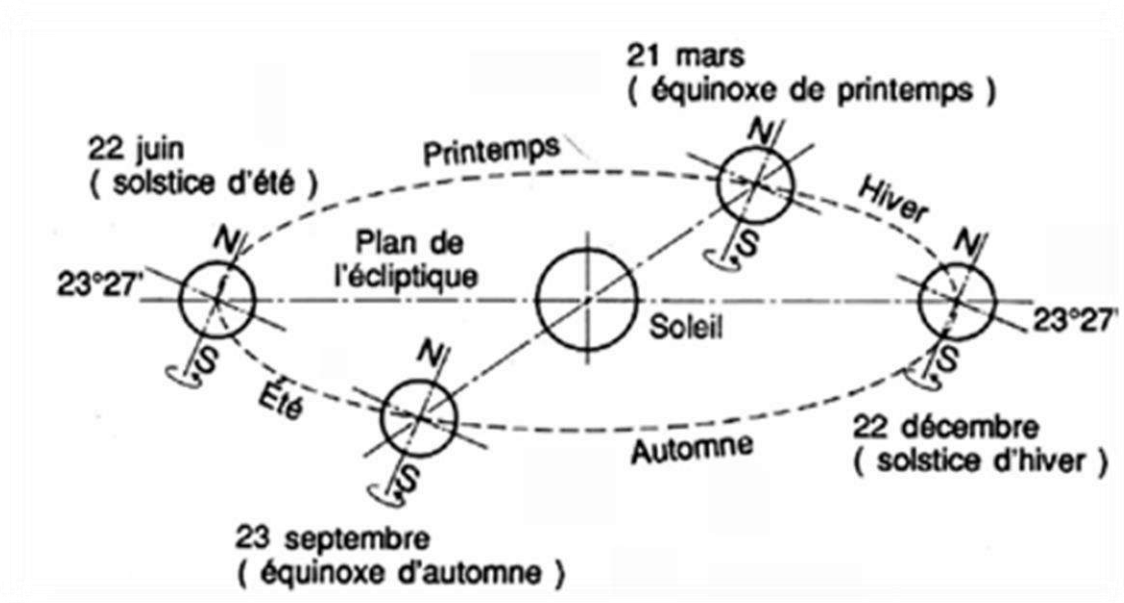


Figure I.2 : Le mouvement de la terre autour de soleil

### I.4. 2 Déclinaison solaire

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (compris entre  $0^\circ$  à l'équateur et  $+90^\circ$  au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère Sud (compris entre  $0^\circ$  à l'équateur et  $-90^\circ$  au pôle Sud), et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes  $\pm 23.45^\circ$ . Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au long de l'année. Pour la pratique, une formule d'approximation est suffisante, elle est donnée par l'équation [8].

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(J + 80)\right] \quad (\text{I-1})$$

Ou avec plus de précision :

$$\delta = \text{Arc sin} \left[ 0.389 \sin\left(\frac{360}{356}(J - 82)\right) + 2 \sin\left(\frac{360}{356}(J - 2)\right) \right] \quad (\text{I-2})$$

Avec:

- $J$  : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c'est à dire il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.
- $\delta$  Varie entre deux valeurs extrêmes :  $-\delta_0 \leq \delta \leq +\delta_0$  avec  $\delta_0 = 23,45^\circ$ .

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par Figure I.3.

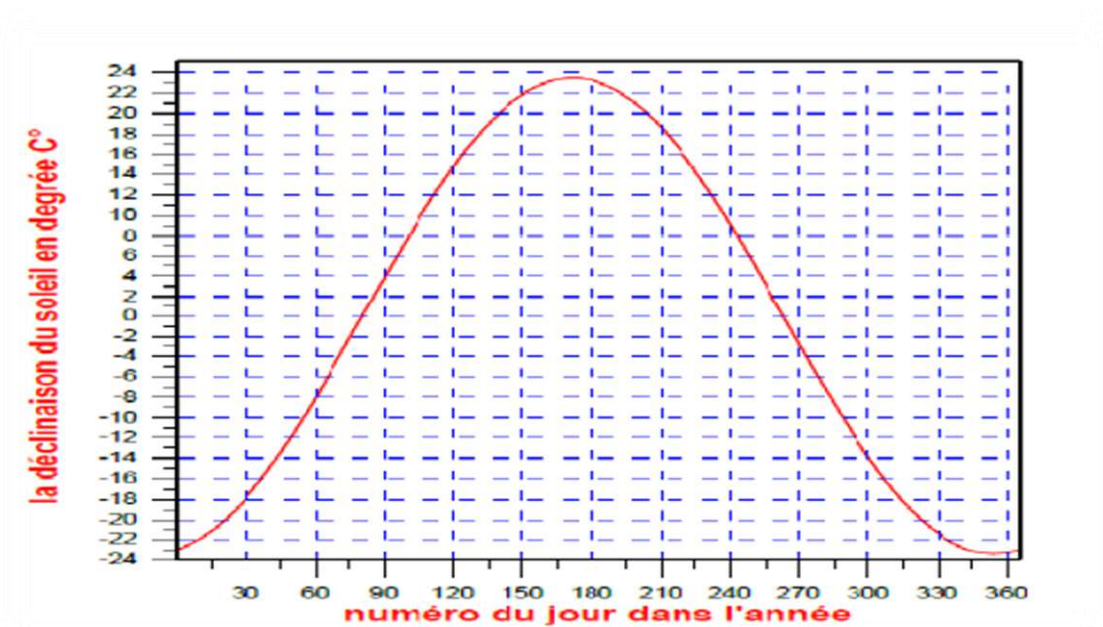


Figure I.3 : Variation annuelle de la déclinaison du soleil [09].

### I.4. 3 Angle horaire ( $\omega$ )

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi, qui est l'heure à laquelle le soleil passe par le plan méridien du zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un instant donné et la projection du soleil sur ce même plan à midi exactement [5] ; L'angle horaire est donné par la relation suivant :

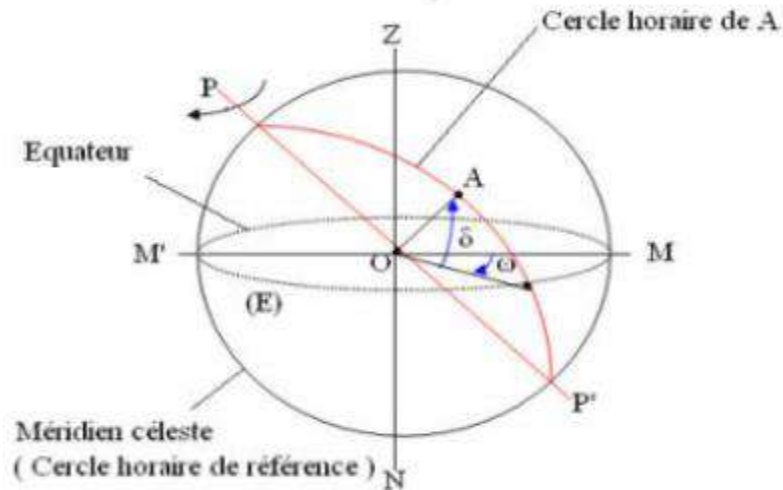


Figure I.4: Angle horair [10]

$$\omega = 15(TVS - 12) \quad (I-3)$$

Avec:

$$\text{➤ } TVS = TI - TU + \left(\frac{\Delta t + 4\lambda}{60}\right) = TI - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \quad (I-4)$$

$$\text{➤ } \Delta t = 9.87 \sin 2\left(\frac{360}{365} \cdot (J - 81)\right) - 3.35 \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (J - 81)\right) - 1.5 \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (J - 81)\right) \quad (I-5)$$

- TSV (Temps Solaire Vrai) : Temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.
- TU (Temps Universel) : Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
- TL (Temps Légal) : Temps donné par une montre.
- $\Delta L$  : Correction de l'équation du temps.
- $\lambda$  : longitude du lieu.
- L'angle horaire H varie d'a -180° à +180° [9].

On prend :

- $H > 0$  après midi.  $H = 0$  midi TSV
- $H < 0$  le matin,

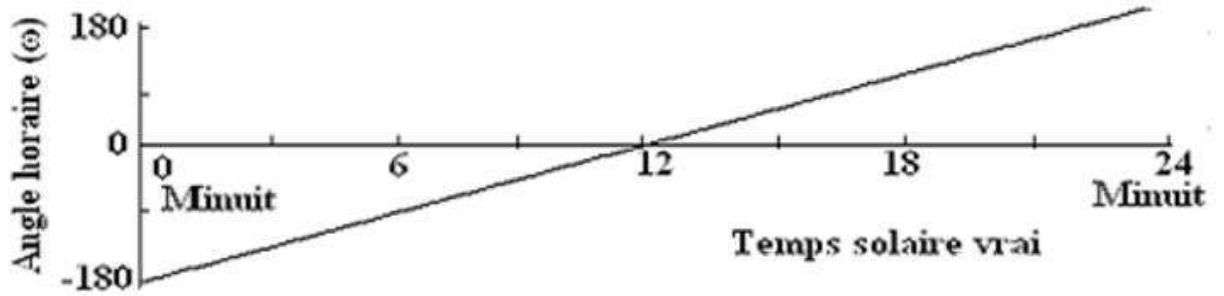


Figure I.5 : variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai.

#### I.4. 4 Azimut h

Il s'agit de l'angle entre la ligne passant au point sur la surface de la Terre et allant vers le sud et la projection horizontale de la ligne reliant le point et le soleil de cet angle est positive si vous allez vers l'ouest [7].

$$\sin(\alpha) = \frac{(\cos(\delta) \times \sin(\omega))}{(\cos(h))} \quad (\text{I-6})$$

Avec :

- $\omega$  : Angle horaire
- $\delta$  : Déclinaison du soleil
- $h$  : Hauteur du soleil

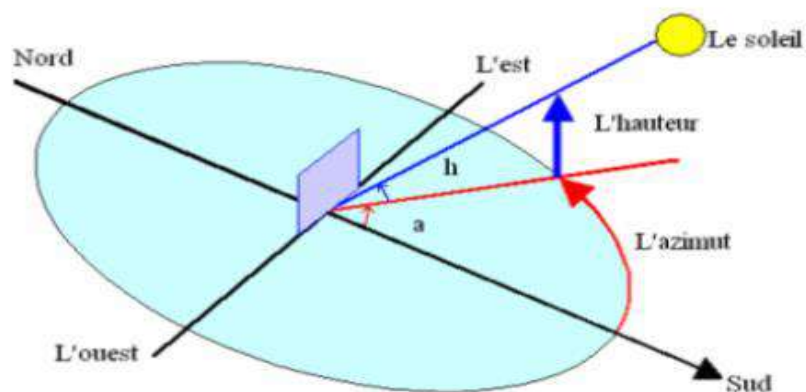


Figure I.6 : Cordonnées horizontales.



### I .4. 5 Hauteur du soleil (h)

C'est le coin entre la ligne entre un point de la surface de la Terre et le centre horizontal du soleil dans lequel le point passe sur la Terre ; Cet angle est égal à zéro au coucher du soleil et il prend la grande valeur au moment de la disparition.

- $h = 0$  Au lever et au coucher du soleil.
- $h > 0$  Pendant la journée.
- $h < 0$  De nuit.

Nous pouvons écrire dans la relation suivante [5] :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \times \sin(\delta) + \cos(\varphi) \times \cos(\omega) \quad (\text{I-7})$$

### I.4. 6 Temps solaire

#### I.4 .6 .1 Le Temps solaire Vrai (TSV)

Il est défini par angle horaire  $\omega$  entre le plan méridien passant par le centre du Solaire et le méridien du lieu considéré [11] :

$$\text{TSV} = \frac{(12+\omega)}{15} \quad (\text{I-8})$$

#### I.4 .6. 2 Le Temps Solaire Moyen (TSM)

La vitesse de la Terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année. Pour avoir un temps qui " s'écoule " à vitesse constante, on définit donc un temps solaire moyen ainsi [11] :

$$\text{TSM} = \text{TSV} - \frac{ET}{60} \quad (\text{I-9})$$

#### I.4 .6.3 Temps Universal (TU)

C'est une échelle de temps basée sur la rotation de la Terre sur elle-même. Il s'agit d'une version mise à jour de Greenwich Mean Time. Horaires - Certaines villes à l'ouest de Greenwich : - Washington -05 heures. Alors que si l'heure à Greenwich est 12h00 l'après-midi, il sera 15h00 à Riyad et 07h00 à Washington.

$$\text{TU} = T_{\text{Greenwich}} + E \quad (\text{I-10})$$

#### I.4.6.4 L'équation du Temps (Et)

On appelle équation du temps la correction, positive ou négative, qu'il convient d'ajouter au temps solaire moyen pour connaître le temps solaire vrai  $TSV + TSM + Et$ , elle est exprimée par la relation suivante [12] :

$$ET = 9.87 \sin[(2B) - 7.35 \cos(B) - 1.5 \sin(B)] \quad (I-11)$$

Avec :

$$\text{➤ } B = 2\pi \times \frac{N-81}{365} \quad (I-12)$$

### I.5. Modèle de calcul de l'irradiation globale sur une surface inclinée

On obtient le rayonnement solaire sur une surface inclinée selon l'équation : [14]

$$H_{tt} = H_{bt} + H_{dt} + H_{rt} \quad (I-13)$$

Avec :

- $H_{tt}$  : Rayonnement total reçu (incident) sur une surface inclinée ( $W/m^2$ ).
- $H_{bt}$  : Rayonnement direct transmis pendant une atmosphère pure sur une surface inclinée ( $W/m^2$ ).
- $H_{dt}$  : Rayonnement diffusé à travers un ciel clair sur une surface inclinée ( $W/m^2$ ).
- $H_{rt}$  : Rayonnement réfléchi par l'environnement ( $W/m^2$ ).

-La composante réfléchie,  $G_r$ , est donnée par la relation suivante : [15]

$$G_r = \rho \times \frac{G_H \times (1 - \cos \beta)}{2} \quad (I-14)$$

Avec :

- $\rho$  : représente le coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol .et  $\beta$  l'inclinaison du champ PV. Pour le site de Bouzaréah,  $\rho = 0.2$  et  $\beta = 27^\circ$
- $G_r$  : La composante réfléchie de l'irradiation solaire.
- $G_H$  : L'irradiation globale horizontale.

Modèle PERRIN BRI-CHAMBUT. [16]

$$G_i = I_{dh} \times R_b + I_{dd}(\beta) + I_r(\beta) \quad (I-15)$$

Avec :

$I_{dh}$  Est exprimé avec une formule semi-empirique comme suit :

$$I_{dh} = A \times \exp\left(\frac{-1}{B \times \sin(h+C)}\right) \quad (\text{I-16})$$

$h$  : est la hauteur angulaire du soleil.

$R_b$  : Est la trigonométrie sphérique ou le facteur d'inclinaison donné par la relation suivante :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi-\beta) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\varphi-\beta) \sin \delta}{\cos(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\varphi) \sin \delta} \quad (\text{I-17})$$

- $\varphi$  : est l'altitude du site étudié.
- $\beta$  : est l'angle de pente du plan horizontal.
- $\delta$  : est l'angle de déclinaison.
- $\omega$  : est l'angle horaire.
- $I_{dd}(\beta)$  : Le rayonnement diffusé reçu par une surface inclinée avec un angle d'inclinaison  $\beta$  exprimé comme suit :

$$I_{dd}(\beta) = \left(\frac{1+\cos \beta}{2}\right) I_{dh} \quad (\text{I-18})$$

- $I_{dh}$  : Le rayonnement diffus  $I_{dh}$  sur le plan horizontal réglé sur  $128 \sin(h)^{0.4}$ .
- $I_r(\beta)$  : est le rayonnement diffus provenant du sol et est reçu par une surface horizontale.

$$I_r(\beta) = \alpha_{sel} \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right) (R_b \times \sin(h) + I_{h0}) \quad (\text{I-19})$$

## I.6 Modèle de calcul de l'inclinaison optimale

De nombreuses techniques pour optimiser l'angle d'inclinaison ont été développées. Les méthodes les plus efficaces consistent à maximiser le rayonnement solaire ou l'énergie collectée à la surface.

