

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 :

Ben aoun Tarek

Mouissi Med Sassi

**Thème:**

**ETUDE D'UN SYSTEME COUPLANT UN  
GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET  
UNE CHARGE ELECTROLYTIQUE**

Soutenu publiquement

Le : 09/06/215

Devant le jury :

M<sup>r</sup> BENMIR ABDELKADER

MA (A) Président

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> DJAFOUR Ahmed

MC (A) Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> LOUAZENE Mohamed Lakhdar

MA (A) Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2014/2015



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chères parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde. Mes très chers frères (Khaïro, Messaoud, Hamza, Sassi)*

*Mes très chères sœurs (Sarah, Yasmin), (Kenza) et Tous mes amis d'université et de travail ou mes frères dans université*

*Et Toute ma famille*

*B. Tarek*



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chères parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont  
jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde*

*Mes très chères sœurs*

*Mes très chers frères*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis*

*M. Med Sassi*



# *Remerciements*

*En premier lieu, nous remercions Dieu qui nous a procuré  
. ce succès*

*Promoteur "Dr. A. DJAFOUR "pour ses conseils précieux et pour  
toutes les commodités et aises qu'elle nous a apportés durant  
l'étude et la réalisation de ce .document*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aux messieurs le  
président et les membres de jury d'avoir accepté  
.d'examiner et d'évaluer notre travail*

*Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui  
ont contribué de près ou de loin à réalisation du  
.présent travail*

*Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout,  
trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus profonds  
en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et  
encouragement afin de nous assurer cette  
.formation dans les meilleures conditions*



# Nomenclature

---

## *Nomenclature*

<b>h</b>	la constante de Planck
<b>C</b>	la vitesse de la lumière
<b>Ct-s</b>	La correction terre soleil
<b>j</b>	Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu
<b>d</b>	Déclinaison du soleil
<b>Nj</b>	le numéro du jour de l'année
<b>RD</b>	Rayonnement direct
<b>Rd</b>	Rayonnement diffus
<b>RG</b>	Le rayonnement global
<b>NO2</b>	Peroxyde d'azote
<b>SO2</b>	d'oxydes soufre
<b>HNO3</b>	acide nitrique
<b>H2SO4</b>	acide sulfurique
<b>UV</b>	ultra-violets
<b>CFC</b>	chlorofluorocarbones
<b>g</b>	abri du verre
<b>e</b>	encapsulant
<b>m</b>	métal
<b>hv</b>	photons dont l'énergie
<b>Eg</b>	l'énergie de bande gap
<b>P-N</b>	Positif –Négatif
<b>Vpv</b>	tension de panneau

---

# Nomenclature

---

<b>VT</b>	tension thermique
<b>T</b>	température absolue en °K
<b>ID</b>	Courant de saturation de la diode
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo courant
<b>A</b>	le facteur d'idéalité
<b>K</b>	constant de Boltzmann
<b>q</b>	charge de l'électron
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo courant créer par la cellule
<b>I<sub>0</sub></b>	Courant de diode
<b>R<sub>sh</sub></b>	Résistances shunt
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série
<b>T<sub>c</sub></b>	température de jonction (K)
<b>I<sub>cc</sub></b>	Le courant de court-circuit
<b>G</b>	éclairage (W/m <sup>2</sup> )
<b>V<sub>co</sub></b>	La tension de circuit ouvert
<b>P<sub>m</sub></b>	la puissance maximale
<b>I<sub>m</sub></b>	le courant maximal
<b>V<sub>m</sub></b>	la tension maximale
<b>η</b>	le rendement
<b>FF</b>	Le facteur de forme
<b>PV</b>	photovoltaïque
<b>GPV</b>	générateur photovoltaïque
<b>NOCT</b>	Nominal Operating Cell Temperature
<b>EVA</b>	Ethylène-Vynil-Acétate
<b>F</b>	Constant de Faraday
<b>P</b>	pression atmosphérique
<b>E<sub>h</sub></b>	Pouvoir calorifique d'H <sub>2</sub> (12.75 J/ml)
<b>I<sub>f</sub></b>	Le courant de point de fonctionnement.
<b>V<sub>f</sub></b>	La tension de point de fonctionnement
<b>f(X<sub>n</sub>)</b>	(f ' ) Le dérivé de la fonction (f)

---

# Nomenclature

---

$X_n$	La présente itération.
$X_{n+1}$	L'itération suivante.
$I_{GPV}$	Courant de générateur
$I_c$	Courant de la charge
$V_{GPV}$	Tension de générateur
$V_c$	Tension de la charge
$\varepsilon$	Mis à arrêter
<b>Gref</b>	Eclairement de référence
$\alpha$	Coefficients de variation du courant
$\beta$	Coefficients de variation de la tension
$T_a$	Température ambiante.
$T_{a,ref}$	Température ambiante de référence
$U_{Stack\ rev}$	La tension réversible
$U_{el}$	La somme de la surtension anodique et cathodique (V)
$U_{Ohm}$	La chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur
$V_e$	La tension d'électrolyseur
$\frac{I}{A_e}$	La densité de courant
$N_s$	Nombre des cellules série d'électrolyseur
$N_p$	Nombre des cellules parallèles d'électrolyseur
$np$	Nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque
$ns$	Nombre de module série dans le champ photovoltaïque
$\eta_s$	Rendement global du système

---

# Nomenclature

---

$\eta_{ui}$	Rendement d'adaptation
$\eta_g$	Rendement de générateur
$\eta_{el}$	Rendement d'électrolyseur
$T_e$	Température de l'électrolyte (K)
$Z$	Nombre d'électron requis pour libérer une molécule
$F$	Constant de Faraday
$Q$	Débit de production d'hydrogène

---



Tableau	Titre	Page
Tab(I.1) :	Spécifications du site d'Ouargla	15
Tab(I.2) :	Température d'Ouargla 2003-2013	15
Tab(I.3) :	Humidité d'Ouargla 2003-2013	16
Tab(I.4) :	Moyenne de vitesse du vent d'Ouargla 2003-2013	16
Tab(I.5) :	Moyenne d'heures d'insolation d'Ouargla 2003-2013	16
Tab(II.1) :	Les avantages et les inconvénients d'une cellule photovoltaïque	26
Tab(IV.1) :	Caractéristique de module photovoltaïque type BP 580F	46
Tab(IV.2) :	Données d'électrolyseur Alcaline	51
Tab(IV.3) :	L'éclairement et les températures de la journée de 04/04/2004 à Ouargla $\beta = 0^\circ$	56

---

## LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Fig (I.1) :	La production mondiale d'énergie primaire	4
Fig (I.2) :	Spectre d'irradiante solaire	7
Fig (I.3) :	Repère équatorial	8
Fig (I.4) :	Définition de l'air masse	9
Fig (I.5) :	Composantes du rayonnement solaire	10
Fig (I.6) :	Situation de la Wilaya d'Ouargla	14
Fig (II.1) :	présentation schématique d'une cellule solaire	19
Fig (II.2) :	Circuit électrique idéal	20
Fig (II.3) :	Circuit électrique réel	21
Fig (II.4) :	Les courbes de puissance maximum (I-V) et (P-V)	22
Fig (II.5) :	Influence de la résistance série et parallèle	24
Fig (II.6) :	Courbes courant -tension sous différentes températures et niveaux d'irradiation	25
Fig (II.7) :	La fabrication du module photovoltaïque	27
Fig (II.8) :	Cellules identique en série	28
Fig (II.9) :	Cellule identiques en parallèles	28
Fig (III.1) :	Cellule d'électrolyse de l'eau	31
Fig (III.2) :	Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique	32
Fig (III.3) :	Schéma de principe d'électrolyseur à vapeur d'eau	33
Fig (III.4) :	Schéma de principe d'électrolyseur à membrane	33
Fig (III.5) :	Schéma de principe d'électrolyseur alcalin	34
Fig (III.6) :	Structure d'un accumulateur acide/plomb à plaques planes	35
Fig (III.7) :	Couplage non direct avec photovoltaïque	37
Fig(IV-1) :	Couplage directe d'un générateur PV à une charge	38
Fig(IV-2) :	Point de fonctionnement de couplage	38
Fig(IV-3) :	Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque	43
Fig(IV-4) :	la caractéristique (I-V) avec différents éclairements, pour $T=25^{\circ}\text{C}$	46
Fig(IV-5) :	la caractéristique (P-V) avec différents éclairements, pour $T=25^{\circ}\text{C}$	47
Fig(IV-6):	la caractéristique (I-V) avec les différentes températures, pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	48
Fig(IV-7):	a caractéristique (P-V) avec les différentes températures, pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$	48

## LISTE DES FIGURES

---

Fig(IV-8) :	Caractéristiques (I-V) de couplage	55
Fig(IV-9) :	Variation de rendement d'adaptation en fonction d'éclairements	55
Fig(IV-10) :	Caractéristiques (I-V) de couplage pour une journéea Ouargla le 04/04/2004	56
Fig(IV-11) :	Variation de rendement d'adaptation en fonction de Temps	57
Fig(IV-12) :	Variation de rendement d'électrolyse en fonction de Temps	57
Fig(IV-13) :	Débit d'hydrogéné	58
Fig(IV-14) :	Caractéristiques (I-V) de couplage (GPV-EI) avec le couplage (GPV-B)	59

---

## Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>01</b>
------------------------------------	-----------

### **CHAPITRE I : LES SOURCES D'ENERGIES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX .**

I.1. INTRODUCTION .....	03
I.2. LES SOURCES D'ENERGIES .....	03
I.2.1. Les énergies fossile .....	04
I.2.1.1. Le Charbon.....	04
I.2.1.2. Le Pétrole.....	04
I.2.1.3. Le Gaz naturel .....	05
I.2.1.4. Le nucléaire.....	05
I.2.2. Les énergies renouvelables .....	05
I.2.2.1 Energie éolienne .....	05
I.2.2.2 La Biomasse .....	05
I.2.2.3 L'ENERGIE SOLAIRE .....	06
I.3. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE .....	11
I.3.1. Avantages .....	11
I.3.2. Inconvénients .....	12
I.4. Impacts environnementaux .....	12
I.4.1. L'effet de serre .....	12
I.4.2. Les pluies acides .....	13
I.4.3. DESTRUCTION DE LA COUCHE D'OZONE .....	13
I.5. Présentation climatique de la région d'Ouargla .....	14
I.5.1. Le relief d'Ouargla .....	14
I.5.2. Données climatiques d'Ouargla .....	15
I.6. CONCLUSION .....	17

### **CHAPITRE II : LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE .....**

II-1. Historique .....	18
II-2. Les systèmes photovoltaïques .....	19
II-2.1 La cellule photovoltaïque.....	19
II-2.2 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	20
II-2.3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque .....	22
II-2.4. Influence de la résistance shunt et série sur la caractéristique I-V .....	23
II-2.5 Influence de la température et l'irradiation solaire sur la caractéristique I-V .....	24
II-2.5. Technologie d'une cellule photovoltaïque .....	25
II-3. Module photovoltaïque .....	26
II-3.1 Composant des modules photovoltaïques .....	27

# Sommaire

---

II-4. Le générateur photovoltaïque .....	28
II-6. DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES PV .....	31
II-7.Conclusion .....	31
<b>CHAPITRE III : CHARGE ELCTROLYTIQUE .....</b>	
III-1. INTRODUCTION .....	32
III-2.Généralités sur l'électrolyse .....	32
III-2.1. fonctionnement de l'électrolyse de L'eau .....	32
III-2.2 Différents types d'électrolyseurs de L'eau .....	33
III-3. Généralités sur les batteries .....	35
III-3.1. fonctionnement de batterie .....	35
III-3.2. Types de batteries utilisés dans les systèmes PV .....	35
III-3.3. Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [Ni-Cd] .....	36
III-4 Couplage GPV-Charge .....	37
III-3.2. Couplage avec la batterie .....	37
III-3.2. Couplage avec l'electrolyseur .....	37
III.5. CONCLUSION .....	38
<b>CHAPITRE IV : MODELISATION ET SIMULATION DE COUPLAGE GENERATEUR PV- ÉLECTROLYSEUR .....</b>	
IV-1 Introduction .....	39
IV-2.Modelisation de générateur photovoltaïque .....	40
IV-2.1 La simulation de la caractéristique I-V .....	44
IV-2.2 Le Module photovoltaïque utilisé .....	46
IV-2. 3 Résultat de simulation de module BP 580F .....	47
IV-3.Modelisation d'électrolyseur .....	49
IV-3.1 La tension de fonctionnement .....	50
IV-3.2 L'électrolyseur utilisé .....	51
IV-3.3 Modèle de la caractéristique (V-I) .....	51
IV-4. MODELISATION DE COUPLAGE (GPV-ELECTROLYSEUR) .....	52
IV-5. DIMENSIONNEMENT DE GENERATEUR .....	52
IV-5.1.Calcul de $N_p$ et $N_s$ .....	52
IV-6.Organigramme de couplage direct .....	53
IV-7.Les résultats de simulation .....	55
VI -8.CONCLUSION .....	60

# Sommaire

---

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>61</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>62</b>



*Introduction*  
*Générale*

# Introduction Générale

---

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire, une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type de façon dangereuse pour les futures générations.

En vertu du Protocole de Kyoto, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8% en dessous de leurs niveaux de 1990 sur la période 2008-2012. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse doivent jouer un rôle important pour atteindre cet objectif. En Algérie bien que les conditions (géographiques, climatiques et météorologiques) soient très favorables, l'énergie solaire n'a pas encore percé et ce marché demeure encore presque vierge.

Notre pays a un des gisements solaires des plus élevés au monde, en effet de part sa position géographique dispose de plus de 2500 heures d'ensoleillement en moyenne par an sur une très grande partie de son territoire [47].

La conversion photovoltaïque du rayonnement solaire en électricité est un des moyens d'exploitation du gisement solaire, elle est réalisée par des cellules solaires.

L'objectif de notre travail est d'évaluer par simulation les performances d'un système avec un générateur PV qui peut être directement connecté à une charge de type continu de nature électrolytique.

Ce travail a été organisé et structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons les sources d'énergies et leurs impacts sur l'environnement en suite nous montrons les données climatiques de la région d'Ouargla. Dans le deuxième chapitre, nous donnons des généralités sur les systèmes photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté la constitution des charges électrolytiques et ses caractéristiques et le principe de leurs couplages avec le générateur PV.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude d'un couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur alcalin. Nous avons présenté des modèles mathématiques qui décrivent les comportements électriques des panneaux photovoltaïques et de l'électrolyseur, la

## Introduction Générale

---

fin du chapitre a été consacré à la simulation de couplage direct, générateur PV – Electrolyseur et enfin une comparaison avec d'autre couplage direct, générateur PV- charge. Enfin nous terminons notre mémoire par une conclusion générale

# CHAPITRE I

## *Les Sources d'énergies et leurs impacts sur l'environnement*

### **I.1. Introduction :**

La présence humaine sur la terre signifie le maintien de la consommation d'énergie, mais à ce jour cette énergie que nous utilisons est très polluante parmi ces sources (pétrole, gaz...) en plus elle est non renouvelable, donc il faut rechercher d'autres sources pour fournir des énergies sans danger sur l'atmosphère et l'être humain ici en a découvert la naissance des énergies renouvelables.

Des énergies produites à partir de la source naturelle comme le vent, l'eau, le soleil. Cette dernière est la plus répandue et la plus disponible par rapport aux autres sources.

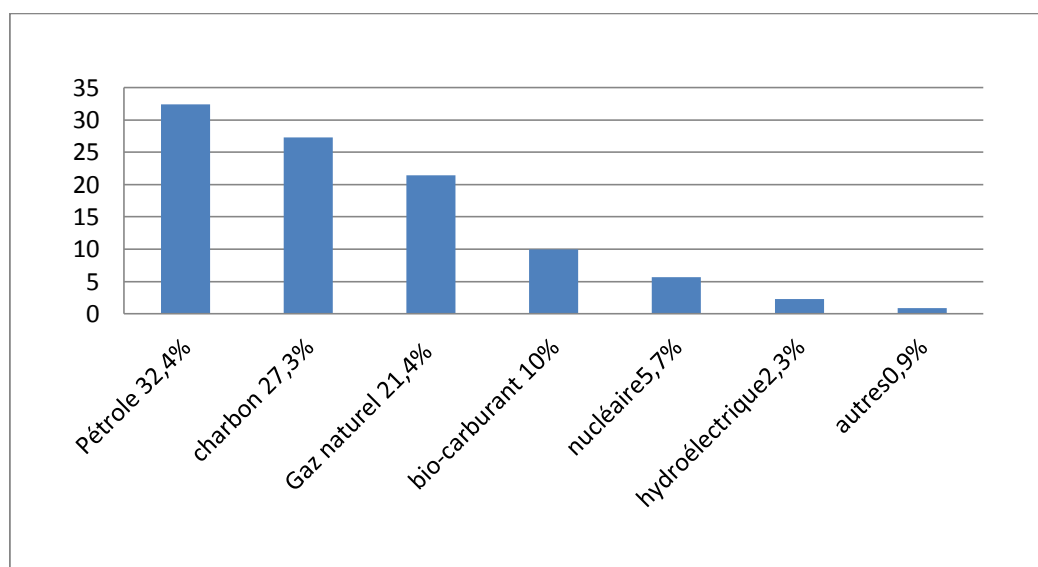
L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci il est possible de produire 2 types d'énergies : l'énergie calorifique avec l'installation solaire thermique (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques.

Cette énergie connue des grands développements dans le monde mais malgré ce développement elle a des inconvénients et des avantages parmi ces inconvénients leurs coûts d'installation qui sont élevés sur-tout dans notre pays ainsi leur utilisation limitée malgré que l'Algérie est un des pays les plus riches de cette énergie. [02]

### **I.2. Les sources d'énergies :**

Une énergie non renouvelable est une source d'énergie dont la capacité à se renouveler est faible voire inexistante à l'échelle humaine. Son utilisation est limitée car la consommation de cette source d'énergie par l'homme est plus rapide que sa régénération à l'inverse des sources.

Les énergies non renouvelables représentent 89% de l'énergie consommée en 2009 (d'après l'agence internationale de l'énergie). La figure (I.1) représente la production mondiale d'énergie primaire.



**Figure (I.1) :** La production mondiale d'énergie primaire [03]

### **I.2.1. Les énergies fossile :**

#### **I.2.1.1. Le Charbon :**

Le charbon est le combustible fossile le plus anciennement utilisé. Il a rendu possible la première révolution industrielle à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle en Angleterre et fourni les bases énergétiques essentielles de la seconde à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Bien que la concurrence du pétrole et du gaz naturel aient fait progressivement baisser sa contribution à la fourniture d'énergie dans le monde, il est encore la deuxième énergie primaire utilisée derrière le pétrole et devant le gaz naturel. On peut également citer le fait qu'il est à l'origine de sous-produits utilisés dans l'industrie pharmaceutique, l'industrie des colorants, les plastiques et les produits de synthèse textiles, les engrais, etc. Enfin, il est également utilisé pour la consommation domestique (chauffage, cuisson des aliments) dans certains pays. [04].

