

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : **Energies Renouvelables**

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme**

**MASTER**

***Thème***

**Modélisation et caractérisation expérimentale d'un  
panneau photovoltaïque alimente un électrolyseur**

Présenté par :  
**Kadri Salim**  
Soutenu le : 29 Mai 2016

Devant le jury composé de :

<b>Dr. SAADI Ramzi</b>	<b>MAB</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. SAADI Aicha</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Dr. BENYAHIA NAIMA</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2015 / 2016**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : **Energies Renouvelables**

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Modélisation et caractérisation expérimentale d'un panneau  
photovoltaïque alimente un électrolyseur**

Présenté par :

*KADRI Salim*

Avis favorable de l'encadreur :

*SAADI Aicha*

*Signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

*SAADI Ramzi*

*Signature*

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : **Energies Renouvelables**

## *Thème :*

**Modélisation et caractérisation expérimentale d'un panneau photovoltaïque alimente un électrolyseur**

**Dirigé et Proposé par : Dr. SAADI Aicha**

## المخلص

تأتي هذه الدراسة في إطار إنتاج واستخدام ناقل الطاقة الهيدروجينية التي تعطي إمكانات واعدة في مشهد الطاقات المتجددة مثل الجزائر. وبدقة أكثر، تتعامل هذه الدراسة مع المحلل الكهربائي ذو تقنية الخلية الوقودية (بروتون غشاء التبادل) من بين الممولات المتجددة للمحلل الكهربائي لغرض إنتاج الهيدروجين، تم العثور على مصدر للطاقة الشمسية (اللوحة الضوئية) وفي مجال الطاقة الشمسية الضوئية، وضرورة النمذجة الجيدة للعمل الكهربائي للوحة الضوئية. والهدف من هذا العمل هو لضبط المعلمات نموذج شامل وحدة الضوئية وفقا للبيانات التقنية للشركة المصنعة وإجراء قياسات على لوحة حقيقية ومقارنة النتائج. كلمات مفتاحية : الهيدروجين، المحلل الكهربائي، اللوحة الضوئية، النمذجة، نماذج.

## Résumé

Cette étude s'inscrit dans le contexte de la production et de l'utilisation du vecteur énergétique hydrogène dont le potentiel est très prometteur dans un paysage énergétique renouvelé comme l'Algérie. Plus exactement, cette étude traite des électrolyseurs de technologie PEM (membranes échanges de protons). Parmi les alimentations renouvelables d'un électrolyseur pour produire de l'hydrogène, on trouve la source solaire (panneau photovoltaïque), et dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque, la modélisation fine du fonctionnement électrique des modules photovoltaïques (PV) est indispensable.

L'objectif de ce travail est d'ajuster les paramètres d'un modèle complet de panneau photovoltaïque en accord avec les données techniques du fabricant et effectuer des mesures sur le panneau réel, puis comparer les résultats obtenus

**Mots-clés:** hydrogène, électrolyseur, panneau photovoltaïque, modélisation, Modèles



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers 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*

*Tous mes amis*

*Salim*

# *Remerciements*

*Remerciements à Dieu – le tout puissant – qui nous a aidé à  
réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier mon promoteur Dr : SAADI.AICHA d'avoir  
accepter de m'encadrer et de me suivre durant toute cette  
période.*

*Mes remerciements vont aussi au président du jury  
Dr : SAADI. RAMZI, et aux membres du jury examinateurs  
Mr : CHENOUFI HALIM qui m'ont fait l'honneur de  
participer au jury de ce travail.*

*Je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire d'énergies  
renouvelables de Biskra, étudiants et chef de laboratoire.*

*Et enfin je remercie l'ensemble, enseignants et collègues de ma  
promotion, qui m'ont aidé à réaliser ce modeste travail.*

## ***LISTES DES FIGURES***

Titre	Page
<b>Figure I.1 : Cellule d'électrolyse de l'eau</b>	10
<b>Figure II.1 : cellule monocristalline.</b>	19
<b>Figure II.2 : cellule poly cristalline.</b>	19
<b>Figure II.3 : cellule amorphe.</b>	19
<b>Figure II.4 : Module photovoltaïque.</b>	20
<b>Figure II.5 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.</b>	23
<b>Figure II.6 : Système hybride.</b>	24
<b>Figure II.7 : Système PV accordée au réseau.</b>	25
<b>Figure II.8 : Système synoptique de production de l'hydrogène solaire.</b>	26
<b>Figure III.1 : schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.</b>	30
<b>Figure III.2 : schéma équivalent d'une cellule solaire.</b>	32
<b>Figure III.3 : schéma équivalent à une diode avec résistance shunt.</b>	32
<b>Figure III.4 : schéma équivalent à une diode sans résistance shunt.</b>	33
<b>Figure III.5 : schéma équivalent à deux diodes avec résistance shunt.</b>	34
<b>Figure III.6 : schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt.</b>	35
<b>Figure III.7 : différentes zones de Caractéristique (I-V) d'un générateur photovoltaïque.</b>	36
<b>Figure III.8 : Groupement des modules PV en série.</b>	37
<b>Figure III.9 : Groupement des modules en parallèle.</b>	37
<b>Figure IV.1 : schéma bloc d'un générateur solaire photovoltaïque sous SIMULINK.</b>	40
<b>Figure IV.2 : Caractéristique <math>I=F(v)</math> d'un GPV.</b>	41

---

<b>Figure IV.3 : Caractéristique <math>P=f(v)</math> d'un GPV.</b>	42
<b>Figure IV.4 : Photo du générateur photovoltaïque.</b>	43
<b>Figure IV.5 : Pyranomètre</b>	43
<b>Figure IV.6 : Anémomètre</b>	44
<b>Figure IV.7 : Thermomètre infrarouge</b>	44
<b>Figure IV.8 : Le multimètre utilisé.</b>	45
<b>Figure IV.9 : Montage électrique de l'expérience d'étude des caractéristiques (I-V) de panneau solaire.</b>	45
<b>Figure IV.10 : Expérience d'étude des caractéristiques (I-V) des panneaux solaires.</b>	46
<b>Figure IV.11 : Courbes d'éclairement 'typique par mois pour différentes la ongle</b>	47
<b>Figure IV.12 : Un plan incliné capte plus de rayonnement qu'un plan horizontal.</b>	47
<b>Figure IV.13 : la caractéristique (I-V) avec différents éclairements, à T autour constant</b>	48
<b>Figure IV.14 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) à T presque 25°C</b>	48
<b>Figure IV.15 : Influence de la température sur la caractéristique I(V) à éclairement presque constant.</b>	49
<b>Figure IV.16 : Influence de la température sur la caractéristique P(V) à éclairement presque constant.</b>	49
<b>Figure IV.17 : Influence de (RS) sur la caractéristique I(V) de module photovoltaïque.</b>	50
<b>Figure IV.18 : Influence de (RS) sur la caractéristique P(V) de module photovoltaïque</b>	50
<b>Figure IV.19 : Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique I (V).</b>	51
<b>Figure IV.20 : Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique P (V).</b>	51

---

## *Notation*

<i>Symbole</i>	<i>Définition</i>
$A$	Le facteur d'idéalité de la jonction.
$I_{ph}$	Le photon courant (A).
$I_0$	Courant de saturation (A).
$R_{sh}$	Résistances shunt (ohm)
$R_S$	Résistance série (ohm)
$PPM$	Le point de puissance maximale.
$I_D$	Courant qui circulé dans la diode (A).
$GPV$	Générateur photovoltaïque.
$V_T$	Potentielle thermodynamique (V).
$k$	La constante de Boltzmann (1.38.10-23 Joules/Kelvin).
$T$	La température de la cellule en Kelvin.
$q$	La charge d'un électron (1,6.10-19 C).
$P_m$	La puissance maximale produite PV (W).
$I_{cc}$	Le courant de court circuit (A).
$V_{co}$	La tension de circuit ouvert (V).
<b>EVA</b>	Ethylène-vynil-acétate

# Sommaire

# Sommaire

Titre	Page
Introduction générale.....	2
<i>Chapitre I : Production d'hydrogène par un électrolyseur</i>	
Introduction.....	5
I.1 Les sources d'énergies et impacts environnementaux.....	5
I.1.1 Le Charbon.....	5
I.1.2 Le Pétrole.....	6
I.1.3 Le Gaz naturel.....	6
I.1.4 Les sources d'énergie nucléaires.....	6
I.2 Les énergies renouvelables.....	6
I.2.1 Energie solaire photovoltaïque.....	6
I.2.2 Energie Solaire Thermique.....	7
I.2.3 Energie éolienne.....	7
I.2.4 La Biomasse .....	7
I.3 L'hydrogène comme vecteur énergétique intermédiaire .....	8
I.4 Caractéristiques de l'hydrogène. ....	8
I.5 Les majors méthode de production d'hydrogène.....	8
I.5.1 Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures.....	8
I.5.2 Production d'hydrogène à partir du charbon.....	9
I.5.3 Production d'hydrogène à partir électrolyse de l'eau.....	9
I.5.4 Production nucléaire d'hydrogène.....	11
I.5.5 Production à partir des énergies renouvelables.....	11
I.5.5.1 Production d'hydrogène en utilisant la biomasse.....	12
I.6 Stockage de l'hydrogène.....	12
I.6.1 Le stockage sous forme gazeux .....	12
I.6.2 Le stockage sous forme liquide.....	12
I.6.3 Le stockage sous forme d'hydrures métalliques.....	13

I.6.4 Le stockage sous basse pression.....	13
I.7 Transport de l'hydrogène.....	13
I.7.1 Transport par route.....	13
I.7.2 Transport par mer.....	14
I.7.3 Le transport de l'hydrogène par gazoducs.....	14
I.8 Les avantages et les inconvénients.....	14
Conclusion.....	15

## *Chapitre II : Le panneau photovoltaïque*

Introduction.....	17
II.1 Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque.....	17
II.2 L'effet photovoltaïque.....	18
II.3 Association de cellules.....	18
II.4 Les différentes technologies .....	18
II.4.1 Les cellules mono- cristallines.....	18
II.4.2 Les cellules poly-cristallines .....	19
II.4.3 Les cellules amorphes .....	19
II.5 Le module photovoltaïque.....	20
II.6 Principe de fonctionnement.....	20
II.6.1 L'absorption de la lumière.....	21
II.6.2 Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement.....	21
II.6.3 La collecte des charges .....	21
II.7 Les critères influant sur le rendement de module photovoltaïque.....	22
II.7.1 Critères atmosphériques.....	22
II.7.1.1 L'éclairement .....	20
II.7.1.2 La température de fonctionnement.....	22
II.7.2 Critères non atmosphérique.....	22
II.7.2.1 Le matériau de fabrication.....	22
II.7.2.2 L'inclinaison et l'orientation du module.....	23

II.7.2.3 L'utilisation des régulateurs de charge.....	23
II.8 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque.....	23
II.9 Les différents types du système PV.....	24
II.9.1 Systèmes autonomes .....	24
II.9.2 Systèmes hybrides.....	24
II.9.3 Système PV accordée au réseau.....	25
II.9.4 Système de production d'hydrogène solaire.....	25
II.10 Secteurs d'application.....	26
II.11 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	27
II.11.1 Inconvénients .....	27
II.11.2 Avantages .....	27
Conclusion.....	28

### *Chapitre III : Modélisation et identification des paramètres de panneau photovoltaïque*

Introduction.....	30
III.1 Modèle d'une cellule solaire idéal.....	30
III.2 Modèle d'une cellule solaire réelle.....	31
III.3 Différents modèles électriques de panneau photovoltaïque.....	32
III.3.1 Modèle à une diode (à une seule exponentielle).....	32
III.3.1.1 Modèle à une diode avec résistance shunt.....	32
III.3.1.2 Modèle à une diode sans résistance shunt .....	33
III.3.2 Modèle à deux diodes (à deux exponentielles).....	34
III.3.2.1 Modèle à deux diodes avec résistance shunt.....	34
III.3.2.2 Modèle à deux diodes sans résistance shunt.....	35
III.4 Les zones de caractéristique (I-V) d'un générateur photovoltaïque.....	35
III.5 Constitution d'un module photovoltaïque .....	36
III.6 Le groupement des modules photovoltaïques.....	37
III.6.1 Groupement en série.....	37
III.6.2 Groupement en parallèle.....	37
III.7 Caractéristique d'un GPV élémentaire .....	38

---

Conclusion .....	38
------------------	----

## **Chapitre IV : Simulation et discussion de résultats**

Introduction.....	40
IV.1 Simulation d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	40
IV.2 Caractéristique Courant-Tension.....	41
IV.3 Caractéristique Puissance-Tension.....	42
IV.4 Caractéristique de module photovoltaïque GPV pratique.....	43
IV.5 Les appareils de mesures.....	43
IV.5.1 Pyranomètre.....	43
IV.5.2 Anémomètre.....	44
IV.5.3 Thermomètre infrarouge sans contact.....	44
IV.5.3 Multimètre.....	44
IV.6 Les caractéristiques (I-V) des panneaux solaires.....	45
IV.6.1 Méthode expérimentale .....	45
IV.7 Influence de la variation d'éclairement et l'angle sur la caractéristique du GPV.....	46
IV.8 Influence de la variation de (E) sur les caractéristiques du GPV.....	48
IV.9 Influence de la variation de (T) sur les caractéristiques du GPV.....	49
IV.10 Les résultats.....	49
IV.11 Influence de la résistance série.....	50
IV.12 Influence du facteur d'idéalité.....	51
Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	54
Bibliographie	

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

La production d'énergie est d'une 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 d'énergie 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 est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces énergies, l'énergie photovoltaïque (PV) et la pile à combustible (PàC). On peut produire directement de l'électricité dans les piles à combustible avec seul résidu (l'eau).