Modèle Stanciu, C., et Stanciu, D. [17] ont proposé une simulation numérique d'un collecteur à plaques planes pour l'angle d'inclinaison optimal à différentes latitudes de  $0^\circ$  à  $80^\circ$

$$\beta = \varphi - \delta \quad (\text{I-20})$$

Avec :

- $(\phi)$  : Latitude
- $(\Delta)$  : Déclinaison solaire

Module Bakirci [11] optimized the tilt angles for solar panels using solar radiation data measured using a polynomial correlation for the optimum tilt angle as a function of solar

declination to eight provinces in Turkey where the optimum tilt angle varies from  $0^\circ$  to  $65^\circ$  throughout the year.

$$\beta = 34.783 - 1.4317\delta - 0.0081\delta^2 + 0.0002\delta^3 \quad (\text{I-21})$$

Modèle Moghadam et al. [17] performed an optimization of solar flat collector inclination to determine monthly, seasonal, semi-annual and annual optimum tilt angles.

$$\beta = 0.917\varphi \pm 0.321^\circ \quad (\text{I-22})$$

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit des concepts importants sur le relèvement du Soleil, tels que les coordonnées et l'heure de la Terre, les temps cardinaux et le mouvement de la Terre autour du Soleil. Ensuite, nous avons fourni les différents types de rayonnement (direct, diffus, etc.) et les expressions mathématiques pour chaque rayonnement en fonction du changement d'inclinaison.

## **CHAPITRE II**

### **Systemes solaire photovoltaïques**

## II.1 Introduction

Chaque jour, le soleil fournit de l'énergie à la terre. Les humains peuvent utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée cellules photovoltaïques, qui convertit l'énergie solaire en électricité. [18]. On estime que l'énergie dégagée par le soleil fois par an représente 40 000 fois les fois l'énergie consommée par l'humanité sous forme de énergies fossiles. Même ainsi, le solaire est encore un secteur relativement inexploité.

Cette évolution constante est rendue possible par la recherche fondamentale de la menée dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de cette gestion de l'énergie menée en parallèle par le En effet, le photovoltaïque est une source d'énergie discontinue, de nature non linéaire et dépendant de nombreux paramètres tels que le rayonnement et la température. Il est donc nécessaire que l'adapte cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire du dans une batterie ou dans tout autre support de stockage en cours de développement, le soit en le renvoyant au réseau public [19].

La production solaire PV attendue est validée par des données expérimentales dans des conditions de fonctionnement standard de l'électrolyseur ( $T = 25\text{ °C}$ ,  $E = 1000\text{ W/m}^3$ ). Cette étude vise à valider le modèle solaire PV sous différentes conditions atmosphériques (rayonnement solaire et température ambiante). Basées sur des données empiriques et manufacturées, les propriétés sont exprimées par des équations mathématiques

## II.2 La production photovoltaïque

L'effet photovoltaïque permet de convertir directement la lumière du soleil en énergie électrique. La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée, entre autres facteurs, à la densité, à la durée de la luminosité du Soleil et à la direction de la planche pour le Soleil. À son apogée, le Soleil envoie environ  $1\text{ kW/m}^2$  de rayonnement au capteur du sujet perpendiculaire à ses rayons, au niveau de la mer, ce qui donne une lumière solaire suffisante par kilowattheure. C'est pourquoi, en ce moment, les cellules photovoltaïques se développent rapidement. La production de cellules photovoltaïques est allouée à l'approvisionnement de sites isolés, et les maisons estiment l'énergie photovoltaïque installée dans le monde à  $46.400\text{ MW}$  à la fin de 2011 ces dernières années.

La cellule photovoltaïque (PV) ou photopile est le plus petit élément de l'installation photovoltaïque. Elle est constituée d'un matériau semi-conducteur et convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques comprennent :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau gap-gap, qui agit comme une barrière d'énergie que les électrons ne peuvent pas franchir sans excitation externe et dont les propriétés électroniques peuvent varier) comme le silicium, qui est un matériau ayant une relativement bonne conductivité électrique,
- D'une couche antireflet qui permet une pénétration maximale des rayons du soleil,
- Ont même La nouvelle combinaison de multiples réfléchissants couches juste en dessous du semi-conducteur, permet à la lumière de se refléter plus longtemps dans celui-ci pour des performances améliorées.

Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions similaires depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation de la production intéresse particulièrement les chercheurs.

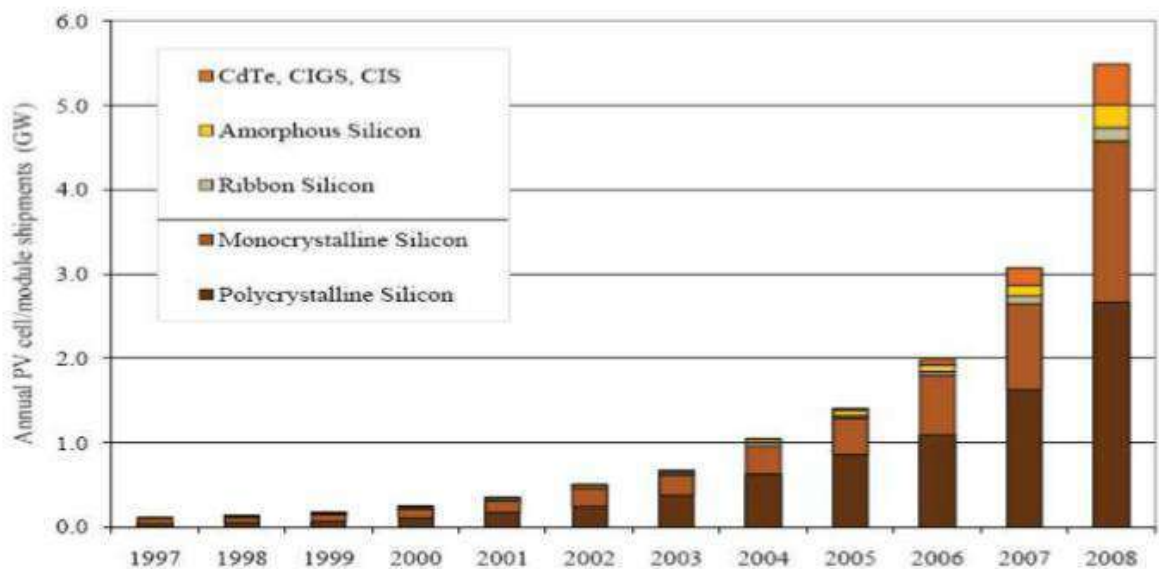


Figure II.1 : Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV

[20]

### II.3 Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs ont acquis une importance considérable dans notre société. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques dans les domaines de l'informatique, des télécommunications, de la télévision, de l'automobile et de l'électroménager, etc. On dit aussi que nous sommes à l'ère du silicium, le semi-conducteur le plus utilisé.

Un semi-conducteur est un solide qui a une conductivité électrique entre un métal et un isolant. La conductivité électrique d'un solide est une propriété due à la présence d'électrons libres qui se déplacent dans le milieu et induisent ainsi un courant électrique. Un courant électrique est un simple écoulement de ce liquide constitué d'électrons libres. Des études de corps purs et bien cristallisés montrent que les cristaux se séparent en deux grandes familles proches du zéro absolu (-273 °C) : les métaux conducteurs, contenant un grand nombre d'électrons libres, et les substances isolantes, où tous les électrons se rejoignent. Dans les liaisons chimiques et sont donc fortement liés [21].

### II.4 Principe de fonctionnement des cellules solaires

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Cette conversion repose sur 3 fondamentaux qui sont les suivants :

- Absorption de l'énergie solaire (photons) par le matériau à partir duquel le dispositif est formé.
- Convertir l'énergie photonique en énergie électrique, en créant des paires d'électrons dans un matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Par conséquent, le matériau qui compose la cellule photovoltaïque doit avoir deux niveaux d'énergie et doit être suffisamment conducteur pour permettre le passage du courant, d'où le rôle Semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque Afin de collecter les électrons générés Pour collecter les particules générées, un champ électrique permettant la dissociation de paires électron/trou est généré. Le plus souvent utilisée. D'autres structures, telles que des contacts hétérogènes et Schottky peuvent également être utilisées.



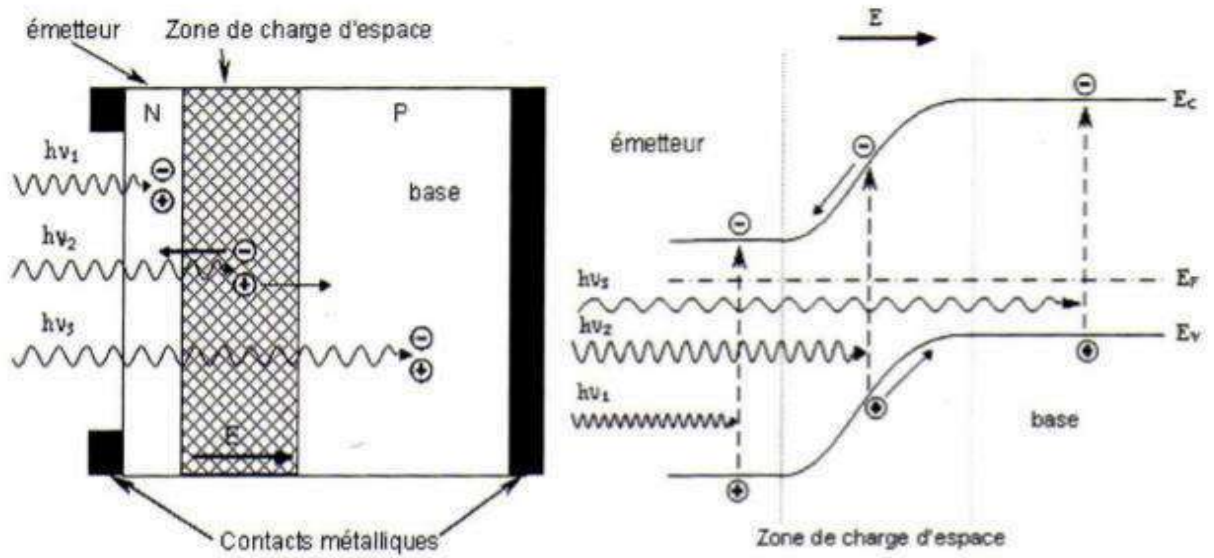


Figure. II.2 : Fonctionnement des cellules photovoltaïques

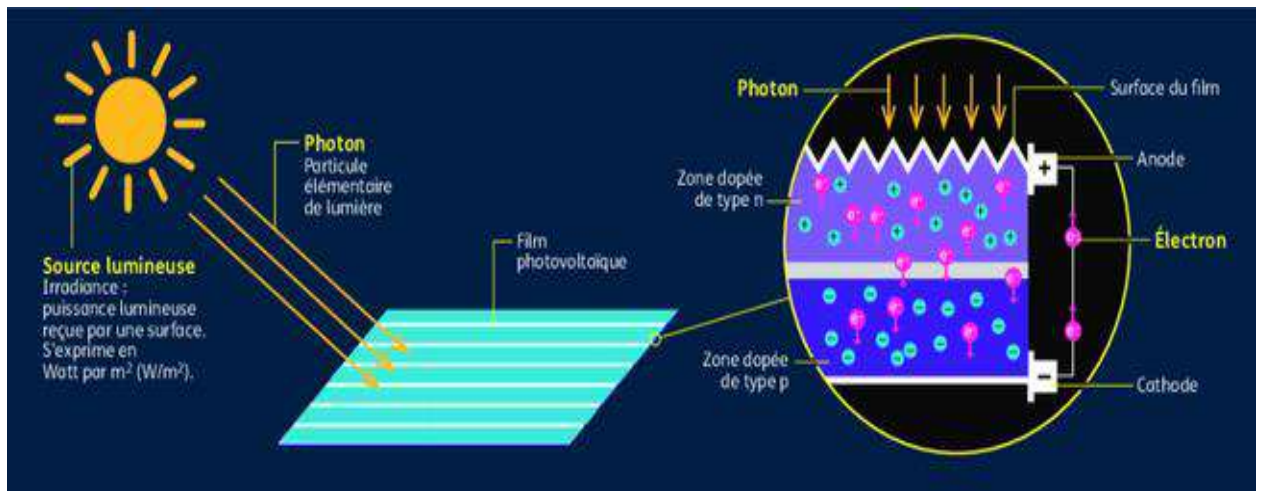


Figure. II.3 : Les cellules photovoltaïques classiques utilisent deux couches de matériaux semi-conducteurs [22].

## II.5 Différentes technologies

Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées avec de nombreux semi-conducteurs, et en fait il existe aujourd'hui trois grands secteurs technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces secteurs participent au marché de manière inégale, et nous allons maintenant discuter de la définition de ces secteurs et des différences entre eux

### II.5.1 Le silicium

Le silicium est la plus grande production au monde utilisée dans les panneaux photovoltaïques parce qu'il est abondant et non toxique, et ce processus est divisé en plusieurs technologies en raison de la nature ou de la méthode de production de silicium utilisée. Il existe deux types de technologies : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin [20,23].

#### II.5.1.1 Silicium monocristallin

Lorsque le silicone dissous est refroidi, un cristal se forme. Le cristal est coupé en fines tranches représentant les cellules. Ces cellules sont généralement uniformes, intenses et lumineuses. Elles sont utilisées, mais pas dans la plupart des marchés parce qu'elles sont coûteuses. C'est un obstacle unique parce que l'efficacité du monocristallin est la plus élevée entre 12 et 20%.

#### II.5.1.2 Le silicium multicristallin (Polycristallin)

Le silicone multicristallin est le plus répandu et le plus répandu parce qu'il représente 50% des utilisations du marché, et est produit par moulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa composition hétérogène et son efficacité varie de 10 à 14% selon le fabricant. En termes de production et de coût, il est le plus bas pour cette raison, il est largement disponible sur le marché.



Figure. II.4 : Photos de cellules monocristallines et multicristalline

### II.5.1.3 Les couches minces

Quel que soit le développement des cellules photovoltaïques, il reste un frein majeur malgré leur large disponibilité, mais le prix du kilowattheure (KWc) est très élevé. (KWc) est l'unité de la puissance d'un générateur PV aux Conditions de Test Standard (STC) ( $1000\text{Wm}^2$  et  $25^\circ\text{C}$ ). De nombreux types de cellules photovoltaïques visent à réduire la quantité de matériaux utilisés pour les produire, les développer et commencer à industrialisés. Ces techniques, appelées dépôt de ruban en couche mince, visent à réduire l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia), Représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est L'utilisation de substrats à bas coût.



Figure. II.5 : Le silicium amorphe



Module souple Uni Solar (68Wc,  $1,12\text{ m}^2$ )



Module rigide Sharp (115Wc,  $1,42\text{ m}^2$ )

Figure. II.6 : Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe).

### II.5.1.4 Cellules organiques et plastique

Ces cellules sont constituées de deux voies : la voie cellulaire « humide » et la voie des cellules polymères organiques aussi appelées cellules « plastiques ». Le développement de ces technologies est très rapide, les records de performances sont très souvent battus par (près de 6%). Les principaux freins auxquels sont actuellement confrontées ces technologies sont la stabilité du, ses performances et sa durée de vie (environ 1000 heures actuellement) [20].

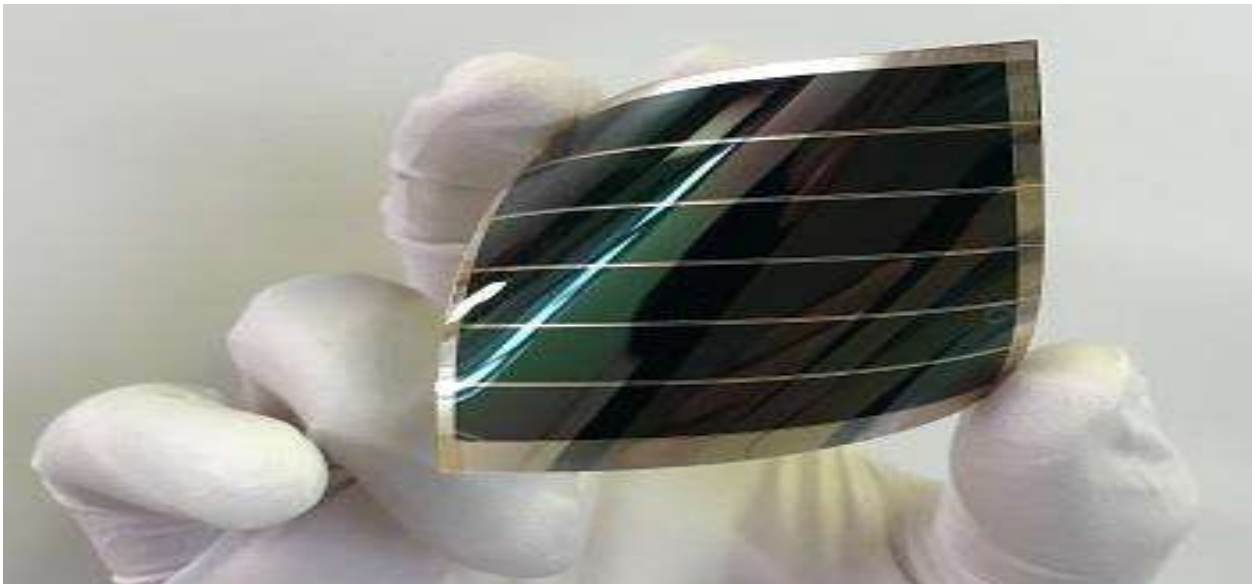


Figure. II.7 : Cellule solaire tout organique sur substrat souple

L'intérêt de ces cellules vient également du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées sur une grande surface, à des cadences élevées, par des techniques d'impression classiques. Ils ouvrent également la voie à applications légères, nomades et polyvalentes. Enfin, grâce aux coûts matériels et de fabrication plus faible, ces cellules devraient généralement être beaucoup moins chères que la par rapport à leurs concurrentes [24].