#### **I.2.1.2. Le Pétrole :**

Le pétrole est un liquide visqueux qui tire son nom du latin Petra - oléum : l'huile de roche. Sa couleur lui vaut le surnom d'or noir. Connu depuis la nuit des temps, il a d'abord été utilisé pour le calfatage des embarcations puis comme lubrifiant et comme carburant d'éclairage (lampes à pétrole, torches). Ce n'est qu'à partir des années 1860 environ que l'on commence à



rechercher le pétrole, en Allemagne et surtout aux États-Unis d'Amérique. Au début du 19<sup>ème</sup> siècle, le pétrole représentait environ 40% de la consommation mondiale d'énergie. [04].

### **I.2.1.3.Le Gaz naturel :**

Ce que l'on désigne sous l'expression gaz naturel est un gaz hydrocarboné provenant du sous-sol terrestre. Composé en grande majorité de méthane (CH<sub>4</sub>), le gaz naturel libère son énergie chimique par combustion en émettant relativement peu de substances polluantes. Ses gisements sont souvent liés à ceux du pétrole et l'exploitation de champs pétrolifères amène généralement à une production simultanée de pétrole et de gaz naturel. [04].

### **I.2.1.4. Le nucléaire :**

L'énergie nucléaire est produite par les noyaux des atomes qui subissent des transformations : ce sont les réactions nucléaires.

Lorsqu'un neutron percute le noyau de certains atomes lourds, le noyau impacté se scinde en deux noyaux plus légers. Cette réaction, appelée fission nucléaire, se traduit par un dégagement d'énergie très important. Elle donne lieu à une réaction en chaîne entre les noyaux des autres atomes, qui dégage une énergie cinétique récupérée sous forme de chaleur dans les réacteurs nucléaires et transformée en électricité. [05]

## **I.2.2. Les énergies renouvelables :**

### **I.2.2.1 Energie éolienne :**

Par définition, l'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Elle est le fruit de l'action d'aérogénérateurs, de machines électriques mues par le vent et dont la fonction est de produire de l'électricité.

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. [06]

### **I.2.2.2 La Biomasse :**

La biomasse est la matière végétale dérivée de la photosynthèse, réaction entre le CO<sub>2</sub> dans l'air, l'eau et la lumière du soleil. Typiquement, la photosynthèse convertit moins de 1% de la

lumière du soleil disponible [07]. Cette énergie est stockée dans les liaisons chimiques des végétaux. Plus récemment, la biomasse fossilisée (charbon et pétrole) a été exploitée.

Brûler des combustibles fossiles en utilisant de la biomasse « âgée » en relâchant du « nouveau CO<sub>2</sub> »; contribue à l'effet de serre et épuise une ressource non-renouvelable alors que brûler une « nouvelle » biomasse n'y contribue pas, parce que la croissance de nouvelles plantations assure que le CO<sub>2</sub> est absorbé par la nouvelle plante. [08]

### **I.2.2.3 L'énergie solaire :**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.

#### **a) L'énergie Solaire Photo Thermique :**

Les panneaux solaires thermiques transforment la lumière en chaleur, le plus souvent pour des chauffe-eaux. Pour cela, les rayons du soleil passent d'abord par une plaque de verre transparente à la lumière. Sous ce verre, un absorbeur noir (plaque de métal recouverte d'une fine couche de chrome) absorbe 80 à 90% des rayons lumineux. L'absorbeur transforme ces rayons lumineux en chaleur, grâce au transfert thermique par rayonnement. En s'échauffant, l'absorbeur émet des infrarouges. Ces infrarouges sont bloqués entre la plaque de métal et la plaque de verre, c'est le principe de l'effet de serre. Ainsi, l'air entre les deux plaques s'échauffe et améliore le rendement. Par conduction, l'énergie thermique ou chaleur de l'absorbeur est transmise à un circuit d'eau (c'est le liquide caloporteur). Celle-ci s'échauffe et est ensuite acheminée vers un ballon d'eau chaude à l'aide d'une pompe, ou bien par la simple gravité. [09]

#### **b) L'énergie solaire photovoltaïque :**

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 le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [10]. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E=h*c /\lambda \quad (I.1)$$

h : la constante de Planck,

c : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [08]. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E \text{ (ev)}=1.24 /\lambda(\mu\text{m}) \quad (I.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique figure (I.2) compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ) [11]. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4\mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8\mu\text{m}$ ).

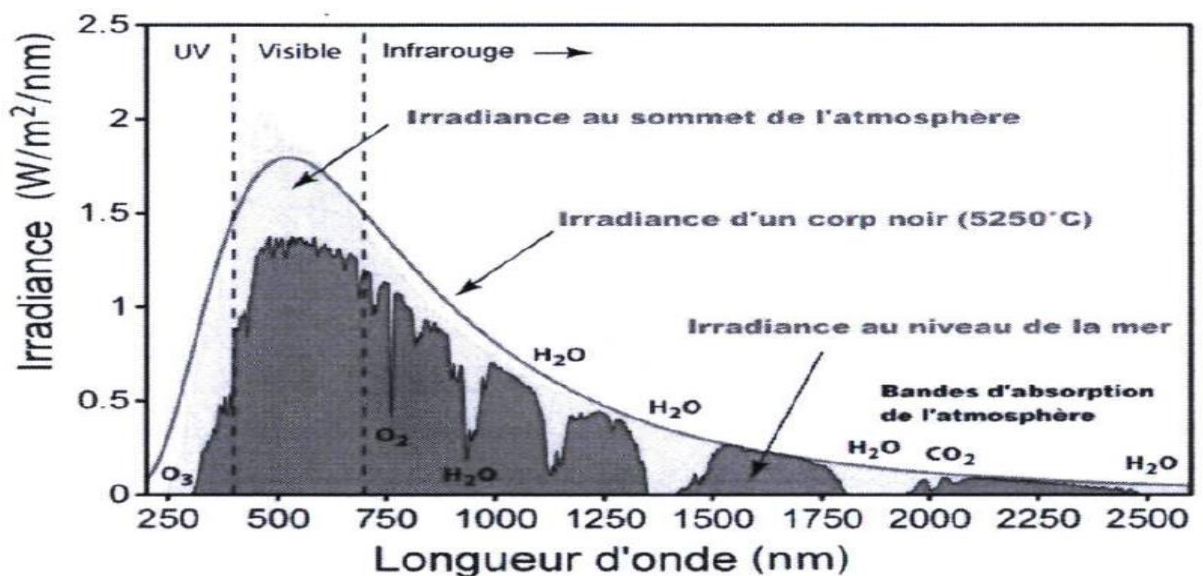


Figure (I.2) : Spectre d'irradiance solaire.

La valeur retenue pour la constante solaire est :  $I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$  Cette valeur est variable pendant l'année puisque la distance terre-soleil est elle-même variable (résultat de la trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par [12] :

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos \left\{ \frac{360}{365} (j - 2) \right\} \quad (I.3)$$

Ou :

$j$  : Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu.

La constante solaire corrigée est :

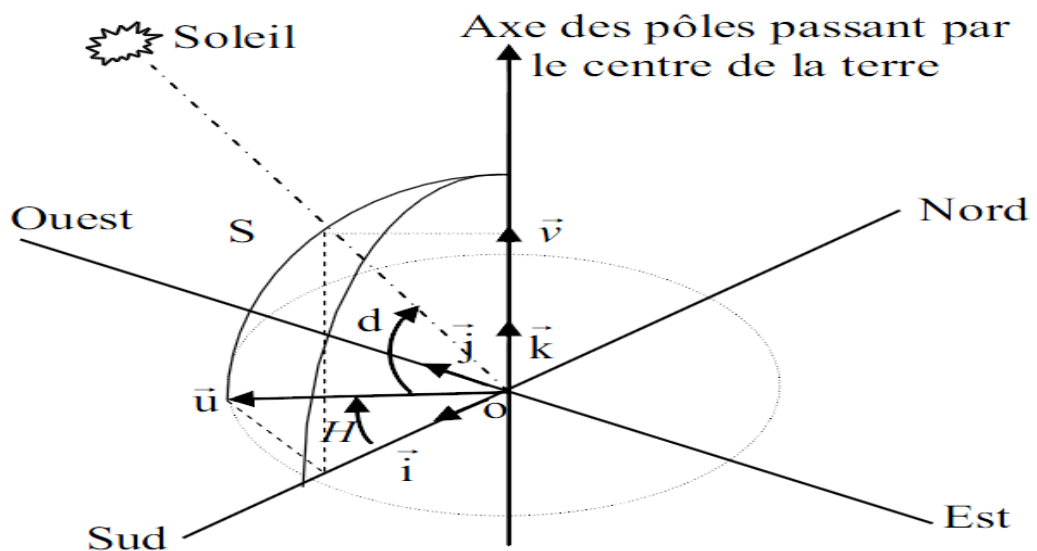
$$I = I_0 * C_{t-s} \quad (I.4)$$

### c) Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial sur figure(I.3).

$$d = \arcsin \left[ 0.389 \sin \left[ \left( \frac{360}{365} \right) * (N_j - 82) \right] + 2 \sin \left( \left( \frac{360}{365} \right) * (N_j - 82) \right) \right] \quad (I.5)$$

$N_j$  est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier



**Figure (I.3) : Repère équatorial [13]**

### d) Angle horaire du soleil

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel [14].

$$H = 15 (TSV - 12) \tag{I.6}$$

$$TSV = TL - DE + \left[ \frac{E t + 4\lambda}{60} \right] \tag{I.7}$$

$$E_t = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \tag{I.8}$$

$$N' = \frac{360}{365} (N - 81) \tag{I.9}$$

TSV : Temps solaire vrai, le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence. L'angle H vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai.

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie).

Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable.

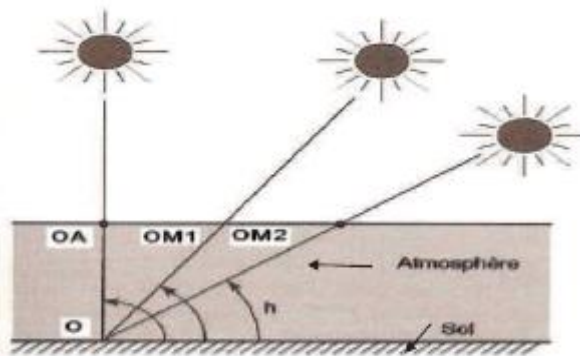
TL : Temps légal. (Donné par une montre).

Et : Correction de l'équation du temps.

$\lambda$  : Longitude de lieu.

**e) Masse d'air :**

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformation. La masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [15].



**Figure (I.4) :** définition de l'air masse

Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil. à l'aide des points O, A, M et l'angle h représentés à la figure (I.4), on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \tag{I.10}$$

Soit

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sinh} \quad (I.11)$$

**f) Les différents types de rayonnement :**

**f.1) Rayonnement direct  $R_D$  :**

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffuses par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être par des miroirs. [16]

$$RD=I\sin(h) \quad (I.12)$$

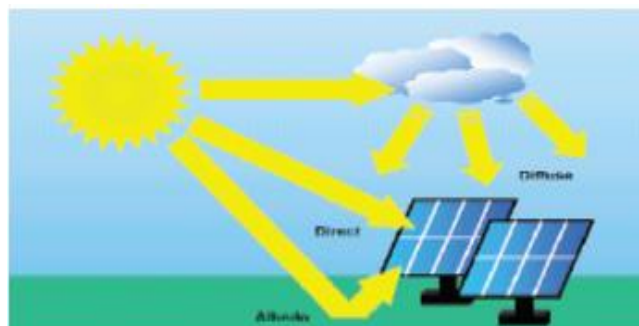
**f.2) Rayonnement diffus  $R_d$  :**

La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions, est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère. (Air, nébulosité, aérosols). [14]

Ce rayonnement provient de manière non isotrope de toutes les directions de l'espace et du sol dans le ciel cet « éclatement » des rayonnements du soleil, dépend donc avant tout des conditions météorologiques par temps ouvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope c'est-à-dire que l'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste par temps clair ou voilé, on a une couronne plus brillante autour du soleil et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.[14]

**f.3) Albédo :**

L'albédo est la partie réfléchié par le sol. Il dépend de l'environnement du site. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur le plan incliné. [16]



**Figure (I.5) :** composantes du rayonnement solaire.

**f.4) Le rayonnement global  $R_G$  :**

Le rayonnement global désigne l'intensité globale de flux solaire sur une surface réceptrice. [17]



$$RG= RD+Rd+Rr \quad (I.12)$$

**g) éclairage solaire :**

L'éclairage énergétique ou irradiant est un terme radiométrique qui quantifie la puissance d'un rayonnement électromagnétique frappant par unité de surface. Dans le système international d'unités, elle s'exprime en watts par mètre carré ( $W/m^2$  ou  $W \cdot m^{-2}$ ). [18]

En photométrie l'éclairage qualifie communément la puissance du flux lumineux reçu par unité de surface. La constante solaire de l'énergie solaire frappant le sol dans des conditions optimales est de  $1\,360,8\, W \cdot m^{-2}$ .

Dans le site d'Ouargla la moyenne de l'éclairage est entre  $500\, W \cdot m^{-2}$  est  $800\, W \cdot m^{-2}$ .

**I.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire :**

L'énergie solaire est l'énergie rayonnante qui vient du soleil. Cette énergie est maintenant utilisée pour produire de l'électricité grâce à la technologie électrique moderne. Aujourd'hui, la technologie rend l'utilisation de diverses formes de panneaux solaires.

Maintenant la question est, faut-il utiliser cette énergie ? Afin de répondre à cela, vous devez connaître certains des avantages et des inconvénients de l'énergie solaire. Sachant cela vous aidera à choisir si vous souhaitez utiliser l'énergie rayonnante à domicile ou non.

**I.3.1. Avantages :**

- Les panneaux solaires ne produisent pas de pollution par rapport aux combustibles fossiles.
- La pollution ne le pourrait produire est la production du panneau, le transport et l'installation.
- Il produit de l'électricité tranquillement par rapport aux carburants renouvelables et combustibles fossiles. Pas de générateurs bruyants.
- Il peut transporter de l'électricité aux zones qui ne font pas partie du réseau national. Un bon exemple de ceci est dans l'espace, où l'utilisation de cellules solaires à haut rendement alimente les satellites.
- Installation de panneaux solaires dans les régions éloignées est beaucoup moins cher que la pose des fils de haute tension.
- Il peut être très efficace dans une grande région du monde, même par temps couvert ou nuageux. Les panneaux peuvent tout simplement être installés sur les toits de sorte qu'il n'est pas nécessaire de trouver un espace pour les placer.

- Il vous aidera à économiser de l'argent dans le long terme. Une fois installé, vous obtenez une source libre de l'électricité pour les années à venir.
- Vous comptez moins sur l'offre mondiale de combustibles fossiles et donc aider à prévenir le réchauffement climatique.

### **I.3.2. Inconvénients :**

- Les panneaux et leurs coûts d'installation peuvent obtenir assez cher.
- Cette énergie ne peut être recueillie au cours de la lumière du jour. Cela signifie que pendant la nuit, les panneaux ne seront pas en mesure de produire de l'électricité pour vous.
- L'utilisation de piles peut résoudre ce problème.
- Il est l'efficacité peut être affectée par la météo. Par exemple, les panneaux de recueillir moins d'énergie par temps nuageux.

## **I.4. Impacts environnementaux :**

### **I.4.1. L'effet de serre :**

Il existe différents types de gaz à effet de serre. Ce sont les structures des molécules de ces gaz qui les rendent aptes à rabattre vers le sol les rayons infrarouges solaires. Tous ces gaz n'ont pas le même impact sur le réchauffement de la Terre.

Les responsabilités humaines sont très importantes en ce qui concerne l'effet de serre. Naturellement, les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont très faibles. Par exemple le plus abondant, le dioxyde de carbone ne représente que 0,03% en volume, soit 600 fois moins que le dioxygène. Cela explique que les activités humaines peuvent changer ces répartitions.

Ainsi les concentrations de dioxyde de carbone ou de méthane ont considérablement augmenté depuis le début de l'ère industrielle. Quant aux CFC, ce sont des gaz artificiels qui ont été fabriqués par les hommes, et utilisés dans les aérosols, les réfrigérateurs et les climatisations depuis les années 1930.

La principale source d'émission des gaz à effet de serre est la combustion des énergies fossiles pour la production d'électricité, le fonctionnement des usines et dans les usages domestiques. La seconde cause est la déforestation car en temps normal les forêts assurent une modulation naturelle de l'effet de serre en absorbant une partie du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère.

Les conséquences de l'effet de serre sont de tous ordres : elles touchent bien sûr d'abord l'environnement, mais peuvent aussi bien être alimentaires que sanitaires ou géopolitiques. La

première conséquence est bien sûr favorable à la Terre : l'effet de serre assure une température moyenne de 15 °C au lieu de - 18 °C et permet la vie telle que nous la connaissons. Toutefois, de manière générale, les conséquences paraissent plutôt négatives. Une élévation de température trop importante provoquerait :

une élévation du niveau de la mer due à la fonte des grandes masses glaciaires avec par exemple des inondations dans des régions peu élevées telles que les Pays-Bas, le Bangladesh ou la disparition d'îles telles que les Maldives, un déplacement des zones climatiques propres à tel ou tel type de culture, d'élevage ou de forêt, et donc une modification des écosystèmes et de la végétation, un risque de recrudescence des maladies infectieuses comme le paludisme ou la fièvre jaune.

### **I.4.2. Les pluies acides :**

Les pluies acides sont des pluies dont le pH est très inférieur à 5,6. Elles sont dues à la transformation chimique, dans l'atmosphère, d'oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>) et de soufre (SO<sub>2</sub>) en acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) et sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Les pluies acides contribuent au dépérissement des forêts. Elles mettent aussi en danger la vie dans les lacs. En effet, lorsque le pH de l'eau devient inférieur à 4,3 le lac meurt : il n'y a plus ni faune, ni flore. Elles dégradent aussi les pierres (surtout celles contenant du calcaire) des statues et des monuments ainsi que d'autres matériaux de construction.

