

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Université A. MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



## **PROJET DE FIN DE CYCLE**

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en Electrotechnique

Option :

- énergie renouvelable
- automatisme industriel

**Thème**

# **Production d'hydrogène à base d'un système de conversion photovoltaïque**

**Préparé par :**

Brahimi Imad

Hamma Imad

**Dirigé par :**

Dr. RABAH BABOURI

**Année Universitaire : 2021/2022**

---

## ***Remerciement***

*Avant tout, Nous tenons à remercier **ALLAH** le Tout-puissant pour le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.*

*Nous tenons à remercier vivement en premier lieu Monsieur : R. BABOURI, docteur à l'université de Bejaia, et notre directeur de mémoire, qui par ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral, et nous rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail*

*Nous voudrions remercier tout particulièrement tous les membres de nos familles ainsi que nos parents de leur soutien et leurs encouragements tout au long de notre cursus.*

## ***DEDICACES***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chères parents, Messaoud et Houria pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études.*

*Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération, et mon amour pour les sacrifices que Dieu les garde pour moi.*

*Mes très chers frères. Mourad, Ferhat, Sofiane et Halim pour leur appui et leur encouragement*

*Mes très chères belles sœurs, Sassia, sassa et Siham pour leur soutien moral,*

*Mes amis et toutes ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser, de près ou de loin ce mémoire.*

**Imad BRAHIMI**

## ***DEDICACES***

*Je dédie ce modeste travail à :*

- ✓ *Mes très chers parents : Ismail et Fatima source de vie, d'amour et d'affection*
- ✓ *Mon cher frère Adel et mes très chères sœurs : Habiba et Zina*
- ✓ *Toute le famille, source d'espoir et de motivation*
- ✓ *Tous mes amis, et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser, de près ou de loin ce mémoire*

*Imad Hamma*

# *Nomenclature*

<b>PEM</b>	membrane échangeuse de protons	
<b>I<sub>D</sub></b>	Courant inverse de diode	(A)
<b>I<sub>o</sub></b>	Courant de saturation de diode, dépendant de la température	(A)
<b>R<sub>SH</sub></b>	Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant	( $\Omega$ )
<b>R<sub>S</sub></b>	Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts	( $\Omega$ )
<b>V<sub>PV</sub></b>	Tension aux bornes de la cellule	(V)
<b>I<sub>PV</sub></b>	Courant fourni par la cellule	(A)
<b>m</b>	Indice du matériau(compris entre 1et 2 selon de la technologie)	
<b>k</b>	Constante de Boltzmann	(J/K)
<b>T</b>	Température en Kelvin	(K)
<b>q</b>	Charge de l'électron	(C)
<b>V<sub>oc</sub></b>	Tension de circuit ouvert	
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit	
<b>NOCT</b>	Température Nominale de Fonctionnement de cellule solaire	(°C)
<b>T<sub>cell</sub></b>	Température de la cellule	(°C)
<b>T<sub>amb</sub></b>	Température ambiante	(°C)
<b>N<sub>p</sub></b>	Nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque	
<b>N<sub>s</sub></b>	Nombre de module série dans le champ photovoltaïque	
<b>I<sub>gén</sub></b>	Le courant délivre par le générateur	(A)
<b>Q</b>	Débit de production d'hydrogène	(ml/s)
<b>R</b>	Constant de gaz parfait	(mol <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
<b>Z</b>	Nombre d'électron requis pour libérer une molécule	
<b>S</b>	Nombre de cellules sériés d'électrolyseur	
<b>P</b>	Nombre de cellules parallèle d'électrolyseur	
<b>N<sub>cellules</sub></b>	Nombre de cellules d'électrolyseur	
<b>F</b>	Constant de Faraday	(C · mol <sup>-1</sup> )
<b>P</b>	pression atmosphérique	(Pa)

$I_f$	Le courant de point de fonctionnement.	(A)
$V_f$	La tension de point de fonctionnement	(V)
$f'(x_n)$	Le dérivé de la fonction $f(x_n)$	
$x_n$	La présente itération	
$x_{n+1}$	L'itération suivante	
$E$	Eclairement	(W/m <sup>2</sup> )
$\eta_e$	Le rendement d'électrolyseur	(%)
$\eta_s$	Le rendement global	(%)
$\eta_u$	Le rendement d'adaptation	(%)

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Répartition de la production de l'hydrogène en fonction des sources fossiles.....	5
<b>Figure I.2</b> : Vaporeformage du gaz naturel.....	6
<b>Figure I.3</b> : Électrolyse de l'eau à partir d'énergie renouvelable .....	7
<b>Figure I.4</b> : principe de l'électrolyse alcaline .....	7
<b>Figure I.5</b> : principe schématique de l'électrolyse PEM.....	8
<b>Figure I.6</b> : principe de l'électrolyse à haute température selon le type de l'électrolyte .....	9
<b>Figure I.7</b> : Stockage de l'hydrogène dans une hydrure.....	12
<b>Figure I.8</b> : Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de l'hydrogène .....	13
<b>Figure I.9</b> : Schéma descriptif d'une pile à combustible de type PEMFC .....	15
<b>Figure I.10</b> : Le soleil source de l'énergie solaire.....	16
<b>Figure I.11</b> : Composantes du rayonnement solaire .....	17
<b>Figure I.12</b> : principe de la conversion PV.....	18
<b>Figure I.13</b> : Différents technique de cellules photovoltaïque.....	19
<b>Figure I.14</b> : Types de cellules photovoltaïques .....	20
<b>Figure I.15</b> : Système PV autonome .....	21
<b>Figure I.16</b> : Système PV raccordé au réseau.....	22
<b>Figure I.17</b> : Module photovoltaïque.....	23
<b>Figure I.18</b> : caractéristiques de groupement série des cellules .....	23
<b>Figure I.19</b> : caractéristiques de groupement parallèle des cellules.....	24
<b>Figure I.20</b> : Schéma de principe d'un hacheur .....	25
<b>Figure I.21</b> : Schéma de principe d'un onduleur .....	25
<b>Figure II.1</b> : Modèle de la cellule PV.....	28
<b>Figure II.2</b> . Modèle simplifié d'une cellule PV .....	29
<b>Figure II.3</b> : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	30
<b>Figure II.4</b> : Le circuit équivalent du module PV.....	32
<b>Figure II.5</b> : L'électrolyse PEM.....	37
<b>Figure II.6</b> : Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur .....	38
<b>Figure II.7</b> : Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique .....	38
<b>Figure II.8</b> : les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale simulé pour $T_{el}=80^{\circ}\text{C}$ .....	41
<b>Figure II.9</b> : point de fonctionnement du système.....	42
<b>Figure III.1</b> : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ .....	47
<b>Figure III.2</b> : Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension $P(V)$ .....	47
<b>Figure III.3</b> : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ .....	48
<b>Figure III.4</b> : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension .....	49
<b>Figure III.5</b> : caractéristique (I-V) du couple, une cellule d'électrolyseur-module PV.....	50