## II.6 Grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire

Quel que soit l'éclairage disponible, une cellule photovoltaïque dispose d'un ensemble de réglages électriques qu'une cellule peut prendre en une seule courbe.

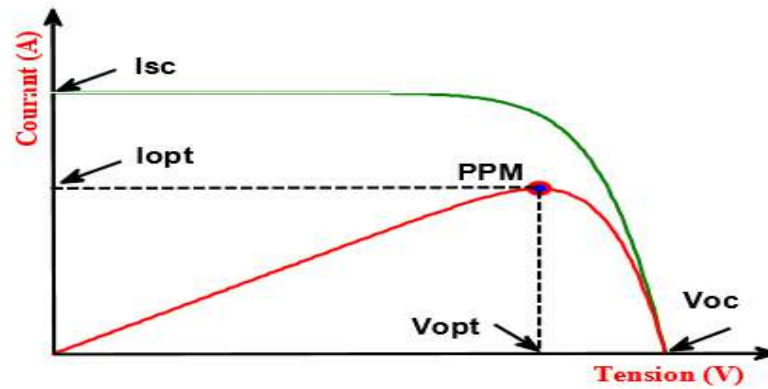


Figure. II.8 : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque

- Le courant maximal ( $I_{sc}$ ). Il se produit lorsque les bornes du module sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- La tension à vide ( $V_{c0}$ ) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert.
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale du module).

### II.6.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

$$I_{cc} = I_0 \left( e^{\frac{V_{c0}}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II-1})$$

### II.6.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{c0}$ )

Comme son nom l'indique, il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque le n'est pas connecté à une charge ou lorsqu'il est connecté à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), du matériau de la couche active et de la nature des contacts de la couche d'électrode active. Cela dépend aussi de la luminosité de la cellule [25].

Et la tension de circuit ouvert,  $V_{c0}$ , lorsque le courant est nul

$$V_{c0} = \frac{K.Tc}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II-2})$$

Avec :

- $\frac{K.T_c}{q}$  : potentiel thermodynamique
- $T_c$  : La température absolue
- $q$  : La constante de charge d'électron.
- $K$  : Le constante de Boltzmann.
- $I_{ph}$  : Le courant photonique
- $I_s$  : Courant de saturation de la diode

Deux régimes peuvent être observés :

#### a. Régime des faibles flux lumineux

Dans ce cas,  $I_{ph} \ll I_s$ , ce qui permet d'écrire :

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II-3})$$

D'où :

$$V_{c0} \approx \frac{(K.T_c)}{q} \cdot \left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (\text{II-4})$$

La formule précédente peut s'écrire Aussi sous la forme suivante :

$$V_{c0} = R_0 \cdot I_{ph} \quad (\text{II-5})$$

En posant

$$R_0 = \frac{K.T_c}{q.I_s} \quad (\text{II-6})$$

$R_0$  : La résistance interne de la diode en Polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

#### b. Régime des flux lumineux suffisamment

Dans ce cas,  $I_{ph} \gg I_s$ , ce qui permet d'écrire :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1$$

D'où

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (\text{II-7})$$

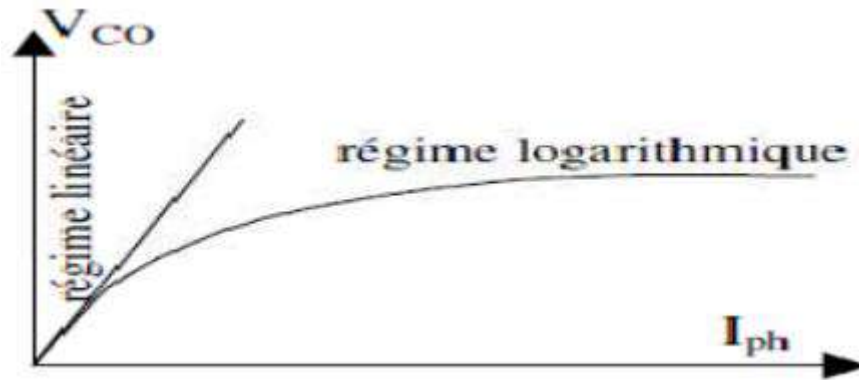


Figure. II.9 : différents régimes selon la puissance d'éclairement

Nous remarquons que cette tension augmente avec le log de  $I_{ph}$ , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $\frac{KT_c}{q}$ . En effet, le courant de saturation,  $I_s$  dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme  $\frac{KT_c}{q}$ . Donc la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [26].

### II.6.3 Puissance optimale

Ils sont obtenus pour une tension et un courant optimal. On calcule la puissance maximale donnée par :

$$P_m = I_{max} \times V_{max} \quad (\text{II-8})$$

### II.6.4 Facteur de forme FF

C'est le facteur de remplissage, Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale délivrée à la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur de forme est élevée, plus la force exploitable est élevée, donc l'objectif principal est d'obtenir de bonnes cellules dans un milieu technologique élevé pour atteindre les caractéristiques idéales que possible. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-9})$$

### II.6.5 Le rendement

Le rendement  $\eta$  de conversion de l'énergie photovoltaïque. Représente le rapport entre la puissance maximale et la puissance de la lumière incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF.V_{co}.I_{cc}}{P_{in}} \tag{II-10}$$

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

### II.7 Association des cellules

#### II.7.1 Association des cellules en série

Si les cellules en série, Il permet de connecter n nombre de cellules en série pour augmenter la tension du générateur photovoltaïque. L'équation (II-2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $N_s$  cellules.

$$V_{co} = N_s.V_{co} \tag{II-11}$$

Avec :

- $V_{co}$  : la tension du circuit ouvert
- $N_s$  : Numbers de cellules.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{co} N_s=0.6V*36=21.6V$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{op}$  proche de celle d'une tension de batterie de 12V [27].

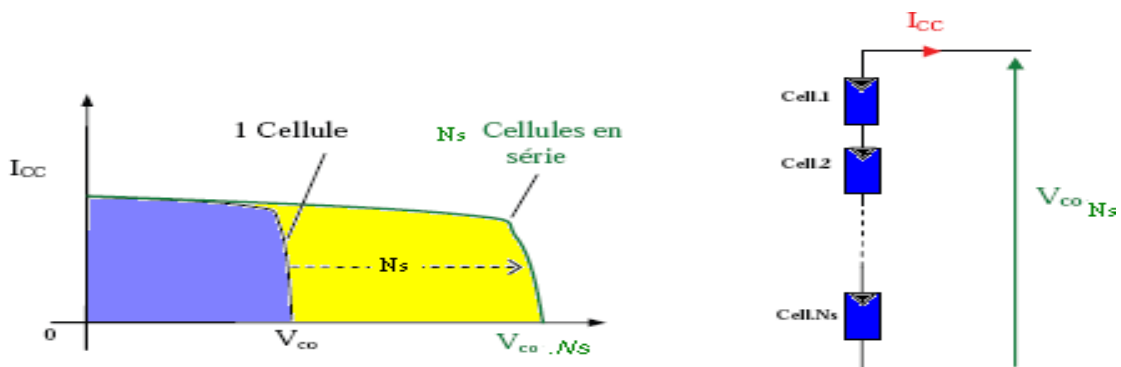


Figure. II.10 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_s$  cellules en série



### II.7.2 Association de cellules en parallèle

En revanche, la combinaison en parallèle de  $N_p$  cellules est possible et permet d'augmenter le rendement que produit ainsi le générateur. Dans un groupe de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique issue de ce groupe est obtenue par l'addition des courants, Figure II-10. L'équation (II-12) quant à elle résume les caractéristiques électriques de l'association en tandem de  $N_p$  cellules

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (\text{II-12})$$

Avec :

- $N_p$  : Numbers de cellules
- $I_{cc}$  (A) : le courant de court-circuit

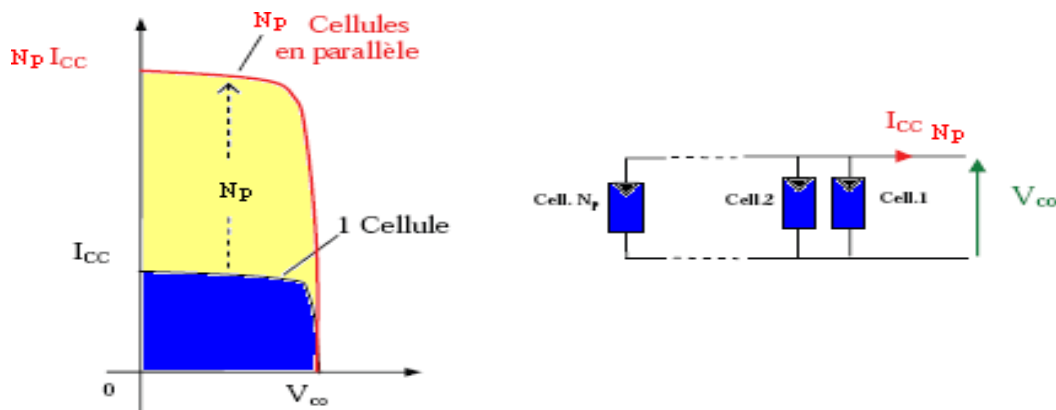


Figure. II.11 : Caractéristiques résultant d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle

### II.8 Modélisation et caractérisation d'une module photovoltaïque

Pour la modélisation des cellules photovoltaïques il faut choisir des circuits électriques équivalents.

Pour le développement de cellules photovoltaïques, Il faut prendre en compte la composition interne de la cellule, c'est à dire le matériau de fabrication, ainsi que les propriétés électriques de chaque élément.

On présentera deux modèles du générateur Photovoltaïque (GPV) à savoir [18] :

- Modèle a une diode
- Modèle à deux diodes

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

### II.8.1 Modèle à une diode

L'utilisation des circuits équivalents est convenable pour simuler les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque. Deux modèles sont principalement utilisés : le modèle à une diode (Figure II-12) et le modèle à deux diodes (Figure II-13) [28]. Le modèle idéal d'une cellule est une source de courant en parallèle avec une diode. Pour tenir compte des effets dissipatifs, deux résistances ont été introduites : la résistance série et la résistance shunt [29,30].

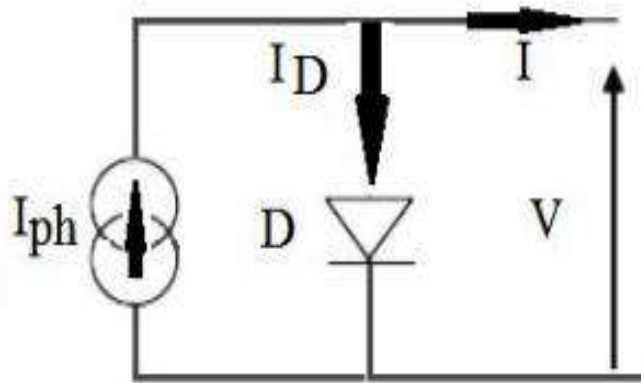


Figure. II.12 : Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II-13})$$

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_{pv}}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II-14})$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{pv}}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II-15})$$

Avec :

- $I_0$ : Courant de saturation de diode
- $V_{pv}$ : tension.
- $V_t$  :  $KT/q$  tension thermique.
- $T$  : température absolue en °K.
- $I_d$  : Courant de saturation de la diode.
- $I_{ph}$  : Photo courant.

## II.8.2 Modèle à deux diodes

Le modèle à une diode est le plus répandu pour représenter une cellule PV grâce à sa simplicité et sa précision [11]. L'évolution de ce modèle a conduit à des modèles plus précis tels que le modèle deux diodes (Figure II-13) [26].

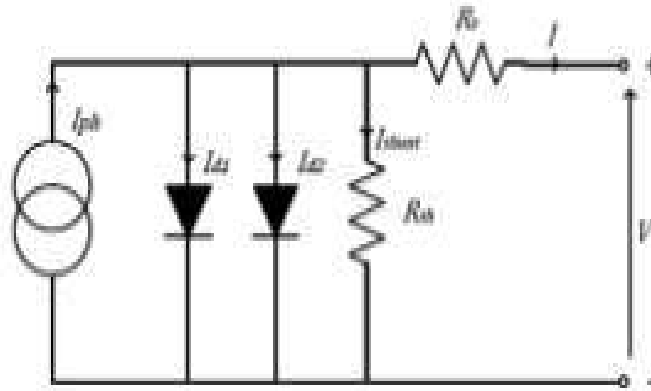


Figure II.13 : Le modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque (Circuit électrique réel)

Ce modèle consiste en un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode, une résistance série  $R_s$  et une résistance parallèle (résistance shunt)  $R_{sh}$ . Il est représenté par le circuit équivalent de la (Figure II-13). Ce circuit peut être utilisé pour une seule cellule, de même que pour un module constitué de plusieurs cellules ou pour un champ constitué de plusieurs modules. Le courant généré par un module photovoltaïque constitué de  $N_s$  cellules en série, en fonction de la tension  $V$  aux bornes est donné par la relation :

Caractéristique courant-tension pour une température donnée et un éclairement solaire fixé est [26] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat1} \cdot e^{\frac{qV_p + R_s I_{pv}}{nkT}} - 1 - I_{sat2} \cdot e^{\frac{qV_p + R_s I_{pv}}{n_2 kT}} - \frac{V_p + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II-16})$$

Il est possible de combiner entre les deux diodes ( $d1$ ,  $d2$ ), et la réécriture de l'équation précédente sous la forme suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - IR_{sh} \quad (\text{II-17})$$

$$I_d = I_{sat} \cdot e^{\frac{V_p + R_s I_{pv}}{nvt}} - 1 \quad (\text{II-18})$$

$$IR_{sh} = \frac{V_p + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II-19})$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \cdot e^{\frac{V_p + R_s \cdot I_{pv}}{V_t}} - 1 - \frac{V_p + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II-20})$$

$K$  :  $1.38 \times 10^{-23}$  constant de Boltzmann.

$q$  :  $1.602 \times 10^{-19}$  charge de l'électron

$I_{ph}$  : Photo courant créer par la cellule

$I$  : Courant de diode

$R_{sh}$  : Résistances shunt

$R_s$  : Résistance série

$T$  : température de la cellule (K).

$n$  : facteur d'idéalité [26]

Température des cellules variant en fonction de l'éclairement et de la température ambiante par la relation :

$$T - T_a = \frac{G}{800} \times (NOCT - 20) \quad (\text{II-21})$$

Avec :

$T_a$  : Température ambiante.

NOCT est la température nominale de fonctionnement de la cellule (Nominal Operating Cell Temperature) dans les conditions suivantes :

$$V_t = \frac{NsKT}{q} \quad (\text{II-22})$$

$V_t$  : la tension thermique

## II.8.2 Simulation de la caractéristique du modèle NeMo<sup>®</sup>54P

Nous avons choisi le panneau NeMo<sup>®</sup>54P et ses propriétés sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Spécification
Puissance de crête typique ( $P_{op}$ )	220 (W)
Tension à la puissance de crête	27.54 (V)
Courant à la puissance de crête	8.08 (A)
Courant de court-circuit	8.62 (A)
Tension en circuit ouvert	33.77 (V)
Coefficient de température de la tension en circuit ouvert	-0.32(%)
Coefficient de température du courant de court-circuit	0.05(%)

Tableau. II.1 : Caractéristiques du module NeMo<sup>®</sup>54P [13]

## II.9 Caractéristiques électriques

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc}(cellule) = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (II-23)$$

- La tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ ) de chaque cellule est :

$$V_{co}(cellule) = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (II-24)$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp}(cellule) = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (II-25)$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp}(cellule) = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (II-26)$$

- La puissance maximale de chaque cellule est :

$$P_{max}(cellule) = I_{mp}(cellule) \cdot V_{mp}(cellule) \quad (II-27)$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_s(cellule) = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_s(module) \quad (II-28)$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh}(cellule) = \frac{N_p}{N_{s_s}} \cdot R_{sh}(module) \quad (II-29)$$

### II.9 .1 Courbes de la caractéristique du module NeMo<sup>®</sup>54P :

Nous avons simulé en créant un code dans le programme Matlab qui nous a permis d'atteindre ces résultats en utilisant les caractéristiques du panneau solaire.