### **I.4.3. Destruction de la couche d'ozone :**

En grande quantité, l'ozone est déplaisant, il a une odeur forte qui irrite les yeux et les poumons. Il contribue à certaines maladies respiratoires telles que l'asthme et aux maladies cardio-vasculaires. La couche d'ozone, comme une paire de bons verres fumés, représente un filtre naturel qui retient la plus grande partie des rayons ultra-violet (UV) nocifs du soleil. Sans la couche d'ozone, un plus grand nombre de personnes souffriraient de coups de soleil, de cancers de la peau, de cataractes et de cécité. Les plantes et les animaux seraient également touchés. C'est pourquoi on peut penser à la couche d'ozone comme si elle était le pare-soleil de notre planète.

Cette couche d'ozone dans la stratosphère renferme presque tout l'ozone qui existe sur terre. C'est le «bon» ozone parce qu'il nous protège des rayons du soleil.

A la surface terrestre, à cause des émissions de polluants provenant de l'automobile, par exemple, il y a ce que nous appelons le «mauvais» ozone. Cet ozone résulte de l'action de la lumière du Soleil sur les gaz d'échappement des véhicules. Au cours de l'été, le « mauvais » ozone cause le smog dans les grandes villes. Malheureusement, l'ozone de surface augmente tandis que l'ozone stratosphérique diminue. Il nous est impossible de faire monter l'ozone de

surface pour contribuer à la couche d'ozone stratosphérique. La meilleure solution est de continuer de diminuer toutes les sources de pollution qui affectent notre atmosphère et notamment l'utilisation des chlorofluorocarbones (CFC).

Ces dernières années, on a vu se former chaque printemps un grand « trou » dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique. Un phénomène comparable d'appauvrissement de l'ozone, quoique moins marqué, est également observé au-dessus de l'Arctique. On a aussi enregistré un amincissement de la couche d'ozone au-dessus des latitudes moyennes. Au-dessus de la région sud du Canada, la couche d'ozone s'est amincie d'environ six pour cent en moyenne depuis la fin des années 70, c'est-à-dire depuis que l'activité humaine a commencé à avoir des répercussions sur la haute atmosphère.

### I.5. Présentation climatique de la région d'Ouargla :

#### I.5.1. Le relief d'Ouargla :

La wilaya d'Ouargla située au Sud-est de L'Algérie, couvrant une superficie totale de 21180 Km<sup>2</sup> et une population de 541 045 habitants (Estimation 2007). Est limitée : Au Nord : par les wilayas de Djelfa et D'El oued ; a l'Est : Par la Tunisie ; Au Sud : par les wilayas de Tamanrasset et d'Ilizi ; A l'Ouest : Par la wilaya de Ghardaïa, La wilaya d'Ouargla est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduite Et des températures élevées, notamment en été. Le pétrole et l'énergie Les principales ressources énergétiques du pays se trouvent dans le sous-sol de la Wilaya de Ouargla dans la région de Hassi Messaoud où l'exploitation a commencé en 1956. Depuis de nouvelles découvertes ont été faites dans les bassins de Gassi Touil, Berkaoui et Ghourd El Baguel. [19]



Figure(I.6) : Situation de la Wilaya d'Ouargla

Pour le site d'Ouargla, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques Suivantes :

**Tableau(I.1) : Spécifications du site d'Ouargla [19]**

Spécification	Valeur
Altitude	141m
Albédo	0.35
Latitude	31°57'
Longitude	5° 24'Est

### I.5.2.Données climatiques d'Ouargla :

#### a) Les températures :

La connaissance de la température est importante pour le choix du système photovoltaïque, les valeurs moyennes et maximum de la température, pour la ville d'Ouargla, Calculées durant 11 années d'observation (2003-2013), sont présentées dans le tableau(I.2).

**Tableau(I.2) : Température d'Ouargla 2003-2013 [20].**

mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Moyenne de T MIN en C°	5.6	7.34	12.08	16.84	21.79	27	31.12	30.15	25.61	19.72	11.36	6.67
Moyenne de T MAX en C°	20.5	22.7	28.33	33.29	38.39	44.3	48.1	46.85	41.15	35.47	26.41	21.1

#### b) Humidité relative :

L'humidité relative est le rapport de la masse de la vapeur d'eau contenue dans certaine Quantité d'air humide a celle qu'il pourrait le contenir, c'est-à-dire à saturation. Elle est inversement proportionnelle à la température .le tableau (I.3) Présente la moyenne et le maximum de l'humidité relative d'après 11 ans d'observation (2003-2013) pour la région d'Ouargla.

**Tableau(I.3) : Humidité d'Ouargla 2003-2013 [20].**

mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout.	Sep	Oct	Nov	Déc
Moyenne HUMIDITE MIN EN %	43	34.7	28.7	24.5	21.4	18.9	16.7	18.73	25.6	29.9	38.4	42.9
Moyenne HUMIDITE MAX EN %	91	81	74.18	64.55	55	48	42.3	47.2	61.1	70.7	84.1	90.4

**c) Le vent :**

Le vent est l'air qui se déplacé horizontalement sur la terre a cause d'une différence de pression atmosphérique. Dans la région de Ouargla le vent soufflé du Nord –Est et du sud, les vents les plus fréquents en hiver sont les vents de l'Ouest tandis qu'au printemps sont Nord - Est et l'ouest dominant, en été ils soufflent du Nord-est et du Sud-ouest, Les moyenne des vents d'après 11 ans d'observation (2003-2013) Pour la région d'Ouargla. Sont présentées sur le tableau (I-3).

**Tableau(I.4) : moyenne de vitesse du vent d'Ouargla 2003-2013 [20].**

mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
FORCE DU VENT Max EN KM/H	18.3	19.4	19.4	23.4	21.4	18.4	21.1	18	18	16.2	15.2	14.9

**d) L'insolation :**

L'insolation est l'exposition au soleil, on définit le pourcentage d'insolation comme étant le rapport de nombre d'heures d'ensoleillement sur la durée astronomique du jour l'ensoleillement est considérable à Ouargla, car l'atmosphère présent une pureté durant toute l'année avec 138 jours en moyenne de l'année ou le ciel est totalement clair, le tableau (I.4) Présente les moyennes d'heures d'insolation d'après 11ans d'observation de (2003-2013) pour la région d'Ouargla

**Tableau(I.5) : moyenne d'heures d'insolation d'Ouargla 2003-2013 [20].**

mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Cumul INSOLATION EN H	266	264.3	286	306.5	330.2	288.4	363.3	366.5	299.3	284.4	275.5	240

**I.6. Conclusion :**

La région d'Ouargla est située dans une zone saharienne, son climat sec désertique est caractérisé par une aridité qui s'exprime par une sécheresse permanente, l'irrégularité et la rareté des précipitations.

D'après les données climatiques et l'étude du rayonnement solaire. Nous avons constaté que l'insolation est considérable. En effet, il dépasse dix heures par jour pendant plusieurs mois, ce qui nous permet de classer la ville d'Ouargla comme un site favorable pour les installations solaires

# CHAPITRE II

## *Les systèmes photovoltaïques*



## II-1. Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil

**1839** : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

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

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

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

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

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

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [21]

## II-2. Les systèmes photovoltaïques :

### II-2-1. La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Dans la figure (II-1) un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [22]

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap ( $E_g$ ), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

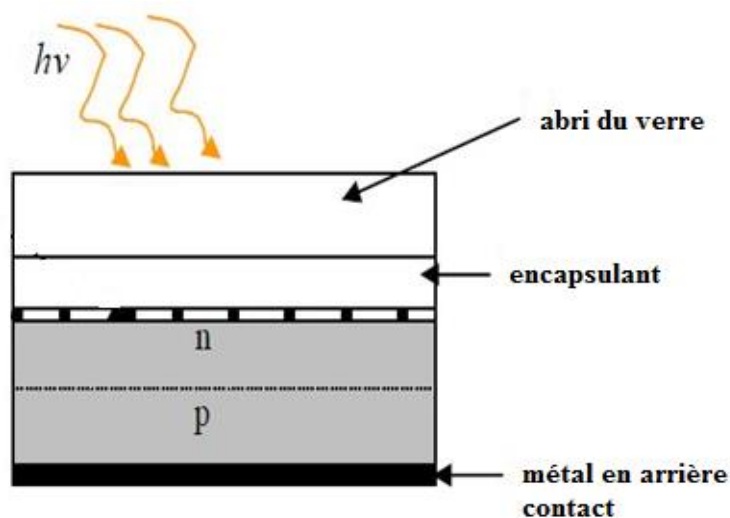


Figure (II-1): présentation schématique d'une cellule solaire.

Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction p-n, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif  $I$  traverse de n vers p.

La puissance électrique produit par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt [23]

### II-2.2. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

#### a) Circuit électrique idéal :

La cellule photovoltaïque peut être représentée par le circuit électrique équivalent donnée par la figure (II-2) composé d'un générateur de courant et d'une diode parallèle. Le courant  $I$  généré par la cellule s'écrit alors [24]

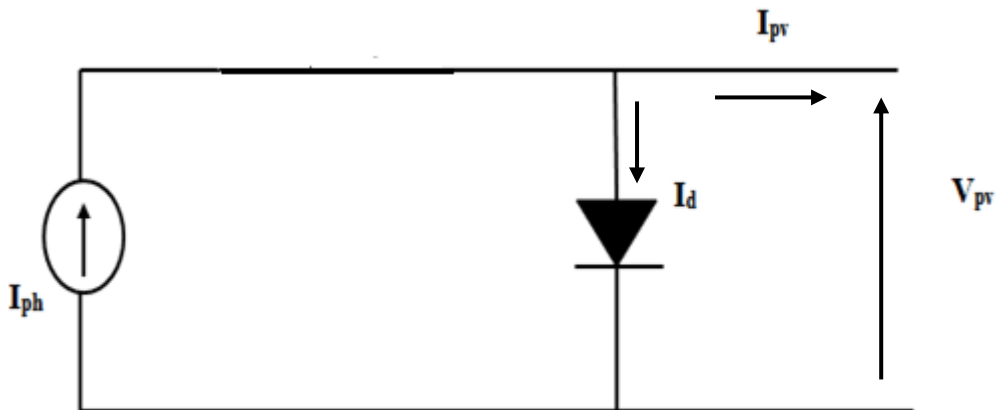


Figure (II-2) : Circuit électrique idéal

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D \quad (\text{II-1})$$

$$I_D = I_0 (e^{V_{pv}/V_t} - 1) \quad (\text{II-2})$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 (e^{V_{pv}/V_t} - 1) \quad (\text{II-3})$$

$I_0$ : Courant de saturation de diode

$V_{PV}$ : tension.

$V_T$ :  $KT/q$  tension thermique.

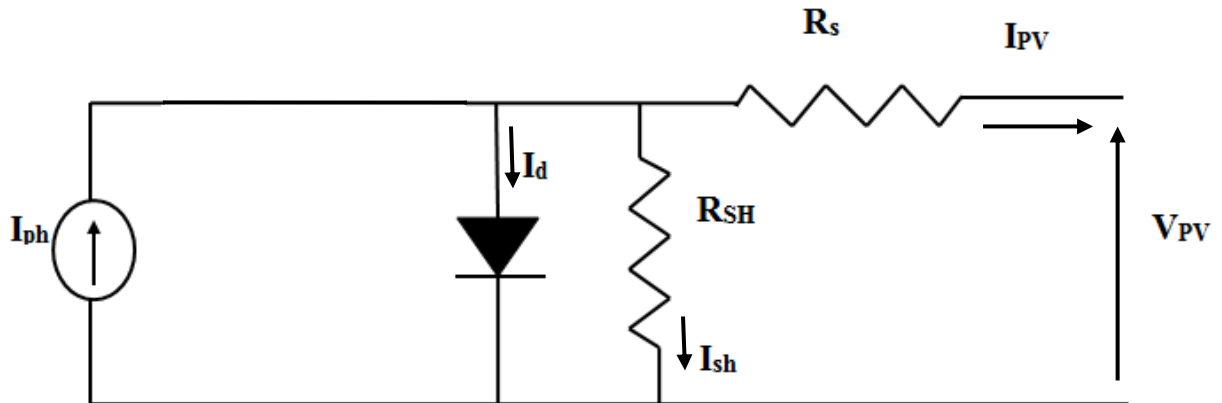
$T$  : température absolue en °K.

$I_D$  : Courant de saturation de la diode.

$I_{ph}$  : Photo courant.

## b) Circuit électrique réel :

En réalité, il existe l'influence de résistances dans la génération du courant, et le circuit électrique équivalent est alors représenté par la figure



**Figure (II-3) : Circuit électrique réel**

La caractéristique courant-tension pour une température donnée et un éclairement solaire fixé est [24]:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (II-4)$$

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T_c}} - 1 \right) \quad (II-5)$$

$$I_{sh} = (V_{PV} + R_s \cdot I_{PV}) / R_{sh} \quad (II-6)$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T_c}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II-7)$$

$A$  : le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ) [30]

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

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

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

$I_0$ : Courant de diode

$R_{sh}$ : Résistances shunt sur les coins de cellule.

$R_s$ : Résistance série

$T_c$  : température de jonction (K).

## II-2-3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

### a) Le courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur est nulle. Son expression approchée est donnée par:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1+R_s/R_{sh}} \quad (\text{II-8})$$

A des niveaux d'éclairement usuels, le photo-courant est proportionnel à l'irradiation solaire (Flux lumineux)  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Dans le cas idéal, il correspond au courant de court-circuit qui peut alors simplement s'écrire

$$I_{cc} = I_{cc0} \cdot \left(\frac{E_g}{1000}\right) \quad (\text{II-9})$$

Où  $I_{cc0}$  est le courant de court-circuit pour une irradiation solaire standard de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ .

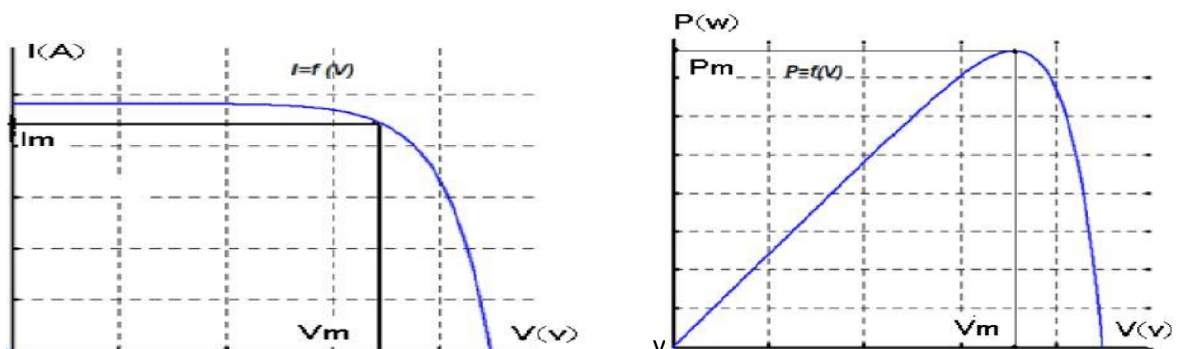
### b) La tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul, c'est la tension maximale de la cellule. Dans le cas idéal, elle est légèrement inférieure à:

$$V_{co} = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0+1}\right) \quad (\text{II-10})$$

La puissance :

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de cour circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension donc la puissance maximale génère par la cellule [15]



**Figure (II-4) :** courbe (I-V) et (P-V) d'une cellule

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{II-11})$$

$P_m$  : la puissance maximale

$I_m$  : le courant maximal

$V_m$  : la tension maximale

### d) Le rendement :

On appelle le rendement " $\eta$ " de conversion de la cellule le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance lumineuse qu'elle reçoit.

$$\eta = \frac{P_m}{G \cdot S} \quad (\text{II-12})$$

$S$  : la surface de la cellule en  $\text{cm}^2$

$G$  : l'éclairement en  $\text{w/m}^2$

### f) Le facteur de forme :

C'est le rapport de la puissance maximale au produit  $I_{cc} \cdot V_{co}$ , il traduit l'influence des pertes par les deux résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$ .

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-13})$$

## II-2.4. Influence de la résistance shunt et série sur la caractéristique I-V :

- Les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$  vont modifier la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire en particulier sous éclairement :

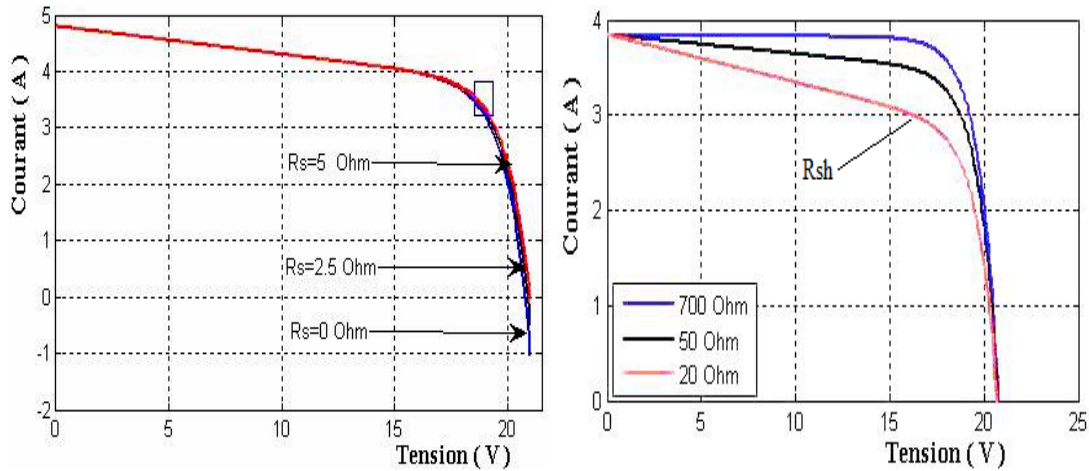
### a. Influence de la résistance série :

L'effet de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire sous éclairement est illustré sur la figure ci-dessous (II-5)

On remarque que la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de  $R_s$ . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique  $I-V$  dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension lorsque  $R_s$  augmente. L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement et le facteur de forme ( $FF$ ) de la cellule. [25]

## b. Influence de la résistance shunt (parallèle)

La figure (II-5) ci-dessous illustre l'effet de la résistance parallèle  $R_{sh}$  sur la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire sous éclairage. On remarque que la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique  $I-V$  de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant (basse tension).



**Figure (II-5) :** Influence de la résistance série et parallèle

## II-2.5. Influence de la température et l'irradiation solaire sur la caractéristique I-V:

La température  $T$  et l'irradiation  $E$  ont un impact direct sur les performances d'une cellule photovoltaïque comme illustre la figure (II.6)

Quand la température des cellules augmente la tension de circuit ouvert diminue sensiblement tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement. Alors on peut remarquer que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé, au contraire d'un environnement chaud.