---

<b>Figure III.6</b> : caractéristique (I-V) de couplage avec $s=8$ , $p=1$ .....	50
<b>Figure III.7</b> : Eclairement en fonction de temps.....	51
<b>Figure III.8</b> : Variation de courant et tension en fonction de temps.....	52
<b>Figure III.9</b> : Evolution de débit en fonction de temps.....	52
<b>Figure III.10</b> : Evolution de volume en fonction de temps .....	53

# Sommaire

Introduction générale .....	1
Chapitre I: Généralités sur la production d'hydrogène	
I. Généralités sur la production d'hydrogène .....	4
I.1. Introduction .....	4
I.2. Production d'hydrogène .....	4
I.2.1. Production par les combustibles fossiles .....	5
I.2.1.1 Le vaporeformage de gaz naturel .....	5
I.2.1.2 Oxydation partielle .....	6
I.2.2 Production d'hydrogène à partir du charbon .....	6
I.2.3. Production par l'électrolyse de l'eau .....	6
I.2.3.1 Les différentes technologie d'électrolyseurs .....	7
I.2.3.1.a. Electrolyseurs alcalins .....	7
I.2.3.1.b. Electrolyseurs PEM .....	8
I.2.3.1.c. Electrolyseurs à haute température .....	8
I.2.4. Production à partir des énergie renouvelables .....	9
I.2.4.1. La biomasse .....	10
I.2.4.2. Solaire thermique .....	10
I.2.4.3. Energie éolienne .....	10
I.2.4.4. Energie solaire .....	11
I.3. Stockage de l'hydrogène .....	11
I.3.1. Le stockage sous forme gazeux .....	11
I.3.2. Le stockage sous forme liquide .....	11
I.3.3. Le stockage sous forme d'hydrures métalliques .....	12
I.3.4. Le stockage sous forme pression .....	11
I.4 Transport de l'hydrogène .....	13
I.4.1. Transport par route .....	13
I.4.1. Transport par mer .....	13
I.4.1. Transport par gazoducs .....	13
I.5. Les applications d'hydrogène .....	14
I.5.1. Application chimiques .....	14
I.5.2. Utilisation énergétique .....	14
I.5.2.1. Pile à combustible .....	14
I.5.2.2. Autre applications énergétiques .....	14
II. La conversion photovoltaïque .....	16
II.1. L'énergie solaire .....	16

II.2. Rayonnement solaire .....	17
II.2.1. Rayonnement direct.....	17
II.2. Rayonnement diffus .....	17
II.2. Rayonnement réfléchis .....	17
II.2. Rayonnement globale .....	17
II.3. Principe de la conversion photovoltaïque (PV) .....	17
II.3.1. Cellules solaire photovoltaïques.....	18
II.3.2. La cellule PV .....	18
II.3.3. Technologie de cellules photovoltaïque .....	19
II.3.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque .....	17
II.4. Systèmes Photovoltaïques .....	20
II.4.1. Systèmes autonome .....	20
II.4.2. Systèmes PV raccordé réseau.....	21
II.4.3. Systèmes PV hybride.....	20
II.5. Le générateur photovoltaïque .....	22
II.5.1. Le module photovoltaïque .....	22
II.5.1.1. Montage en série .....	23
II.5.1.2 Montage en parallèle .....	24
II.6. Les convertisseurs statiques.....	24
II.6.1. Les convertisseurs statiques .....	24
II.6.2. Les convertisseurs DC/DC.....	24
II.7. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques .....	25
II.7.1. Avantages.....	25
II.7.2. Inconvénients .....	25
II.8. Conclusion .....	26

### Chapitre II: Modélisation de système de production

II.1. Introduction.....	28
II.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	28
II.2.1 Générateur photovoltaïque idéal .....	28
II.2.2. Générateur photovoltaïque "réel".....	30
II.2.3. Paramètres de champ photovoltaïque .....	33
II.2.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	33
II.2.5. Evolution de la caractéristique(V-I) .....	34
II.2.6. L'organigramme caractéristique(V-I).....	36
II.3. Modélisation d'électrolyseur .....	37
II.3.1. Modèle d'électrolyseur .....	37
II.3.2. La caractéristique courant-tension d'électrolyseur.....	40

---

II.4.	Modélisation de couplage (GPV-Electrolyseur) .....	41
	II.4.1. Calcul du point de fonctionnement.....	42
II.5.	Dimensionnement d'électrolyseur .....	34
II.6.	Conclusion .....	44
<b>Chapitre III: Commande et simulation de système de production</b>		
III.1	Introduction .....	46
III.2	Résultats de Simulation.....	46
	III.2.1 Le module photovoltaïque .....	46
	III.2.2 Le couplage PV-électrolyseur.....	49
	III.3. Conclusion .....	53
	Conclusion générale .....	54
	Bibliographies .....	55
	(Annexes 1).....	57

## Introduction générale

Aujourd'hui, on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables comme, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement climatique.

Le plus intéressant dans l'utilisation de l'énergie solaire, est l'obtention de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant ainsi une maintenance réduite.

Selon de nombreux experts, l'hydrogène est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur. L'hydrogène est la forme d'énergie la moins nocive pour l'environnement. Équipé d'un cycle énergétique fermé, il peut être utilisé pour diverses applications telles que la production d'électricité, le chauffage des habitats et l'approvisionnement en carburant des transports. L'hydrogène se présente comme un excellent alternatif dans un premier temps et un substitut par la suite. Elle peut jouer un rôle plus important que l'énergie conventionnelle. En effet, elle a l'avantage d'être non polluante et peut utiliser les mêmes moyens de transport que l'énergie conventionnelle. Non seulement il peut répondre aux besoins énergétiques locaux, mais il peut également être un important produit d'exportation.

Plusieurs technologies existent pour la production d'hydrogène. Certaines de ces technologies ont atteint la maturité de production commerciale, tandis que d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle du pétrole lourd, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont autant de procédés de production d'hydrogène en industrialisation. La production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau est le processus le plus courant et le plus populaire. L'utilisation de l'énergie solaire dans le processus d'électrolyse est la méthode la plus rentable et la plus respectueuse de l'environnement.