#### A. Courbe de la caractéristique I-V

La figure (II-14) montre la caractéristique I-V du module NeMo<sup>®</sup>54P.

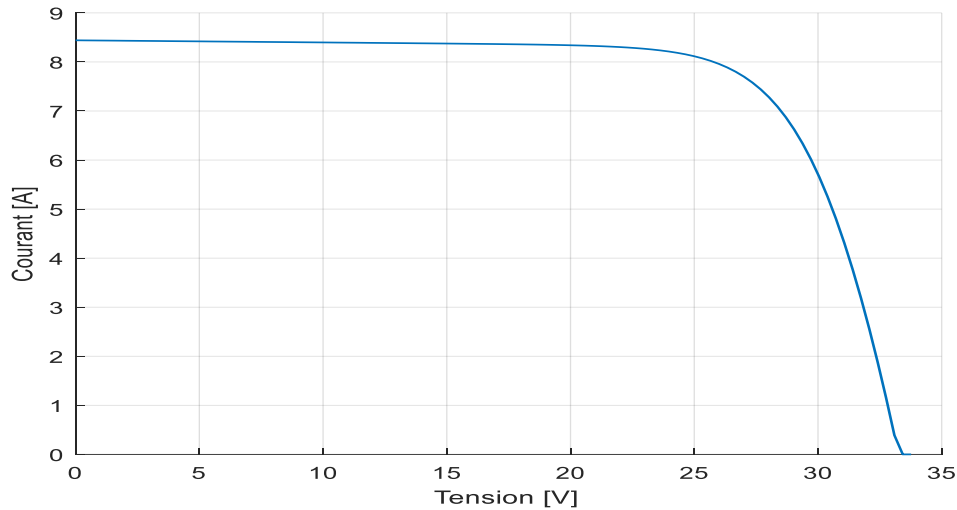


Figure. II.14 : Caractéristique I-V du panneau solaire

#### B. Courbe de la caractéristique P-V

La figure (II-15) montre la caractéristique P-V du modèle NeMo<sup>®</sup>54P.

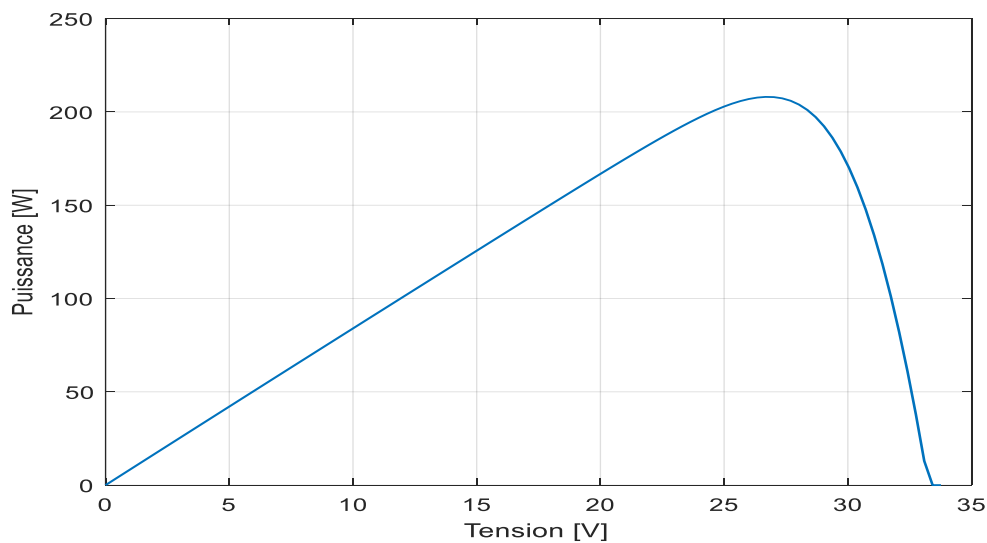


Figure. II.15 : Caractéristique P-V du panneau solaire

La valeur MPP peut être déterminée par Conditions d'essai standard 1000 et 25 C°

## II.9.2 Influence d'éclairement sur le module

### A. Influence sur la caractéristique $I=f(v)$

La figure (II-16) montre la caractéristique I-V du modèle NeMo<sup>®</sup>54P en fonction de l'éclairement incident et à température constante.

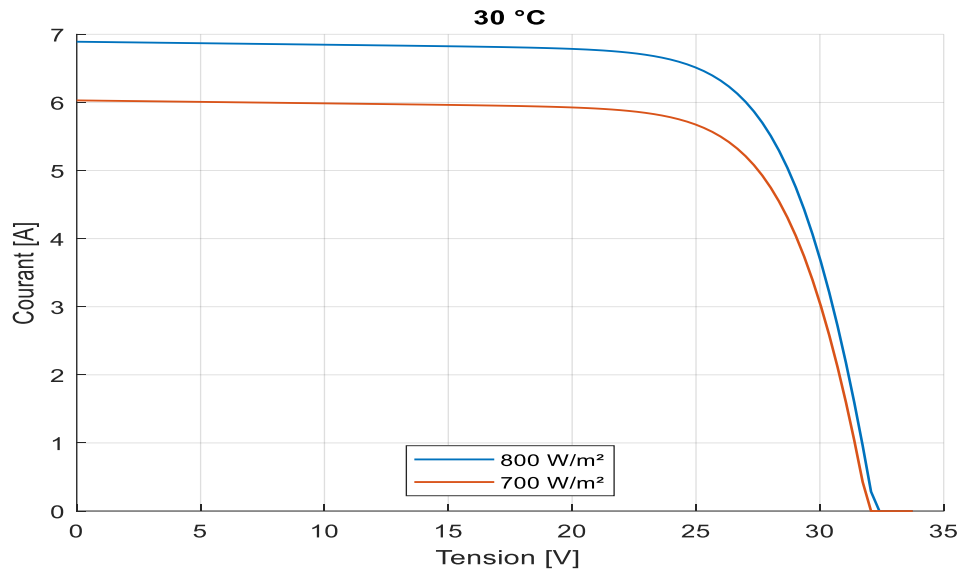


Figure. II.16 : Effet de l'éclairement solaire sur la courbe I-V (T=30C°)

La valeur du courant du court-circuit est proportionnelle à l'intensité d'éclairement, la valeur de tension de circuit ouvert varie peu par rapport à la variation de l'éclairement.

### B. l'influence sur la caractéristique $P=f(v)$

La figure (II-17) montre la caractéristique P-V du modèle NeMo<sup>®</sup>54P en fonction de l'éclairement incident et à température constante.

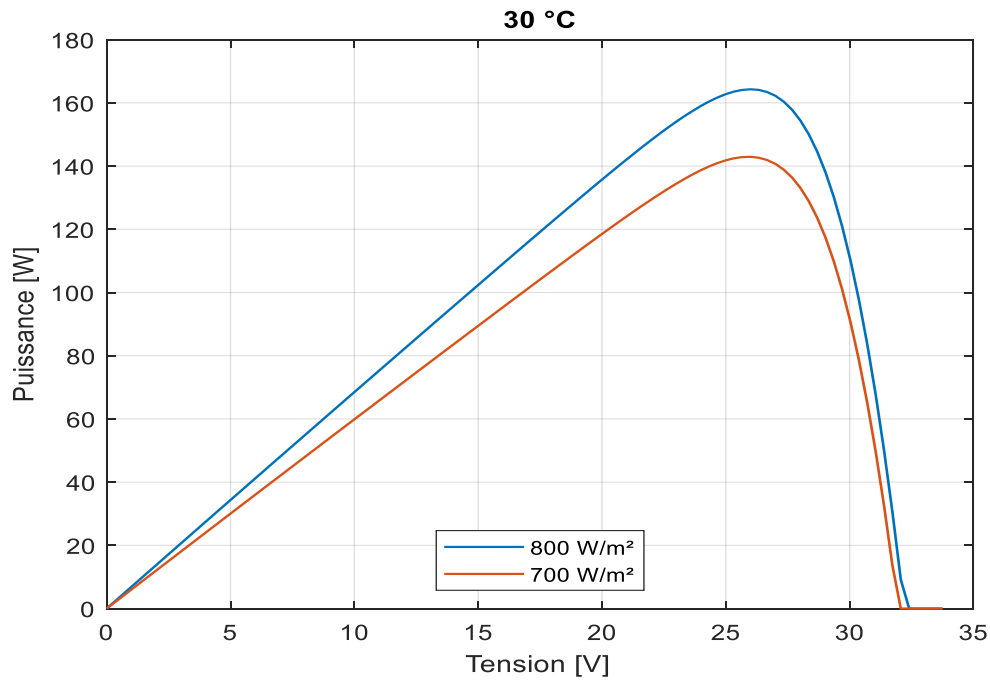


Figure. II.17 : Effet du l'éclairement solaire sur la courbe P-V ( $T=30C^{\circ}$ )

Cette figure illustre que la tension est quasi constante en fonction de variation d'éclairement, la puissance est proportionnelle à l'intensité d'éclairement.

### II.9.3 Influence de la température sur le module NeMo<sup>®</sup>54P

#### A : sur la caractéristique $I=f(v)$ :

La figure ci-dessous représente la caractéristique I-V pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de température.



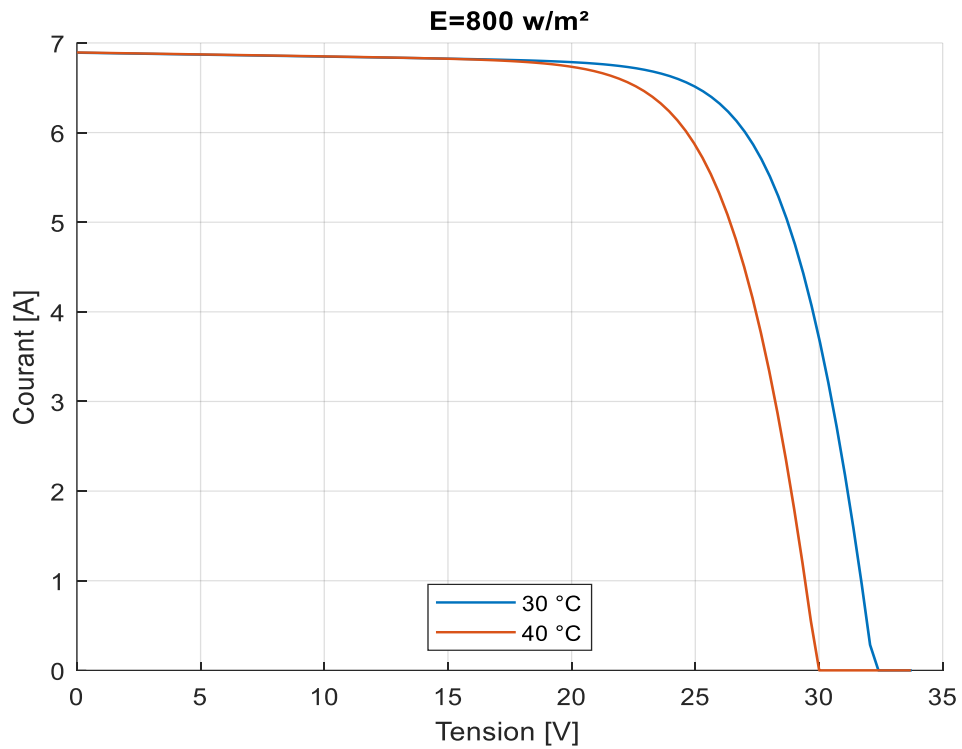


Figure. II.18 : Effet de la température ambiante sur la courbe I-V ( $E=800\text{W/m}^2$ )

Le courant du court-circuit  $I_{cc}$  varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre une diminution de la tension du circuit ouvert. D'autre part, le courant électrique augmente de manière relativement faible d'environ 0,5 % par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule [31].

### **B : sur la caractéristique $P=f(V)$**

La figure ci-dessous représente la caractéristique P-V pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de température.

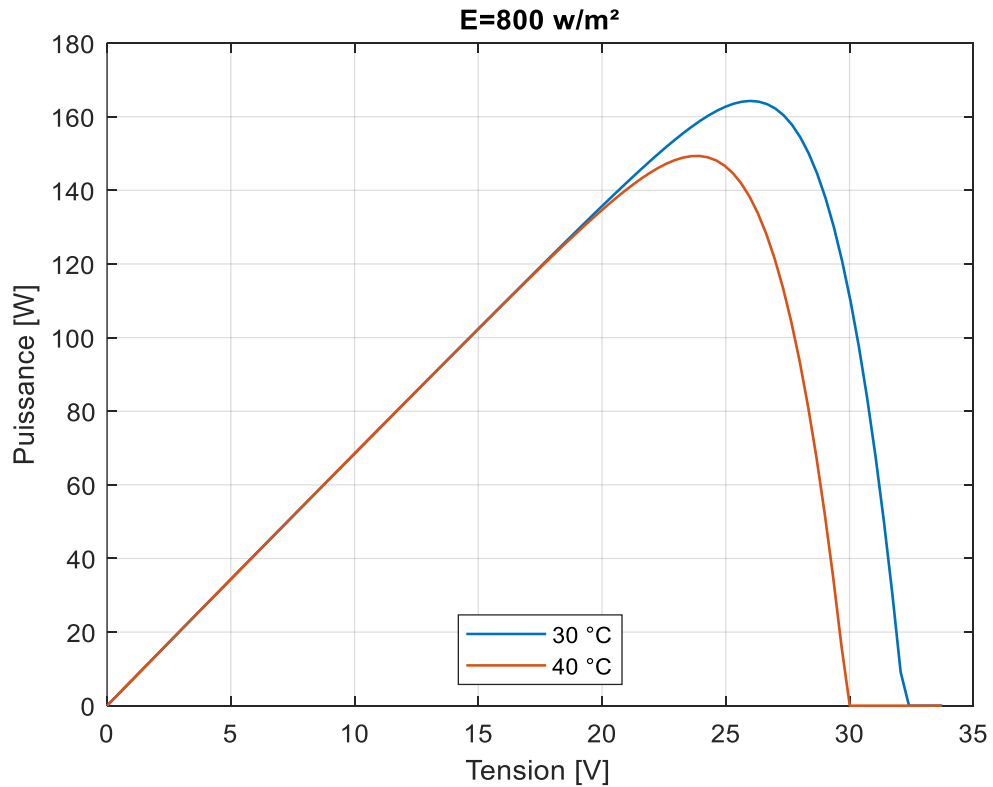


Figure. II.19 : Effet de la température ambiante sur la courbe P-V ( $E = 800 \text{ W/m}^2$ )

On peut remarquer sur la (Figure II-19) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible [33]. Lorsque la température augmente de la température ambiante et pour un éclairement de  $800 \text{ W/m}^2$  la puissance maximale diminue de la tension.

## II.10 Conclusion

Nous avons expliqué dans ce chapitre le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres influents sur leurs performances. Puis nous avons cité les différents éléments contenus généralement dans les configurations des systèmes photovoltaïques, afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV de production d'électricité solaire.

## **CHAPITRE III**

### **Analyse expérimentale sur la production d'hydrogène vert**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire un travail expérimental sur l'alimentation de notre électrolyseur en électricité renouvelable sans utiliser le réseau électrique, puis évaluer l'efficacité des composants du système. Au cours des expériences, la température ambiante, la température du panneau et l'irradiation solaire sont pris comme données d'entrée pour notre système, en fin et après l'analyse des performances de système nous proposons une amélioration pour augmenter la quantité d'hydrogène produit par le système.