Pour les cellules en silicium cristallin,  $V_{co}$  baisse d'environ 0.37% pour chaque degré Celsius de plus,  $I_{cc}$  augmente de 0.05% pour les mêmes conditions.

La température du GPV dépend non seulement de la température ambiante mais aussi des effets de l'irradiation de la cellule. Puisque seule une petite fraction de l'insolation qui touche le module est convertie en électricité, la plupart de l'énergie incidente est absorbée et convertie en chaleur [15].

Pour aider les concepteurs de systèmes à tenir compte des variations de performances de la cellule avec la température, les fabricants fournissent souvent un indicateur appelé NOCT

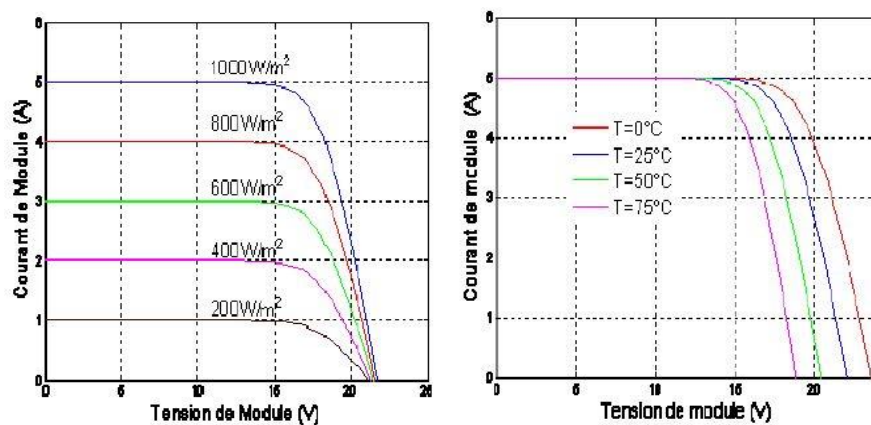
(Nominal Operating Cell Température), où représente le degré de température de la cellule dans des conditions systémiques:

- journée claire d'ensoleillement moyenne  $800 \text{ (w/m}^2\text{)}$ .
- Température ambiante de  $(20^\circ \text{C})$ .
- Vitesse moyenne du vent  $(1\text{m/s})$ .

$$T_c = T + (NOCT - 20) \frac{G}{800} \quad (\text{II-14})$$

T : la température ambiante.

G: Éclairement



**Figure (II-6) :** Courbes courant -tension sous différentes températures et niveaux d'irradiation.

## II-2.5. Technologie d'une cellule photovoltaïque :

### a) Silicium monocristallin :

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.

### b) Silicium poly cristallin :

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.



### c) Silicium amorphe (a-si) :

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [12].

Le tableau (II.1) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utiliser d'une cellule photovoltaïque.

Type	Silicium mono cristallin	Silicium poly Cristallin	Amorphe
Durée de vie	25 ans	25 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bons rendements en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

**Tab(II.1)** les avantages et les inconvénients d'une cellule photovoltaïque.

### II-3. Module photovoltaïque :

Un module solaire photovoltaïque ou panneau solaire photovoltaïque est un panneau constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement.

Le module photovoltaïque à base de silicium (cellules minces et cellules organiques en développement) produit une électricité à courant continu à partir du rayonnement solaire, Transformée en courant alternatif, l'électricité ainsi produite, appelée également électricité verte ou électricité solaire, est soit utilisée, soit revendue au gestionnaire des réseaux extérieur soit accumulée dans des batteries électriques.

Les modules PV sont la base de construction à Haute Performance Energétique, à basse consommation et à énergie positive [26]

### II-3.1. Composant des modules photovoltaïques :

La fabrication du module photovoltaïque passe par l'encapsulation qui a pour but de regrouper les cellules en série ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et à des courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs.

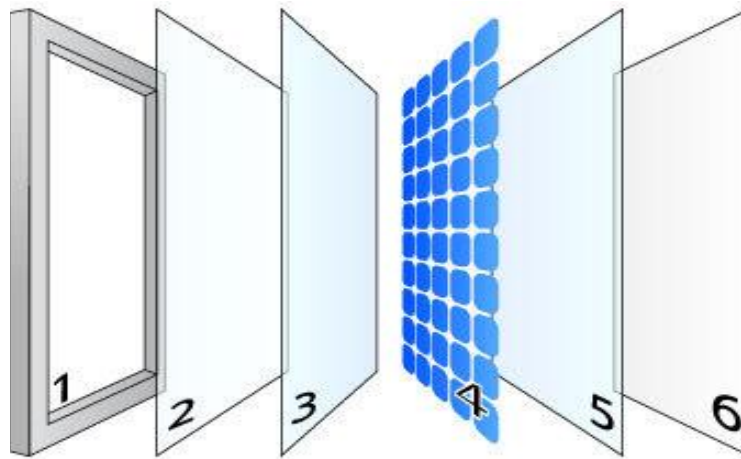
Cette protection doit permettre une durée de vie des modules photovoltaïques supérieure ou égale à 25 ans. L'encapsulation consiste à la mise en sandwich d'un ensemble de composants constitué de cellules solaires, de matériau encapsulant (EVA), plaque arrière tedlar (BACK SHEET), une plaque de verre solaire et un cadre en aluminium.

Le module photovoltaïque est composé de cellules solaires qui ont les mêmes caractéristiques électriques, connectées entre elles puis enrobées dans une résine transparente, l'EVA. Les faces avant et arrière des cellules sont recouvertes respectivement d'un verre et d'un film multicouche étanche (back sheet). La cellule solaire est l'élément le plus important dans un module PV parce qu'elle génère la puissance électrique suite à l'excitation des irradiations solaires.

La résine transparente utilisée est une résine thermosensible, formée d'Ethylène Vinyle Acétate "I'E.V.A'", Les quatre caractéristiques qui ont fait de l'EVA un matériau de choix pour l'encapsulation sont sa résistivité électrique très élevée le classant comme un très bon isolant électrique, ses températures de fusion et de polymérisation relativement faibles, sa très faible absorption d'eau et enfin, sa bonne transmission optique.

La face arrière du module est constituée d'un film multicouche, le tedlar, pour améliorer les performances électriques et mécaniques du module. Le cadre des panneaux est un profilé en aluminium anodisé, il sert à : protéger les bords du verre, améliorer la résistance mécanique globale du module, améliorer le degré d'étanchéité avec injection de gel de silicone et faciliter l'installation et le transport.

La boîte de jonction photovoltaïque abrite toutes les parties porteuses de courant afin de réduire les risques d'incendie, de choc électrique et des blessures de personnes par sa robustesse.



**Figure (II-7) :** La fabrication du module photovoltaïque [27]

- 1- Cadre en aluminium
- 2- Plaque avant transparente prismatique (optimisation de la réception des rayons solaires)
- 3- Feuille d'EVA
- 4- Cellules de silicium interconnectées
- 5- Feuille d'EVA
- 6- Plaque servante de substrat arrière (Tedlar ou verre)

### **II-4. Le générateur photovoltaïque :**

Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs module photovoltaïques élémentaires en série et /ou parallèle, et possède de nombreuses propriétés (la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert)

#### **a) Association en séries :**

En additionnant des cellules ou des modules identique en série, la courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules ou modules en série.

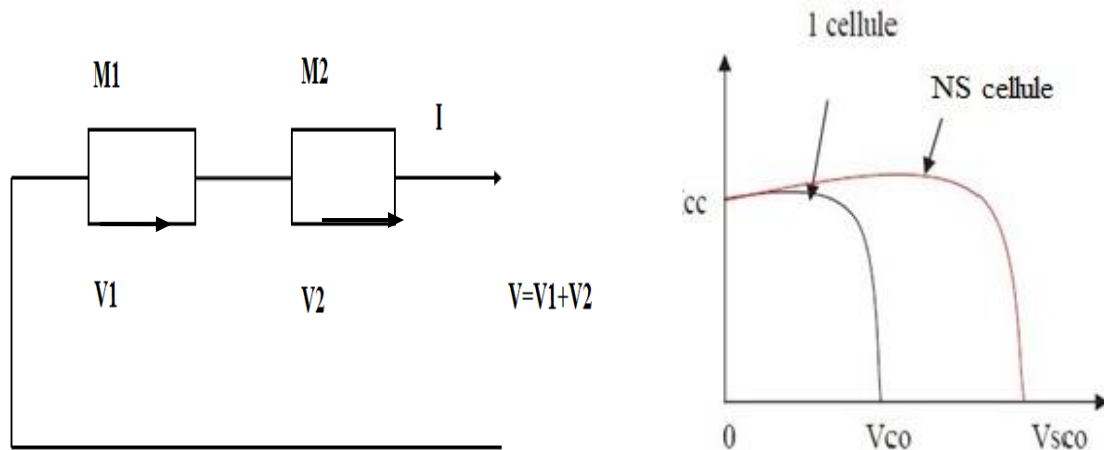


Figure (II.8) : Cellules identiques en série

**b) Association en parallèles :**

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

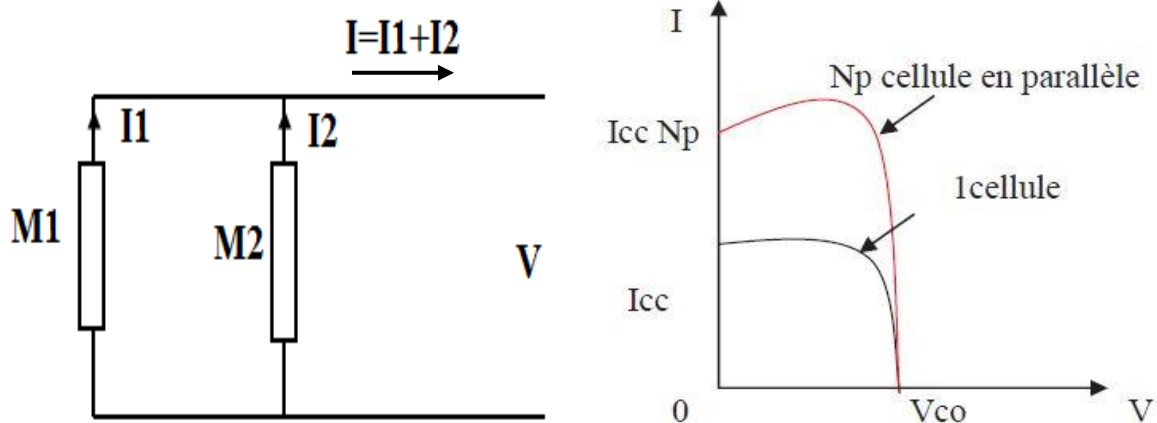


Figure (II.9) : Cellules identiques en parallèles

**II-5) Inconvénients Avantage :**

**a) Avantage :**

- Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins, spatiaux.

## Les systèmes photovoltaïques

---

- 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 méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Temps de réalisation d'une centrale PV minimum.
- Ils ont une longue durée de vie.
- On élimine les frais et les risques de transport associés des énergies fossiles

### **b) Inconvénients :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
  - Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent en alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est continue et de faible voltage (< 30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Le stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5 ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement [28]

### **II-6. Différentes configurations des systèmes PV :**

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- un système de régulation et de stockage.
- une source auxiliaire d'appoints. [29]
- une charge.

### **II-7. 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

## *Les charges électrolytiques*

## III-1. Introduction :

Dans ce chapitre nous étudierons quelques charges électrolytiques comme les électrolyseurs et les batteries électriques en état de charge et leurs couplages avec le générateur photovoltaïque.

## III-2. Généralités sur l'électrolyse :

L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Elle permet par ailleurs, dans l'industrie chimique, la séparation d'éléments ou la synthèse de composés chimiques. [31] L'électrolyse est utilisée dans divers procédés industriels, tels que la production de hydrogène par électrolyse de l'eau, la production d'aluminium ou de chlore, ou encore pour le placage d'objets par galvanoplastie, dans ce chapitre nous parlerons de l'électrolyse de l'eau. [31]

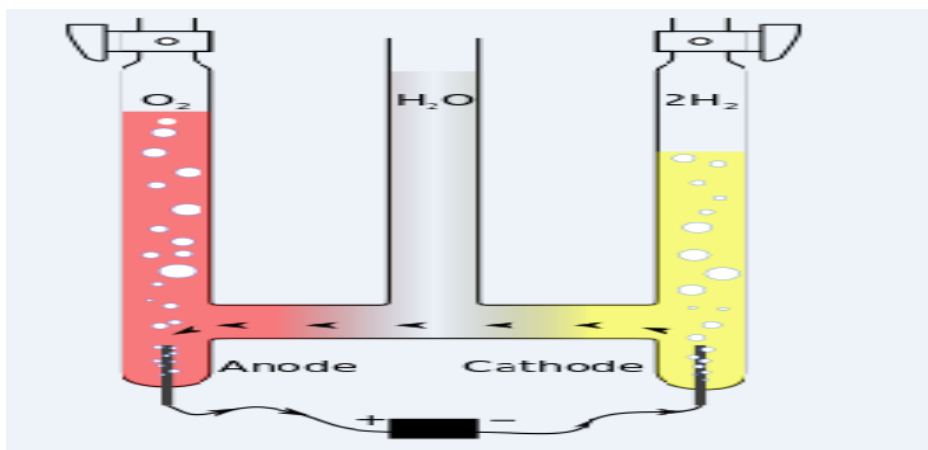
### III-2.1. fonctionnement de l'électrolyse de L'eau :

L'électrolyse est une réaction d'oxydoréduction provoquée par le passage d'un courant électrique dans un électrolyte la réaction à la cathode est une réduction, la réaction à l'anode est une oxydation :

Réduction (gain d'électrons) : cathode (-) : oxydant +  $ne^- \Leftrightarrow$  réducteur

Oxydation (perte d'électrons) : anode (+) : réducteur  $\Leftrightarrow$  oxydant +  $ne^-$

Les électrons ( $e^-$ ) intervenant dans les réactions sont apportés par le circuit électrique. Le Schéma classique d'une cellule d'électrolyse est donné par la Figure (III.2) Ci-dessous [32]



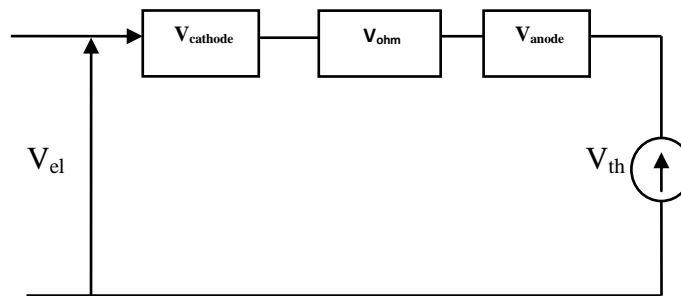
Figure(III.2) : Cellule d'électrolyse de l'eau (changer)



## Charge Electrolytique

L'électrolyseur est une charge pour le système, son point de fonctionnement est défini en fonction de sa connexion avec la source d'énergie.

Le schéma équivalent d'électrolyseur :



**Figure(III.3) :** Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique

La tension de cellule d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes :

$$V_{el} = V_{th} + V_{anode} + V_{cathode} + V_{ohm} \quad (III.1)$$

Où :

$V_{th}$  : Tension théorique

$V_{anode}$  : Surtension anodique (V)

$V_{cathode}$  : Surtension cathodique (V)

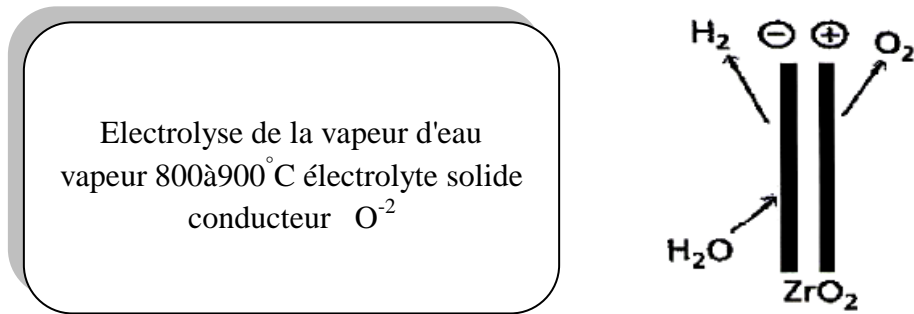
$V_{ohm}$  : Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur

### III-2.2 Différents types d'électrolyseurs de L'eau :

Il existe plusieurs technologies d'électrolyseurs : les technologies alcaline, la plus développée et la plus mature, les technologies à membrane, et les technologies à vapeur d'eau à haute température.

#### a- L'électrolyseur à vapeur d'eau :

Les électrolyseurs haut température ont une tension par cellule plus basse que les autres technologies (l'énergie de dissociation de la vapeur d'eau est plus faible, que celle de l'eau) mais la densité de courant maximal atteinte est faible. De plus, le développement de cette technologie rencontre des problèmes de matériaux et de fabrication. Il n'existe que des prototypes. [33]

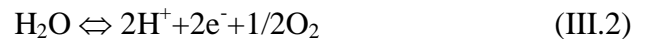


**Figure (III.3) :** Schéma de principe d'électrolyseur à vapeur d'eau

### b- L'électrolyseur à membrane :

La cellule d'électrolyseur est constituée de deux électrodes (cathode et anode), d'un électrolyte et d'un générateur de courant. L'électrolyte peut être une membrane polymère échangeuse de proton ou une membrane céramique conductrice d'ions oxygène. Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions suivantes ont lieu :

à l'anode, l'eau s'oxyde en oxygène. Les électrons partent dans le circuit.



À la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se recombinaient avec les électrons pour donner l'hydrogène.



L'eau utilisée pour ce type d'électrolyseur est très pure pour éviter que les impuretés ne perturbent par le fonctionnement de l'électrolyseur. [04]



**Figure (III.4) :** Schéma de principe d'électrolyseur à membrane

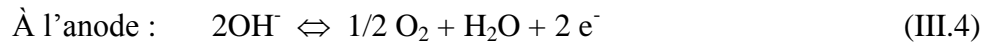
### c- L'électrolyseur alcalin :

L'électrolyseur est alimenté en matière première par une solution de potasse, et en électricité par un courant continu de très basse tension. Sous l'action de l'électricité, l'eau est décomposée en : Hydrogène qui se forme à la cathode, et en oxygène qui se forme à l'anode. L'eau consommée est remplacée par de l'eau déminéralisée. La potasse qui ne sert qu'à conduire

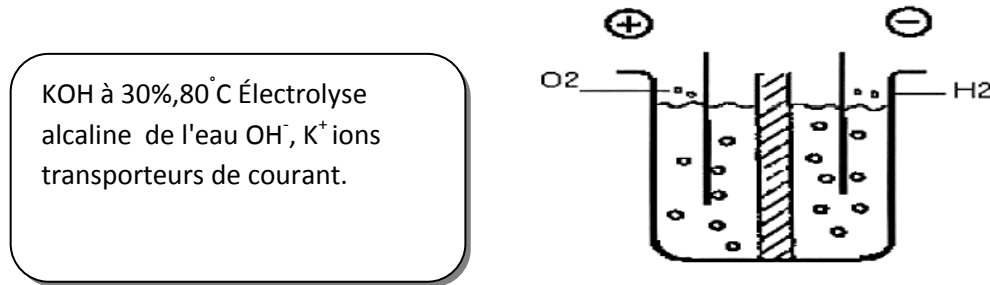
## Charge Electrolytique

l'électricité au sein de la solution est recyclée. Une partie de l'énergie électrique consommée chauffe la solution de potasse qu'il faut continuellement refroidir. [34]

La conduction ionique est alors assurée par les ions d'hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) et de potassium ( $\text{K}^+$ ). Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous :



La figure (III.5), illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline.