Dans ce projet, nous présentons une étude d'un système de production d'hydrogène basé sur un système de conversion photovoltaïque. Notre travail se répartit en trois chapitres principaux :

Dans le premier chapitre nous faisons une étude générale sur la production d'hydrogène (Production, Stockage, Transport et applications d'hydrogène) et nous avons aussi présenté les différents éléments qui constituent un système PV (la cellule, module et champ PV).

---

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des composants du système photovoltaïque et traite aussi la modélisation qui décrit le comportement des différentes parties du système de production d'hydrogène.

Le troisième chapitre se portera sur la simulation du système de production à l'aide du logiciel MATLAB et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, nous concluons ce modeste travail par une conclusion générale.

---

# Chapitre I : Généralités sur la production d'hydrogène et la la conversion photovoltaïque

## I. Généralités sur la production d'hydrogène

### I.1. Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple et le plus accessible de l'univers, son noyau est constitué d'un proton et ses atomes n'ont qu'un seul électron. La molécule de dihydrogène ( $H_2$ ) est constituée de deux atomes d'hydrogène, et ce que nous appelons habituellement hydrogène signifie dihydrogène.

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, 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.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation direct d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière

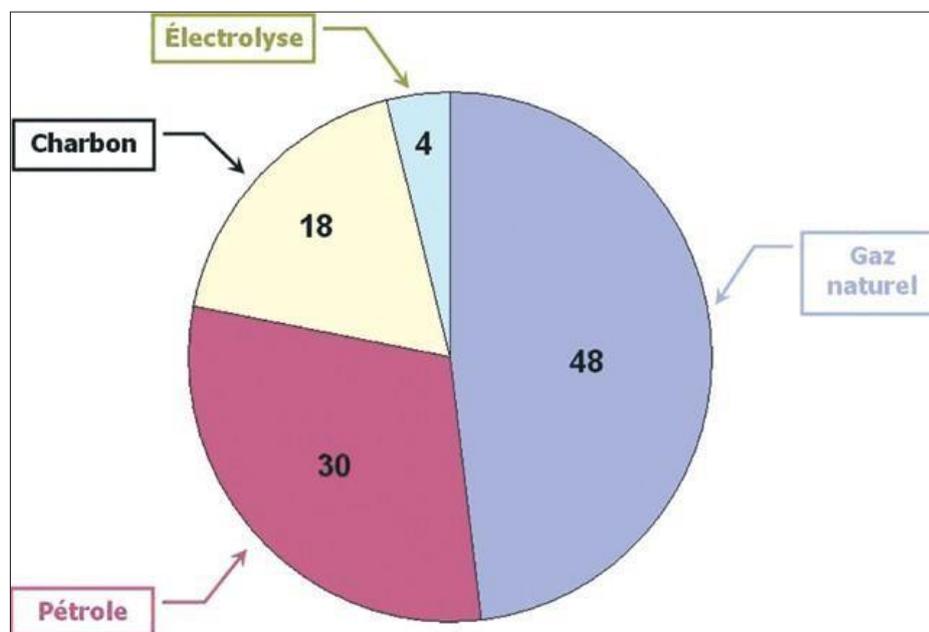
Cette énergie connus des grands développements dans le monde mais malgré cette développements elle a des inconvénients parmi ces inconvénients leur couts d'installation qui sait élever sur tous notre pays ainsi leur utilisation limite malgré que l'Algérie est un pays plus riches de cette énergie .

### I.2. Production d'hydrogène

Plusieurs techniques de production existent. Certaines 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 industrialisés ou en phase d'industrialisation.

### I.2.1. Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures)

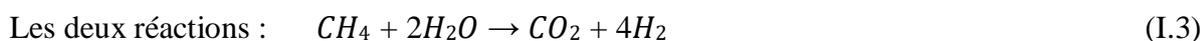
L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus se présente dans l'apparition de CO<sub>2</sub> comme sous-produit ce qui peut présenter des avantages économiques mais pas très écologiques.

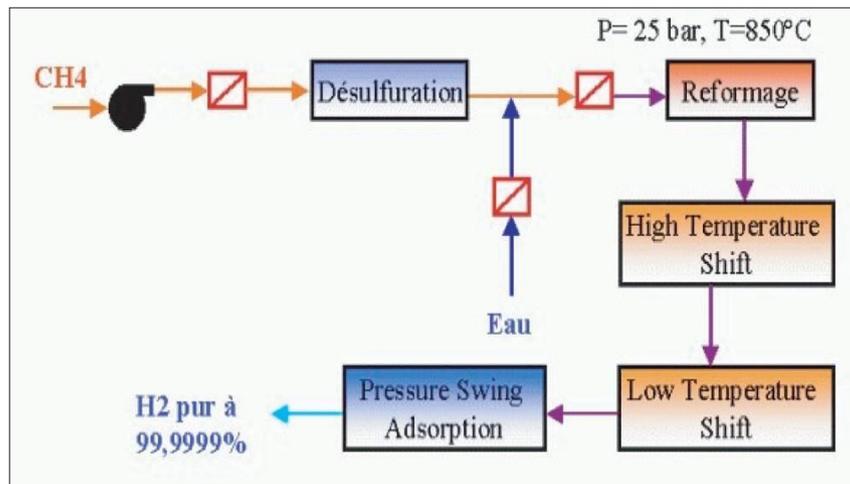


**Figure I.1** : Répartition de la production de l'hydrogène en fonction des sources fossiles

#### I.2.1.1. Le vaporeformage de gaz naturel

Le gaz naturel contient principalement du méthane. Cependant, une désulfuration est généralement requise avant d'entrer dans l'unité de reformage à la vapeur (reformage à la vapeur). Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à réaliser sont la production de gaz de synthèse et la conversion du CO. Il est à noter que ces réactions sont en équilibre thermodynamique, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire à la réaction chimique se produire, la charge partielle ne réagira pas et se mélangera au produit. Dans le cas du reformage à la vapeur, cela entraîne la sortie de l'unité de la majeure partie du méthane (CH<sub>4</sub>) et du monoxyde de carbone (CO) [1].