L'hydrogène est en effet un gaz non toxique et très énergétique capable de produire de la chaleur et de faire fonctionner des moteurs par combustion directe (moteurs à combustion interne) avec de l'eau pure comme résidu. Mais l'hydrogène ne se trouve dans la nature qu'à l'état combiné, surtout dans l'eau et les hydrocarbures, il est donc nécessaire de le produire et en cela, comme l'électricité, il n'est pas à proprement parler une énergie mais aussi un vecteur énergétique.

Un point très important est de noter que la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir de l'électricité fournie par les énergies renouvelables (éoliennes, capteurs photovoltaïques) permettrait sans polluer, à la fois de stocker, de transporter et de réutiliser ces énergies, c'est-à-dire de compenser leurs deux principaux inconvénients d'être intermittentes et non stockables.

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire, on se propose dans ce travail la production d'hydrogène par voie solaire. Cette énergie solaire servira spécifiquement par utilisation d'un électrolyseur d'eau au sud algérien.

Le but de cette étude est de modéliser et caractériser un panneau PV qui alimente un électrolyseur. Ce travail a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles sur la production d'hydrogène par un électrolyseur, le second chapitre, nous avons présenté les enjeux et les

développements actuels des cellules photovoltaïques, le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque et l'influence des différents paramètres extérieurs.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des cellules photovoltaïques qui passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents et deux modèles sont établis ; modèle idéal et modèle réel simple.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus.

# *Chapitre I*

## *Production d'hydrogène par un électrolyseur*

## Introduction

L'hydrogène pouvant être produit à partir des énergies fossiles pétrole, gaz ou charbon à partir d'eau grâce aux énergies renouvelables hydraulique, solaire ou éolien ou grâce au nucléaire, ou encore à partir de la biomasse, le gaz dihydrogène (de symbole  $H_2$ , appelé communément hydrogène) est un vecteur d'énergie universel. Ces différents moyens de synthèse ont comme principaux avantages de pouvoir produire l'hydrogène dans n'importe quel endroit du globe en fonction des sources d'énergies localement disponibles, ce qui permettrait à de nombreux états d'aboutir à une certaine indépendance énergétique.

Car l'hydrogène en tant que vecteur énergétique ne pourra résoudre seul les problèmes annoncés de pénurie en énergies fossiles.

Elles peuvent être utilisées dans des domaines d'applications comme les transports, la production d'électricité et de chaleur pour des habitations ou le secours électrique.

### I.1 Les sources d'énergies et impacts environnementaux

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.

On distingue généralement les types suivant d'énergie non renouvelable :

#### I.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. [1]

### **I.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. [2]

### **I.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 ( $\text{CH}_4$ ), 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.

### **I.1.4 Les sources d'énergie nucléaires**

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

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.

Mais Les déchets produits par l'industrie de l'uranium et les centrales nucléaires forment la majeure partie des déchets radioactifs terrestres.

Ces déchets sont radioactifs et par conséquent dangereux pour les êtres vivants qui peuvent se trouver en contact ou à proximité d'eux. [3]

## **I.2 Les énergies renouvelables**

### **I.2.1 Energie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la

conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron. Outre les avantages liés au faible coût de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette énergie répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux.

### **I.2.2 Energie Solaire Thermique**

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turboalternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques [4].

### **I.2.3 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 [4].

### **I.2.4 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. 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 [5].

### **I.3 L'hydrogène comme vecteur énergétique intermédiaire**

Dans le domaine d'énergie renouvelable surtout l'énergie produit par la photovoltaïque il y a un problème de continuité de production d'électricité dans la nuit ou les jours nuageux. Pour cela on utilise des techniques pour assurer la continuité de production d'électricité comme les batteries et l'hydrogène... L'Hydrogène est considéré comme le porteur potentiel d'énergie du futur. On entend par hydrogène solaire, l'hydrogène produit en utilisant les énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire.

### **I.4 Caractéristiques de l'hydrogène**

Hydrogène (du grec « qui produit de l'eau »), élément de symbole (H), incolore, inodore et insipide, de numéro atomique 1. On confondait l'hydrogène avec d'autres gaz, jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontre en 1766 que l'hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Le chimiste montra plus tard que l'hydrogène était une substance indépendante, qui se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau.

En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma hydrogène [6].

### **I.5 Les majors méthode de production d'hydrogène**

L'hydrogène a un avenir certain dans le domaine de l'énergie. Nous étudierons donc les possibilités envisageables pour sa production à grande échelle. Dans le cas d'une production à grande échelle, il faut tenir compte des rendements et des possibilités économiques.

#### **I.5.1 Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures**

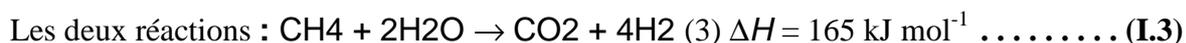
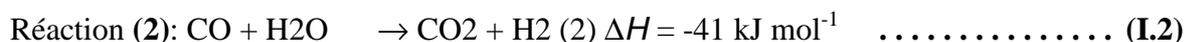
Il existe plusieurs méthodes qui permettent de convertir des hydrocarbures en hydrogène. Néanmoins, elles entraînent la formation de dioxyde de carbone, qui est au centre des polémiques actuelles sur les problèmes liés à l'effet de serre. Elles présentent donc des avantages économiques et pratiques mais ne sont pas très écologiques.

- **Le vaporeformage de gaz naturel**

Le gaz naturel contient essentiellement du méthane. Toutefois, il doit généralement être désulfuré avant d'être dirigé vers l'unité de vaporeformage. Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse (**I.1**) et la conversion du (CO) (**I.2**). On notera que ces réactions sont thermodynamiquement équilibrées, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire

à la réaction chimique pour s'effectuer, une partie de la charge ne réagit pas et reste mélangée aux produits.

Dans le cas du vaporeformage, ceci se traduit par une fraction significative de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) en sortie d'unité. [7]



- **Oxydation partielle (POX)**

L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. à haute température (classiquement de 900 à 1500 °C) et à pression élevée (classiquement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène (I.4) en tant qu'oxydant et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur.

Le (CO) produite est encore convertie à ( $\text{H}_2$ ) comme décrit dans l'équation :



Le procédé d'oxydation partielle de gaz naturel n'est généralement pas utilisé pour la production d'hydrogène : On lui préfère le plus souvent la technologie de vaporeformage décrite plus haut. En revanche, on peut se tourner vers l'oxydation partielle de gaz naturel pour des applications en chimie, quand on recherche un ratio ( $\text{H}_2/\text{CO}$ ) légèrement inférieur à 2.



### I.5.2 Production d'hydrogène à partir du charbon

Dans le monde, l'hydrogène est produit à 18 % à partir du charbon, contre 4 % en Europe. Le principal inconvénient de son utilisation est qu'il produit du  $\text{CO}_2$ . Cependant le charbon étant mieux réparti à la surface du globe que le gaz naturel ou le pétrole, il représente une solution pour l'indépendance énergétique des pays.

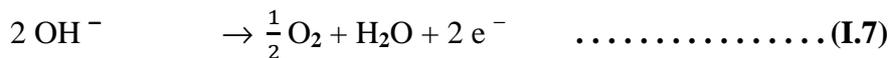
### I.5.3 Production d'hydrogène à partir électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) en hydrogène  $\text{H}_2$  et oxygène  $\text{O}_2$  lors d'une réaction d'oxydo-réduction. Le procédé industriellement disponible à l'heure actuelle

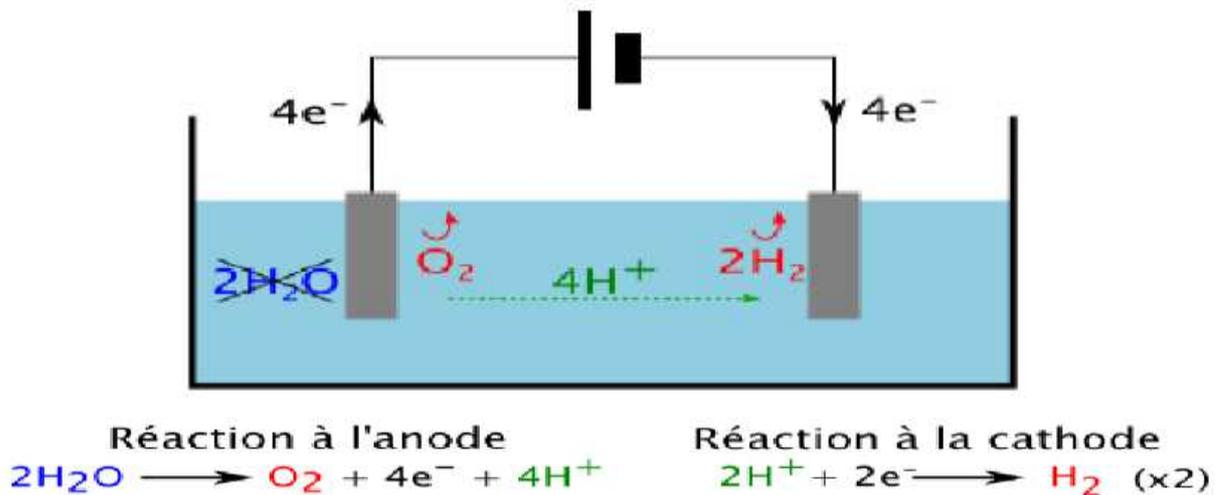
consiste à réaliser cette électrolyse à l'aide d'électricité. Au regard du coût de la production par électrolyse, seul 4% de l'hydrogène est actuellement produit par électrolyse dans les cas où l'électricité est bon marché ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire.

- **Principe de l'électrolyse de l'eau**

L'électrolyse de l'eau consiste en deux réactions chimiques ayant lieu séparément sur deux électrodes. à la cathode se produit la réduction de l'eau suivant l'équation (I.6) et à l'anode l'oxydation des ions hydroxydes selon l'équation (I.7).



Les électrons ( $\text{e}^-$ ) intervenant dans les réactions sont apportés par le circuit électrique. Le schéma classique d'une cellule d'électrolyse est donné par la Figure (I.1) Ci-dessous



**Figure (I.1):** Cellule d'électrolyse de l'eau.

- **Technologies des électrolyseurs d'eau**

Il existe actuellement trois types d'électrolyseur d'eau classés selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement :

- **Les électrolyseurs Alcalins**

Commercialisés et représentant la quasi-totalité des ventes d'électrolyseurs. L'électrolyse est réalisée à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) dont la concentration varie en fonction de la température de fonctionnement.

➤ **Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser) à oxyde solide**

Un électrolyte en céramique, conducteur à haute température sont encore au stade de la recherche. Cette technologie est directement issue des développements de piles à combustible de type SOFC, fonctionnant entre 600 et 1100°C et cet électrolyse à haute température (EHT) est un des procédés de production d'hydrogène à grande échelle les plus prometteurs pour le futur [8].

➤ **Les électrolyseurs (PEM) à membrane échangeuse de protons**

Sont encore cours de développement mais proches de la commercialisation. Cette technologie se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons PEM à basse température.

#### **I.5.4 Production nucléaire d'hydrogène**

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO<sub>2</sub> est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

- L'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire
- Des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale nucléaire.

Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur : de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis.

#### **I.5.5 Production à partir des énergies renouvelables**

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie est portée par le souci de limiter le recours aux hydrocarbures en raison de la limitation des stocks disponibles mais aussi en raison de l'émission de gaz à effet de serre résultant de leur utilisation. Dans cette optique de protection de l'environnement, les technologies de production d'hydrogène utilisant les énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermique et hydraulique) sont en cours de développement.

Une utilisation classique consiste bien évidemment à produire de l'électricité à partir d'énergie renouvelable et d'utiliser cette électricité pour réaliser l'électrolyse de l'eau selon les techniques décrites précédemment [9].

### I.5.5.1 Production d'hydrogène en utilisant la biomasse

Pour produire du dihydrogène à partir de la biomasse, il faut faire une transformation thermochimique. Les produits de la biomasse sont composés principalement de  $C_6H_9O_5$ . La première étape consiste donc à sécher la matière qui devient alors ( $C_6H_7O_4$ ). Ensuite, on chauffe à  $600^\circ\text{C}$ , pour provoquer la dégradation thermique : c'est la thermolyse. Après cette étape, les produits sont à 70% gazeux, sous forme de  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  et quelques indésirables tels les goudrons. Les 30% solides restants sont essentiellement composés de carbone. On continue donc à élever la température jusqu'à  $1000^\circ\text{C}$  pour gazéifier le carbone.

On introduit ensuite de la vapeur d'eau qui, réagissant avec le carbone, produit du dihydrogène et du monoxyde de carbone. On convertit ensuite le ( $CO$ ) par une réaction avec de l'eau.



**Bilan :**



Après cette opération, on élève la température jusqu'à  $1100^\circ\text{C}$  afin d'éliminer les acides et les goudrons. Enfin, on raffine le gaz de biomasse pour récupérer le dihydrogène.

Le rendement de la transformation thermochimique est de 3KWh produits /1Kwh consommé.

## I.6 Stockage de l'hydrogène

### I.6.1 Le stockage sous forme gazeux

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes dont toutefois nombreuses. Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Des progrès ont été faits : de 200 bars, pression des bouteilles distribuées dans l'industrie, la pression est passée à 350 bars aujourd'hui et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de 700 bars. De plus, l'hydrogène est l'élément le plus petit de l'univers, il faut donc trouver des matériaux pouvant contenir l'hydrogène sans risque de fuite [10].

### I.6.2 Le stockage sous forme liquide

Pour cette technique, beaucoup d'énergie est utilisés pour le refroidissement aux températures qu'exige l'opération :  $-253^\circ\text{C}$ . Stocker l'hydrogène sous cette forme est possible mais nécessite un développement plus poussé. En effet, cette méthode est déjà utilisée dans le

domaine spatial. Mais l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier juste après l'hélium. Il est donc possible d'utiliser de l'hydrogène sous forme liquide pour le stocker mais cela revient très cher, ce qui rend son application impossible aux particuliers pour le moment.