**Figure (III.5) :** Schéma de principe d'électrolyseur alcaline

### III-3. Généralités sur les batteries :

Les batteries sont des dispositifs qui ont la capacité de transformer directement une énergie chimique en une énergie électrique, à travers une réaction d'oxydo-réduction. Dans le cas des piles (batteries primaires), la réaction chimique est irréversible et la décharge peut avoir lieu une seule et unique fois. Le terme d'accumulateur (batterie secondaire) est utilisé lorsque la réaction chimique est réversible, permettant au dispositif d'être chargé et déchargé plusieurs fois. [35]

#### III-3.1. fonctionnement de batterie :

Le modèle de batterie décrivant le rapport entre la tension, le courant et l'état de charge SOC (the state of charge), la tension finale de la batterie  $V_B$  peut être exprimée comme suite : [36]

$$V_b = E_{oc} + I_b * R_b \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$E_{oc}$  : Tension de circuit ouvert de batterie (V)

$I_b$  : Courant de batterie (A)

$R_b$  : Résistance interne de batterie ( $\Omega$ )

#### III-3.2. Types de batteries utilisés dans les systèmes PV :

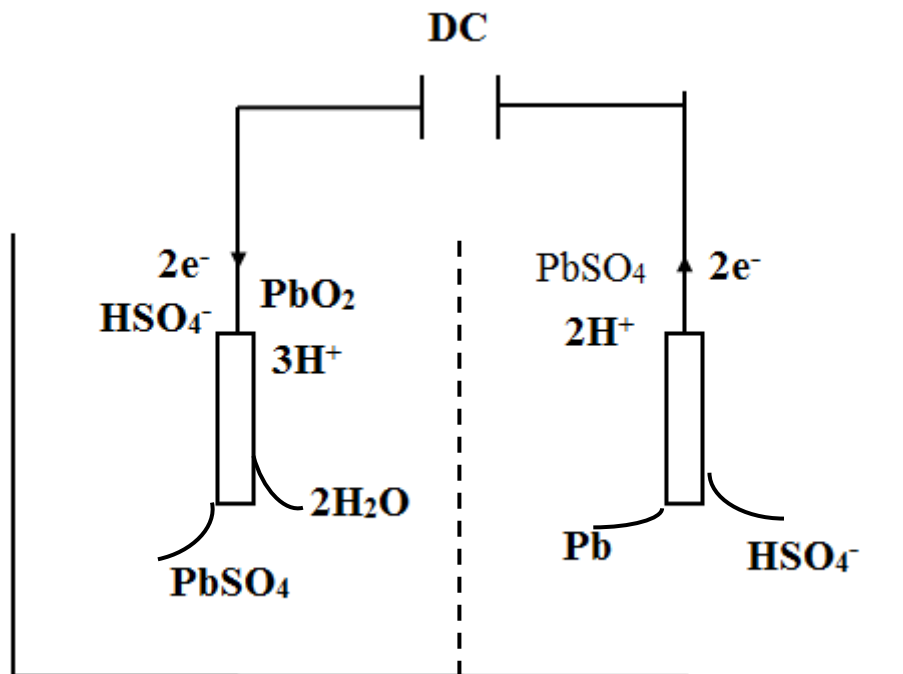
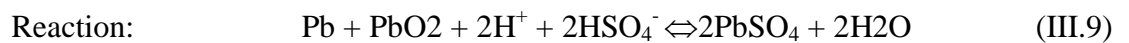
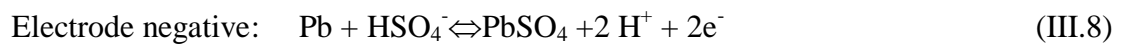
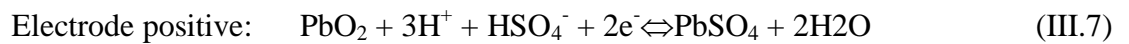
Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique.

## Charge Electrolytique

Les principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont : [36]

### a- Les Accumulateurs au plomb acide :

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale :



**Figure(III.8) :** Structure d'un accumulateur acide/plomb à plaques planes [37]

### II-3.3. Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [Ni-Cd] :

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb-Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. [38]Elles ont connu un fort développement dans les domaines où une source d'énergie portable

est nécessaire. Cependant, du fait de la forte toxicité du cadmium, elles ont progressivement été abandonnées et remplacées par les batteries Ni-MH. [39]

### III-4 Couplage GPV-Charge :

#### III-4.1. Couplage avec le Batteries

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur la quelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension préétabli : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs (régulations de charge série, régulateur de charge de coupure, régulateur de charge à découpage, régulateur de charge série à coupure partielle, régulateur de charge parallèle). [40]

#### III-4.2. Couplage avec l'électrolyseur :

Il existe deux mode de couplage de charge électrolyse sont :

##### a) Les convertisseurs :

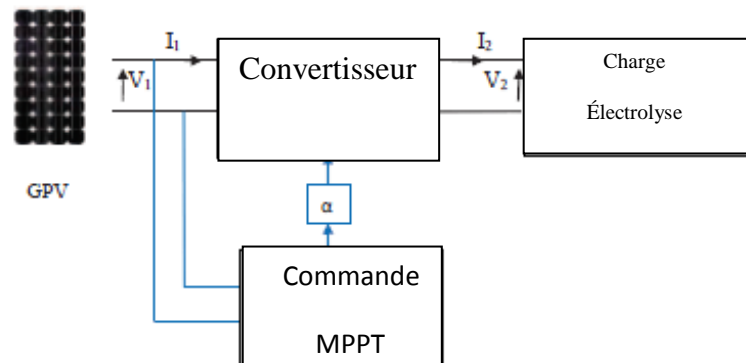
Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. il existe plusieurs type comme (hacheur DC /DC, onduleur DC/AC...) [41].

##### b) Le contrôleur MPPT :

Un MPPT est un mot en l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairage, la puissance délivrée sera

## Charge Electrolytique

différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (électrolyse par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [11]. pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM),des contrôleur MPPT sont utilisés ,ces contrôleurs sont destinés a minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques baser sur des méthode optimale[42].



**Figure III.9** : couplage non direct avec photovoltaïque.

### III-5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons parlé des différents types d'électrolyseurs avec leurs principes de fonctionnements .En suite on a présenté les batteries électrique utilisés dans les systèmes photovoltaïques et finalement nous avons donné une aidé sur le couplage de ces charges électrolytique avec le générateur photovoltaïque.

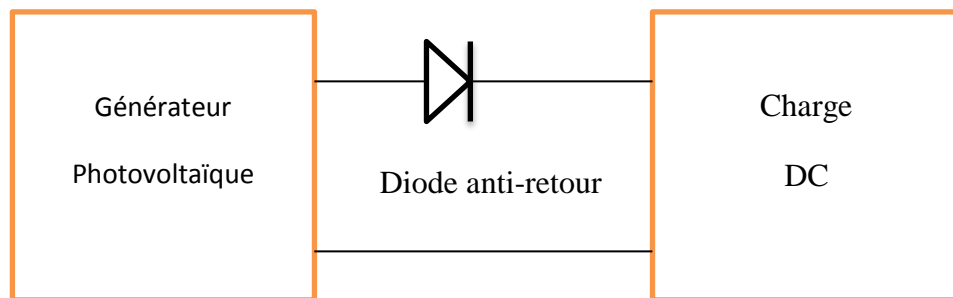
Dans le chapitre prochain, on présentera la modélisation des éléments de système PV – charge électrolytique et la modélisation de couplage direct Système PV – charge électrolytique soit le cas d'électrolyseur ou de batteries.

# CHAPITRE IV

## *Modélisation et simulation de couplage Générateur PV - Électrolyseur*

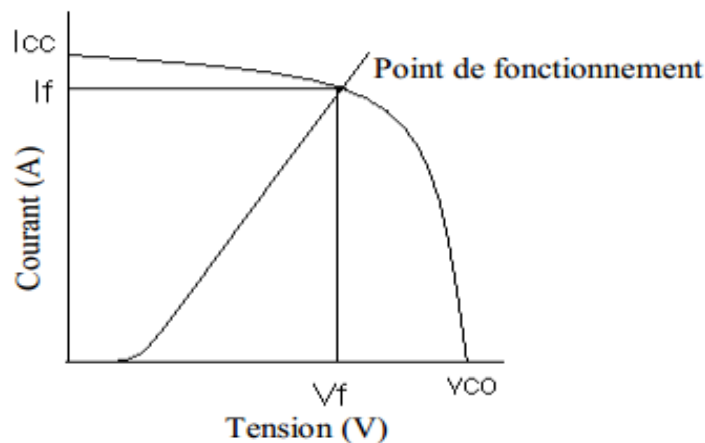
### IV-1 Introduction :

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque PV varient en fonction de la température, de l'éclairement, des caractéristiques de fabrication et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. L'utilisation directe de la puissance sortant d'un générateur PV est possible. Par exemple, un module PV peut être directement connecté à une charge de type continu. Cependant, dans certains cas de connexion directe, le module n'est exploité au mieux qu'au point de fonctionnement pour lequel la tension nominale de la charge est égale à la tension optimale du générateur.



**Figure (IV-1)** Couplage directe d'un générateur PV à une charge

La source de notre système est le générateur PV, l'électrolyseur est la charge dans ce système. Pour l'étude de notre système (G PV-électrolyseur), Nous traçons la caractéristique (I-V) de générateur et de la charge, pour trouver le point de fonctionnement de ce dernier. Le point de fonctionnement représente l'intersection entre les deux graphes.



**Figure (IV-2)** : point de fonctionnement de couplage



Les conditions de couplage direct entre le générateur et la charge sont

Courant de générateur = courant de la charge

$$I_{GPV} = I_c \quad (IV-01)$$

Tension de générateur = tension de la charge

$$V_{GPV} = V_c \Rightarrow V_{GPV} - V_c = 0 \quad (IV-02)$$

La résolution de cette équation se fait par la méthode de Newton-Raphson dont les étapes sont :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (IV-03)$$

$X_n$ : La présente itération.

$X_{n+1}$ : L'itération suivante

$f'(X_n)$  Le dérivé de la fonction  $f(X_n)$

Norme  $\varepsilon$  et mis à arrêter, l'équation représentant

$$\varepsilon = X_{n+1} - X_n \quad (IV-04)$$

### IV-2 Modélisation de générateur photovoltaïque :

De nombreuses études sont concentrées sur le développement de modèles mathématiques pour simuler la caractéristique de courant-tension (IV), et d'autres dirigée vers la modélisation de la performance des modules photovoltaïques sur le plan de l'électricité produite.

L'étude bibliographique a fait ressortir qu'il existe deux approches concernant la modélisation des capteurs photovoltaïques. La première nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur une fois installé.

C'est le cas des modèles **Sandia** et **Cenerg**. La deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs, ce qui est le cas des modèles **Madison, Borowy et al.**

**a)Modèle Sandia :** [36]

Le Sandia National Laboratory (Albuquerque, USA) a élaboré un modèle de capteur PV, permettant à la fois de tester des capteurs ainsi que d'estimer leur productivité.

La méthode permet de prendre en compte le fait que les STC (Standard Test Conditions), c'est à dire les conditions de références suivants lesquelles les grandeurs représentant le module sont mesurées par les constructeurs, sont bien différentes des conditions normales de fonctionnement. Dans ces conditions de référence, la température de fonctionnement des cellules PV est égale à 25°C, ce qui correspond à une température ambiante aux alentours de 0°C, ce qui est rarement le cas dans la pratique

Le modèle peut s'appliquer à la caractérisation d'un capteur PV constitué de plusieurs modules. Les équations déterminantes sont les suivantes :

$$I_{sc} = \frac{G}{G_r} f_1(AM) f_2(\beta) (I_{scr} + u_{Isc} (T_j - T_{jr})) \quad (IV-05)$$

$$I_{mp} = C_o + G_e (I_{mpr} + u_{Imp} (T_j - T_{jr})) \quad (IV-06)$$

$$V_{oc} = V_{cor} + C_1 \ln(G_e) + u_{Isc} (T_j - T_{jr}) \quad (IV-07)$$

$$V_{mp} = V_{mpr} + C_2 \ln(G_e) + C_3 [\ln(G_e)]^2 + u_{Vmp} (T_j - T_{jr}) \quad (IV-08)$$

$$G_e = \frac{I_{sc}}{I_{scr}} \quad (IV-09)$$

$G$  : rayonnement incident (W/m<sup>2</sup>),

$T_j$  : Température de jonction (K),

$AM$  : nombre d'air-masse,

$b$  : angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du capteur,

$G_r$  : rayonnement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>),

$T_{jr}$  : Température de jonction référence (25°C),

$f_1$  : Fonction du nombre d'air-masse,

$f_2$  : Fonction de l'angle d'incidence  $b$  du rayonnement sur le capteur PV,

$I_{scr}$  : Intensité de court-circuit de référence,

$V_{cor}$  : Tension de circuit ouvert de référence,

$V_{mpr}$  : Tension de puissance maximale de référence,

$I_{mpr}$  : Intensité de puissance maximale de référence,

$u_{Isc}$  : Coefficient de dépendance en température du courant de court-circuit.

$u_{Vmp}$  : Coefficient de dépendance en température de la tension de puissance maximale.

$u_{Imp}$ : Coefficient de dépendance en température du courant de puissance maximale.

$C_0, C_1, C_2, C_3$  : Coefficients déterminés expérimentalement.

Le principal avantage de ce modèle est qu'il permet de prendre en compte les différentes pertes électriques mentionnées ci-dessus. Cependant celui-ci nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur une fois installé

**b) Modèle Cenerg : [36]**

Le modèle développé par le Centre d'énergétique se base sur le modèle à une diode. Un bilan électrique sur ce schéma permet d'établir une expression donnant le courant I en fonction de la tension V disponible aux bornes du capteur :

$$I = P_1 \cdot G \cdot \left[ 1 + P_2 \cdot (G - G_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref}) \right] - \left[ P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left[ -\frac{E_g}{K \cdot T_j} \right] \right] \cdot \left[ \exp \left[ \frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot K \cdot T_j} \right] - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (IV-10)$$

Avec :

I : intensité aux bornes du capteur,

V : tension aux bornes du capteur,

G : rayonnement incident (W/m<sup>2</sup>),

TJ : température de jonction du capteur PV,

P1, P2, P3, P4, Rs, Rsh : paramètres à déterminer expérimentalement (Rs et Rsh étant les résistances séries et shunt des cellules),

n : paramètre d'ajustement, est égal au nombre de cellules en série (36 par exemple) pour un module PV parfait, et est supérieur dans la pratique,

Gref : rayonnement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>),

TJ : température de jonction de référence (25 °C),

Eg : gap du matériau, vaut 1.12eV pour le silicium cristallin.

Ce modèle a été validé expérimentalement par le Centre d'Energétique à Sophia Antipolis. Dans tous les cas, la différence entre calculs et résultats expérimentaux pour la productivité électrique est inférieure à 5%.

Lors de la caractérisation du champ de modules, et donc de la mesure des différents coefficients, il est noté que ces coefficients intègrent les pertes électriques dues aux

'Mismatchlosses' (dissymétrie entre modules) ainsi que les pertes dans les connexions. La puissance électrique perdue est estimée à environ 3%.

Nous retrouvons pour ce modèle la même problématique que pour le modèle 'Sandia': les paramètres expérimentaux permettent une caractérisation plus fiable du système PV, mais cela nécessite une phase de mesures relativement lourde.

### c)Modèle Madison : [36]

Ce modèle a été développé par l'université de Madison pour la programmation d'un module de simulation de capteur PV appelé 'PHANTASM' chaîné au programme de simulation thermique de bâtiment 'TRNSYS'. Tout comme le modèle 'Cenerg', il se base sur le modèle électrique des cellules appelé 'Modèle à une diode'. Par contre, le modèle développé propose une méthode qui permet de calculer les performances du module PV à partir des données fournies par les constructeurs.

L'équation qui donne l'intensité  $I$  en fonction de la tension  $V$  aux bornes du capteur est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left[ \frac{q(V + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot T_j} \right] - 1 \right) - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (\text{IV-11})$$

Avec :

$I$  : intensité aux bornes du capteur (A),

$V$  : tension aux bornes du capteur (V),

$I_{ph}$  : Photo courant (A),

$I_s$  : Courant de saturation inverse de diode (A),

$n$  : paramètre d'ajustement,

$T_j$  : température de jonction,

$R_s$  : résistance série,

$R_{sh}$  : résistance shunt.

- Le premier terme de l'équation du modèle 'Cenerg' (équivalent au photo courant  $I_{ph}$  du modèle 'Madison') est fonction de la température jonction  $T_j$ , et dépend d'un terme en  $G^2$ , ce qui n'est pas le cas pour l'expression du photo courant  $I_L$  du modèle 'Madison'. Pour ce calcul, le modèle 'Madison' utilise une hypothèse simplificatrice qui dit que le photo courant est proportionnel au rayonnement incident  $G$ , et qu'il ne dépend pas de la température  $T_j$ .

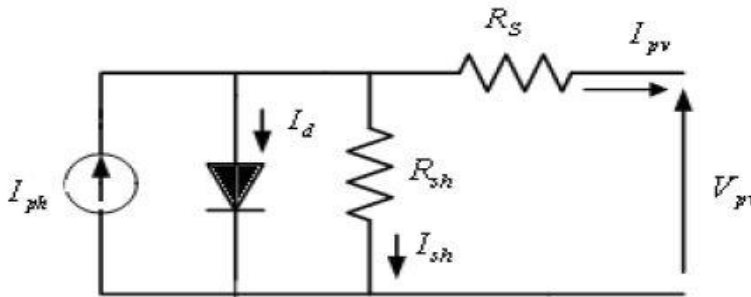
- Dans l'équation du modèle 'Madison' le calcul du troisième terme, qui est le courant traversant la résistance shunt  $R_{sh}$ , fait intervenir la tension aux bornes de la résistance série  $R_s$ . Cette

résistance série n'intervient pas dans l'équation du modèle 'Cenerg', car dans ce modèle pour calculer l'intensité traversant la résistance shunt Rsh, la tension aux bornes de la résistance série est négligée.