**Figure I.2 :** Vaporeformage du gaz naturel

### I.2.1.2. Oxydation partielle

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. A 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 converti à  $H_2$  comme décrit dans l'équation :



### I.2.2. Production d'Hydrogène à Partir Du Charbon

18 % de l'hydrogène mondial est produit à partir du charbon, contre 4 % en Europe. Le principal inconvénient de son utilisation est qu'il produit du dioxyde de carbone. Cependant, le charbon étant mieux réparti à la surface de la terre que le gaz naturel ou le pétrole, il représente une solution à l'indépendance énergétique des pays.

### I.2.3. Production par l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau ( $H_2O$ ) en hydrogène ( $H_2$ ) et oxygène ( $O_2$ ) lors d'une réaction d'oxydo-réduction. L'idée serait donc de combiner un dispositif de récupération de l'énergie renouvelable telle qu'un système de panneaux photovoltaïques pour l'énergie solaire, ou un parc d'éoliennes pour l'énergie du vent, à un module d'électrolyse de l'eau. De l'hydrogène pur sera produit grâce à l'électricité fournie par une énergie renouvelable, tel qu'illustré sur la figure (I.3) [2].

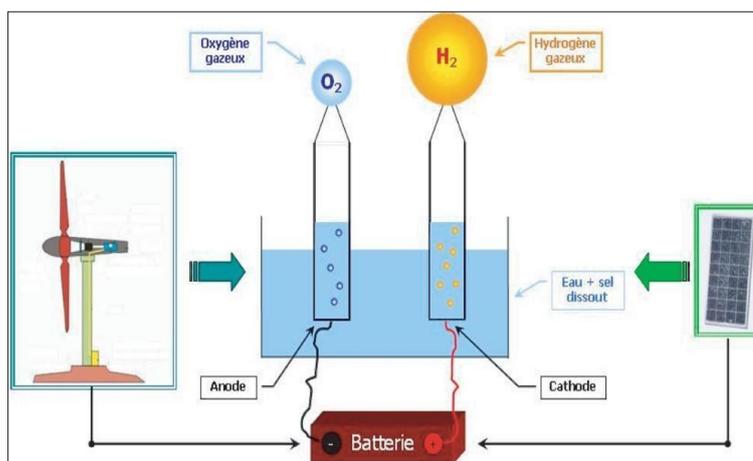


Figure I.3 : Électrolyse de l'eau à partir d'énergie renouvelable.

### I.2.3.1. Les différentes technologies d'électrolyseurs [2]

#### I.2.3.1.a. Electrolyseurs alcalins

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyseur est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La condition ionique est alors assurée par les ions hydroxyde ( $OH^-$ ) et potassium ( $K^+$ ). Les réactions anodiques sont décrites ci-dessous :

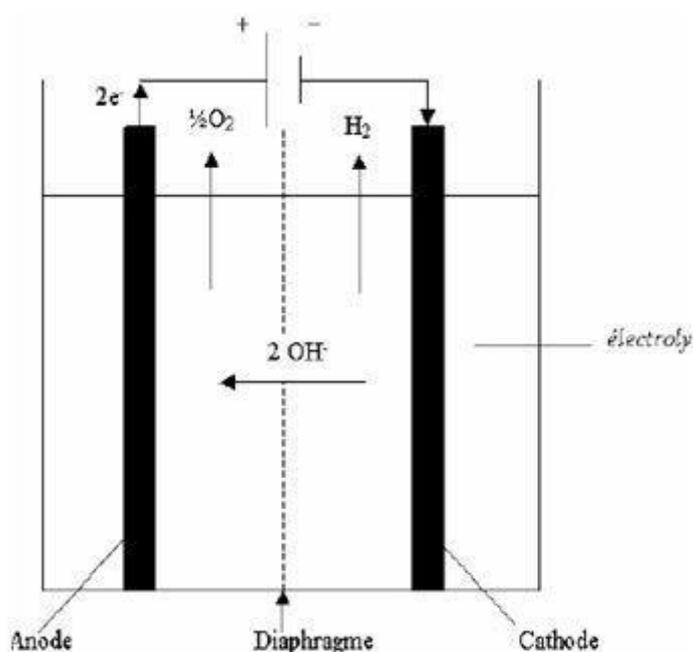
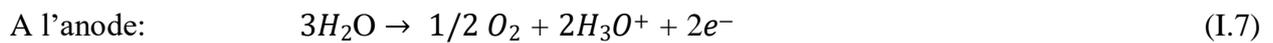


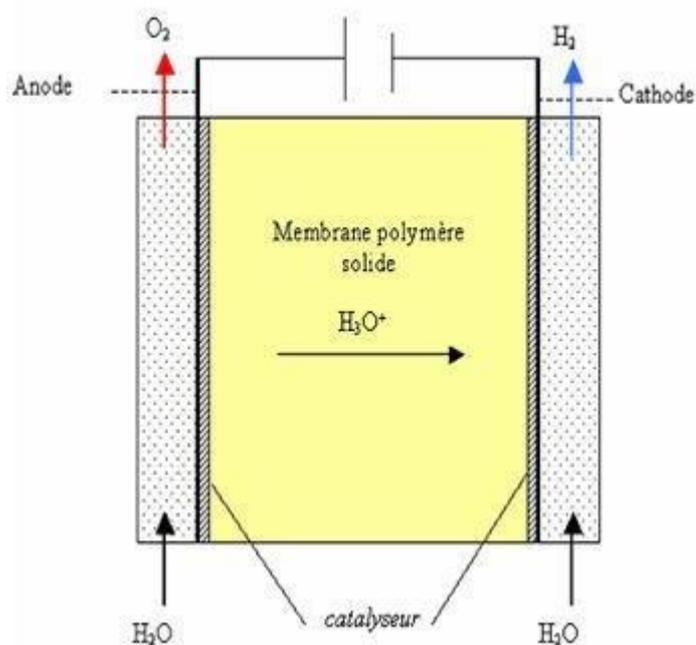
Figure I.4: principe de l'électrolyse alcaline.

### I.2.3.1.b. Electrolyseurs PEM

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium ( $H_3O^+$ ) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits ( $H_2$  et  $O_2$ ), selon les réactions suivantes :



Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM.



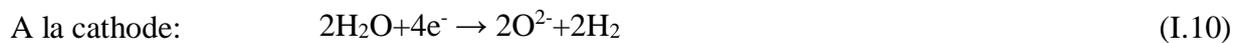
**Figure I.5 :** principe schématique de l'électrolyse PEM.