### **I.6.3 Le stockage sous forme d'hydrures métalliques**

Dans cette méthode, l'hydrogène est « capturer » dans les interstices d'une poudre d'alliage métallique comprimée, un peu comme une éponge absorbe de l'eau. Cette technique est très avantageuse notamment une construction simple et un niveau élevé de sécurité. L'automobile reste pour l'instant hors de portée des hydrures existant actuellement, à cause du poids.

### **I.6.4 Le stockage sous basse pression**

Cette technique serait une alternative au stockage sous pression gazeuse. Elle consisterait à stocker l'hydrogène dans des matériaux capables d'absorber l'hydrogène et de le restituer lorsque cela est nécessaire. Il pourrait s'agir de matériaux carbonés ou encore certains alliages métalliques. Nous utilisons le conditionnel car ce mode de stockage n'est encore qu'un objet d'étude, il n'est pas encore au point.

## **I.7 Transport de l'hydrogène**

### **I.7.1 Transport par route**

Le transport de l'hydrogène liquide par camion est le plus courant pour l'alimentation des stations-services à hydrogène comme cela est le cas pour les stations de démonstration mises en œuvre dans de nombreux pays. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs cryogéniques cylindriques à l'image des camions citernes transportant des liquides. Ces véhicules peuvent transporter jusqu'à 3.5 t d'hydrogène liquide pour un poids total de 40 t. Quand il est utilisé en grande quantité comme substance chimique de base (industrie pétrolière, synthèse de l'ammoniac) l'hydrogène est en général acheminé par gazoduc, le transport sous forme liquide par camion étant plutôt réservé à des applications nécessitant des quantités moindres, comme l'industrie électronique [11].

### **I.7.2 Transport par mer**

Le fait que l'hydrogène liquide soit dense et que les réservoirs cryogéniques le contenant puissent avoir de très importantes capacités suggère assez naturellement le transport par mer depuis les lieux pouvant avoir une grande capacité de production à ceux de forte consommation.

L'hydrogène liquide aurait été contenu dans de grands réservoirs cryogéniques sphériques à double paroi de 3000 m<sup>3</sup>.

### **I.7.3 Le transport de l'hydrogène par gazoducs**

Le transport de l'hydrogène par gazoducs (plusieurs dizaines de bar), existe depuis des décennies sans aucun accident majeur reporté.

Ces réseaux servent à alimenter des sites industriels. La longueur cumulée dans le monde de gazoducs hydrogène est estimée entre 2.000 et 3.000 km à comparer à plus de 1.000.000km pour le transport du gaz naturel.

En s'orientant vers une économie de l'hydrogène, des modèles sur le transport de l'hydrogène comparent la livraison par gazoduc et par camion de capacités d'hydrogène. A partir d'un seuil de pénétration du marché, le transport de l'hydrogène par canalisation s'avère plus économique. Diverses études ont donc été engagées pour développer ce moyen de transport. Parmi celles-ci, citons quelques exemples non-exhaustifs :

Injecter de l'hydrogène dans les canalisations de gaz naturel existantes. Cette méthode permettrait d'assurer une transition « douce » vers un avenir où l'hydrogène aurait une part significative dans le bouquet énergétique [11].

## **I.8 Les avantages et les inconvénients**

En effet, les avantages de l'hydrogène sont nombreux:

- Un atome très abondant sur Terre (sous forme d'eau).
- La molécule la plus énergétique, soit 2,2 fois le gaz naturel.
- Il n'est ni polluant, ni toxique.
- Sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau.
- C'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air).
- Son transport est aisé (en particulier par pipes)
- Ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à combustible (le moyen le plus efficace pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique).

Il convient aussi de mentionner ses inconvénients:

- Sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel.
- L'énergie minimale à fournir pour l'enflammer est 10 fois inférieure à celles d'hydrocarbures classiques.

## **Conclusion**

Dans le cadre de notre étude, nous avons constaté que le dihydrogène présente des atouts majeurs qui lui assurent un bel avenir en tant que vecteur énergétique intermédiaire. En effet, ses applications recouvrent un large éventail des besoins énergétiques humains : il est utilisable dans le domaine des transports, des applications stationnaires et portables, sans compter son rendement énergétique élevé.

De plus, c'est une énergie propre si sa production s'opère à partir d'une énergie non polluante comme le rayonnement solaire. Cet avantage est capital suite aux récentes polémiques à propos de l'effet de serre.

## *Chapitre II*

# Le panneau photovoltaïque

## Introduction

Dans le cas de photovoltaïque, l'énergie primaire est le rayonnement solaire. Elle se trouve dans le milieu ambiant, elle se fait d'exposer les modules ou les panneaux devant la lumière pour obtenir une puissance électrique, cette énergie est gratuite et disponible pendant toutes la journée.

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés : électrification rurale (pour les besoins domestiques et les besoins communautaires : centres de santé, écoles, etc.), pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications, etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments.

### II.1 Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque

La cellule solaire est l'élément de base des panneaux solaires qui produisent de l'électricité. Une cellule solaire (ou bien une cellule photovoltaïque) est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère de l'électricité, cet effet est appelé l'effet photovoltaïque, qui a été découverte par le français Edmond Becquerel en 1839. [12]

Ce n'est qu'en 1954 que les laboratoires BELL mettent au point une cellule au silicium capable de convertir directement en électricité l'énergie solaire avec un rendement de 6%. En 1958, les cellules photovoltaïques trouvent une place dans l'industrie avec l'industrie spatiale américaine qui utilisera des cellules ayant un rendement de 9% pour alimenter ses satellites.

Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. Mais la technologie photovoltaïque ne connaît son véritable essor qu'à la fin des années 90 avec l'avènement de la connexion au réseau, technologie qui permet d'injecter sur le réseau public d'électricité, l'énergie produite par un générateur photovoltaïque et convertie par un onduleur en courant alternatif.

La recherche est très active dans le domaine du solaire photovoltaïque. Les prix diminuent constamment et les rendements progressent.

En 20 ans, les rendements sont passés de 15% à 36% dans les laboratoires. Ce dernier chiffre serait celui atteint sur Terre par les cellules solaires utilisées par les robots martiens.

Les cellules solaires, ou générateur solaire, sont désormais à la base de la partie alimentation embarquée sur les satellites qui gravitent autour de la terre.

## **II.2 L'effet photovoltaïque**

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière « Attaquent » les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arracher.

Dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons « arrachés » créent une tension électrique continue et faible.

## **II.3 Association de cellules**

Lorsque l'on associe en série des cellules leur tension s'ajoute, lorsque l'on associe en Parallèle des cellules leur courant s'ajoute. Il faut savoir que lorsque l'une des cellules est affectée d'une gêne (ombre...), tout le fonctionnement est perturbé. La tension générée par une cellule est limitée à la valeur du gap de son matériau.

On associe les cellules afin de pouvoir délivrer des tensions de (12V, 24 V, 48V).

## **II.4 Les différentes technologies**

Le rendement des cellules PV dépend principalement des matériaux constituant, la plupart des recherches se dirigent dans ce domaine, car c'est l'élément qui freine jusqu'à maintenant la production photovoltaïque et sa répartition à grande échelle.

Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. Il existe trois types principaux de cellules :

### **II.4.1 Les cellules mono- cristallines**

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.

- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

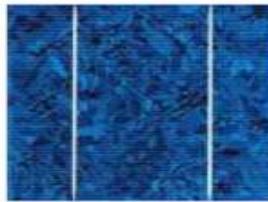


**Figure (II.1) :** cellule monocristalline

#### II.4.2 Les cellules poly-cristallines

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

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



**Figure (II.2):** cellule poly cristalline

#### II.4.3 Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)

Le silicium amorphe, est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.



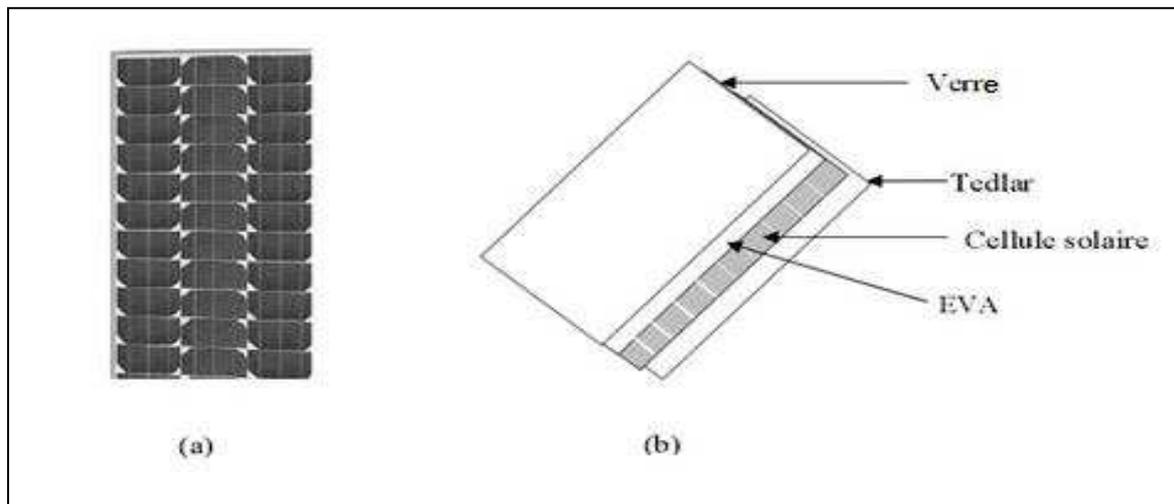
**Figure (II.3):** cellule amorphe

## II.5 Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module **Figure (II.4.a)**.

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) **Figure (II.4.b)** et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. [13]



**Figure (II.4):** Module photovoltaïque.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [14].

## II.6 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque est la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique, ce qui met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- l'absorption de la lumière dans le matériau.
- le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement.
- la collecte des charges.

### II.6.1 L'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir principalement trois évènements optiques qui sont :

- la réflexion, auquel cas la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- la transmission, où cette fois la lumière traverse l'objet.
- l'absorption, où ici la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme, à savoir généralement sous forme thermique.

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du **flux lumineux absorbé sera restitué sous forme d'énergie électrique**. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque ce que l'on cherche à convertir, c'est la lumière du soleil.

### II.6.2 Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement

L'énergie lumineuse peut être convertie en énergie électrique. Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont les électrons, particules élémentaires chargées négativement. Les photons vont absorber leur énergie aux électrons des couches électroniques périphériques, ce qui leur permet de se libérer de l'attraction de leur noyau, c'est **l'effet photoélectrique**.

Plus généralement, l'effet photoélectrique (émission d'électrons par un métal sous l'action de radiations lumineuses) recouvre plusieurs phénomènes d'interactions de la lumière et de la matière, où des photons **cèdent leur énergie** à des électrons. Les électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur pour les faire circuler dans un circuit.

### II.6.3 La collecte des charges

Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs (généralement silicium) qui transforment directement la lumière du rayonnement solaire en énergie électrique. Les particules de lumière (photons) viennent heurter les électrons sur le silicium et lui communiquent leur énergie.

Le silicium est dopé de manière à jouer le rôle de clapet anti-retour (diode) d'électricité et ainsi à diriger tous les électrons dans le **même sens**. Une tension apparaît donc en présence de lumière aux bornes de la cellule. Si l'on ferme le circuit à l'aide d'une lampe, d'un moteur, etc...,

**le courant peut circuler.** La tension est peu variable alors que le courant est quasi proportionnel à la lumière reçue.

L'intensité maximum du courant produit dépend de la surface de la cellule et de la valeur de l'éclairement.

## **II.7 Les critères influant sur le rendement de module photovoltaïque**

Pour que le module photovoltaïque garde toujours un rendement élevé, plusieurs paramètres entrent en jeu et perturbent sa fiabilité ou l'inverse, on peut classer ces critères en deux :

### **II.7.1 Critères atmosphériques**

Ces critères sont imposés généralement par les conditions climatiques et dépendent principalement de l'atmosphère et des lieux des installations, on peut citer plusieurs paramètres tels que l'éclairement, la température, la vitesse du vent, la présence de poussières ...etc.

#### **II.7.1.1 L'éclairement**

On constate que le rendement dépend de l'éclairement, ce facteur est variable le long de la journée et ne peut agir pour l'augmenter, la meilleure solution est de choisir un endroit de forte ensoleillement pour exposer les modules.

#### **II.7.1.2 La température de fonctionnement**

L'augmentation de la température influence directement sur le comportement de la photodiode, elle engendre la diminution de la tension de l'ordre de 2 mV par degré Celsius, cette augmentation se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, donc, sur le rendement de la cellule photovoltaïque.

### **II.7.2 Critères non atmosphériques**

Ce sont les critères qui ne dépendent pas de l'atmosphère et en fonction de ceux-ci on peut augmenter le rendement du module, Les principaux sont les suivants :

#### **II.7.2.1 Le matériau de fabrication**

Ce facteur est très important, et influence directement sur la conversion photovoltaïque, en général le silicium reste le matériau le plus fiable dans la fabrication du module et son rendement est le plus élevé.

### II.7.2.2 L'inclinaison et l'orientation du module

En général, les modules sont statiques. Comme le soleil est en mouvement permanent, il faut donc leur donner une orientation et une inclinaison qui optimise l'énergie fournie annuelle.

L'orientation plein Sud des modules permet de capter un maximum de lumière au cours de la journée et résulte en un pic de production autour de midi.

L'inclinaison joue un rôle très important pour attirer le maximum de flux solaire, les expériences ont montré qu'il suffit incliner le module d'un angle de 34 degrés pour obtenir un meilleur rendement.