- Donc, nous avons choisi de travailler sur le modèle 'Madison'

#### IV-2.1 La simulation de la caractéristique I-V :

Le schéma suivant représente le modèle réel d'un module PV :



**Figure(IV.3) :** Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque

##### a) Méthode d'un modèle de Rauschenbach :

On a d'abord caractérisé le générateur PV en utilisant le modèle de 'Rauschenbach', et présenté une méthode itérative pour la poursuite de sa courbe de puissance maximale.

Les résultats obtenus sont validés, par comparaison avec ceux obtenus par la méthode analytique.

L'application de ce modèle nécessite la connaissance de trois paramètres, à savoir  $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$  et  $P_m$

Il est défini par: [43]

$$I = I_{CC} [1 - C_1 [\exp(\frac{V}{V_{CO}}) - 1]] \quad (IV-12)$$

$$C_1 = [1 - \frac{I_m}{I_{CC}}] \cdot \exp[\frac{-V_m}{C_2 V_{CO}}] \quad (IV-13)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{CO}} - 1}{\ln[1 - \frac{I_m}{I_{CC}}]} \quad (IV-14)$$

Avec :

$C_1$  et  $C_2$ : Les constantes calculées à chaque simulation.

$V_{CO}$  : Tension de circuit ouvert du GPV

$I_{CC}$ ,  $V_{CO}$  et  $P_{max}$  courant, Tension et Puissance maximale respectivement.

$I_{CC}$ : Courant généré par les rayons solaires.

L'expression (IV-30) génère la caractéristique (I-V) pour un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C , pour une autre valeur de l'éclairement et de la température, les nouvelles valeurs du courant et de la tension du générateur PV sont :

$$\Delta T = (T - T_{ref}) \quad (IV-15)$$

$$\Delta I = \alpha \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) + \left( \frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{cc} \quad (IV-16)$$

$$T = T_a + \frac{G}{G_{ref}} (NOCT - T_{a,ref}) \quad (IV-17)$$

Avec:

$G_{ref}$  : Eclairement de référence.

$\alpha$  et  $\beta$  : Coefficients de variation du courant et de la tension avec la température.

$T_a$  : Température ambiante.

$T_{a,ref}$  : Température ambiante de référence.

NOCT : Température normale de fonctionnement

Applicable à un niveau d'éclairement et de température de la cellule en particulier. Pour d'autres valeurs d'éclairement et de température

$$I_{cc} = n_p \cdot I_{cc_{ref}} + \Delta I \quad (IV-18)$$

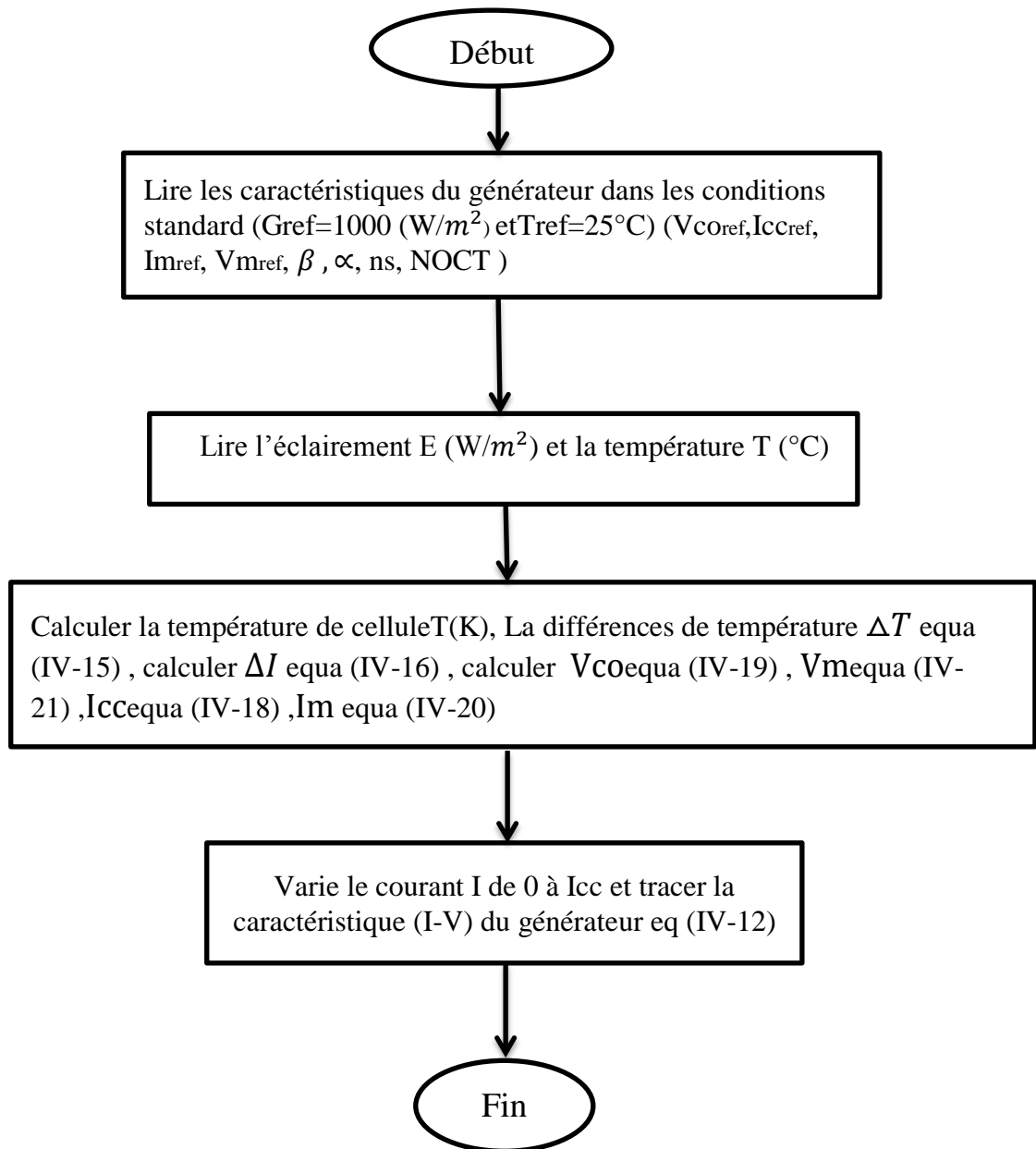
$$V_{co} = n_s \cdot V_{co_{ref}} [1 + 0.0539 \cdot \log(G/G_{ref}) + \beta \cdot (T_a - T_{a,ref})] \quad (IV-19)$$

$$I_m = n_p \cdot (I_{m_{ref}} + \Delta I) \quad (IV-20)$$

$$V_m = n_s \cdot (V_{m_{ref}} [1 + 0.0539 \cdot \log(G/G_{ref}) + \beta \cdot (T_a - T_{a,ref})]) \quad (IV-21)$$

Par l'utilisation de ces équations nous avons réalisé un organigramme qui permet de générer la caractéristique (I-V) pour n'importe quelles valeurs d'éclairements et de températures

b) L'organigramme pour tracer la caractéristique (I-V) :



IV-2.2 Le Module photovoltaïque utilisé :

Pour la mise en œuvre du graphique nous avons choisi module photovoltaïque (**BP 580F**) ont des caractéristiques ards conditions nominal enregistrées par le fabricant (G=1000 W/m<sup>2</sup> T=25C°)

Caractéristiques électriques typiques	BP 580F
Puissance maximale(Pmax)	80 W
Tension à Pmax(Vmp)	18.0 V
Courant à Pmax(Imp)	4.44 A
Courant court-circuit	4.7 A
Tension circuit-ouvert	22.0 V
Le coefficient de température de courant	0.065 A/°C
Le coefficient de température de tension	-80 mV/°C
NOCT	47

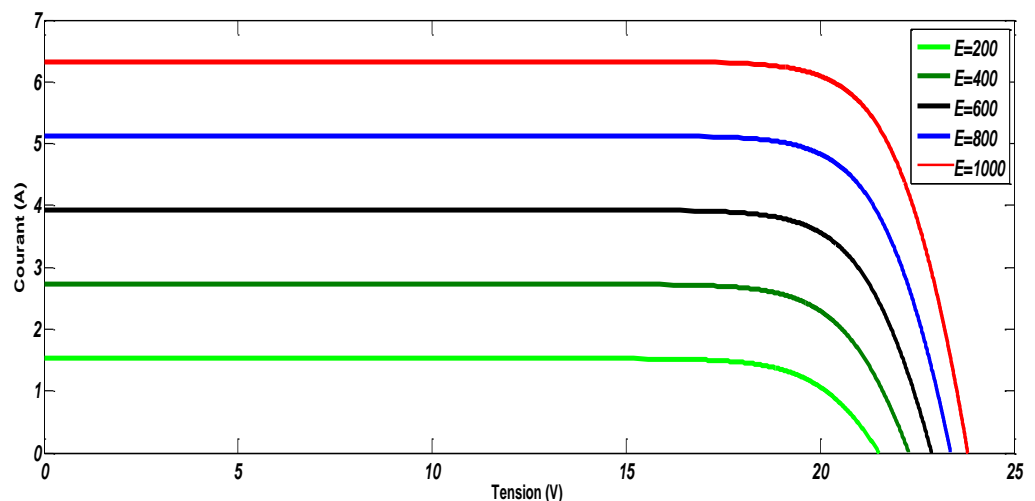
**Tableau (IV-1) :** caractéristique de module photovoltaïque type BP 580F

### IV-2. 3 Résultat de simulation de module BP 580F :

#### a) Influence de l'éclairement :

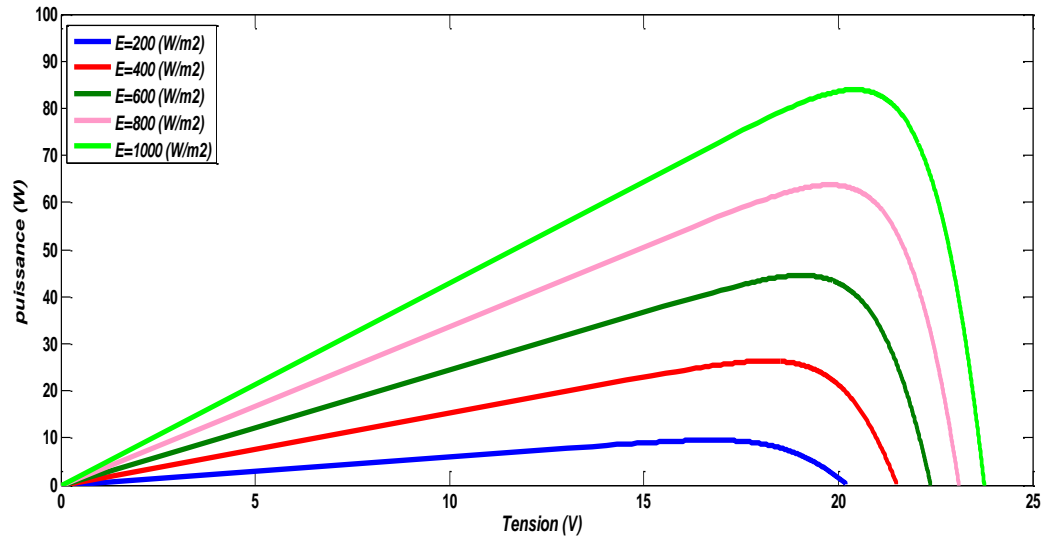
Une baisse de l'éclairement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire  $I_{cc}$  proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{coet}$  donc un décalage du point Pmax du panneau solaire vers les puissances inférieures. Les graphes suivants représentent les caractéristiques P(V) et I(V) respectivement d'un générateur

Photovoltaïque pour une température constante ( $T=25^{\circ}C$ ) et un éclairement variable.



**Figure (IV.4) :** la caractéristique (I-V) avec différents éclairements, pour  $T=25^{\circ}C$





**Figure (IV.5) :** la caractéristique (P-V) avec différents éclairements, pour  $T=25^{\circ}\text{C}$

Il est clair 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, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule ( $P_{\text{max}}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### b) Influence de la température :

La figure (IV.4) et figure (IV.5) présente des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

Nous remarquons que la température à 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. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de  $25^{\circ}\text{C}$ .

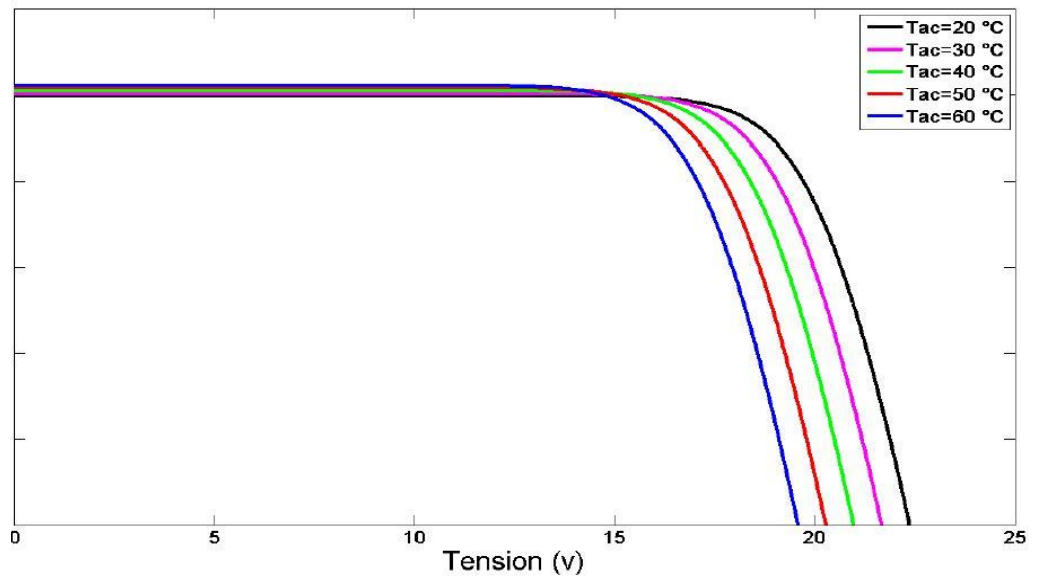


Figure (IV.6) : la caractéristique (I-V) avec les différentes températures, pour  $E=1000W/m^2$

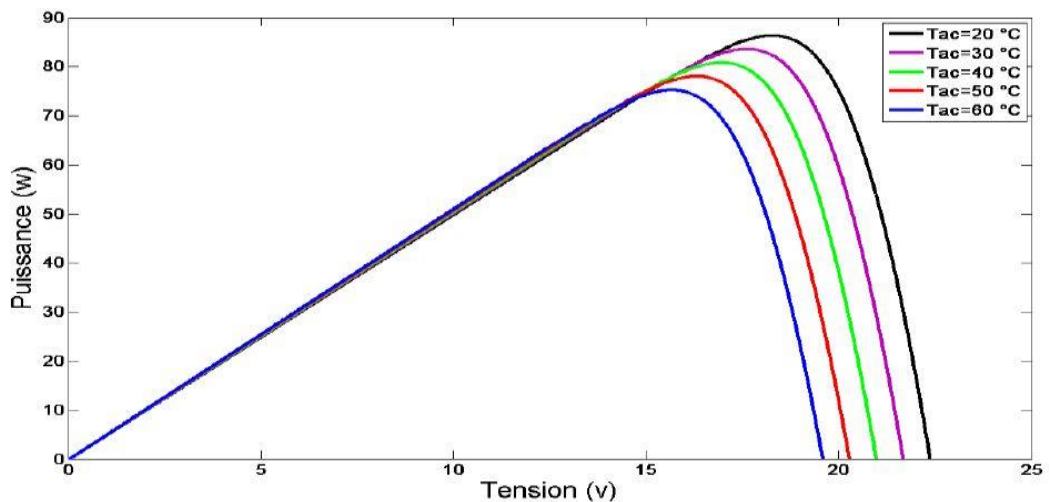


Figure (IV.7) : la caractéristique (P-V) avec les différentes températures, pour  $E=1000W/m^2$

### IV-3. Modélisation d'électrolyseur :

La première électrolyse par courant continu (électrolyse de l'eau) a été réalisée le 2 mai 1800 par deux chimistes britanniques, **William Nicholson** (1753-1815) et **Sir Anthony Carlisle** (1768-1842), quelques jours après l'invention de la première pile électrique (publication soumise le 20 mars 1800 dans une lettre en français au président de la **Royal Society, Joseph Banks**) par **Alessandro Volta** et grâce à celle-ci. **J. R. Deiman** et **A. Paets van Troostwijk** avaient déjà réalisé une électrolyse de l'eau en 1789 au moyen d'une machine électrostatique et d'une bouteille de Leyde sans réussir à interpréter la réaction observée.

L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Elle permet par ailleurs, dans l'industrie chimique, la séparation d'éléments ou la synthèse de composés chimiques. C'est aussi dans la classification des corps purs.

L'électrolyse est utilisée dans divers procédés industriels, tels que la production de dihydrogène par électrolyse de l'eau, la production d'aluminium ou de chlore, ou encore pour le placage d'objets par galvanoplastie. [44]

L'électrolyse alcaline est le procédé le plus mature, employé en industrie. Les électrolyseurs se présentent en modules de petite ou moyenne capacité (0,5-800 m<sup>3</sup>/h d'hydrogène), utilisant une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium ou potasse dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25 % en masse à 80 C° jusqu'à 40 % à 160 C°). La potasse est préférée à la soude, essentiellement pour des raisons de conductivité supérieure à niveau de température équivalent et de meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates.

Les modules comprennent généralement, une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse, une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur et un système de contrôle. Certaines technologies d'électrolyseurs fonctionnent directement sous pression. Les modules de petite capacité opèrent typiquement de 3 à 30 bars, ces avantages aident dans mes études pour réaliser couplage.