### I.2.3.1.c. Electrolyseurs à haute température

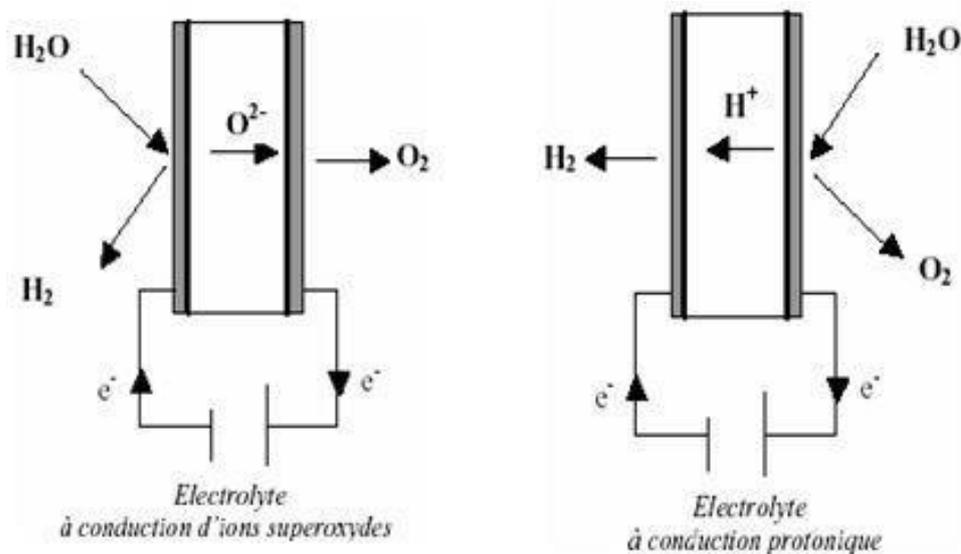
Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions

superoxydes  $O^{2-}$ . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte :

- Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :



- Electrolyte à conduction protonique:



\*

**Figure I.6** : principe de l'électrolyse à haute température selon le type de l'électrolyte.

#### I.2.4. Production à partir des énergies renouvelables

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est motivée par le souci de limiter l'utilisation des hydrocarbures en raison de la limitation des stocks disponibles et des émissions de gaz à effet de serre liées à leur utilisation. Du point de vue de la protection de l'environnement, des technologies de production d'hydrogène utilisant des sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, géothermique et hydraulique) se développent. Les utilisations typiques incluent évidemment la production d'électricité à partir de sources d'énergie

renouvelables et l'utilisation de cette électricité pour l'électrolyse de l'eau en utilisant les technologies décrites ci-dessus.

#### I.2.4.1. 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  $C_6H_{10}O_5$ . 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.



#### I.2.4.2. Solaire thermique

Le principe du solaire thermique consiste à concentrer le rayonnement en un point pour augmenter sa température. Le fonctionnement du four est schématisé Figure I.7 ci-dessous : une première série de miroirs orientables et situés sur la pente, captent les rayons solaires et les envoient vers une deuxième série de miroirs concentrateurs formant une parabole

La chaleur produite par le soleil peut alors être directement utilisée pour produire de l'hydrogène à partir de méthane ou d'eau. Dans le cas de l'eau, il est nécessaire de s'appuyer sur un cycle thermochimique type  $Zn/ZnO$  et on obtient de l'hydrogène mais également de l'oxygène. Il est donc nécessaire de rajouter une étape de séparation des gaz. Dans le cas du méthane, il est possible de travailler sans catalyseur, par pyrolyse, et dans ce cas les produits de réactions sont de l'hydrogène et du noir de carbone. Il n'y a donc pas d'étape de séparation [3].

#### I.2.4.3. Energie éolienne

L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'hydrogène les plus prometteuses. Elle offre de réelles opportunités en sites isolés. Réalisée principalement en

utilisant l'électrolyse de l'eau, les systèmes de production comprennent entre autres les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les convertisseurs de puissance et les électrolyseurs.

#### **I.2.4.4. Energie solaire**

L'hydrogène est produit, par voie solaire, principalement à l'aide de procédés thermochimique, photo électrochimique et électrolytique :

- Procédés thermochimiques : Ces techniques convertissent le rayonnement solaire en chaleur à des températures comprises entre 200°C et 2000°C avec un rendement supérieur à 70%, et cette chaleur primaire est ensuite convertie en vecteur énergétique d'hydrogène. Les concentrateurs solaires peuvent être l'une des alternatives intéressantes pour les pays disposant de grandes ressources solaires.
- Procédés photo électrochimique : La cellule photolyse est un composant électronique qui exposé à la lumière (photon) décompose l'eau en oxygène et hydrogène. Une telle cellule photo électrochimique est formée d'une électrode photosensible immergée dans un électrolyte ou dans l'eau. Ce procédé de photolyse présente l'avantage sur filière photovoltaïque de supprimer la nécessité de transport du courant électrique entre la centrale solaire photovoltaïque et les installations de production de l'hydrogène par hydrolyse (la conversion directe apporte en outre un rendement supérieur).
- Procédés électrolytiques : Ce procédé consiste à dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen d'un courant électrique continu, traversant un électrolyte disposé entre deux électrodes.

### **I.3. Stockage de l'hydrogène**

#### **I.3.1. Le stockage sous forme gazeux**

La régulation de l'hydrogène sous sa forme gazeuse est une option prometteuse. Cependant, il existe de nombreuses contraintes. Léger et encombrant, l'hydrogène doit être compressé au maximum pour réduire la taille du réservoir. Des progrès ont été faits : de 200 bar (la pression de la bouteille distribuée dans l'industrie) à 350 bar aujourd'hui, l'évolution passe désormais par des réservoirs capables de supporter une pression de 700 bar. De plus, l'hydrogène est le plus petit élément de l'univers, nous devons donc trouver des matériaux pouvant contenir de l'hydrogène sans risque de fuite [4].