### II.7.2.3 L'utilisation des régulateurs de charge

Afin d'améliorer les performances des modules photovoltaïque et d'assurer une meilleure durée de vie, il est primordial d'installer les régulateurs de charge, tel que de type série, shunt, MPPT.

## II.8 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des Pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles. [15]

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

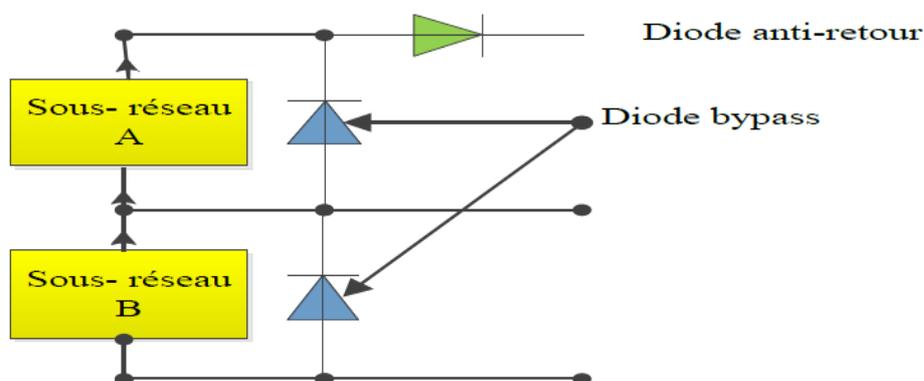


Figure (II.5): Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

## II.9 Les différents types de système PV

Les systèmes PV sont composés selon les exigences en quatre types : autonome, raccordée au réseau, hybride et production d'hydrogène (électrolyse d'eau).

### II.9.1 Systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque (PV) est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système PV autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Donc l'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, l'éclairage, etc...) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée.

Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques. [16]

Les performances des systèmes autonomes reviennent surtout sur l'état des batteries, c'est l'élément de base dans ces types des systèmes.

### II.9.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie.

Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés. [17]

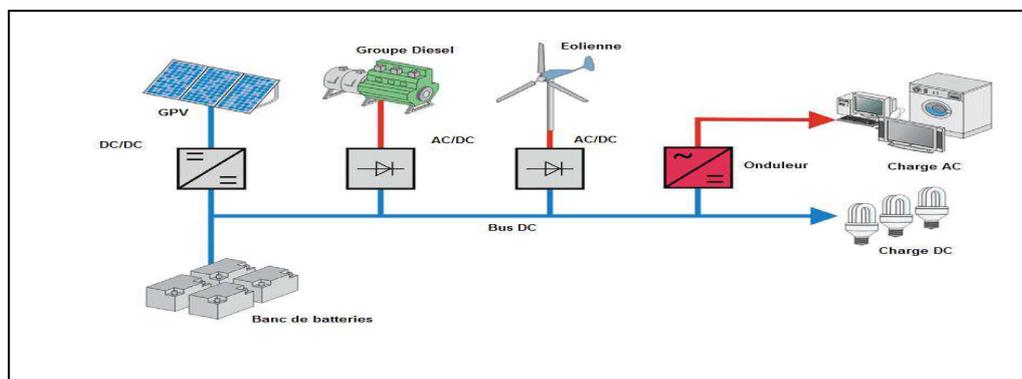


Figure (II.6): Système hybride

### II.9.3 Système PV accordée au réseau

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

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

Dans les systèmes raccordés au réseau, c'est l'onduleur qui remplace les batteries, dans ce cas c'est l'élément de base dans ces types des systèmes [18].

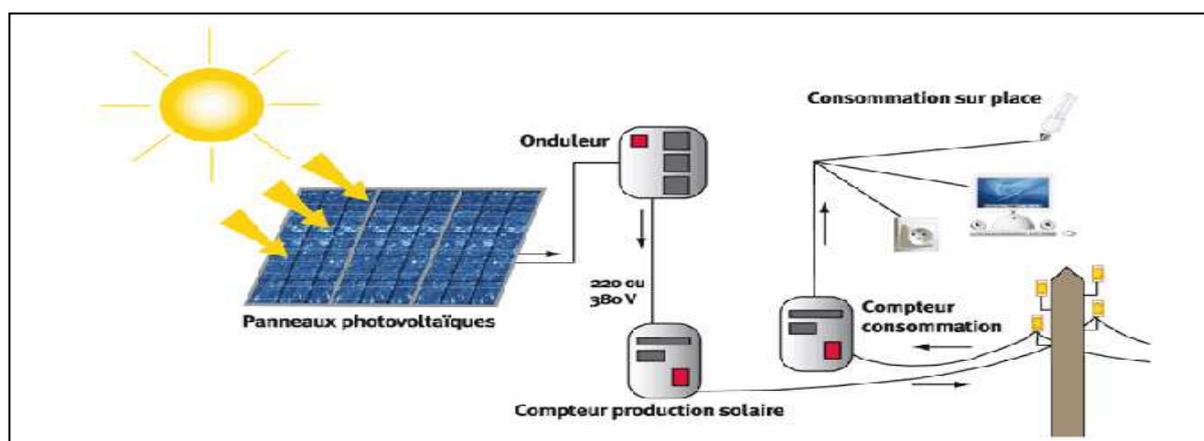


Figure (II.7): Système PV accordée au réseau

### II.9.4 Système de production d'hydrogène solaire

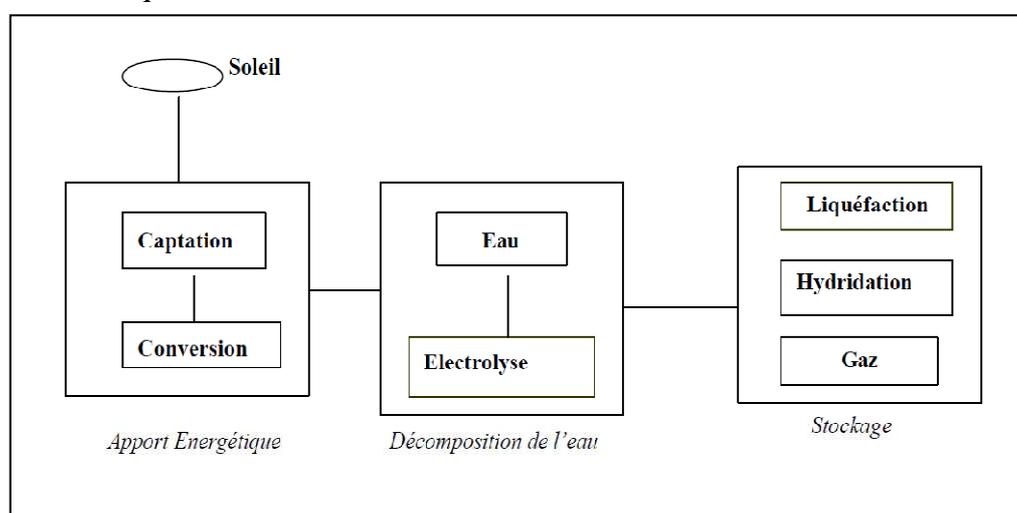
Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation.

Les cycles thermochimiques purs et hybrides par exemple sont à l'échelle de Recherche et développement, tandis que les procédés photochimiques et photo biologiques sont encore au premier stade de la recherche. L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement. La figure (II.8) montre le schéma synoptique d'un procédé de production d'hydrogène par électrolyse.

On voit, de cette figure, que l'on peut diviser le système en trois parties :

- Le système d'appoint énergétique pour la décomposition de l'eau. Ce système peut être un champ de panneaux photovoltaïques ou un système hybride. L'utilisation de stations géothermiques a aussi été prise en considération. [19]
- Le système de l'électrolyse de l'eau. Les techniques les plus importantes couramment utilisées pour la production de l'hydrogène sont les électrolytes alcalines, les membranes polymères et les oxydes de céramiques.



**Figure (II.8):** Système synoptique de production de l'hydrogène solaire

## II.10 Secteurs d'application

### ❖ Domaine spatial

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

### ❖ Télécommunications

Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...

### ❖ Sites isolés

Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages.

### ❖ Domaine du transport

Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire.

### ❖ Acquisition de données

L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

## II.11 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### II.11.1 Inconvénients [17]

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

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-20 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. [20]

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Alors on peut dire que le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

### II.11.2 Avantages [17]

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque, le principe de la conversion PV et les cellules monocristallines qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation des systèmes photovoltaïques et leurs secteurs d'application .encore on a dit que le système photovoltaïque possède plusieurs types de configuration selon l'utilisation et selon le mode de stockage.

Afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes photovoltaïques.

## *Chapitre III*

# *Modélisation d'un panneau photovoltaïque*

## Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée cellule PV). [21]

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui à une caractéristique statique courant tension (I-V) non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la tension de la cellule. Le point de fonctionnement du (GPV) peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ).

La détermination du point de fonctionnement du (GPV) dépend directement de la charge à laquelle il est connecté, il est plus ou moins éloigné du (PPM) caractérisé par le courant et la tension optimaux, notées ( $I_{op}$ ,  $V_{op}$ ).

Dans ce chapitre, nous allons tenter de définir les modèles s'appliquant aux cellules photovoltaïques, la détermination de ses paramètres se fera sur bases de données fournies par le constructeur de panneaux.

### III.1 Modèle d'une cellule solaire idéale

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction P-N).

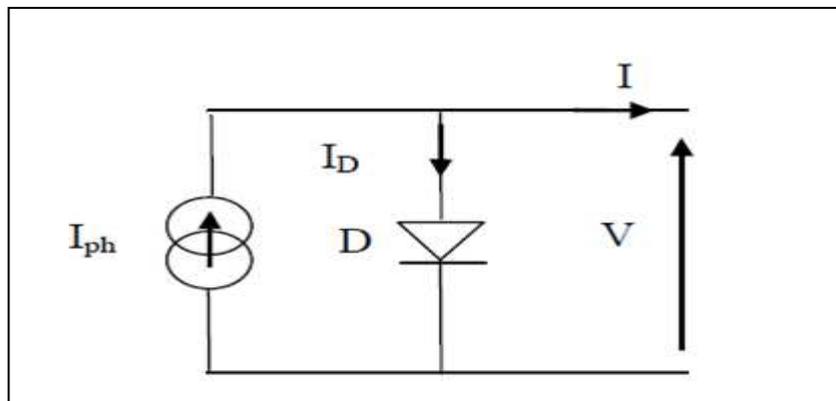


Figure (III.1): schéma idéal d'une cellule photovoltaïque.

L'équation courant tension (I-V) du circuit équivalent est donné comme suit:

$$I = I_{ph} - I_D \dots\dots\dots(III.1)$$

Avec :

**I**: courant fourni par la cellule

**I<sub>ph</sub>**: photon-courant de la cellule proportionnelle à l'éclairement (E).

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{a.V_T}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (III.2)$$

Avec :  $V_T = \frac{k.T}{q}$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{a.V_T}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (III.3)$$

Avec :

**I<sub>0</sub>**: Courant de saturation inverse de la diode.

**V<sub>T</sub>**: Potentielle thermodynamique.

**k** : La constante de Boltzmann (1.38.10<sup>-23</sup> Joules/Kelvin).

**T**: La température de la cellule en Kelvin.

**q**: La charge d'un électron (1,6.10<sup>-19</sup> C).

**a** : Le facteur d'idéalité de la jonction (1 < A < 3).

**V**: La tension aux bornes de la cellule.

### III.2 Modèle d'une cellule solaire réelle

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

Rauschenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvés que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant les significations liées aux phénomènes physiques de la cellule.

Roger (1984), Appelbaum (1987), Ekstein (1990), Duffie et Beckmann (1991) et Alghuwainem (1992) ont employés le modèle à quatre paramètres. [22]

### III.3 Différents modèles électriques de panneau photovoltaïque

#### III.3.1 Modèle à une diode (à une seule exponentielle)

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma Suivant :

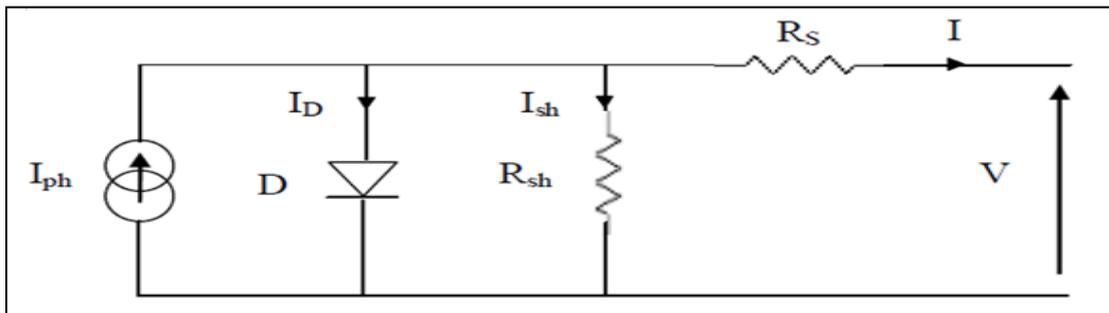


Figure (III.2): schéma équivalent d'une cellule solaire.

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes Physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I-V) de la photopile:  
 - la résistance série est la résistance interne de la cellule, elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [23]

##### III.3.1.1 Modèle à une diode avec résistance shunt

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la Façon dont celle-ci a été réalisée.