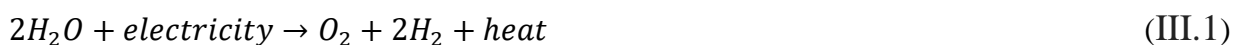
### III.2 Intégration des modules PV avec l'électrolyseur

Le panneau solaire photovoltaïque a été intégré à un électrolyseur pour la production d'hydrogène. Il existe trois types différents d'électrolyseur : Alcalin électrolyseur, électrolyseur de haute température et PEM (membrane d'échange de protons) électrolyseur. L'hydrogène est produit par fractionnement électrochimique de l'eau dans l'électrolyseur à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque. La concentration solaire est équilibrée de sorte que le point de contrôle le plus extrême du photovoltaïque est bien coordonné à la capacité de travail de l'électrolyseur pour optimiser la productivité du système [35].

### III.3 Électrolyseurs PEM

La technologie d'électrolyseur PEM [36] est dotée d'une membrane polymère et d'électrodes poreuses, et elle repose sur l'utilisation d'une membrane d'échange de protons polymériques. Sa pile composait physiquement quelques cellules connectées en série. L'opération d'électrolyse de l'eau permet de produire de l'hydrogène  $H_2$  et de l'oxygène  $O_2$  grâce à une praticabilité électrolytique alimentée par panneau solaire (PV) [37]. La modélisation électrolyseur PEM se compose de quatre parties qui sont les modèles électriques, thermiques, électrochimiques et thermodynamiques.

Le système PEM-solaire PV est représenté à la figure 17. Les équations. (III.1) et (III.2) montrent l'opération chimique, ainsi que l'opération d'oxydation [37] :





Pour l'hydrogène produit dans l'électrode cathodique, l'équation de réduction est donnée par l'équation (III.3).



La tension de fonctionnement totale de la cellule PEM  $V_{el}$  est établie par la somme du potentiel Nernst, de l'activation sur le potentiel et de l'ohmique sur le potentiel. Le modèle théorique est donné par les Equation. (III.4) et (III.5) [38] :

$$V_{el} = E + \eta_{lel} + E_{ohm} \quad (III.4)$$

$$E = \frac{\Delta G}{nF} \quad (III.5)$$

Avec :

- E : le potentiel thermodynamique
- $\eta_{lel}$  : l'activation sur tension,
- $E_{ohm}$  : l'ohmique sur le potentiel,
- $\Delta G$  : Gibbs énergie libre,
- n : nombre d'électrons transférés pendant la réaction
- F est la constante de Faraday.

L'efficacité électrique de l'électrolyseur PEM ( $\eta_{elec}$ ) donnée par l'Equation (III.6). Défini comme le produit d'efficacité de courant ( $\eta_i$ ) et d'efficacité de tension ( $\eta_{voltage}$ ) [39] :

$$\eta_{elec} = \eta_i * \eta_{voltage} \quad (III.6)$$

### III.4. Description de système

Le panneau solaire photovoltaïque a été testé dans des conditions extérieures au laboratoire LAGE de l'Université de Ouargla (Latitude 32°36E, longitude, 5°24N, hauteur 0.14 km). La technologie des panneaux solaires photovoltaïques polycristallins. Les mesures sont mesurées et

enregistrées de 9 h44 à 16 h30 h pour chaque période de 30 minutes, et les expériences ont été réalisé en mois de mai.

Le système expérimenté est composé de différents éléments qui sont regroupés ensemble pour constituer un prototype de production de l'Hydrogène, ces éléments sont :

- ❖ Deux Panneaux solaires.
- ❖ Régulateur.
- ❖ Convertisseur DC/AC intégrée
- ❖ Convertisseur DC /DC
- ❖ Deux batteries de 12 V
- ❖ Electrolyseur (PEM HG60).
- ❖ Bouteille de stockage d'Hydrogène.
- ❖ Unité d'acquisition de données.

L'objectif des tests expérimentaux est d'alimenter notre électrolyseur en électricité renouvelable sans utiliser l'électricité du réseau, puis d'évaluer l'efficacité des composants du système. Pendant les expériences, la température extérieure, la température du panneau et le rayonnement solaire sont pris comme données d'entrée pour l'unité de gestion de l'alimentation L'hydrogène délivré au cours de notre expérience est recueilli dans les bouteilles d'hydrogène basse pression sous forme d'hydrure métallique, tandis que l'oxygène gazeux produit par l'électrolyseur est évacué dans la chambre d'atmosphère.



Figure. III.01: Système de production d'hydrogène solaire

### III.5 Description technique de l'unité de gestion de l'alimentation PMU

Le PMU en tant qu'armoire de la gestion, Assure que l'énergie circule entre les panneaux solaires et la charge, la charge délivrée par le système est la somme de la puissance demandée par l'utilisateur et de la consommation du système.

### III.6. Résultats des expériences

#### III.6.1 La température et l'éclairement

La production de l'énergie photovoltaïque dépend fortement de la chute de l'irradiation solaire sur sa surface [33].

L'irradiation solaire et la température ambiante sont déterminées pour une journée comme le montre sur la figure III.2.

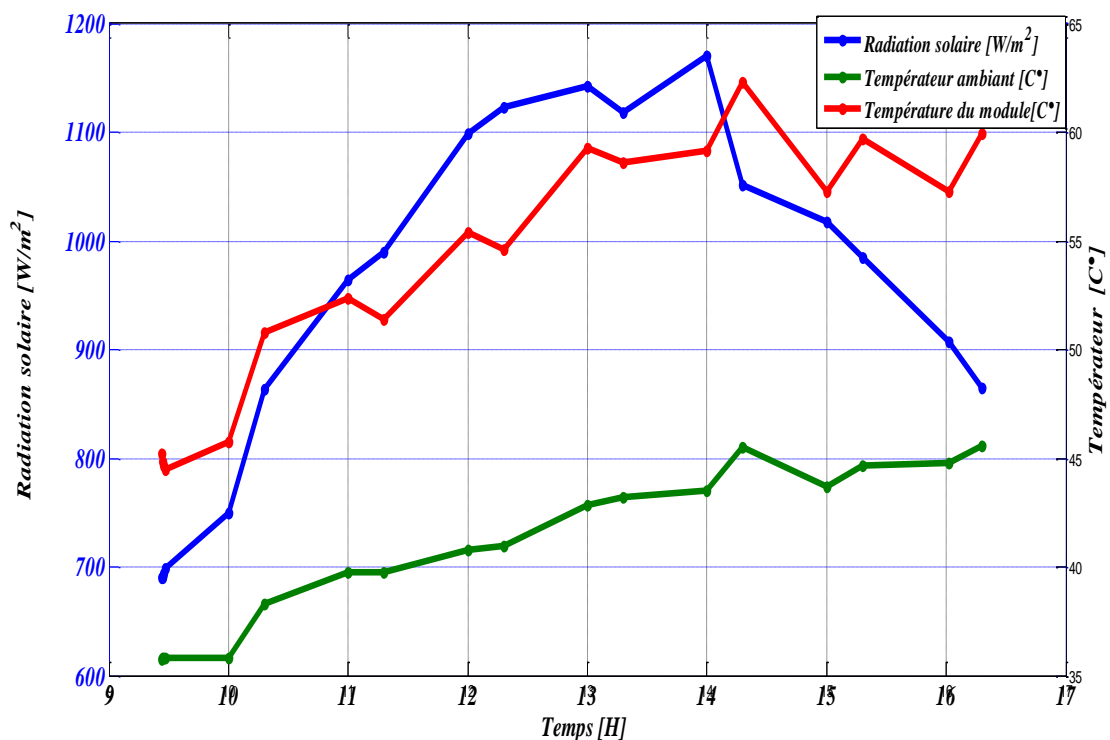


Figure III.02 : Profil quotidien de L'irradiation solaire et de la température ambiante.

À travers les résultats présentés, nous avons enregistré une valeur maximale pour le rayonnement solaire et la température du module à 14h00 et 14h30, respectivement, tandis que la valeur la plus élevée pour la température ambiante été à 16h30.

- **Courant de module**

Les valeurs de courant du module sont obtenues pour la durée de l'expérience comme il est indiqué sur la figure III.03

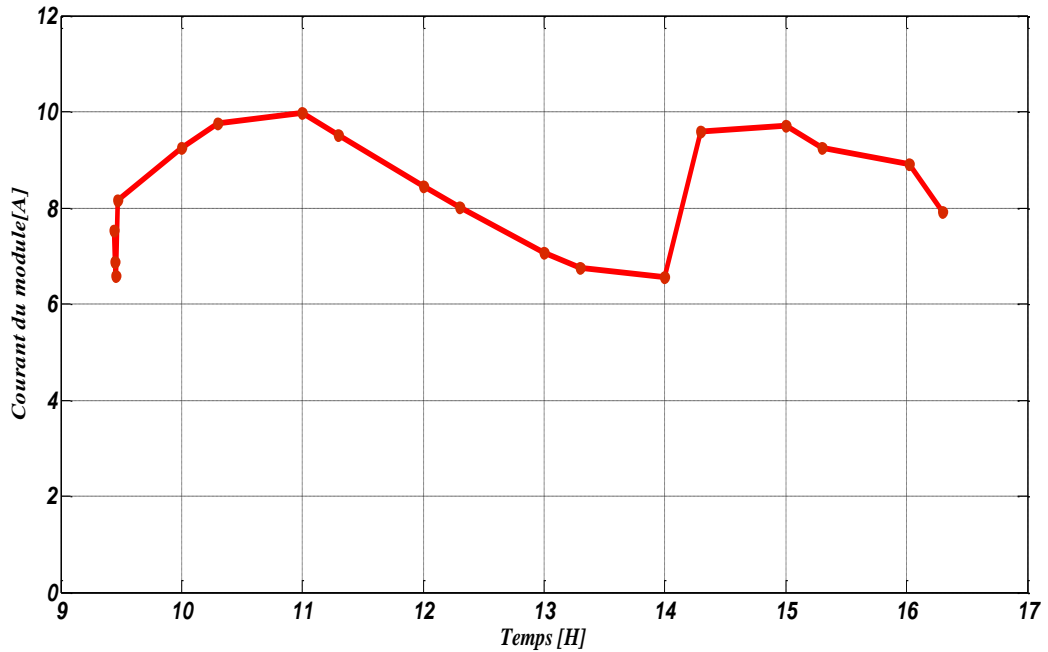


Figure III. 03 : Courant du module en fonction du temps.

D'après la figure 3, nous remarquons que la valeur la plus élevée de Courant a été enregistrée aux heures 11 h 00 et 15 h 00. Cela est dû à la modulation de la quantité d'irradiation, tandis que la valeur la plus basse a été enregistrée à l'environ de 09h30 et à 14h.

- **Puissance de radiation solaire**

Les valeurs de Puissance de l'irradiation solaire sont obtenues pour la durée de l'expérience comme il est indiqué sur la figure III.04.



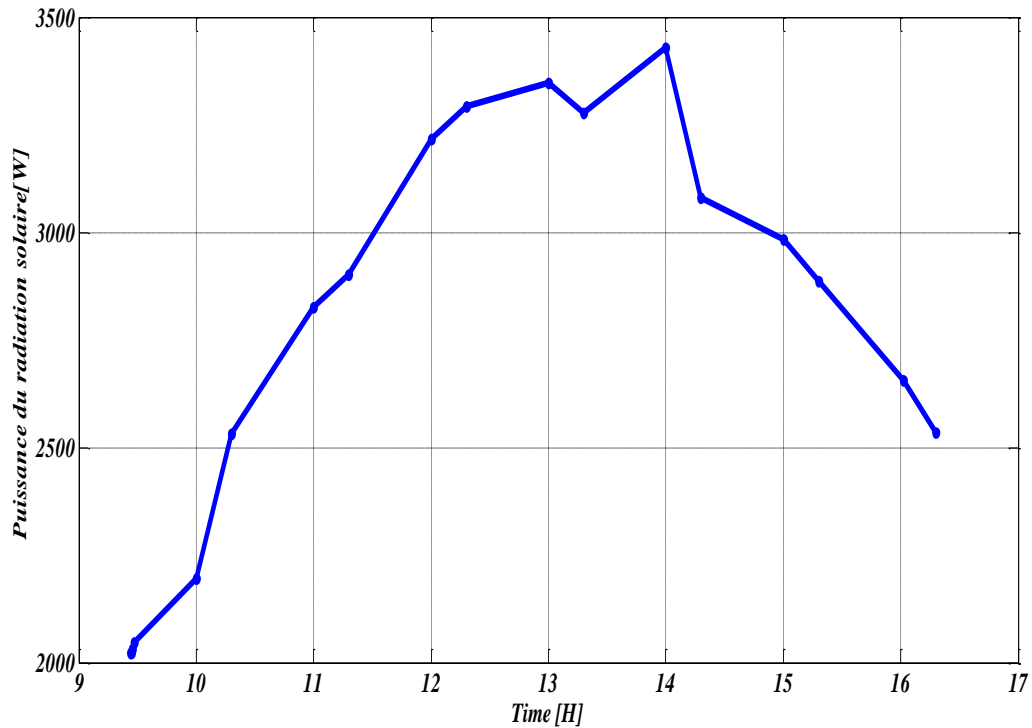


Figure III.4: Puissance de l'irradiation solaire en fonction du temps

D'après les résultats de la courbe, on remarque que la valeur la plus élevée de Puissance de l'irradiation a été enregistrée entre 12h et 14h. Pour notre jour d'expérimentations avec une durée à peu près de 07h.

- **Puissance électrique au niveau des panneaux solaires et la charge**

Les valeurs de Puissance du irradiation solaire et panneau solaire sont obtenues pour la durée de l'expérience comme indiqué sur la figure III.05.

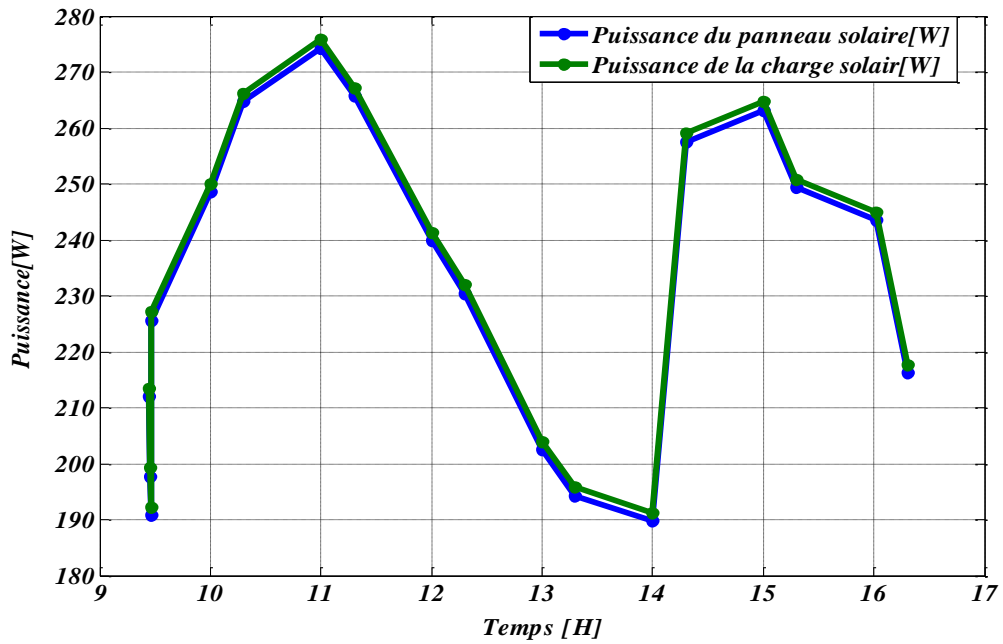


Figure III.5: Puissance de l'irradiation solaire et panneau solaire en fonction du temps

On voit que la puissance de ces panneaux solaires est supérieure à la puissance de la charge. Les deux valeurs précédentes sont des valeurs électriques (sortie des panneaux solaires et entrée de la charge)

### III.6.2 Résultats de batterie

- **Courant et Tension**

Les valeurs de courant et de la tension des batteries sont obtenues pour la durée de l'expérience comme il est indiqué sur la figure III.06.