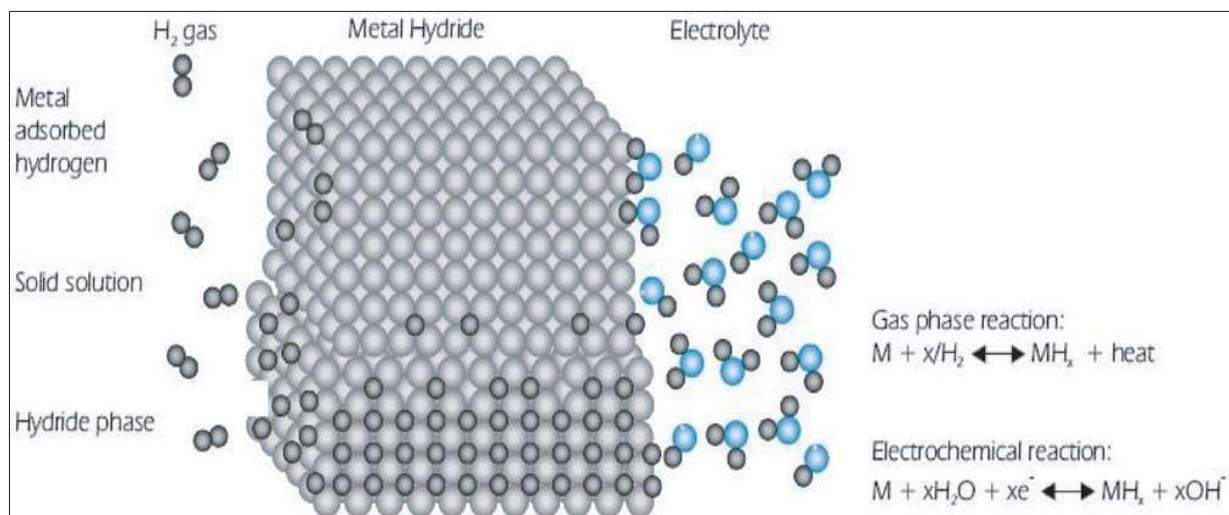
#### **I.3.2. Le stockage sous forme liquide**

Pour cette technologie, beaucoup d'énergie est consommée pour refroidir jusqu'à la température nécessaire au fonctionnement : -253°C. Le stockage de l'hydrogène sous cette forme

est possible, mais nécessite des développements supplémentaires. En fait, cette méthode est déjà utilisée dans le domaine spatial. Mais l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier après l'hélium. On peut donc utiliser de l'hydrogène liquide pour le stocker, mais cela coûte très cher, ce qui rend impossible pour les particuliers de l'appliquer actuellement. Il faut aussi ajouter le fait que près de 3 à 4 % de l'hydrogène s'évapore chaque jour.

### I.3.3. Le stockage sous forme d'hydrures métalliques

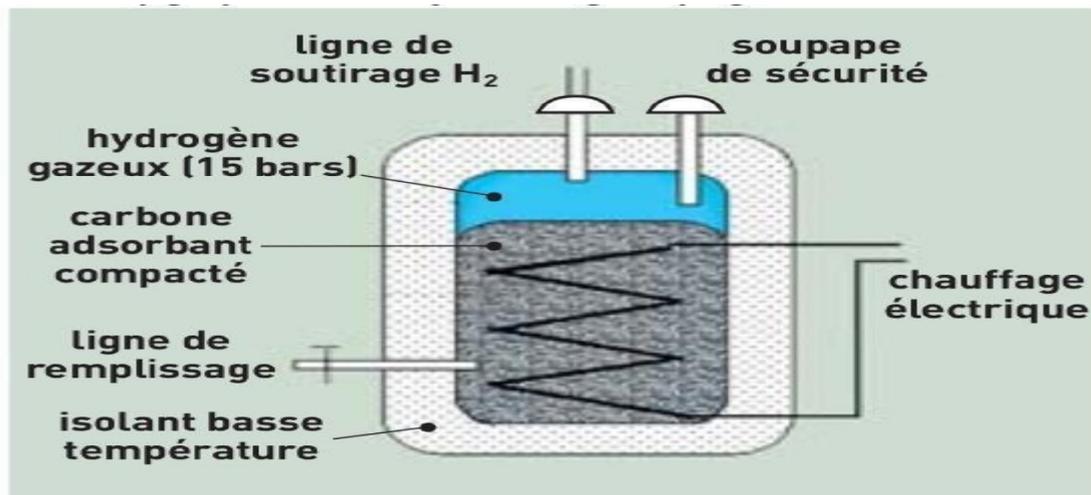
Dans cette méthode, l'hydrogène est capturé dans les interstices d'une poudre d'alliage métallique comprimée, un peu comme une éponge absorbe de l'eau. Cette technique est très avantageuse notamment une construction simple et un niveau élevé de sécurité. L'automobile reste pour l'instant hors de portée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



**Figure I.7 :** Stockage de l'hydrogène dans une hydrure

### I.3.4. Le stockage sous basse pression

Cette technique serait une alternative au stockage sous pression de gaz. Il s'agirait de stocker l'hydrogène dans des matériaux capables de l'absorber et de le restituer si nécessaire. Il peut s'agir d'un matériau carboné ou d'un alliage métallique. Nous utilisons le conditionnel car ce mode de stockage n'est encore qu'un objet de recherche et n'a pas encore été développé.



**Figure I.8 :** Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de l'hydrogène.

## I.4 Transport de l'hydrogène

### I.4.1. 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 [5].

### I.4.2. Transport par mer

La densité de l'hydrogène liquide est très élevée, et le fait que les réservoirs cryogéniques le contenant peuvent avoir des volumes très importants est une indication naturelle du transport par voie maritime des lieux de forte capacité de production vers les lieux de forte consommation. L'hydrogène liquide sera contenu dans de grands réservoirs cryogéniques sphériques à double paroi de 3 000 mètres cubes.

### I.4.3. 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 1.000.000 km 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 [5].

## **I.5. Les applications d'hydrogène**

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Comme il peut être aussi utilisé de deux différentes manières :

- Comme produit chimique dans l'industrie : là il entre en tant que réactif dans les procédés chimiques tels que le raffinage du pétrole ou la production d'ammoniac
- Comme vecteur d'énergie : dans ce cas, l'hydrogène est un carburant ou une source d'énergie.

### **I.5.1. Applications chimiques**

L'hydrogène réagit avec de nombreux éléments non métalliques. Il se combine avec l'azote en présence d'un catalyseur pour former de l'ammoniac, avec le soufre pour former du sulfure d'hydrogène, avec le chlore pour former du chlorure d'hydrogène et avec l'oxygène pour former de l'eau. La réaction entre l'oxygène et l'hydrogène a lieu à température ambiante et seulement en présence d'un catalyseur, tel que le platine finement divisé. Lorsque l'on enflamme un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène, il se produit une explosion. L'hydrogène se combine également avec certains métaux tels que le sodium et le lithium pour former des hydrures. L'hydrogène agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cuivre : le gaz entraîne l'oxygène et laisse le métal à l'état libre. L'hydrogène réagit avec les composés organiques insaturés pour former les composés saturés correspondants. [2]

### **I.5.2. Utilisations énergétiques**

#### **I.5.2.1. Pile à combustible**

La pile à combustible, PAC, est un convertisseur d'énergie. Une interface entre deux formes d'énergie : chimique et électrique. Classée dans le groupe « pile à combustible à membrane solide » (Solid Polymer Fuel Cell SPFC), son travail réside dans sa capacité à produire un courant électrique continu en activant l'oxydation du combustible, en l'occurrence

l'hydrogène ( $H_2$ ), et la réduction du comburant, dans ce cas l'oxygène ( $O_2$ ), qui interagissent entre les bornes d'une membrane conductrice d'ions, voir la figure (I.10) [6].