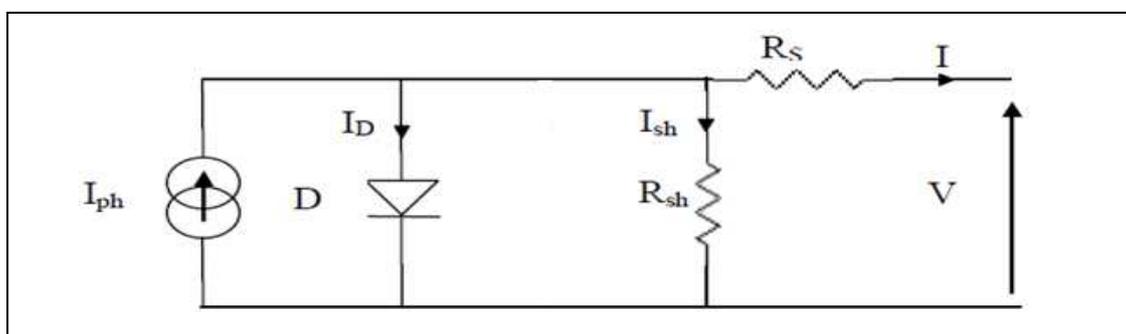


Figure (III.3): schéma équivalent à une diode avec résistance shunt.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[ \exp \left( \frac{q \times (V + R_s \times I)}{a.k.T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (III.4)$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \dots \dots \dots (III.5)$$

$$= I_{ph} - I_0 \times \left[ \exp \left( \frac{q \times (V + R_s \times I)}{a.k.T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \right) \dots \dots \dots (III.6)$$

### III.3.1.2 Modèle à une diode sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. La figure illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode. [23]

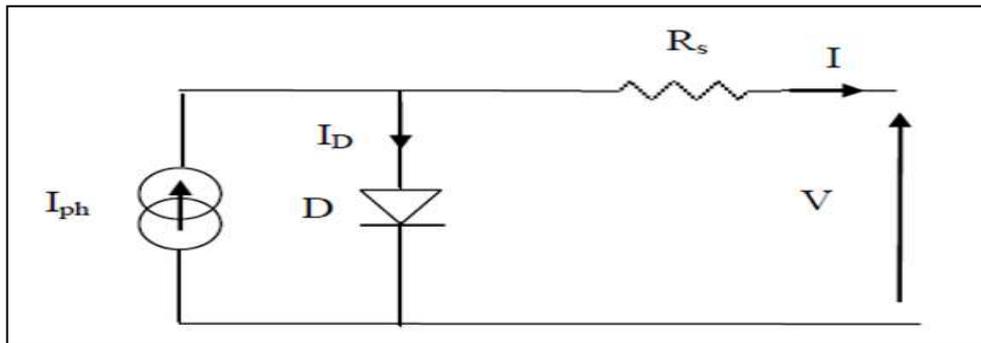


Figure (III.4): schéma équivalent à une diode sans résistance shunt.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

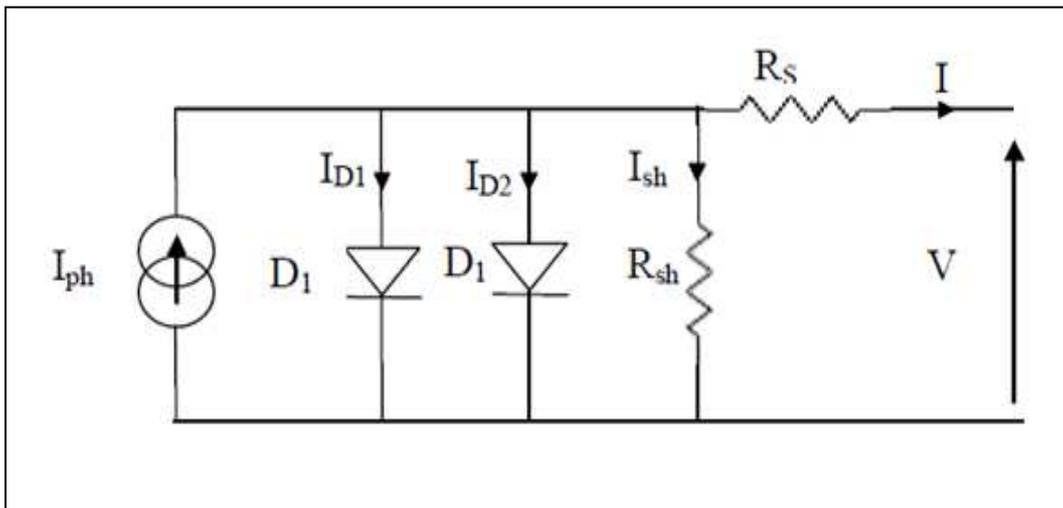
$$I = I_{ph} - I_D \dots \dots \dots (III.7)$$

$$= I_{ph} - I_0 \times \left[ \exp \left( \frac{q \times (V + R_s \times I)}{a.k.T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (III.8)$$

**III.3.2 Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)**

**III.3.2.1 Modèle à deux diodes avec résistance shunt**

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (**figure III.5**), qui se compose d’une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.



**Figure (III.5):** schéma équivalent à deux diodes avec résistance shunt.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \dots\dots\dots(\text{III.9})$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{01} \times [\exp(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T}) - 1] \dots\dots\dots(\text{III.10})$$

$$I_{D2} = I_{02} \times [\exp(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T}) - 1] \dots\dots\dots(\text{III.11})$$

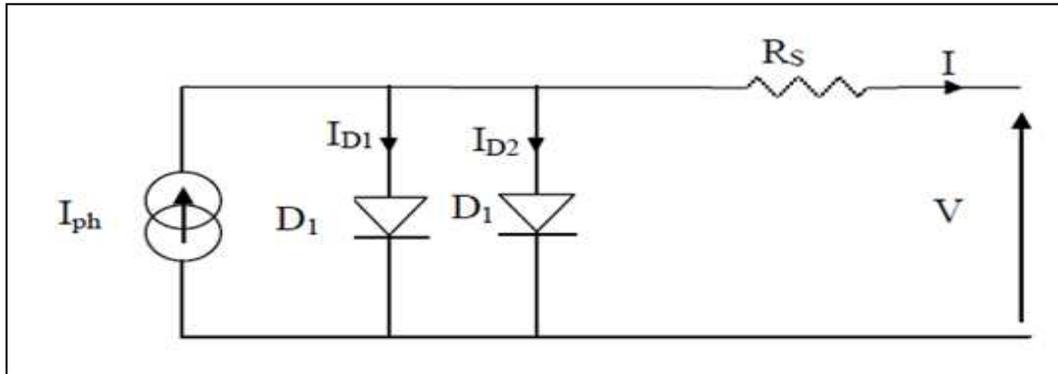
Avec :

$I_{01}, I_{02}$  : courant de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{01} \times [\exp(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T}) - 1] - I_{02} \times [\exp(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T}) - 1] - \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \dots\dots\dots(\text{III.12})$$

**III.3.2.2 Modèle à deux diodes sans résistance shunt**

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (figure III.6), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série.



**Figure (III.6):** schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \dots\dots\dots (III.13)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \times [\exp(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T}) - 1] - I_{02} \times [\exp(\frac{q \times (V + R_s \times I)}{a \cdot k \cdot T}) - 1] \dots\dots\dots (III.14)$$

Après la modélisation de différents modèles on peut dire que :

Les quatre paramètres inconnus sont  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $a$  et  $R_s$  ou avec précision les paramètres aux conditions de référence.

Alors que  $R_s$  et  $a$  sont supposés être constants,  $I_{ph}$  est en fonction de l'éclairement et de la température des cellules et  $I_0$  est en fonction de la température seulement. Cette dernière peut être déterminée à partir de la température ambiante et avec l'aide des données des essais standards fournis par les fabricants.

**III.4 Les zones de caractéristique (I-V) d'un générateur photovoltaïque**

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (III.7) représente trois zones essentielles :

- a) **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- b) **La zone (2)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- c) **La zone (3)**: qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

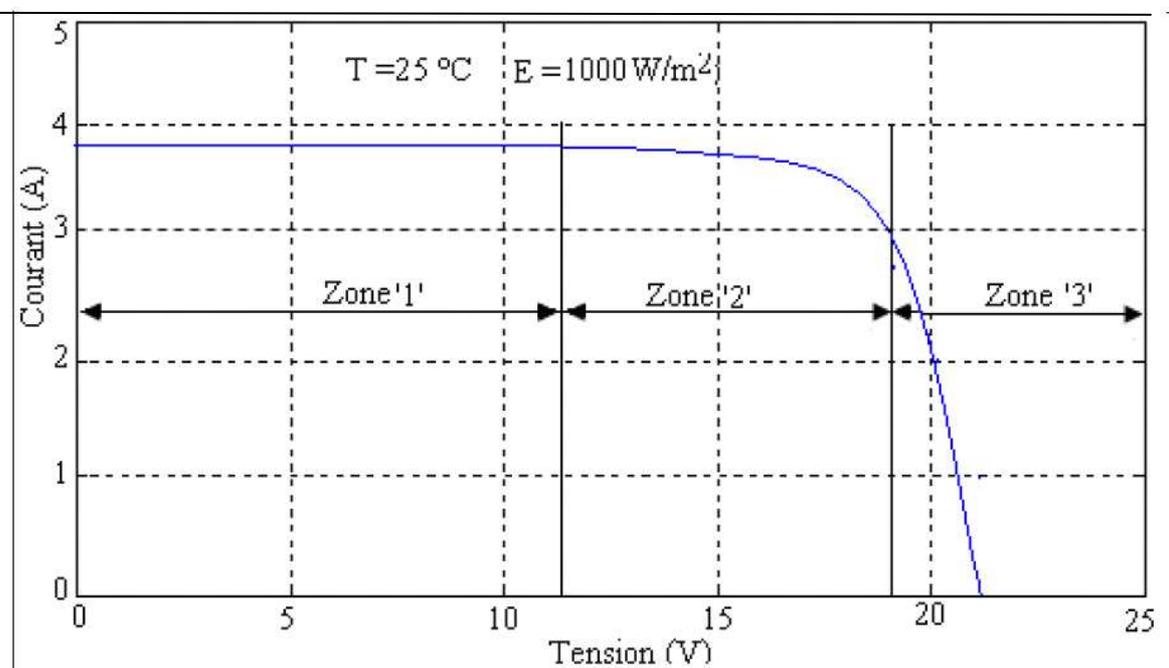


Figure (III.7): Les différentes zones de Caractéristique (I-V) d'un générateur photovoltaïque. [24]

### III.5 Constitution d'un module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque seule est souvent peu utilisable ; son faible épaisseur la rend très fragile et elle produit une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W, avec une tension de moins de 1V.

Ainsi pour accroître la puissance, on assemble ces cellules soit en série, soit en parallèle. Les cellules sont assemblées pour former un GPV élémentaire (module photovoltaïque).

## III.6 Le groupement des modules photovoltaïques

### III.6.1 Groupement en série

Les connexions en série de plusieurs modules augmentent la tension pour un même courant.

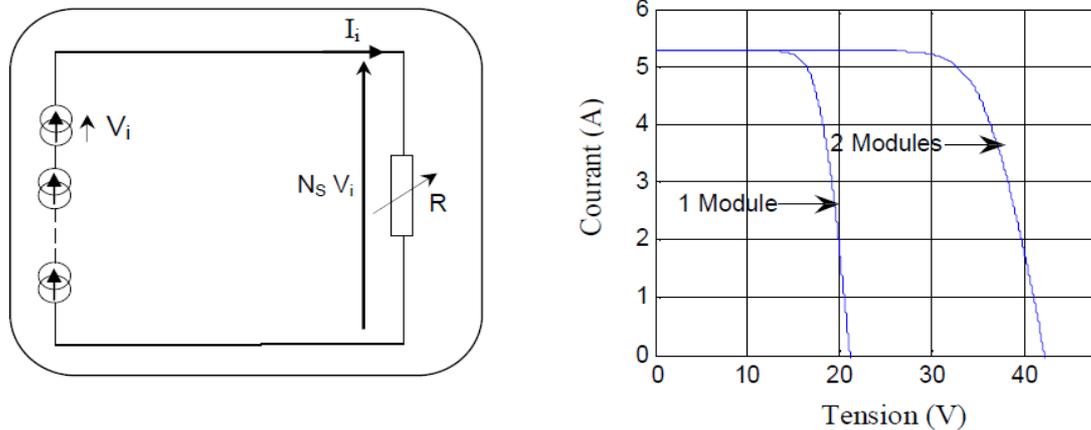


Figure (III.8): Groupement des modules PV en série.

### III.6.2 Groupement en parallèle

Les connexions en parallèle de plusieurs modules augmentent le courant pour la même tension (figure III.9).

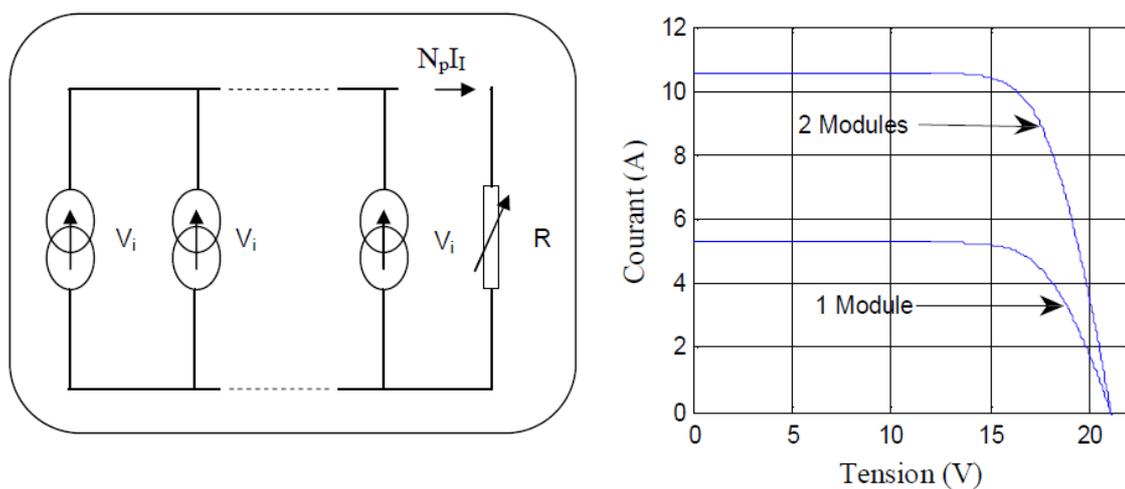


Figure (III.9): Groupement des modules en parallèle.