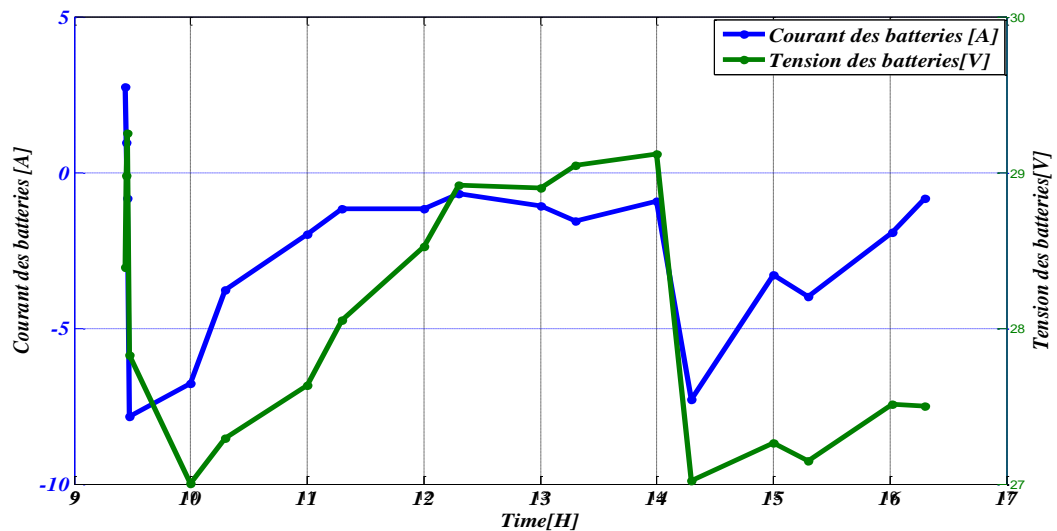


Figure III.6 : Courant et tension des batteries en fonction du temps

D'après les courbes enregistrées sur la Figure III.06, on peut voir que pendant le temps de démarrage de système la tension de la batterie prend une valeur supérieure à 29 V et après quelque second la tension tombe jusqu'à des valeurs inférieure à 28 V ensuite pendant le temps de fonctionnement de système la batterie se décharge avec la variation de tension et de courant dans les intervalles (28V à 29,2 V) et (-7,8 A à -0,67A) respectivement, suivant les besoins de la charge et la disponibilité des irradiation au niveau des panneaux solaires.

### Puissance de la batterie

La figure III .07 ci-dessous montre comment la puissance fluctue en fonction des besoins de la charge utile, et les conditions de l'exposition des panneaux au irradiation solaires.

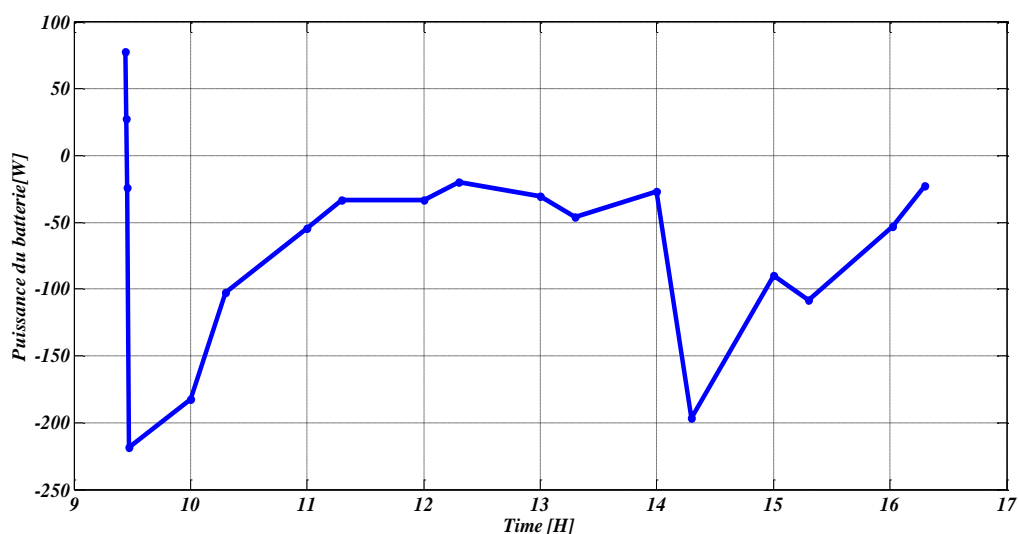


Figure III.07 : Puissance de la batterie en fonction du temps

D'après les résultats de la courbe on constate que la batterie se décharge pendant le temps de fonctionnement de système.

### III.6.3 Electrolyseur

- Puissances d'entrée et de sortie de d'électrolyseur

Dans le but de connaître le rendement de l'électrolyseur PEM, nous obtenons la puissance entrante dans l'électrolyseur à partir de l'acquisition de données et les valeurs de puissance de sortie de l'électrolyseur sont calculées par l'équation suivante. [40]

$$P_{out} = \frac{Q * E * 1000}{3600} \quad (20)$$

- Q : Hydrogène débit (l/h).
- E = 10.8 la valeur calorifique inférieure de l'hydrogène en (MJ/m<sup>3</sup>)

Les puissance à l'entrée et à la sortie de l'electrolyseur sont représenté sur la figure suivante

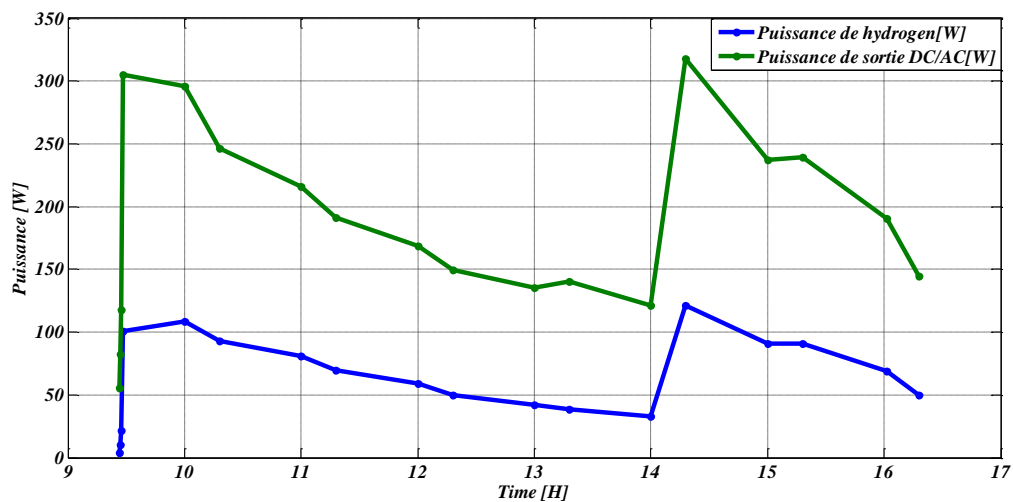


Figure III.08 : Puissance d'entrée et de sortie d'électrolyseur en fonction de temps

Nous observons que la puissance d'entrée est toujours supérieure à celle de la puissance de sortie, parce qu'il y'a des pertes de puissances au niveau de l'électrolyseur.

### III.6.4 Production d'hydrogène

- Production d'hydrogène

La figure III.09 ci-dessous montre comment la production d'hydrogène change et montre les valeurs maximales et minimales, en fonction des conditions du ciel et de la disponibilité de l'énergie.

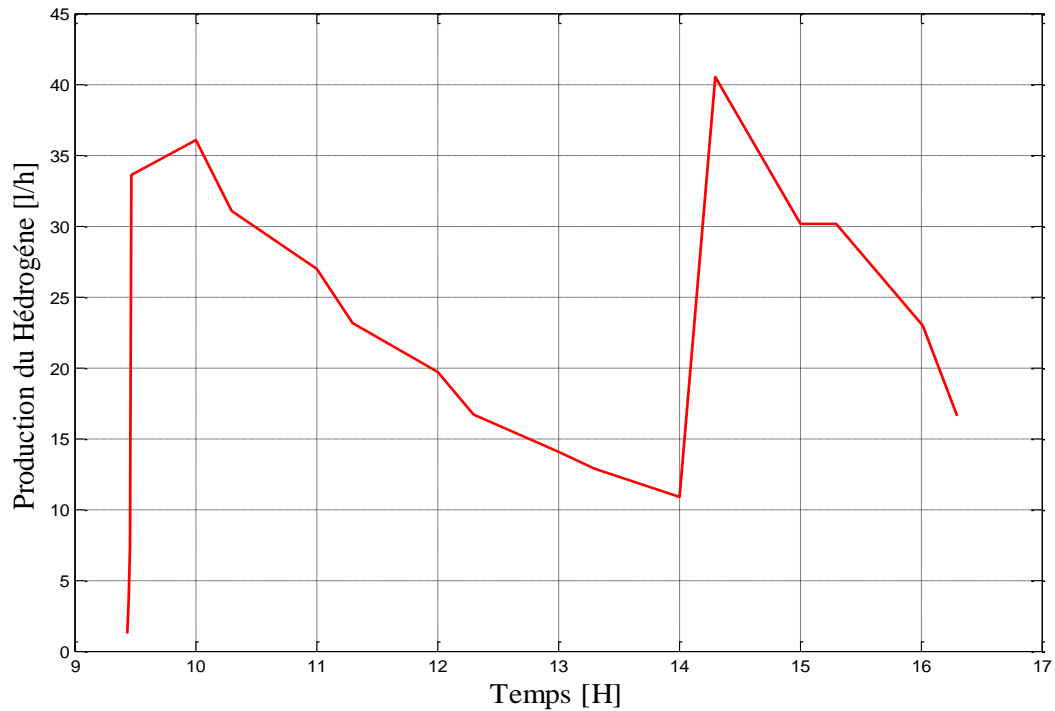


Figure III.09 : production d'hydrogène en fonction de temps.

On remarque sur la figure III.09 que le débit de l'électrolyseur varie au cours de l'expérience entre 1,23 l/h et 40,49 l/h et prend à 14h la valeur la plus faible, 10,8 l/h.

### III.6.5 Convertisseur DC/DC

- Puissance du système

Les valeurs des puissances du système sont obtenues pour la durée de l'expérience comme indiqué sur la figure III.10.

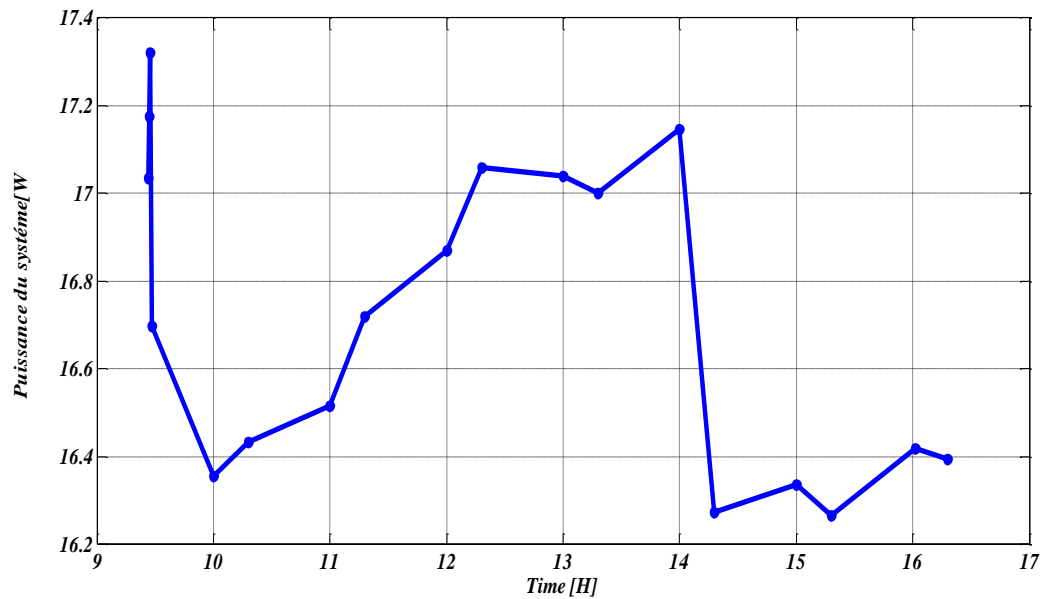


Figure III.10 : Puissance du système en fonction du temps.

La courbe représente la puissance du système, on remarque l'oscillation les valeurs, et cela représente la consommation du système à chaque instant

- **Courant continu du système**

Les valeurs de Courant continu du système sont obtenues pour la durée de l'expérience comme indiqué sur la figure III.11

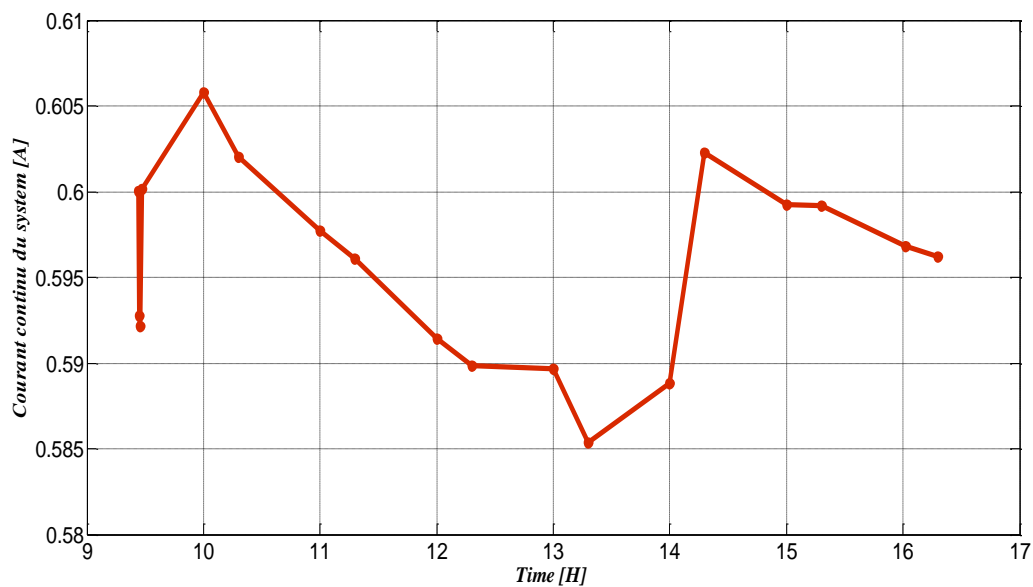


Figure III.11 : Courant continu du système en fonction du temps.

La valeur la plus élevée de courant continu du system d'entrée du convertisseur DC/DC a été enregistrée à 10h00, puis il a fluctué en fonction des conditions météorologiques (éclairage) tout au long de l'expérience.

- **Tension de sortie du convertisseur DC/ DC**

Les valeurs de tension de sortie du convertisseur sont obtenues pour la durée de l'expérience comme indiqué sur la figure III.12.

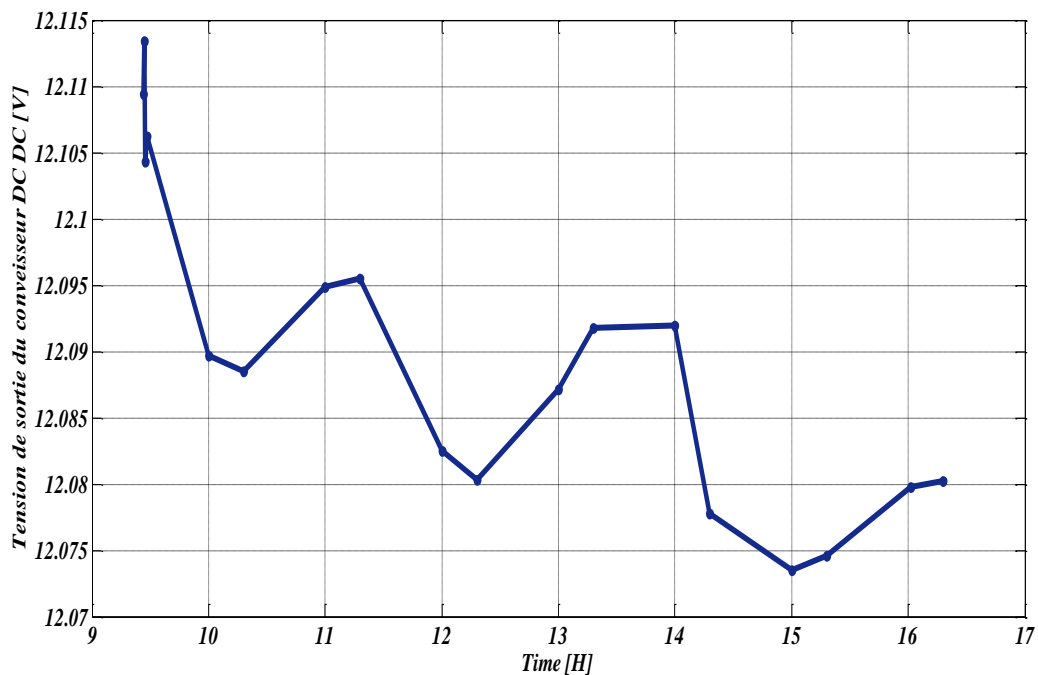


Figure III.12: Tension de sortie du convertisseur DC/ DC en fonction du temps

La valeur la plus élevée de la tension de sortie du convertisseur DC/DC a été enregistrée à 9h45 puis il a fluctué en fonction des conditions météorologiques tout au long de la période d'expérimentation, où la valeur la plus basse a été enregistrée à 15h00.