L'oxydation de l'hydrogène à l'anode va éclater la molécule  $H_2$  en deux ions hydronium  $H^+$  et deux électrons  $e^-$ , selon l'équation :

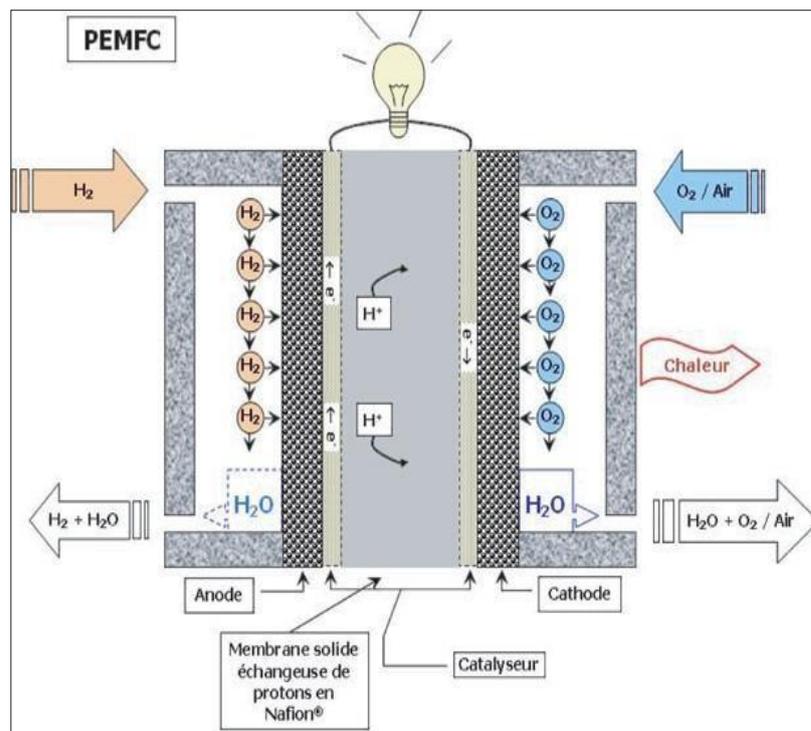


Du côté anodique de la pile, les ions  $H^+$  traversent l'électrode poreuse pour atteindre l'électrolyte solide constitué d'une membrane échangeuse d'ions, le Nafion.

D'un autre côté, les deux électrons issus de l'éclatement de la molécule d'hydrogène vont suivre le circuit électrique établi pour rejoindre la cathode qui sera le siège de la réduction de l'oxygène selon l'équation :



La réduction de l'oxygène à la cathode met en contact les électrons issus de l'oxydation de l'hydrogène à l'anode, qui ont traversé le circuit électrique.



**Figure I.9** : Schéma descriptif d'une pile à combustible de type PEMFC

### I.5.2.2. Autres applications énergétiques

Les domaines potentiels d'application de l'hydrogène comme énergie sont extrêmement nombreux et variés, à commencer par tous ceux qui sont déjà couverts par le pétrole (et ses dérivés) et le gaz :

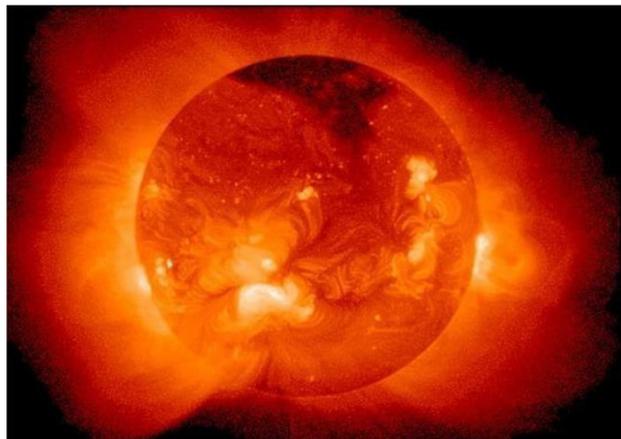
- Le transport, avec des moteurs thermiques alimentés directement en hydrogène, comme le démontre le constructeur BMW depuis des années, ou avec des piles à combustibles couplées ou non à des batteries dans des montages hybrides, comme l'ont démontré une quinzaine de constructeurs automobiles dans le monde.
- L'industrie, qui consomme aujourd'hui la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde et qui pourrait reconvertir sans grande difficultés ses systèmes actuellement alimentés en fuel ou gaz naturel.
- L'agriculture, qui, à travers des engrais, utilise déjà des sous produits de l'hydrogène, comme des dérivés de l'ammoniac.

## II. La conversion photovoltaïque

Un système photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque et d'un ensemble de composants électriques (convertisseur statique, batterie de stockage avec son régulateur de charge, câblage et protection) qui permettent d'adapter la puissance électrique produite aux spécifications des récepteurs.

### II.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge.



**Figure I.10** : Le soleil source de l'énergie solaire.

## II.2. Rayonnement solaire

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C.

### II.2.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs [7].

### II.2.2. Rayonnement diffus

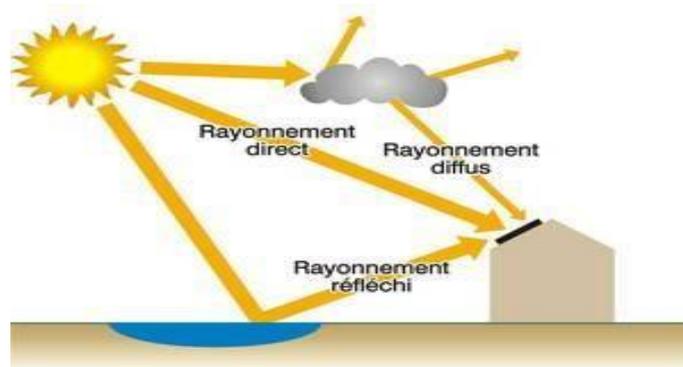
Le rayonnement diffus est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste.