La plupart des panneaux PV commercialisés sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ses sous réseaux est lui même constitué d'un groupe de cellules PV connectées en série.

Le nombre de cellules par sous réseaux est un compromis économiques entre protection et pertes d'une partie importantes du GPV en cas de défaut partiel.

L'ensemble des cellules doit être encapsulé sous verre ou sous composé plastique, l'ensemble est appelé module photovoltaïque.

Un module est souvent constitué de **36** ou **72** Cellules, et l'ensemble des modules photovoltaïques est appelé champ photovoltaïque.

### III.7 Caractéristique d'un GPV élémentaire

On décrit un GPV élémentaire par les paramètres suivants:

- **La puissance de crête ( $P_c$ )** : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ C$  et un éclairement de  $1000 W/m^2$ ).
- **la tension à vide ( $V_{co}$ )**: tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )**: courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **le point de fonctionnement optimum, ( $V_{op}, I_{op}$ )** : lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, on écrit :

$$P_m = V_{op} \times I_{op} \dots\dots\dots(III.15)$$

- **le rendement** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation Incidente.
- **le facteur de forme** : rapport entre la puissance optimal  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présente des différents modèles (à une seule exponentielle et celui en double exponentielle) caractérisant les cellules photovoltaïques, ce qui nous à permis de modéliser et simuler le modèle en une seule exponentielle (sans la résistance shunt) en fonction de l'éclairement et la température.

# *Chapitre IV*

## *Simulation et discussion de résultats*

## Introduction

Dans ce chapitre nous avons présentons tous les étapes intermédiaires de les travaux pratiques sur les panneaux solaires, afin que toutes les mesures de la radiation de la lumière et la différent démarche qui ont mené à le courant après le changement de la température et de l'angle de situation du panneau, pour l'observation des caractéristiques des panneaux dans une journée.

Nous observons l'influence de la résistance série et le facteur d'idéalité sur l'analyse, de puis en fais à partir le programme MATLAB une simulation du panneau photovoltaïque et sortir des caractères de courant et de tension.

En fin, en fait une comparaison entre les deux méthodes de résultat pratique et simulation.

### IV.1 Simulation d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Sur la base du modèle mathématique du générateur solaire photovoltaïque développé dans le chapitre (III), on obtient le bloc schématique de SIMULINK montré sur la figure (IV.1).

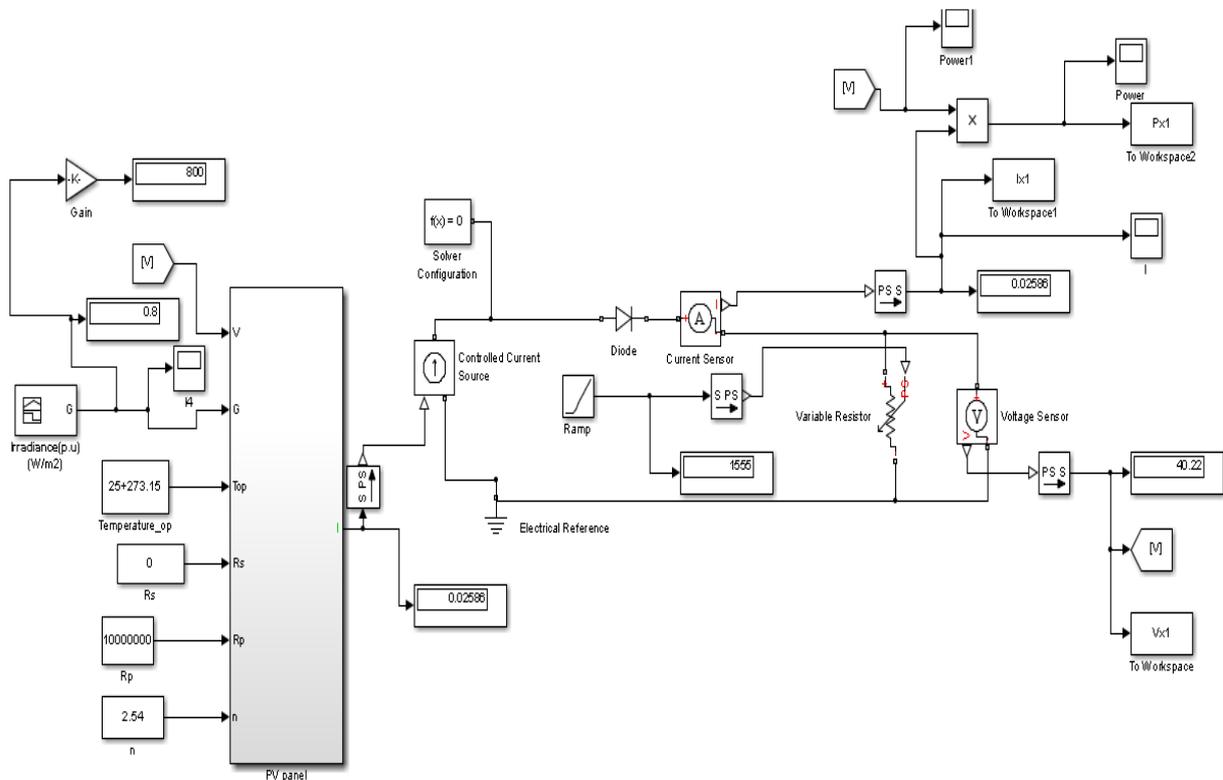


Figure (IV.1): Schéma bloc d'un générateur photovoltaïque sous SIMULINK.

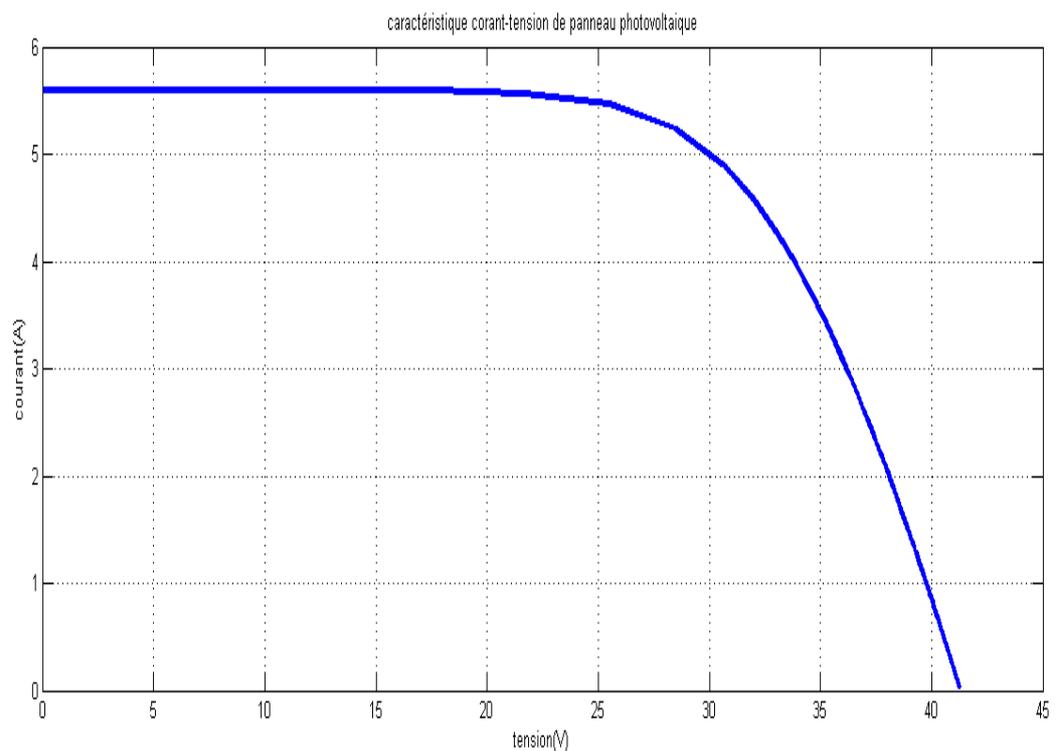
Le générateur photovoltaïque a simulé .il peut délivrer dans les conditions standards de test une puissance de 190 W.

PV en model STP. Ces paramètres sont :

- La tension de circuit ouvert  $V_{co}=45.2V$
- La tension optimal  $V_{op}= 36.6V$
- Le courant de court-circuit  $I_{cc}=5.62A$
- Le courant optimale  $I_{op}=5.20A$

## IV.2 Caractéristique Courant-Tension

La caractéristique (I/V) d'un GPV est non linéaire (**figure IV.2**). Le module PV produit une puissance maximale à un point appelé point de fonctionnement.



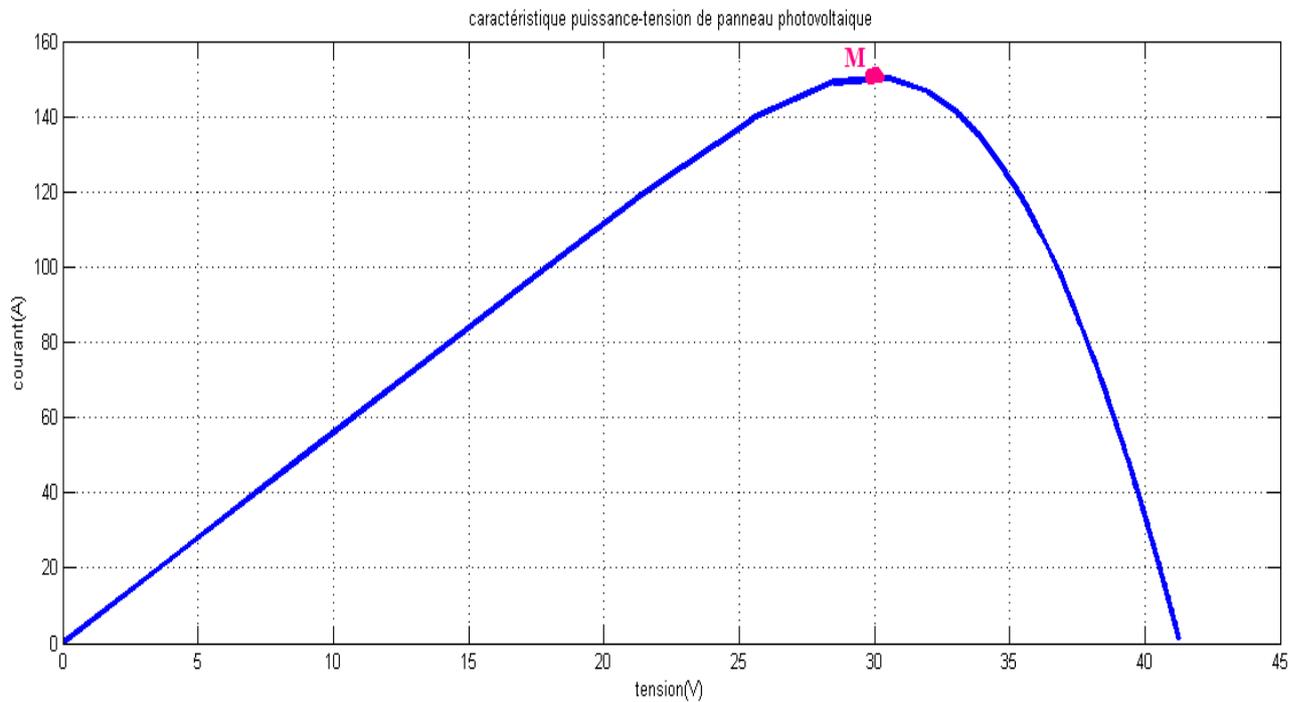
**Figure (IV.2):** Caractéristique  $I=F(v)$  d'unu GPV.

### IV.3 Caractéristique Puissance-Tension

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière, c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes

(figure (IV.3)).

Le point M représente la puissance maximale débitée par le module.



**Figure (IV.3):** Caractéristique  $P=f(v)$  d'un GPV.

## IV.4 Caractéristique de module photovoltaïque GPV pratique

Nous avons travaillé dans ce projet sur un générateur photovoltaïque qui peut délivrer dans les conditions standards de test une puissance de 190 W. Nous avons élaboré le montage pour étudier les caractéristique courant-tension et la caractéristique puissance-tension de ce générateur photovoltaïque (GPV).



Figure (IV.4): Photo du générateur photovoltaïque.

## IV.5 Les appareils de mesures

### IV.5.1 Pyranomètre

Le pyranomètre (**figure IV.5**) est un type d'actinomètre à large bande servant à mesurer l'irradiation solaire sur une surface plane, c'est un capteur qui est conçu pour mesurer la densité du flux de rayonnement solaire (en watts par mètre carré) à partir d'un champ de vision de 180 degrés.



**Figure (IV.5) : Pyranomètre.**

### IV.5.2 Anémomètre

Ce petit anémomètre très utile il permet de :

- 1) Mesure de la vitesse du vent et de la température.
- 2) Indication de refroidissement éolien.
- 3) Affichage de la température en degrés Celsius et Fahrenheit.

**Figure (IV.6): Anémomètre**

### IV.5.3 Thermomètre infrarouge sans contact

Ce thermomètre infrarouge va vous surprendre avec sa capacité de prendre la température sans toucher les choses (d'une utilisation simple, il mesure la température corporelle à une distance de 5 à 8 cm), en moins d'une seconde. Rapide et précis.