### III.6.6 Convertisseur DC/AC

- Puissance convertisseur

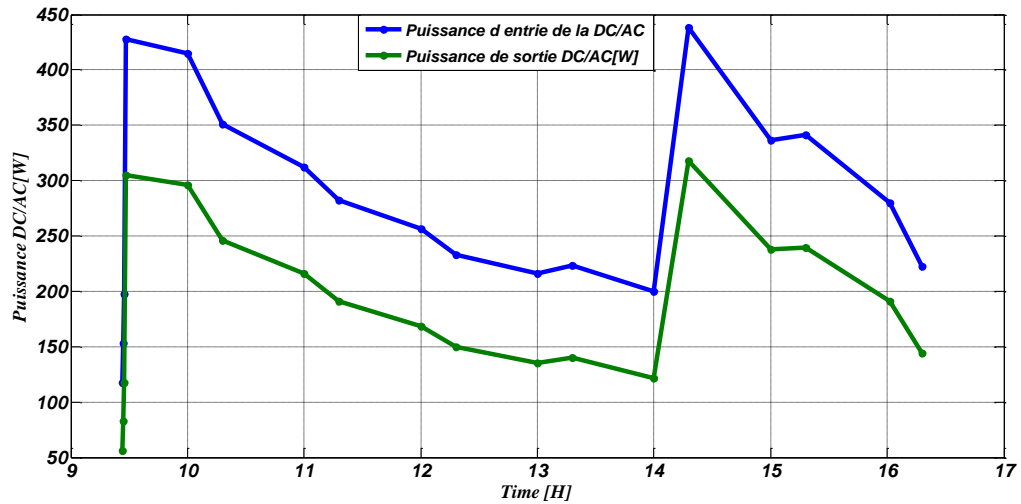


Figure III.13: Puissance de convertisseur en fonction du temps.

Il a été observé que la Puissance d'entrée est toujours supérieure à puissance de sortie du convertisseur DC/ AC à cause des pertes au niveau de convertisseur.

- Courant d'entrée et de sorte du convertisseur DC/ AC

Les valeurs de courant d'entrée et de sortie du convertisseur DC/AC sont obtenues pour la durée de l'expérience comme indiqué sur la figure III.14.



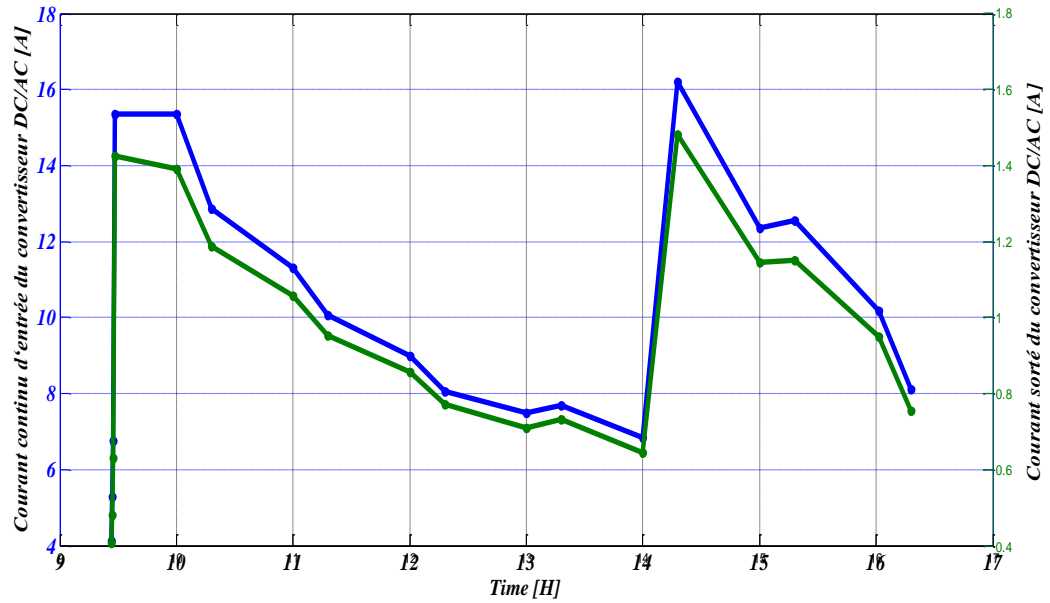


Figure III.14: Courant d'entrée et de sortie du convertisseur DC/ AC en fonction du temps.

On voit que le courant d'entrée est supérieur au courant de sortie du convertisseur DC/AC, donc le convertisseur perd du courant.

- **Tension de sortie de convertisseur DC/ AC**

Les valeurs de tension de sortie de convertisseur DC/ AC sont obtenues pour la durée de l'expérience comme indiqué sur la figure III.15.

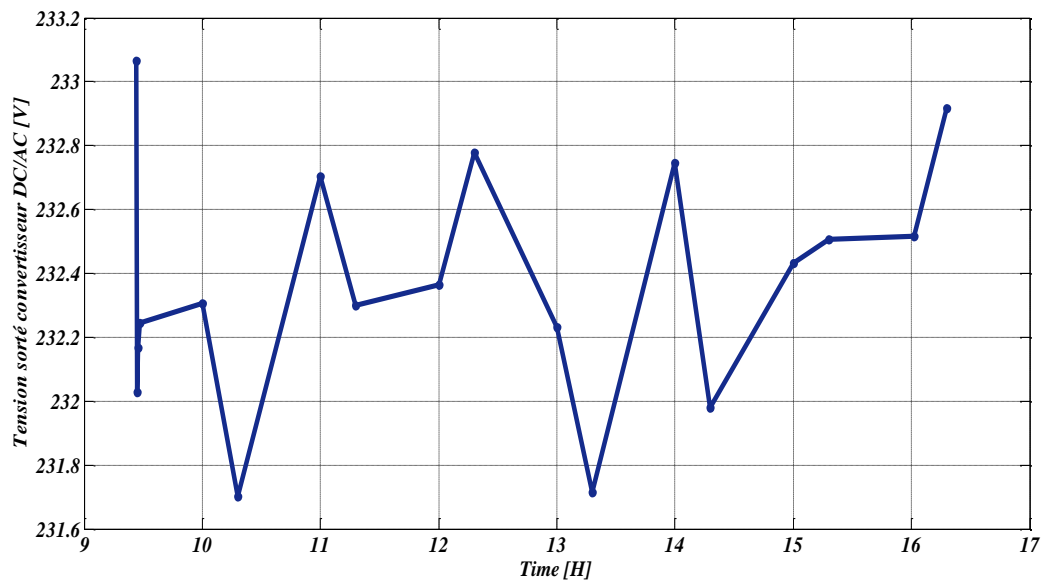


Figure III.15: Tension de sortie de convertisseur DC/ AC en fonction du temps

A travers les résultats enregistrés ci-dessus, nous avons enregistré une fluctuation de la tension de convertisseur de type DC/AC, selon les besoins du système.

### III.6.7 Volume d'Hydrogène

Par l'utilisation de la méthode d'intégration de trapèze sous Matlab, on a calculé le volume d'hydrogène pendant le temps de fonctionnement de système.

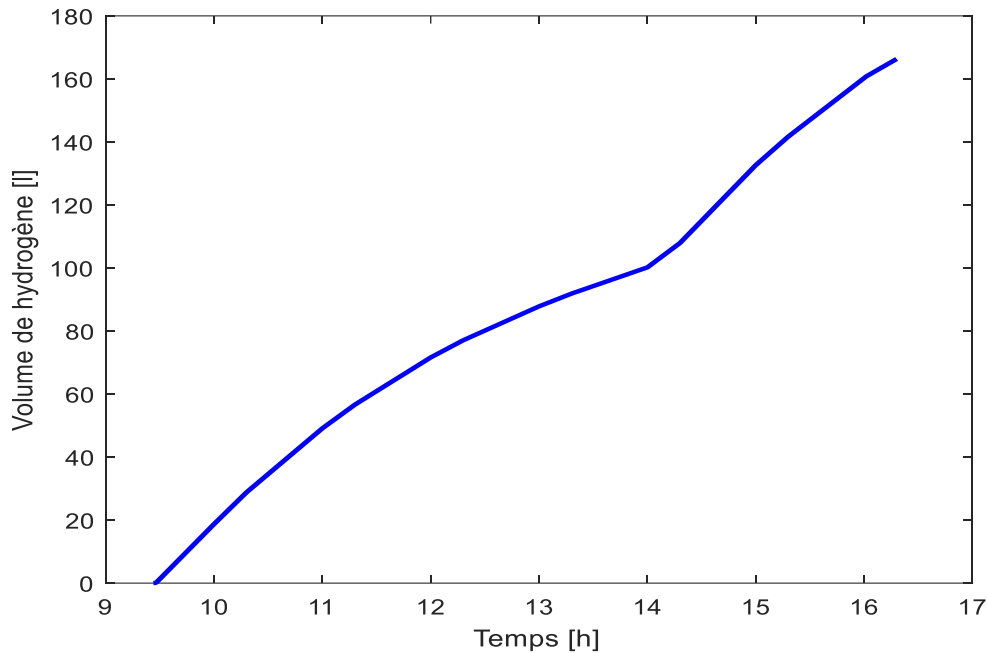


Figure III.16: Volume de l'hydrogène en fonction du temps

Pour un fonctionnement pendant une journée de 9h44 à 16 h30, la quantité d'Hydrogène produite est de 166 L

### III.6.8 Le rendement de l'électrolyseur

Nous avons obtenu les valeurs de rendement pour la durée de l'expérience, sachant que le transformateur et le circuit de redressement sont intégrés dans l'électrolyseur, le rendement peut être calculé par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{\text{puissance de sortie d'electrolyseur}}{\text{puissance d'entrée d'electrolyseur}}$$

Les résultats sont présentés dans la figure III.17 suivantes :

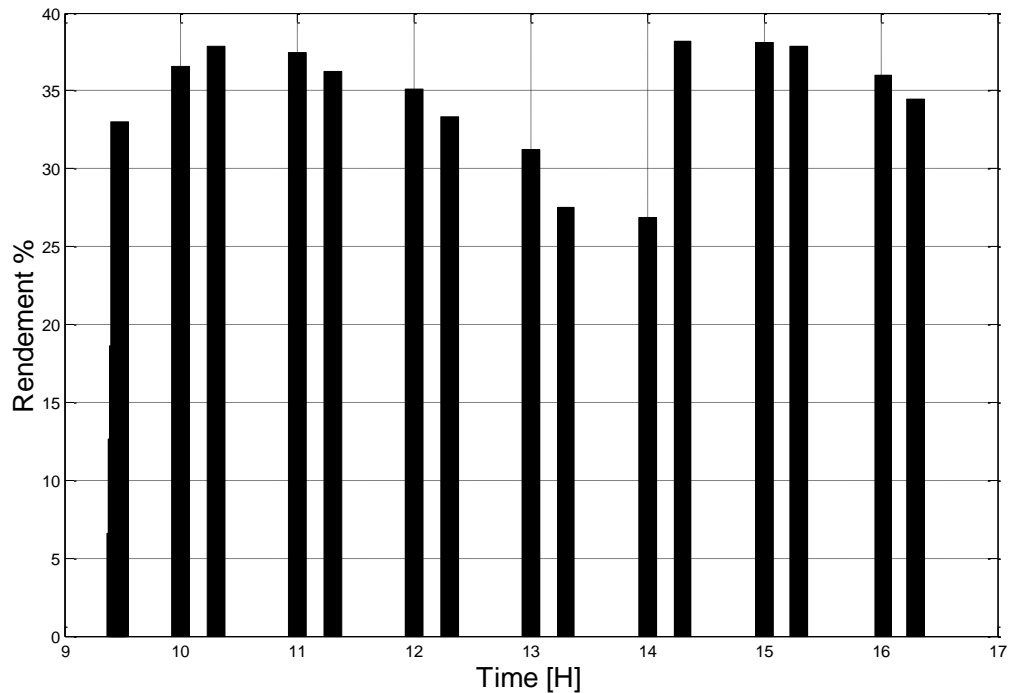


Figure III.17: Rendement de l'électrolyseur PEM.

D'après cette figure III.17, on remarque que le rendement de l'électrolyseur ne dépasse pas 40% à cause des pertes au niveau de l'électrolyseur.

### III.7 Améliore de volume d'hydrogène produit

Afin de comprendre comme en doit procéder pour augmenter la quantité d'Hydrogène produite par le système, nous effectuons les vérifications suivantes :

- 1) Une comparaison entre les valeurs des rendements de générateur pendant le temps de fonctionnement et son rendement maximale s'il y a une extraction maximale de la puissance de générateur, voir le tableau III-1.

Temps	Rendement de module	Rendement de module max
09 :44	<b>10.56</b>	<b>11.76</b>
09 :45	<b>09.84</b>	<b>11.90</b>
09 :46	<b>09.46</b>	<b>11.90</b>
09 :47	<b>11.09</b>	<b>11.92</b>
10 :00	<b>11.38</b>	<b>11.84</b>
10 :30	<b>10.52</b>	<b>11.31</b>
11 :00	<b>09.76</b>	<b>11.17</b>
11 :30	<b>09.21</b>	<b>11.28</b>
12 :00	<b>07.50</b>	<b>10.83</b>
12 :30	<b>07.05</b>	<b>10.96</b>
13 :00	<b>06.09</b>	<b>10.35</b>
13 :30	<b>05.97</b>	<b>10.46</b>
14 :00	<b>05.58</b>	<b>10.35</b>
14 :30	<b>08.41</b>	<b>09.94</b>
15 :00	<b>08.88</b>	<b>10.54</b>
15 :30	<b>08.69</b>	<b>10.28</b>
16 :00	<b>09.22</b>	<b>10.47</b>
16 :30	<b>08.59</b>	<b>10.19</b>

Tableau III-1 : Rendement de module en fonction du temps

Nous remarquons que le rendement instant des modules est toujours inférieur au rendement maximal au même instant.

2) Nous avons réalisé sous MATLAB pour le calcul de la puissance maximale des panneaux solaires. Avec les éclairagements et températures considérés de notre expérience, nous avons comparé cette puissance avec celle de la puissance des panneaux solaires. Nous avons reçu les courbes qui suivant :

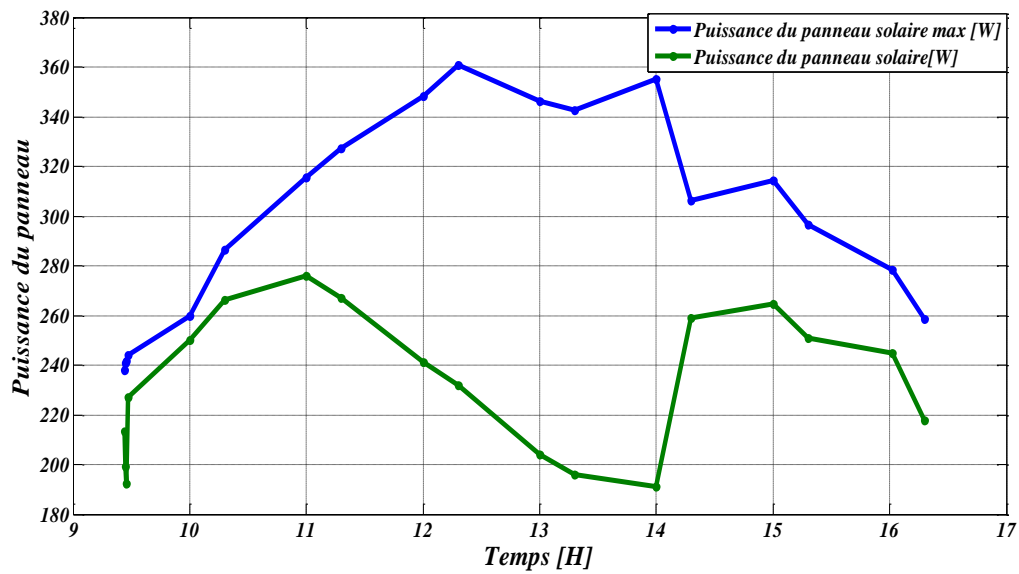


Figure III.18: Puissances du panneau en fonction du temps

On a observé que les puissances maximales calculées des modules sont toujours supérieures à la puissance de sortie des modules.