### IV-3.1 La tension de fonctionnement :

En raison des pertes d'énergie liées à la cinétique de réaction ainsi que le transport de charge par l'intermédiaire des conducteurs électriques et l'électrolyte, tous les dispositifs pratiques pour l'électrolyse de l'eau fonctionnent en régime de tension qui est supérieure à la tension thermo neutre. La tension de fonctionnement ou réelle ( $U_{op}$ ) d'une cellule électrolytique peut être exprimée comme :

$$U_{op} = U_{rev} + \sum \Delta U_{el} + \Delta U_{Ohm} \quad (IV-22)$$

$U_{rev}$  : La tension réversible

$U_{el}$  : La somme de la sur tension anodique et cathodique (V)

$U_{Ohm}$  : La chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur

**IV-3.2 L'électrolyseur utilisé :**

Nous utilisons dans l'étude un modèle d'électrolyseur de l'eau alcaline H2 IGEN 300/1/25 anciennement de Vanden Borre systèmes-Stuart hydrogène énergie (maintenant HySTAT <sup>TM</sup> de Hydrogenics, Canada). Ce bipolaire est un filtre-presse de type électrolyseur incorporant un empilement 22 cellules d'électrolyse de 300 cm<sup>2</sup> de surface montés en série. La membrane de type électrodes (Vanden Borre IMET) et l'électrolyte est une solution concentrée de KOH (30% en poids) dans l'eau. La production d'hydrogène nominale est de 1 Nm<sup>3</sup> / h à une pression maximale de fonctionnement et température de 25 atm et 70 ° C, respectivement, avec une tension de pile de 43 V et un courant de 120 A. La consommation d'énergie globale est 4,90 kWh / N m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>[45]

**IV-3.3 Modèle de la caractéristique (V-I) :**

Le modèle (V-I) pour l'électrolyseur est donnée par l'équation, suivent : [41]

$$V_e = U_{Stack\ rev} + r \cdot \left(\frac{I}{A_e}\right) + s \cdot \text{Log} \left(1 + t \cdot \left(\frac{I}{A_e}\right)\right) \quad (IV-23)$$

$$= U_{Stack\ rev} + (r_1 + r_2 \cdot T_e) \cdot \left(\frac{I}{A_e}\right) + (s_1 + s_2 \cdot T_e + s_3 \cdot T_e^2) \cdot \left(\text{Log} \left[1 + \left(t_1 + \frac{t_2}{T_e} + \frac{t_3}{T_e^2}\right) \cdot \left(\frac{I}{A_e}\right)\right]\right) \quad (IV-24)$$

- r , t , s: Les paramètres pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression).
- $\frac{I}{A_e}$ : représente la densité de courant

Les paramètres de notre électrolyseur sont représentés dans le tableau (IV-2) :

paramètres	
r1	0.0015 Ωm <sup>2</sup>
r2	-6.019×10 <sup>-6</sup> Ωm <sup>2</sup> ° C <sup>-1</sup>
s1	2.427 V
s2	-0.0307 V° C <sup>-1</sup>
s3	3.90×10 <sup>-4</sup> V° C <sup>-2</sup>
t1	0.214 A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup>
t2	-9.870 A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> °C
t3	110.1 A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> °C <sup>2</sup>

**Tableau (IV-2) : Données d'électrolyseur Alcaline [41]**

**IV-4. Modélisation de couplage (GPV-électrolyseur) :**

Le couplage entre les deux graphiques des caractéristiques (I-V) de générateur PV et de l'électrolyseur dans un système unique, permet de trouver le point de fonctionnement de système

Appliquons les conditions de couplage nous trouvons :

$$U_{Stack\ rev} + r. \left(\frac{I}{Ae}\right) + s.Log \left(1+t. \left(\frac{I}{Ae}\right)\right) = I_{cc}. P2 \log \left(\frac{I_{cc} P1 + I_{cc} + I}{I_{cc}.P1}\right) \quad (IV-25)$$

$$f(I) = - U_{Stack\ rev} - r. \left(\frac{I}{Ae}\right) - s.Log \left(1+t. \left(\frac{I}{Ae}\right)\right) - I_{cc}. P2 \log \left(\frac{I_{cc} P1 + I_{cc} + I}{I_{cc}.P1}\right) = 0 \quad (IV-26)$$

**IV-5. Dimensionnement de générateur :**

**IV-5.1. Calcul de Np et Ns :**

Pour améliorer adaptation de l'électrolyseur au générateur PV avec l'éclairement de E=1000 W/m<sup>2</sup>

Nous avons calculé les nombres des cellules séries (Ns) et parallèles (Np) de générateur, en suivant les étapes suivantes :

On résoudre l'équation suivant :

$$N_p \cdot I_{max\ mod} = I_{elec} \quad (IV-27)$$

$$V_{max} \cdot N_s = \left(- U_{Stack\ rev} - r. \left(\frac{I_{max}}{N_p}\right) - s. \log \left(1 + t. \left(\frac{I_{max}}{N_p}\right)\right)\right) \quad (IV-28)$$

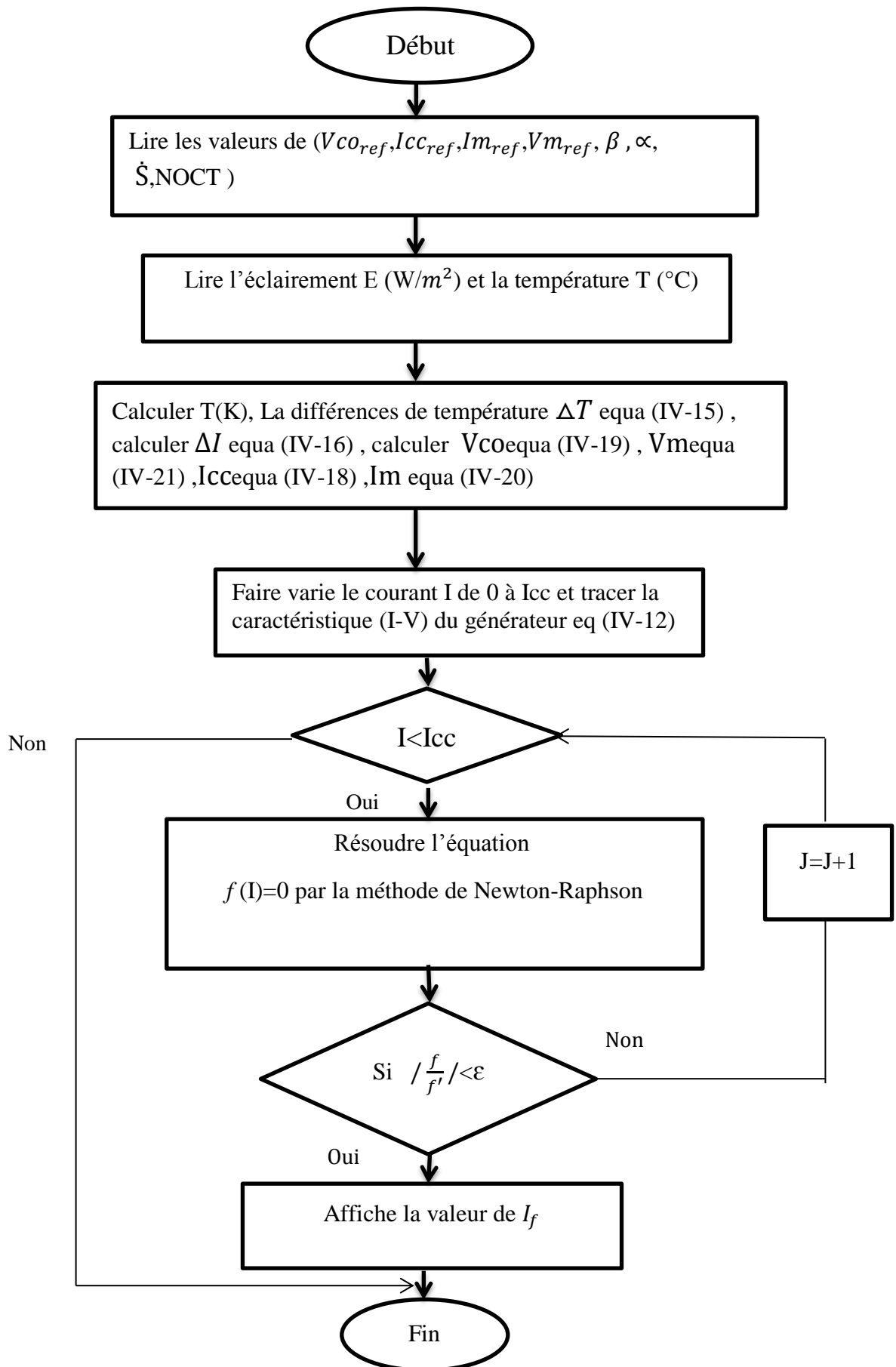
$$\Rightarrow N_p = \frac{I_{elec}}{I_{max\ mod}} \quad (IV-29)$$

$$\Rightarrow N_s = \frac{\left(- U_{Stack\ rev} - r. \left(\frac{I_{max}}{N_p}\right) - s. \log \left(1 + t. \left(\frac{I_{max}}{N_p}\right)\right)\right)}{V_{max}} \quad (IV-30)$$

Nous avons résolu ce système d'équation en prenant en considération la puissance et le courant maximal d'électrolyseur et les caractéristiques des modules et nous avons trouvé :

$$N_p = 25 \qquad N_s = 3$$

**IV-6.Organigramme de couplage direct :**



a) **Le rendement global du système:**

$$\eta_s = \frac{I_f \cdot 1.23 \cdot N_s}{G \cdot \dot{S}} \quad (\text{IV-31})$$

G: éclairement ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),

$\dot{S}$  : Surface de générateur ( $\text{m}^2$ )

b) **Le rendement d'adaptation :**

$$\eta_{ui} = \frac{I_f \cdot V_f}{I_m \cdot V_m} \quad (\text{IV-32})$$

c) **Le rendement de générateur photovoltaïque :**

$$\eta_g = \frac{I_f \cdot V_f}{G \cdot \dot{S}} \quad (\text{IV-33})$$

d) **Débit de production d'hydrogène :**

On peut calculer le débit d'hydrogène en (ml/s) par l'équation suivante :

$$Q = \frac{N_E \cdot R \cdot I_f \cdot T_e}{Z \cdot F \cdot P} \quad (\text{IV-34})$$

$N_E$  : Nombre de cellules d'électrolyseur

R: Constant des gaz parfaits ( $8,3144621 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$I_f$ : Le courant de fonctionnement d'électrolyseur (A)

$T_e$ : Température de l'électrolyte (K)

Z: Nombre d'électron requis pour libérer une molécule

F: Constant de Faraday ( $96\,485 \text{ C/mol}$ )

P : Pression d'électrolyseur (MPa)

e) **Le rendement d'électrolyseur :**

$$\eta_{el} = \frac{1.23 \cdot N_E}{V_f} \quad (\text{IV-35})$$

$V_f$ : La tension du point de fonctionnement.

IV-7. Les résultats de simulation :

La figure III.16 représente la caractéristique (I-V) de générateur photovoltaïque et l'électrolyseur avec  $N_s = 3$ ,  $N_p = 25$  avec les différentes valeurs d'éclairements et de température fixe ( $T=25C^\circ$ ).

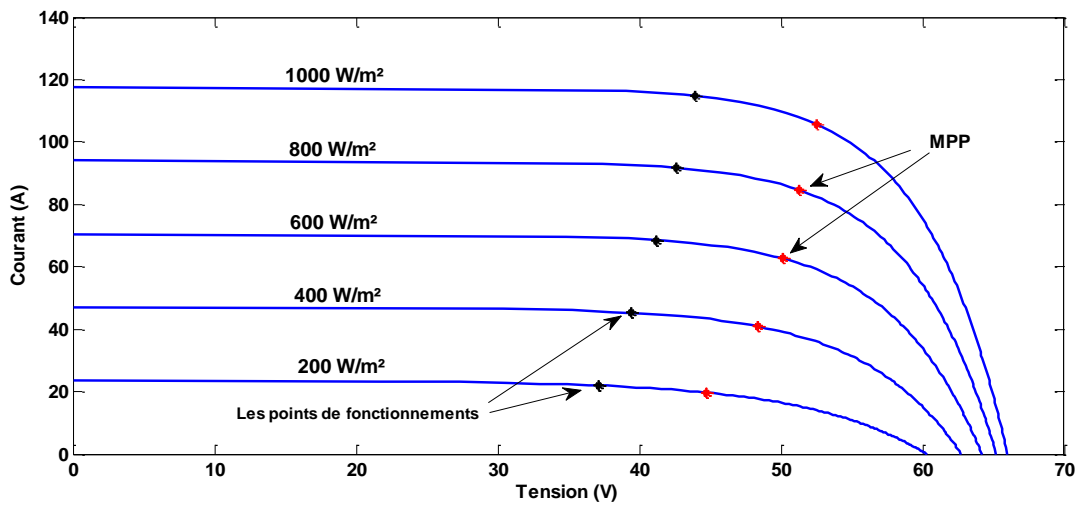


Figure (IV.8) : Caractéristiques (I-V) de couplage

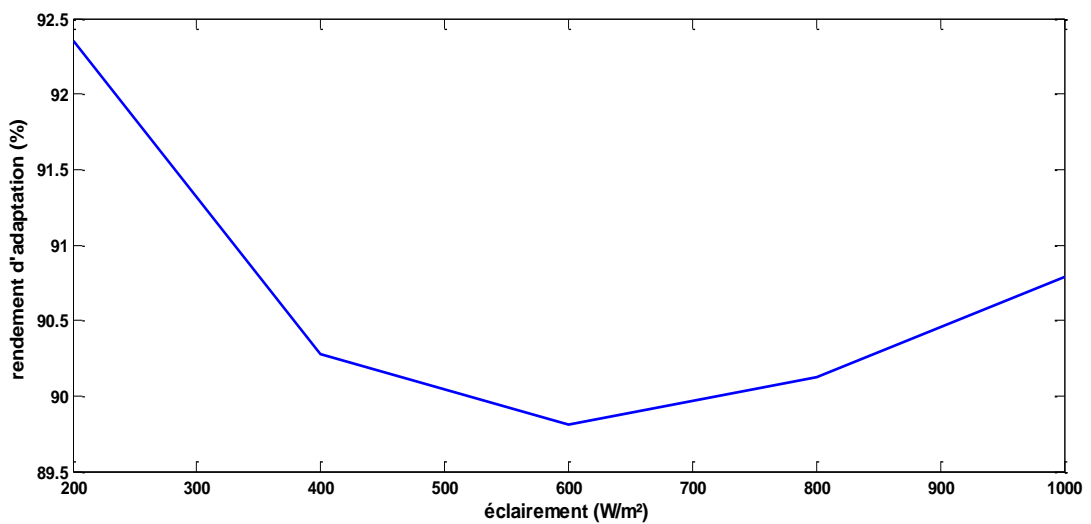


Figure (IV.9) : Variation de rendement d'adaptation en fonction d'éclairements



**Interprétation des résultats :**

Pour évaluer les pertes dues au non adaptation du système, on a simulé à l'aide du Programme développé les caractéristiques (I-V) du couplage direct entre le générateur et l'électrolyseur. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures ci-dessus :

D'après Caractéristiques (I-V) figure (IV.8) de couplage nous notons qu'il y a un rapprochement entre les point de fonctionnement d'électrolyseur à les points de puissance maximums (MPP)

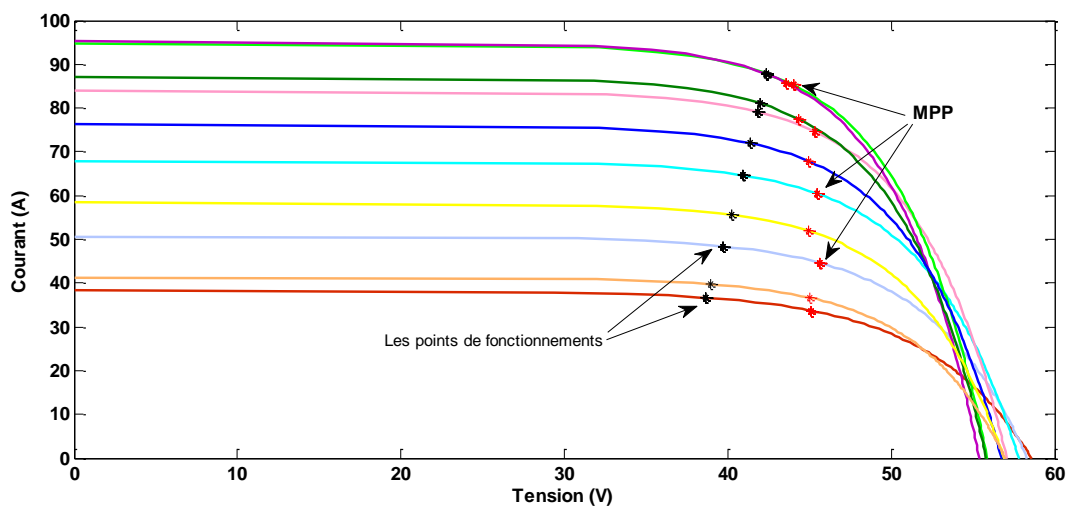
D'après la courbe de rendement d'adaptation figure (IV.9), nous remarquons que le rendement varié entre (90 % et 92.5%) pour un éclairement entre (200-1000) w/m<sup>2</sup> avec une valeur de générateur améliore le résultat moyen total (90.63 %) d'adaptation de système de telle sorte que les points de fonctionnement de système seront le plus approche possible des points de puissance maximale (MPP) de GPV

De ces résultats, nous pouvons dire que couplage direct peut travailler comme bon couplage avec convertisseur et le coût le plus bas, et pour éviter les pannes des convertisseurs

**a) Modèle avec des données de l'éclairement pour une journée dans la ville d'Ouargla :**

Heure	8 :00	9 :00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
G (w/m <sup>2</sup> )	323	426	569	700	787	790	724	636	488	364
T(c°)	29	31	33	35	39	41	40	37	37	36