**Figure (IV.7): Thermomètre infrarouge**

### IV.5.3 Multimètre

Le multimètre (**figure IV.8**) est un appareil de mesure qui possède plusieurs fonctions. Il peut être utilisé comme :

- **Ampèremètre** : pour mesurer l'intensité du courant électrique (en Ampères : **A**).
- **Voltmètre** : pour mesurer la tension entre deux points du circuit (en Volts : **V**).
- **Ohmmètre** : pour mesurer la résistance (en Ohms :  $\Omega$ ).

De plus, le multimètre possède des entrées pour :

- Vérifier la **continuité** du courant.
- Tester une **diode**.
- Tester un **transistor**.



**Figure (IV.8):** Le multimètre utilisé.

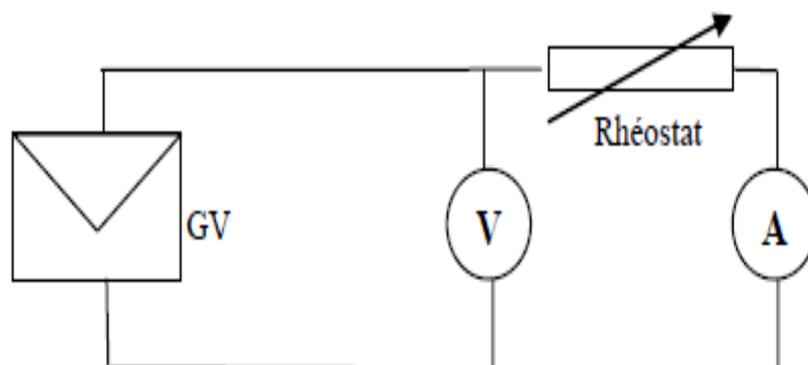
## IV.6 Les caractéristiques (I-V) des panneaux solaires

### IV.6.1 Méthode expérimentale

Dans cette expérience, les panneaux solaires sont reliés à :

- 1) Un voltmètre : pour lire les valeurs de tension des panneaux solaires.
- 2) Un ampèremètre : pour lire les valeurs du courant des panneaux solaires.
- 3) Un rhéostat : résistance variable employée pour commander le courant avec la tension du système photovoltaïque.

Selon le schéma de montage suivant :



**Figure (IV.9):** Montage électrique de l'expérience d'étude des caractéristiques (I-V) de panneau solaire.

Pour déterminer les caractéristiques du panneau PV, nous avons effectué une série de mesures de la tension et du courant et ceci en faisant varier la valeur de la résistance depuis le Rhéostat qui est alimenté par les panneaux photovoltaïques. L'expérience décrite ci-dessus est réalisée sur un temps court (de l'ordre de 5 minutes) afin d'assurer un éclairage constant durant toute l'expérience. Les relevés des valeurs du courant et de tension nous permettent de tracer la courbe des caractéristiques (I-V) des panneaux à chaque éclairage mesuré.

La figure ci-dessous présente le montage de cette expérience.

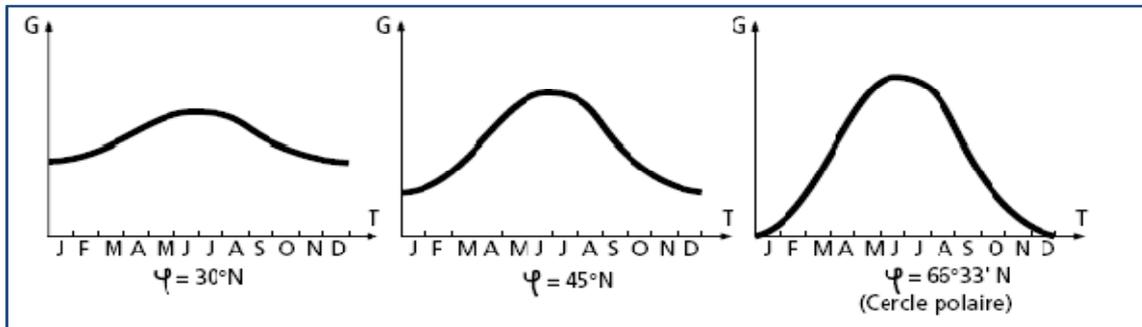


**Figure (IV.10):** Expérience d'étude des caractéristiques (I-V) des panneaux solaires.

#### IV.7 Influence de la variation d'éclairage et l'angle sur la caractéristique du GPV

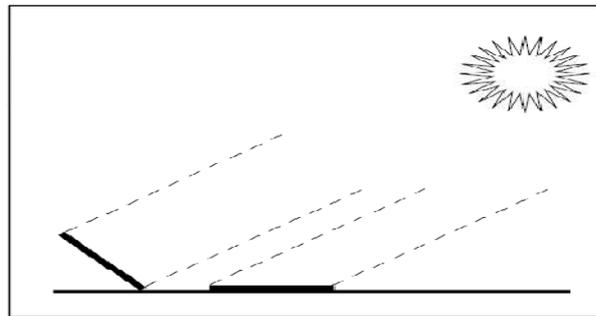
Les journées d'hiver sont également plus courtes, et le Soleil encore plus bas qu'à l'équateur.

Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire ( $G$ ) sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente l'angle (**Figure IV.11**).



**Figure (IV.11):** Courbes d'éclairement 'typique par mois pour différentes la ongle.

Inversement, le rayonnement atteint son intensité maximale lorsque le plan est perpendiculaire aux rayons du Soleil, donc l'intensité du rayonnement solaire sur un plan quelconque augmente quand on l'incline vers le Soleil (**figure IV.12**).



**Figure (IV.12):** Un plan incliné capte plus de rayonnement qu'un plan horizontal.

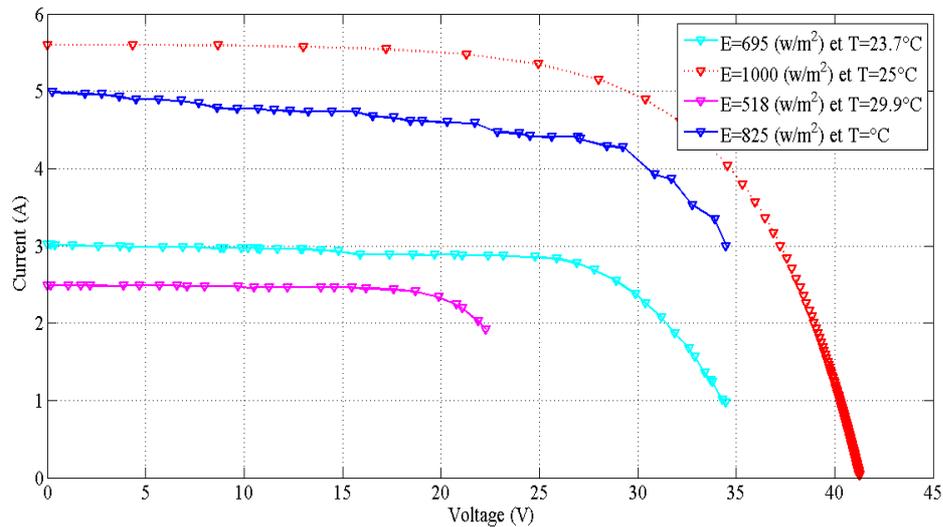
On maximise par conséquent la quantité d'énergie solaire directe captée quand on change constamment l'inclinaison du plan pour le maintenir à angle droit avec les rayons du Soleil. Si le plan est fixe, la quantité d'énergie reçue sera moindre, car les rayons du Soleil le frapperont de biais la majorité du temps.

La figure (**IV.12**) montre l'effet de l'angle d'inclinaison sur le rayonnement direct frappant un plan, de mois en mois, à  $45^\circ$  de latitude. Lorsque l'inclinaison est égale à environ  $35^\circ$  par rapport à l'horizontale, le plan capte à peu près la même quantité d'énergie solaire toute l'année. Le rayonnement annuel capté est au maximum lorsque le plan est incliné à un angle égal à la latitude.

Dans le travail que ce suit on a considéré que l'angle d'inclinaison égal a latitude de Biskra ( $34.8^\circ$ ).

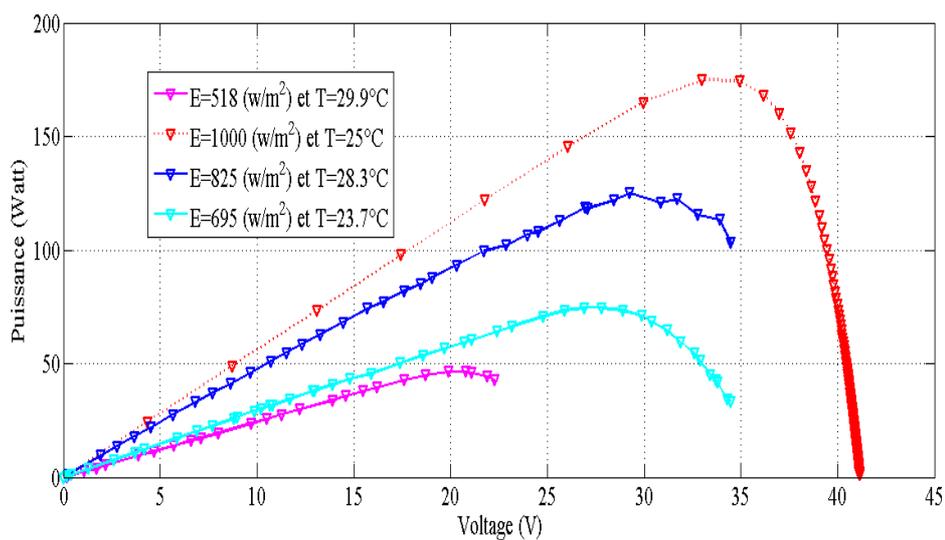
### IV.8 Influence de la variation de (E) sur les caractéristiques du GPV

Les figures (IV.13) et (IV.14) représente l'influence de la variation d'éclairements sur les courbes caractéristique du GPV.



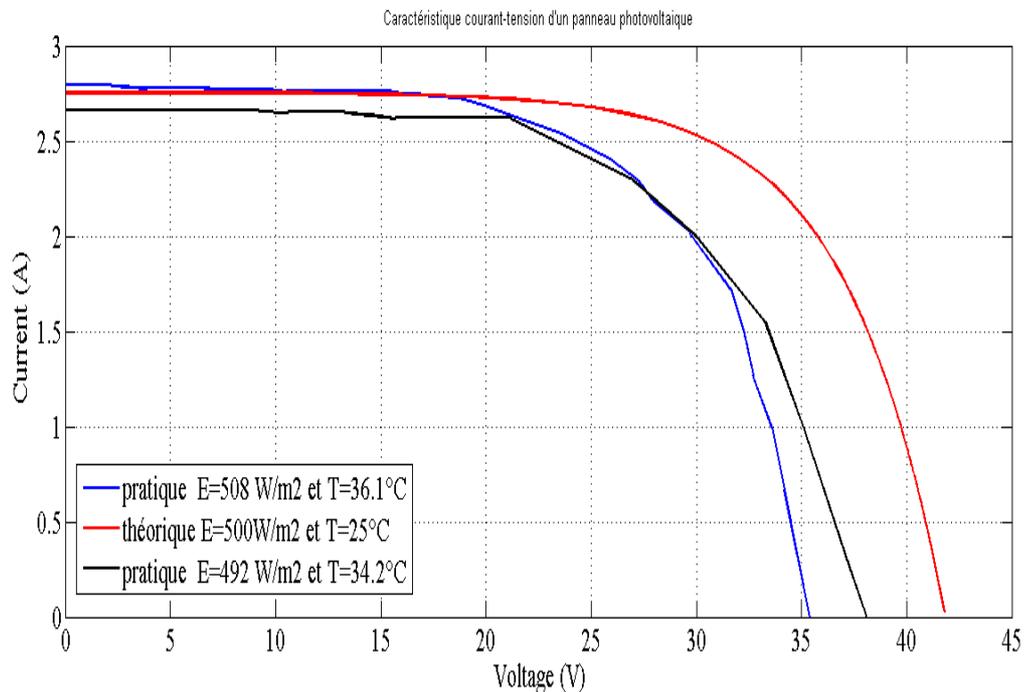
**Figure (IV.13):** la caractéristique (I-V) avec différents éclairements, à T autour constante.

Lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclairements (Figure IV.14), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est une fonction logarithmique.