Donc pour améliorer la quantité d'hydrogène produite on est obligé d'améliorer le transfert de puissance entre les modules et l'électrolyseur.

- **Pour l'électrolyseur**

Nous présentons les valeurs que nous pouvons obtenir, et la figure suivante montre une comparaison de la puissance d'entrée et de sortie de l'électrolyseur.

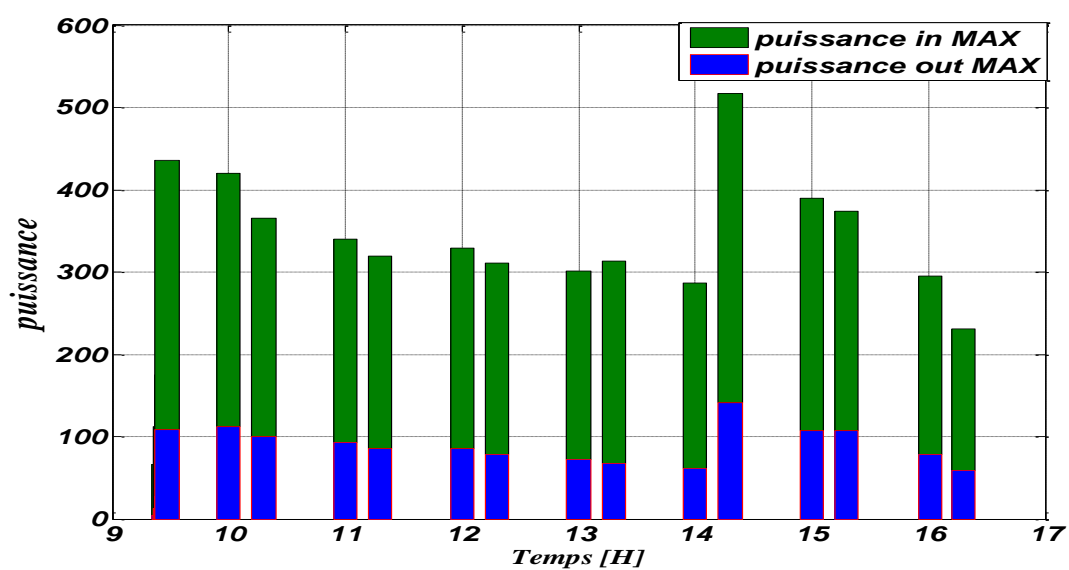


Figure III.19: Puissance de l'électrolyseur après l'amélioration en fonction du temps

- Pour la production

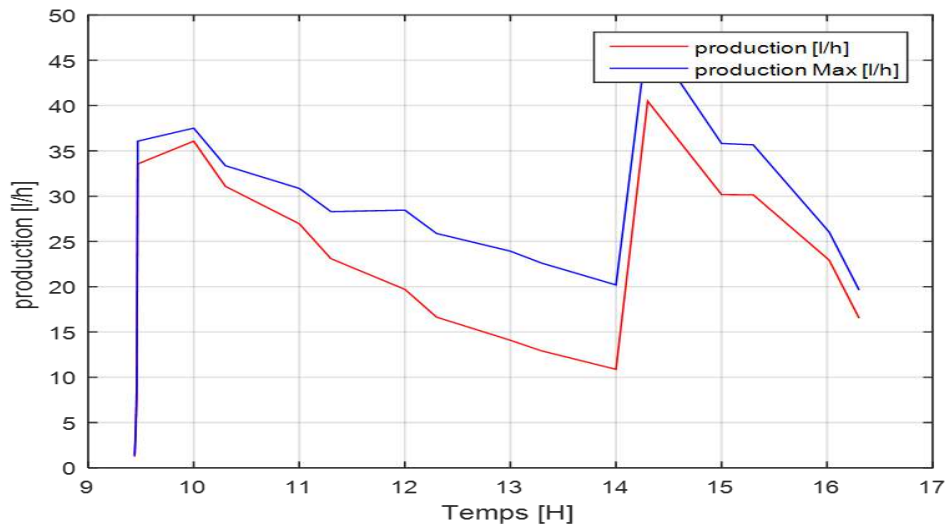


Figure III.20 : Production d'hydrogène MAX en fonction du temps

Nous remarquons que la production maximale calculé est toujours supérieur à la production pendant l'expérience.

- Pour volume d'hydrogène

Nous présentons les valeurs que nous pouvons obtenir, et la figure suivante montre une comparaison entre les deux productions de l'hydrogène avant et après l'amélioration proposé.

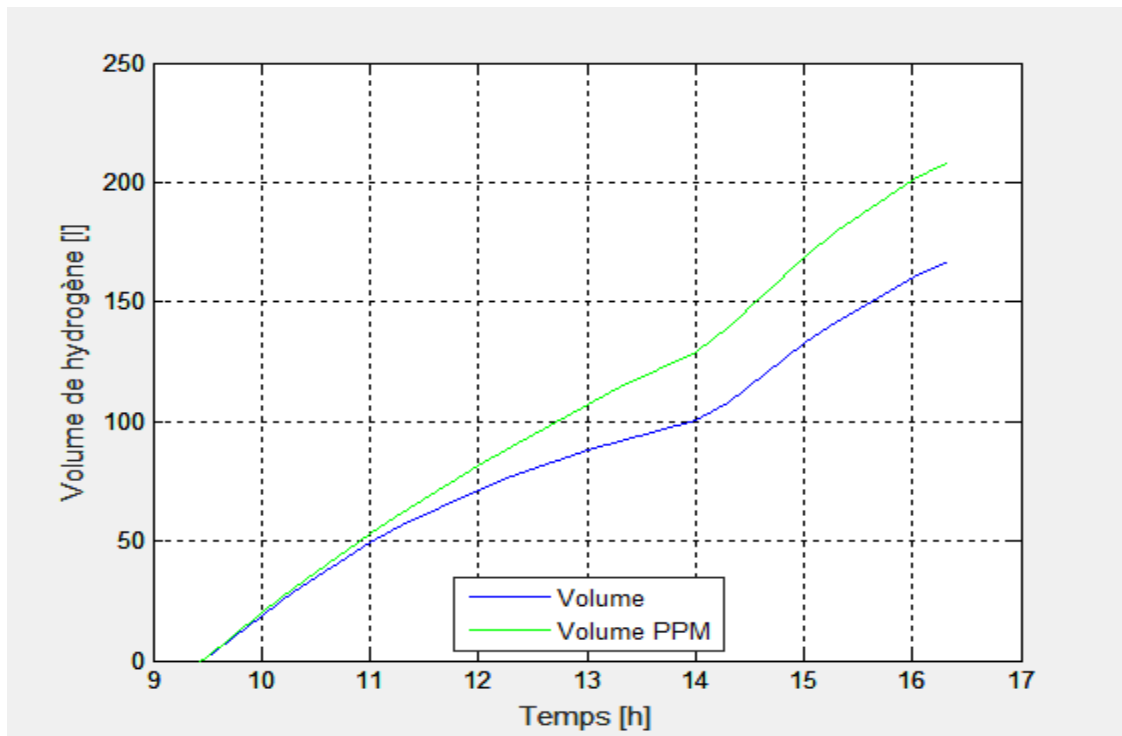


Figure III.21 : Comparaison des volumes d'hydrogène en fonction du temps

On voit que le volume d'hydrogène après l'amélioration proposé est supérieur au volume d'hydrogène produit lors de l'expérience

### III.6 Conclusion

D'après la réalisation des expériences au niveau du laboratoire, pendant 7 heures de la journée et d'après l'acquisition des résultats concernant notre système, nous pouvons noter que l'efficacité l'électrolyseur ne dépasse pas 40%, et que la quantité d'hydrogène produite est de 166 litres au cours de l'expérience, l'amélioration que nous avons proposée pourra augmenter la quantité d'hydrogène produite et par rapport aux résultats précédents de l'expérience.

## **Conclusion générale**



## **Conclusion générale**

Notre travail concerne la production d'Hydrogène par la voie d'un système photovoltaïque alimentant un électrolyseur de type PEM (proton exchange membrane).

Notre objectif est l'étude et l'expérimentations d'un système photovoltaïque dans le but de proposer des solutions pour augmenter le volume de l'hydrogène produit par électrolyseur, la production d'énergie électrique est réalisée par un système photovoltaïque.

Nous avons commencé notre travail par la présentation de la région d'étude et des généralités sur les rayonnements solaires et les systèmes photovoltaïque. Ensuite nous avons exécuté des expériences sur notre système pour la production d'hydrogène par le fonctionnement de l'électrolyse (PEM) à l'aide de l'alimentation par le système photovoltaïques. Après l'étude et l'analyse des résultats des expériences, nous citons les remarques suivantes :

- La puissance du système de sortie 12V DC/DC est non utilisé
- La puissance fournie par les modules PV est inférieure à la puissance maximale à chaque instant durant le temps de fonctionnement de système.

Pour cela, on propose des améliorations qui peuvent surélever les performances de système et augmente la quantité d'hydrogène produite comme suit :

- L'ajout d'un système de régulation du suivi de la puissance maximale qui permet l'extraction vers le système de la puissance maximale des modules à chaque instant pendant le temps de fonctionnement.
- L'installation d'un système de coupure pour la conserve de la puissance non utilise au niveau de sortie DC/DC 12 V, selon le besoin énergétique.

Comme perspective, Cette installation pourra être développé par l'ajout d'autres éléments au système photovoltaïque, comme la pile à combustible et d'autres éléments de contrôle et de gestion de l'énergie électrique.

## Références bibliographiques

- [1] Kouache Ahmed Zouhir, Rehouma Lakhdar, Djafour Ahmed, Danoune Mohammed Bilal. Contribution À La Modélisation Optimale Des Piles À Combustible De Type PEM Par Utilisation Des Méthodes Méta-heuristiques. 2020. Université Kasdi Merbah - Ouargla, Mémoire de Master.
- [2] Mardjia, H. Adnani, « Algérie, énergie solaire et Hydrogène », office des publications universitaire.
- [3] للتنمية كنزة. "الطاقة الشمسية كاستراتيجية لتحقيق التنمية المستدامة في الجزائر." المجلة الدولية and عيشاوي، كنزة، 35-42 : (2016)5.1
- [4] Maafi, « A survey on PV activities in Algeria ». Renewable Energy, 2000.
- [5] Meziane, F. (2012). Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [6] Office Météorologique Ouargla.
- [7] Helali, Kamelia. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [8] Soltane Belakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents.
- [9] Bekkouche Sidi Mohammed El Amine « Modélisation du Comportement Thermique.
- [10] Louazene, Mohamed Lakhdar. Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes–Application zone de Ouargla. Diss. Université de Batna 2, 2015.
- [11] Lemdak, Kaima, and Nabila Kiouas. Simulation et Etude expérimentale d'un système PV au milieu aride. Diss. .2019 جامعة غرداية.
- [12] ZERROUKI, Moussa, et al. "Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien." Annals of Science and Technology 4.1 (2012).
- [13] Khelfaoui, N., et al. "Experimental investigation of solar hydrogen production PV/PEM electrolyseur performance in the Algerian Sahara regions." International Journal of Hydrogen Energy 46.59 (2021): 30524-30538.
- [14] ASTM E 1830 Standard Test Methods for Determining Mechanical Integrity of Photovoltaic Modules.
- [15] Evaluation de l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah.

- [16] Gougui, A., et al. "Field experience study and evaluation for hydrogen production through a photovoltaic system in Ouargla region, Algeria." *International Journal of Hydrogen Energy* 45.4 (2020): 2593-2606.
- [17] Stanciu C, Stanciu D. Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World—A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models. *Energy Convers Manag* 2014.
- [18] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models » 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.
- [19] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [20] Site web « <https://www.universalis.fr/encyclopedie/semiconducteurs/> »
- [21] Site web « <https://www.usinenouvelle.com/article/cahier-technique-avec-le-photovoltaïque-organique-le-solaire-gagne-en-souplesse.N1810682> »
- [22] Loïc Bailly « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [23] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [24] Roshanak Radbeh « Réalisation et caractérisation des cellules solaires Organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [25] Zouache Foudil « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques ». Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.
- [26] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, and Syaf aruddin, "Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 19, no. 7, pp. 1613–1626, Aug. 2011.
- [27] Loïc Bailly « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [28] Tanvir Ahmad, Sharmin Sobhan and Md Faysal Nayan, 'Comparative Analysis Between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect On its Efficiency', *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 4, N°3, pp. 31 - 46, 2016.

- [29] Shengyi Liu and Roger A. Dougal, 'Dynamic Multiphysics Model for Solar Array', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, N°2, pp. 285 – 294, 2002.
- [30] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, 'PV Panel Model Based on Data Sheet Values', In IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2392 - 2396, 2007.
- [31] Oi, “Design and simulation of photovoltaic water pumping system”, Thèse de Doctorat, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005.
- [32] Adamo F, Attivissimo F, Di Nisio A, Lanzolla A, Spadavecchia
- [33] Idoko L. Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique. Energy Rep, 2018.
- [34] Shaari S, Sopian K, Amin N, Kassim MN. The temperature dependence coefficients of amorphous silicon and crystalline photovoltaic modules using Malaysian field test investigation, 2009.
- [35] Paul B, Andrews J. Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in Solare hydrogen systems for remote area power supply, 2008.
- [36] Chadel M, Bouzaki MM, Chadel A, Petit P, Sawicki J-P, Aillerie M, et al. Influence of the spectral distribution of light on the characteristics of photovoltaic panel. Comparison between simulation and experimental. In: AIP conference proceedings. AIP Publishing LLC, 2017.
- [37] Aouali F, Becherif M, Tabanjat A, Emziane M, Mohammedi K, Krehi S, et al. Modelling and experimental analysis of a PEM electrolyser powered by a solar photovoltaic panel, 2014.
- [38] Paul B, Andrews J. Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in Solare hydrogen systems for remote area power supply, 2008.
- [39] Gougui A, Djafour A, Danoune M, Khelfaoui N. Field experience study and evaluation for hydrogen production through a photovoltaic system in Ouargla region. Algeria 2020

## Résumé

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à produire de l'hydrogène grâce au rayonnement solaire, qui est reçu par les panneaux solaires orientés selon un angle optimal, produisant ainsi de l'énergie électrique, qui sert à alimenter l'électrolyseur. Ce dernier sépare l'eau en oxygène et en hydrogène et puis stocke l'hydrogène dans des bouteilles spéciales. Les résultats de l'expérience dans le laboratoire ont été encourageants en termes de volume produit, qui a atteint environ 166 litres pendant les périodes d'essai. Afin d'améliorer la quantité de production, la puissance maximale des panneaux a été calculée dans les mêmes conditions de l'expérience dans l'environnement MATLAB, où le volume d'hydrogène produit a atteint environ 207 litres dans les mêmes périodes d'étude expérimentale.

**Mots clé :** Gisement solaire ; Système photovoltaïque ; Hydrogène solaire

### ملخص

يهدف العمل المقدم في هذه المذكرة إلى إنتاج الهيدروجين عبر الاشعاعات الشمسية، التي تستقبل من طرف الالواح الشمسية الموجهة بزواوية مثلى منتجة بذلك طاقة كهربائية، التي تستغل في تغذية المحلل الكهربائي فيقوم هذا الأخير بفصل الماء الى أوكسجين وهيدروجين ثم يخزن الهيدروجين في قارورات خاصة. نتائج التجربة في المخبر كانت مشجعة من ناحية الحجم المنتج الذي وصل الى حوالي 166 لتر خلال فترات التجربة، ولتحسين كمية الإنتاج تم حساب الاستطاعة العظمى للألواح في نفس شروط التجربة في بيئة الماطلاب حيث وصل الحجم المنتج من الهيدروجين الى حوالي 207 لتر في نفس فترات الدراسة التجريبية.

**الكلمات المفتاحية:** اشعاع شمسي ; نظام كهروضوئي; الهيدروجين الشمسي

### Abstract

The work presented in this memorandum aims to produce hydrogen through solar radiation, which is received by the solar panels directed at an optimal angle, thus producing electrical energy used to feed the electrolyzer. The latter separates the water into oxygen and hydrogen and then stores the hydrogen in special tanks. The results of the experiment in the laboratory were encouraging in terms of the volume produced, which reached about 166 liters during the trial periods. In order to improve the production quantity, the maximum power of the panels was calculated under the same conditions of the experiment in the MATLAB environment, where the volume of hydrogen produced reached about 207 liters in the same experimental study periods.

**Keywords:** Solar Field; Photovoltaic system; Solar hydrogen