**Tab (IV-3) :** L'éclairement et les températures de la journée de 04/04/2004 à Ouargla  $\beta = 0^\circ$  [24]



**Figure (IV.10) :** Caractéristiques (I-V) de couplage pour une journée a Ouargla le 04/04/2004

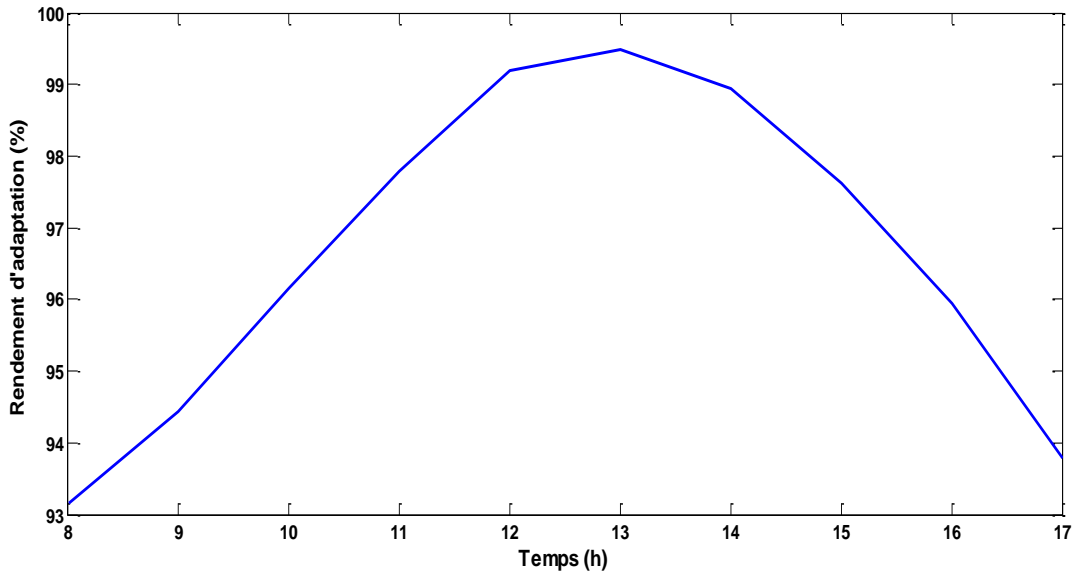


Figure (IV.11) : Variation de rendement d'adaptation en fonction de Temps

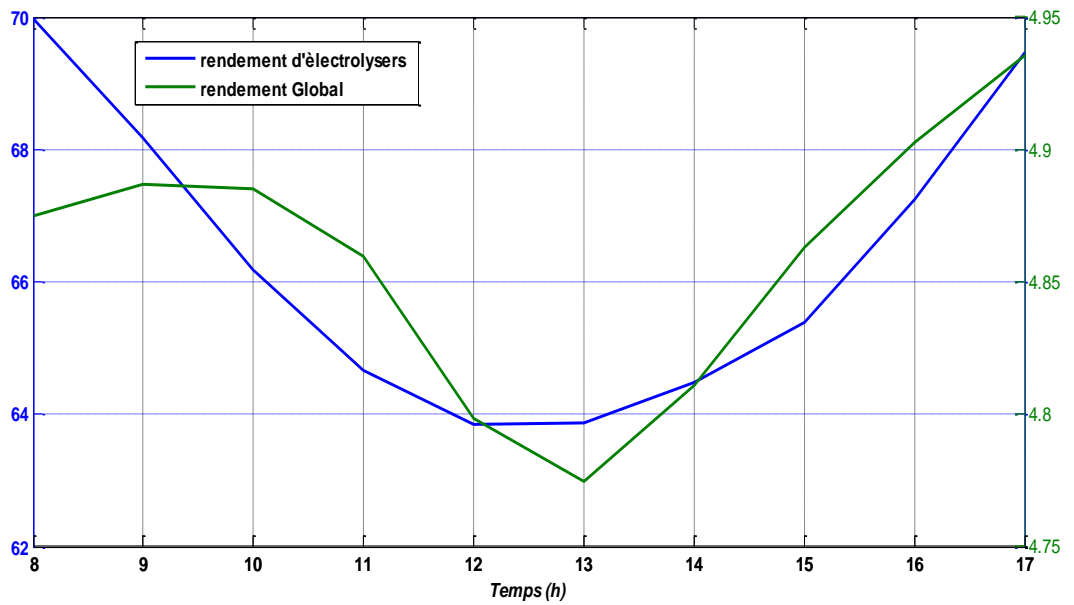
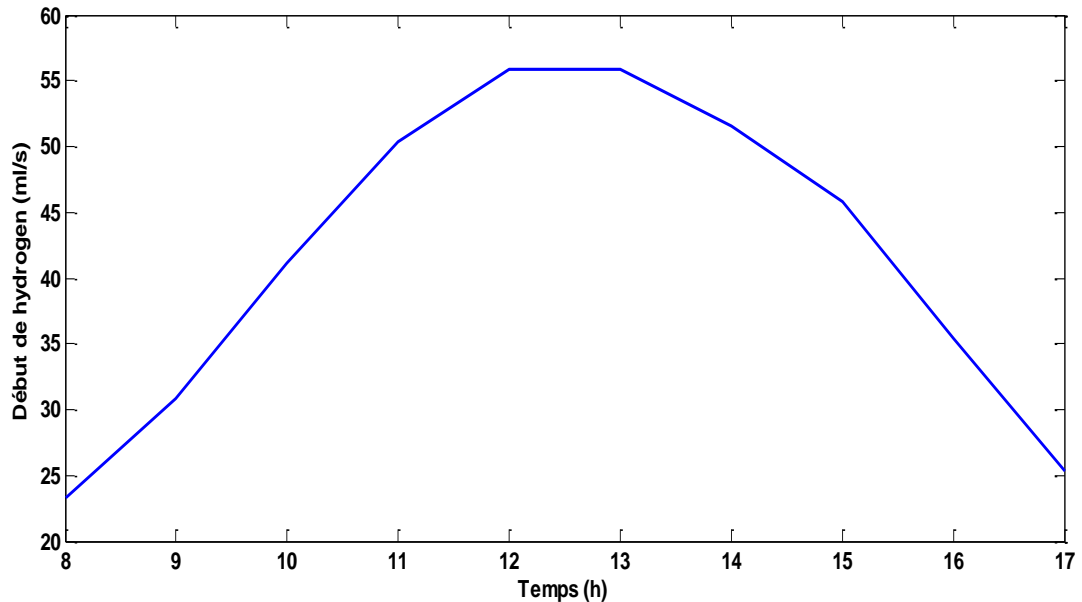


Figure (IV.12) : Variation de rendement d'électrolyse en fonction de Temps



**Figure (IV.13) : Débit d'hydrogéné**

#### **Interprétation des résultats :**

On a simulé à l'aide du Programme développé les caractéristiques (I-V) du couplage avec les données pour une journée dans la ville d'Ouargla, Les résultats obtenus sont montrés dans les figures ci-dessus :

La courbe de couplage figure (IV.10), montre une rapprochement entre les points de fonctionnement du système et les points de puissance maximale pour les fortes éclaircements

D'après la courbe de rendement d'électrolyseur nous observons que l'allure prend des valeurs importantes à l'intervalle (100-400 W/m<sup>2</sup>) et (800-1000 W/m<sup>2</sup>) prend les valeurs faibles dans les intervalles d'éclairciment de (500-700 W/m<sup>2</sup>) et (figure IV.10).

Figure (IV.12) Nous remarquons que le rendement global de système, varié entre 4.75% et 4.95% par rapport au premier cas parce que le rendement d'adaptation (figure IV.11) varié entre 93% et 99.6%, le rendement moyen d'adaptation (96.64 %)

Figure (IV.13) représenté la courbe de débit de production d'hydrogène nous remarquons l'alluré prend des valeurs important à l'intervalle (400-700 W/m<sup>2</sup>) dans la même valeur important de rendement d'adaptation

**b) Comparaison de couplage avec une autre charge :**

On comparé le couplage (GPV-EI) avec le couplage (GPV-B) dans intervalle d'éclairement (200-800 W/m<sup>2</sup>) et température fixe (25 C°)

Plusieurs modèles de simulation de la batterie ont été élaborés le plus classique est le modèle (I-V) , C'est le modèle le plus simple établissant la relation entre le courant et la tension au niveau de la batterie pendant sa charge, il est formulé par l'équation :

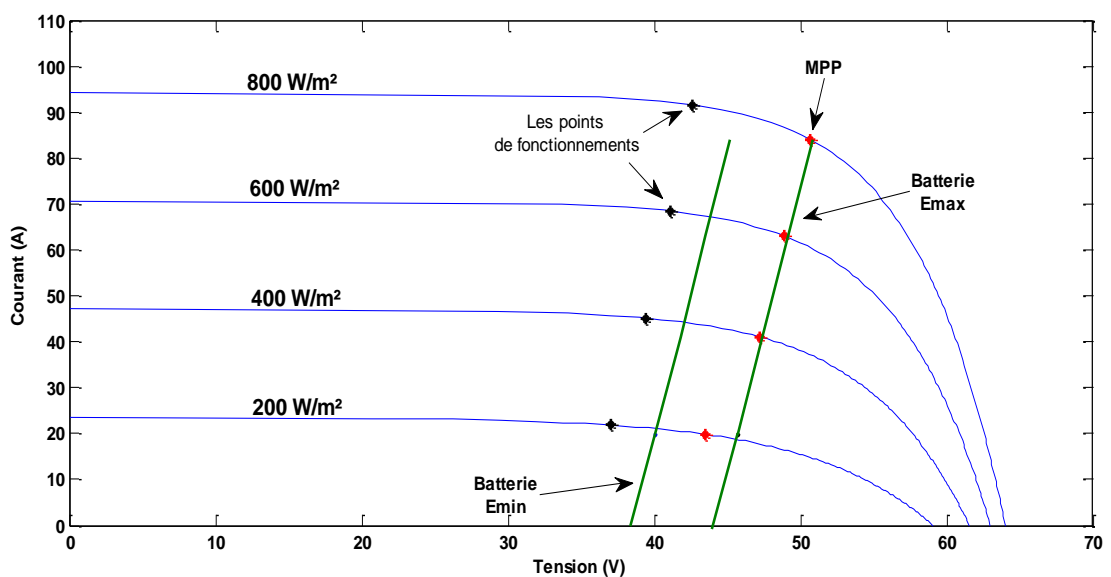
$$V = E_b + R_b \cdot I \tag{IV-36}$$

**Les données de la batterie :** [46]

$$E_{bmin} = 9.7 \text{ v} , E_{bmax} = 11.025 \text{ v} , R_b = 2 \text{ ohm}$$

Si on a utilisé une batterie de 10 volts, connectés en nombre série de batterie (Nsb=4) et parallèle, Valeur minimale de décharge  $E_{bmin}$  et une valeur maximale de sur charge  $E_{bmax}$

$$E_{bmin} = 9.7 \cdot Nsb = 38.5 \text{ v} , E_{bmax} = 11.025 \cdot Nsb = 44.1 \text{ v}$$



**Figure (IV.14)** Caractéristiques (I-V) de couplage (GPV-EI) avec le couplage (GPV-B)

Il est clair que la qualité de l'adaptation entre le générateur et la batterie dépend des deux valeurs de tensions la tension de décharge et celle de sur charge de la batterie et de sont éloignement des points de tension des points de puissance maximale de générateur PV.

Dans notre cas la valeur moyenne de rendement d'adaptation pour la tension de décharge est (93.6 %)

Et pour la tension de charge la valeur moyenne de rendement d'adaptation est 98.01 %

### **VI -8.Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons simulé un modèle mathématique décrivant le couplage du générateur photovoltaïque et l'électrolyseur dans des différentes conditions d'éclaircissements et de températures ,avec l'évaluation des performances du système, les résultats obtenus montrent un rendement d'adaptation entre le générateur PV et l'électrolyseur qui dépasse les 90% durant toute la journée.

*Conclusion  
Générale*

## Conclusion Générale

---

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude le couplage direct entre le générateur photovoltaïque et la charge électrolytique (électrolyse alcalin et batterie).

La charge électrolytique est considéré par beaucoup comme une technologie d'avenir, car elle peut bénéficier des nombreux développements sur les électrolytiques, Cette technologie reste encore peu employée au regard de la production mondiale d'hydrogène par exemple. Tout cela justifie la poursuite des travaux de recherche.

L'objectif global de notre travail est l'étude de couplage direct de générateur photovoltaïque avec une charge électrolytique, pour déterminer les performances de système avec l'utilisation des données climatiques de la région d'Ouargla.

Dans ce travail nous avons présenté la modélisation des éléments de système et la simulation de couplage direct pour les différentes conditions d'éclairement et de température.

D'après les résultats obtenus dans ce système à couplage direct, nous pouvons observer un rapprochement considérable entre les points de puissances maximales du GPV et celle des points de fonctionnements de l'électrolyseur et aussi dans le cas de la batterie.

Suite à ces résultats nous pouvons dire que pour ces deux charges choisi le choix judicieuse des dimensions de générateur et de l'électrolyseur et aussi le choix de la tension de batterie permet d'arriver à une adaptation acceptable entre le générateur et la charge ce qui provoque une pesse du pris totale de système par l'élimination des éléments comme le convertisseur.

## BIBLIOGRAPHIES

---

- [01] Ben Khelifa Nadjiba Master en Électrotechnique thème Détermination des paramètres d'un panneau photovoltaïque "Caractérisation" Université de Tébessa 2014
- [02] Sources: key world energy statistics international energy agency rapport 2012
- [03] G. Bessereau - A. Sanière «Charbon : ressources, réserves et production » Manuscrit transmis en décembre 2007. Innovation Energie Environnement.
- [04] Jean-Louis Bascdevant, James Rish et Michel Spiro « Energie Nucléaire » les éditions de L'école polytechnique. Janvier 2002.
- [05] Société du Groupe Sonelgaz « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique » document a été élaborée par le ministère de l'énergie et des mines. Mars 2011
- [06] Babu, B.V. and A.S. Chaurasia, modeling for pyrolysis of solid particle: kinetics and heat transfer effects. energy conversion and management, 2003.
- [07] FARADJI née Kherbouche Djamila « Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse » mémoire de DOCTORAT. Univ Abu Bakr Belkaid Tlemcen
- [08] <http://fr.wikipedia.org>
- [09] Alain Bilbao learreta '' Réalisation de commandes MPPT Numériques '' Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.
- [10] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ' Le pompage photovoltaïque', Université d'Ottawa, 1998.
- [12] S.ABADA ' Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic', Mémoire Maître es Sciences, Université laval, 2011.
- [13] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [14] Khoudrane Ismail master Professionnel Génie Mécanique Thème : Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques Université Ouargla 2014
- [15] SOUFI ADEL Master en GENIE ELECTRIQUE thème Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque utilisant la technique d'espace d'état 2011-2012 ouargla
- [16] A .Doppi, « climatisation solaire », Thèse de magister, Center Universitaire Ouargla, 2000.
- [17] A .Ben mir, « modélisation d'une cellule solaire en couche de structure P-I-N à de silicium amorphe hydrogène», Thèse magister, Center Universitaire, Ouargla, 2000.
- [18] [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89clairement\\_%C3%A9nerg%C3%A9tique](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89clairement_%C3%A9nerg%C3%A9tique)
- [19] Sekiou Yasmine MASTER ACADEMIQUE thème Dimensionnement d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque dans la région d'Ouargla 2012-2013
- [20] centre de météo Ouargla.



## BIBLIOGRAPHIES

---

- [21] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [22] A. buyers « les système photovoltaïques » guide, Canada 2002 .ARTICLE PDF.
- [23] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef « Optimisation du rendement d'une cellule Solaire N+P au Silicium Monocristallin
- [24] L .kemmouche« Modèle de fonctionnement d'une station solaire photovoltaïque en prévision de panne » université constantine 2002
- [25] SALAHEDDINE BENSALÉM « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 2011
- [26] [http://www.xpair.com/lexique/definition/module\\_photovoltaique.htm](http://www.xpair.com/lexique/definition/module_photovoltaique.htm)
- [27] <http://eco-solutions.over-blog.com/montage-des-panneaux-solaire-sur-une-toiture>
- [28] Maouedj Rachid. '' Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de tlemcen et de bouzareah''. Thèse de Magister. Université de Tlemcen, Algérie, 2005
- [29] KHERIDLA KHINECHE ''Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque'', Mémoire MASTER ACADEMIQUE. Université d'Ouargla, 2014
- [30] M Saad Saoud , H Abbassi , M kermiche « Modélisation d'un système photovoltaïque autonome » Université d'Ouargla 2013
- [31] <http://fr.wikipedia.org>
- [32] Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque Thèse de Master .U. KASDI MERBAH OUARGLA
- [33] production et stockage de l'hydrogène ([www.ademe.fr](http://www.ademe.fr))
- [34] F. Ayati Technologie de production d'hydrogène applique a la pile a combustible Thèse de Magister .U.S.T.H.B.2004.
- [35] Etude de matériaux hydrurables par émission acoustique– Application aux batteries Ni-MH Thèse de docteur de l'école doctorale matériaux de Lyon
- [36] Contribution à l'étude à la modélisation des éléments d'un système photovoltaïque Thèse de Magister de U. Abou-Bekr BELKAÏD Tlemcen
- [37] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation», Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME).
- [38] Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004.
- [39] Avicenna Development, The portable rechargeable battery (PRB) market in Europe (2008-2015), Report for Rechargeable aisbl, (2010), <http://www.rechargebatteries.org/>

## BIBLIOGRAPHIES

---

- [40] Z.Bachi, S.Elfodil, « Conception et réalisation d'un système de régulation de charge semi statique a sortie fixe pour installation photovoltaïque », université de Blida
- [41] Othmane BENSEDDIK Mémoire de Master thème étude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque UNIVERSITE KASDI MERBAH- OUARGLA 2012
- [42] C. CABAL 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ', Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.
- [43] 'Simulation of Grid-Connected Photovoltaic System', Jingzhe Song
- [44] <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse>
- [45] 'Renewable Hydrogen Production: Performance of an Alkaline Water Electrolyzer Working under Emulated Wind Condition' Luis M. Gandi'a, Raquel Oroz, Alfredo Ursu'a, Pablo Sanchis, and Pedro M. Die'guez (2006)
- [46] Batterie lithium 10 V Ah BL1510 BLACK ET DECKER
- [47]<https://www.facebook.com/l.php?u=https%3A%2F%2Fwww.pnst.cerist.dz%2Fdetail.php%3Fid%3D80221%252F&h=GAQGbzF8F>

# Résumé

---

## Résumé

L'Algérie est l'un des états qui possède des moyennes climatiques importantes parmi lesquelles l'exploitation de l'énergie renouvelable.

Ce qui nous motive pour faire ce travail qui étudié Comment exploiter l'énergie solaire photovoltaïque par l'étude d'un système à couplage direct (générateur photovoltaïque – électrolytique), afin de déterminer les performances de système, par la modélisation des éléments de système et la simulation de fonctionnement par l'exécution d'un organigramme sous MATLAB.

Mots clé : couplage direct, photovoltaïque, électrolytique

## ملخص

الجزائر هي واحدة من الدول التي لديها إمكانيات مناخية مهمة بما في ذلك استغلال الطاقة المتجددة العمل الذي سنقوم به هو دراسة كيفية تسخير الطاقة الشمسية ، من خلال نظام الربط المباشر(الألواح الكهروضوئية - الحمولة الكهروكيميائية) وهذا لتحديد كفاءة النظام من خلال النمذجة الكلية لعناصر النظام ومحاكاة عمله عبر تنفيذ مخطط عمله في ماتلاب.

الكلمات المفتاحية: الاقتران المباشر، الفوطوولطاني، المحلل الكهربائي.

---