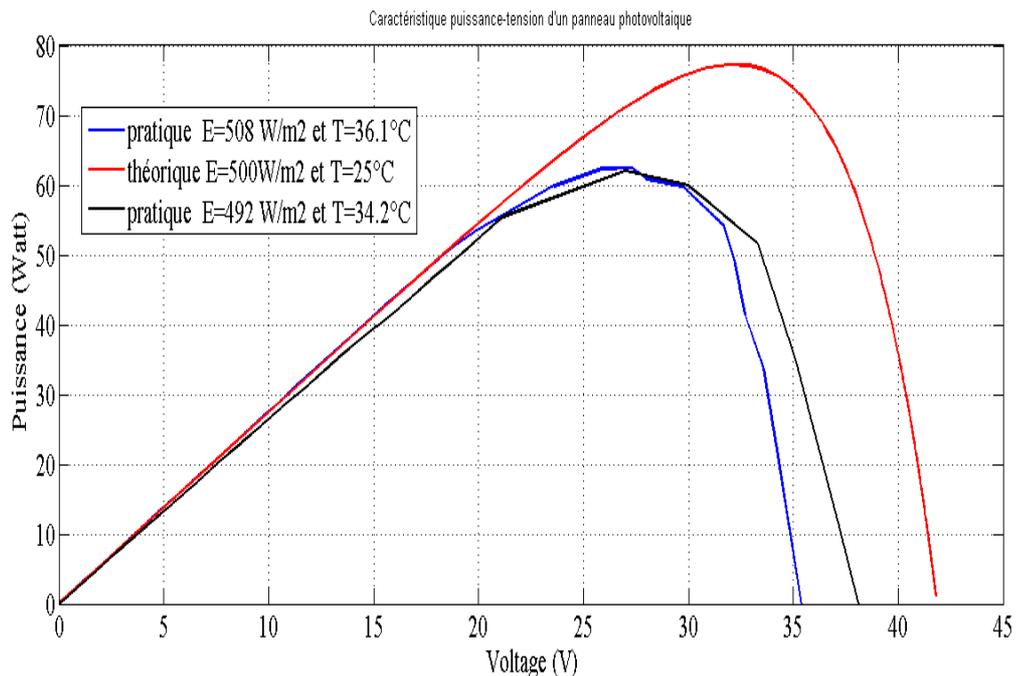


**Figure (IV.14):** Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) à T autour 25°C

### IV.9 Influence de la variation de (T) sur les caractéristiques du GPV



**Figure (IV.15):** Influence de la température sur la caractéristique I(V) à éclairage presque constant



**Figure (IV.16):** Influence de la température sur la caractéristique P(V) à éclairage presque constant

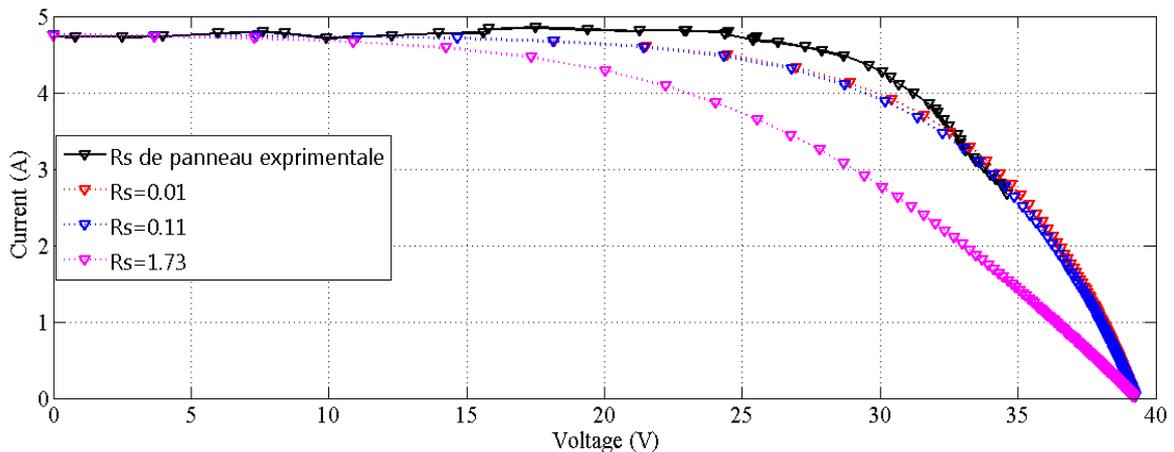
### IV.10 Les résultats

La figure (IV.15) et (IV.16) montre l'influence de la température sur la caractéristique I(V). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'un panneau solaire sur la caractéristique P(V). Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente.

Mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

### IV.11 Influence de la résistance série

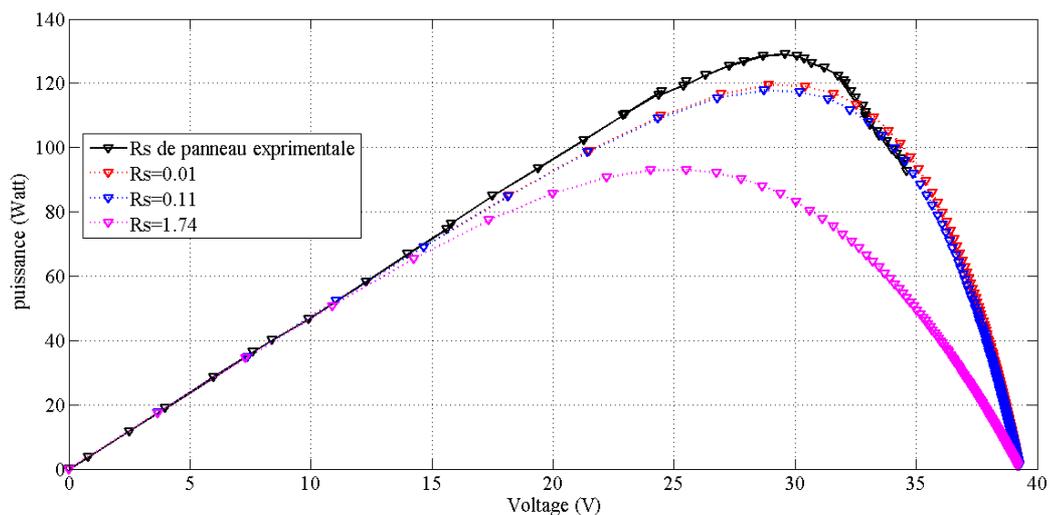
La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsque elle augmente elle diminue la valeur de courant de court circuit  $I_{cc}$ .



**Figure (IV.17):** Influence de **RS** sur la caractéristique  $I(V)$  de module photovoltaïque

(1) :  $0.01\Omega$  ; (2) :  $0.11\Omega$  ; (3) :  $1.73\Omega$

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de courbe de puissance.



**Figure (IV.18):** Influence de **RS** sur la caractéristique  $P(V)$  de module photovoltaïque

(1) :  $0.01\Omega$  ; (2) :  $0.11\Omega$  ; (3) :  $1.73\Omega$

Après les résultats obtenue on constate que :

Les performances d'un panneau photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que ( $R_s$ ) est grande, ainsi pour avoir un bon rendement il faut que la résistance ( $R_s$ ) soit la plus petite que possible. La figure (IV.17) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique ( $I-V$ ).

Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I = f(V)$  dans la zone où le panneau fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum.

#### IV.12 Influence du facteur d'idéalité

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur la point de puissance maximale et conduit à une perte de puissance au niveau de la zone de fonctionnement (Figure IV.19) et (Figure IV.20).

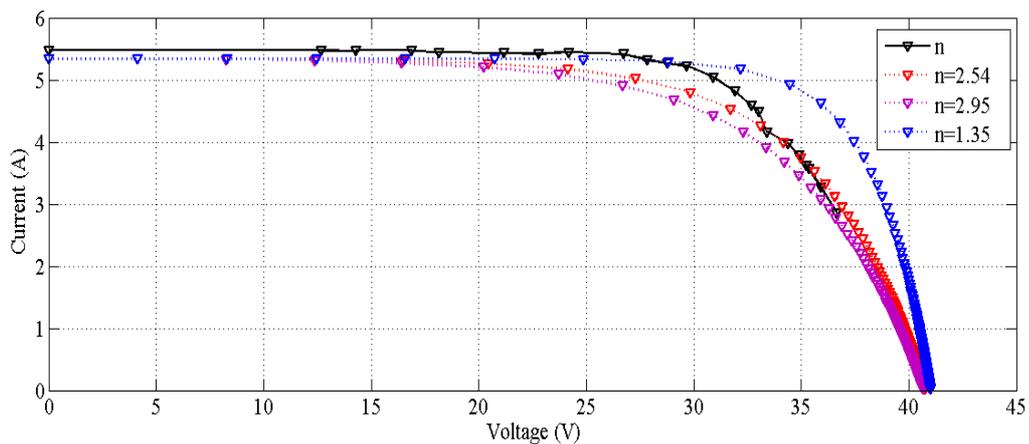


Figure (IV.19): Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique I (V).

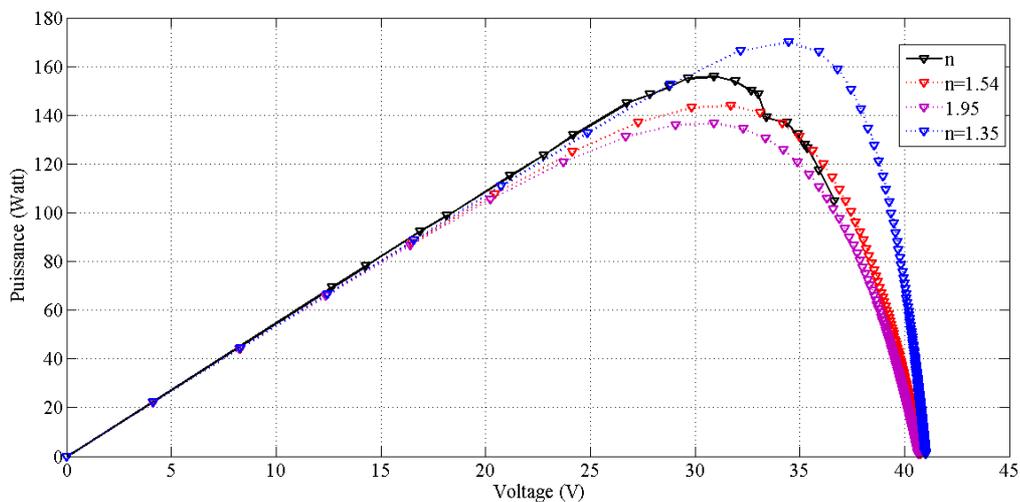


Figure (IV.20): Influence de facteur d'idéalité sur la caractéristique P (V).

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présente des différents modèles (modèle à une diode sans résistance shunt et modèle idéale) caractérisant les cellules photovoltaïques, ce qui nous à permis de modéliser et simuler le modèle en une seule exponentielle (sans la résistance shunt) en fonction de l'éclairement et la température. Ceci va nous permettre d'estimer la puissance fournie par une installation photovoltaïque.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Hydrogène-Énergies renouvelables s'est lancé dans la conception et la réalisation d'un électrolyseur alimenté par des panneaux photovoltaïques. L'électrolyse comme moyen propre de production d'hydrogène par voie électrique passe inévitablement par la maîtrise de chaque composant d'un montage complexe. L'hydrogène est le combustible et le porteur potentiel d'énergie du futur. On entend par hydrogène solaire, l'hydrogène produit en utilisant les énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire.

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire, elle dispose d'une durée d'ensoleillement et d'une quantité d'énergie incidente très importante font de l'Algérie une place de choix pour la production d'hydrogène solaire. Cette production offrira non seulement une énergie propre mais aussi et surtout permettra d'augmenter et de diversifier ses ressources énergétiques.

Dans ce travail on a modélisé et caractériser un module PV pour des applications d'une pile à combustible. La modélisation a été effectuée selon deux modèles le premier et idéal et le deuxième un modèle réelle, les paramètres comme le facteur d'édilité et la résistance série de panneau PV de 190W sont bien déterminés, quelque soit les conditions climatiques tel que la température et l'éclairement. La comparaison entre les résultats de simulation et celle d'expérimentale vérifier la bonne validation et la robustesse des paramètres.

Comme perspective à notre étude, nous proposons :

- Etudier et développer d'autres modèles mathématiques pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des panneaux PV.
- De réaliser un électrolyseur à l'échelle du laboratoire capable de mettre en évidence les différents éléments le constituant.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

## Bibliographique

- [1] : G. Bessereau - A. Sanière «Charbon : ressources, réserves et production » Manuscrit transmis en décembre 2007. Innovation Energie Environnement.
- [2] : Stéphane Thiers site <http://thiers.stephane.free.fr>.
- [3] : Jean-Louis Bascdevant, James Rish et Michel Spiro « Energie Nucléaire » les éditions de L'école polytechnique. Janvier 2002.
- [4] : 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
- [5] : FARADJI née Kherbouche Djamila « Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse » mémoire de DOCTORAT. Univ Abu Bakr Belkaid Tlemcen.
- [6] : Microsoft® Encarta® 2009, **Hydrogène**, Microsoft Corporation, 2008.
- [7] : J.P. Jonchère Fiche 3.1 – Final : octobre 2003 1ère émission : 2001 - Révision du 16 oct. 2003 Source : RAPPORT D'ÉTUDE 10/06/2008 N° DRA-08-95313-07833B  
Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés.
- [8] : Samer RABIH « Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs Photovoltaïques » thèse de doctorat Univ de Toulouse 03/10/2008.
- [9] : J. K. Dahl, K. J. Buechler, A. W. Weimer, A. Lewandowski, C. Bingham, «Solar-thermal dissociation of méthane in a fluid-wall aerosol flow reactor», International Journal of Hydrogen Energy, 29 (2004) 725-736.
- [10] : J.P. Jonchère « production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles » mémento de l'hydrogène 1ère émission.
- [11] : Mémento de l'Hydrogène « liquéfaction, stockage et transport de l'hydrogene sous forme cryogenique» fiche 4.3 – révision de juillet 2011
- [12] M. Angel Cid Pastor : « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques». Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [13] : T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME)

- [14] : C. Bernard, J. Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger».2006
- [15] : A.C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," , thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse 2005.
- [16] : Installations photovoltaïques, "Systèmes autonomes", document du constructeur bel power.
- [17] : D. Turcotte, M. Ross and F. Sheriff. «Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools», article PV Horizon, Canada, 2001.
- [18]: Installations photovoltaïques, "Systèmes raccordés au réseau", document du constructeur bel power.
- [19] : Arnason, Bragi, and Thorsteinn I. Sigfusson. 2000. "Iceland—A Future Hydrogen Economy." International Journal of Hydrogen Energy, vol. 25, 389.
- [20]: A. Guen, « Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles » Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Février 1992.
- [21] : [www.web-libre.org/.../centrale-solaire-photovoltaïque](http://www.web-libre.org/.../centrale-solaire-photovoltaïque).
- [22]: R, Chenni, «étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire», Mémoire de Doctorat, Université Mentouri de Constantine ,2007
- [23] : [www.BP.solar.fr](http://www.BP.solar.fr).
- [24] : Boukhers. D, «Optimisation D'un Système D'énergie Photovoltaïque Application Au Pompage», Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine ,2007