### II.2.3. Rayonnement réfléchi

L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [8].

### II.2.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre.



**Figure I.11** : Composantes du rayonnement solaire.

## II.3. Principe de la conversion photovoltaïque (PV)

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires convertit l'énergie lumineuse des rayons solaires directement en électricité en transférant l'énergie des photons aux électrons du matériau. Ce matériau a deux parties, l'une est l'excès d'électrons et l'autre est le manque d'électrons, appelés respectivement dopage de type N et dopage de type p. Lorsque la première

est mise en contact avec la deuxième, les électrons en excès dans la partie N diffusent dans la partie P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone dopée initialement P devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formé.

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite (gap) communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trous. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel. [9]

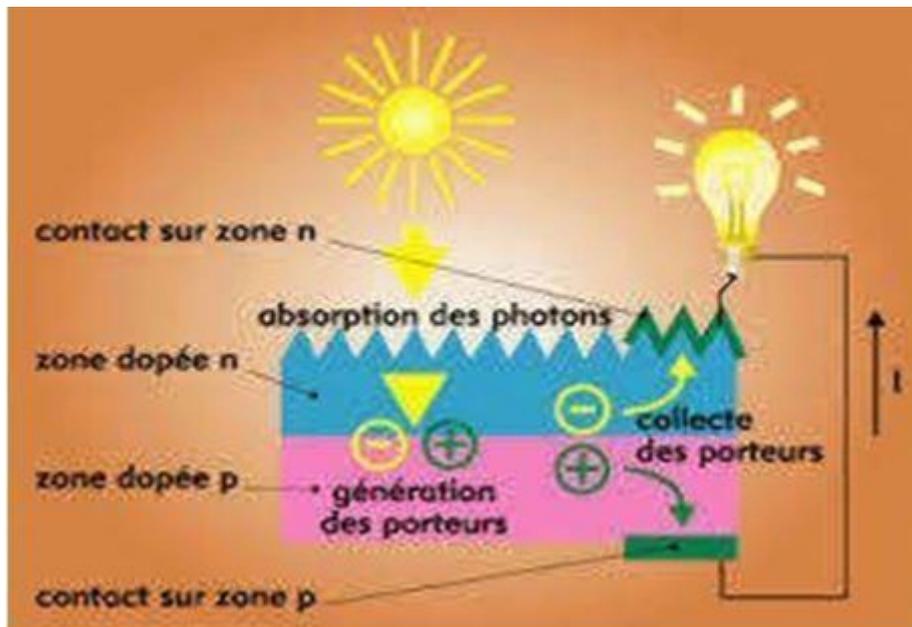


Figure I.12 : principe de la conversion PV.

### II.3.1. Cellules solaires photovoltaïques

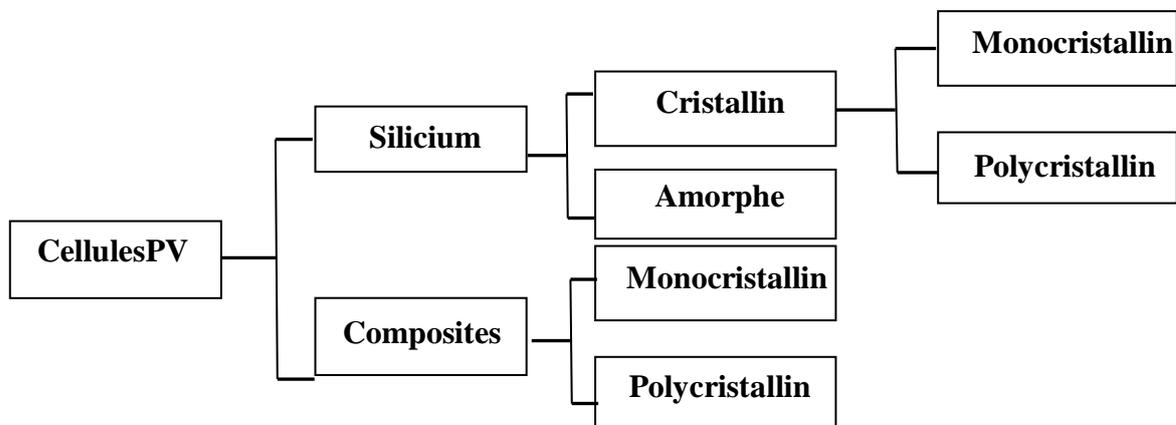
La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée.

### II.3.2. La cellule PV

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [10].

### II.3.3. Technologie de cellules photovoltaïques

Il existe différentes technologies constituant les cellules photovoltaïques illustrées par la figure suivante :



**Figure I.13** : Différents technique de cellules photovoltaïque.

#### ➤ Les cellules monocristallines

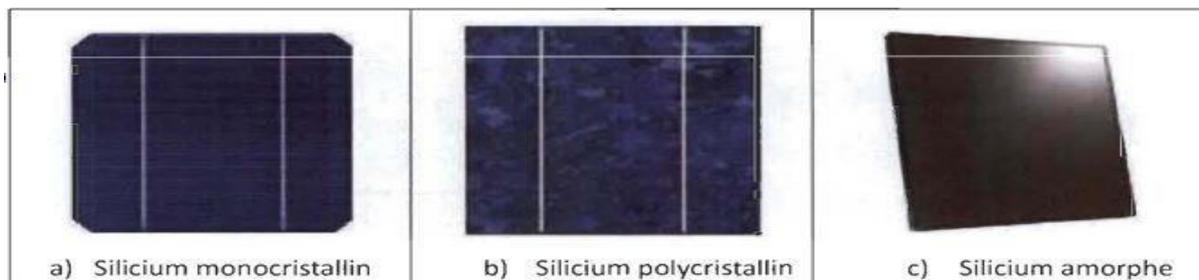
Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

#### ➤ Les cellules poly-cristallines

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible (11% -13%).

#### ➤ Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres.



**Figure I.14** : Types de cellules photovoltaïques.

### II.3.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont :

- ✓ La résistance série  $R_s$ .
- ✓ La résistance shunt  $R_{sh}$ .
- ✓ Le courant de saturation  $I_{sat}$ .
- ✓ L'éclairement  $W$ .
- ✓ La température  $T$ .

## II.4. Systèmes Photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en trois catégories : autonome, raccordé au réseau et systèmes hybrides. Pour les endroits qui sont loin du système de production d'électricité conventionnel, des systèmes autonomes d'alimentation en énergie photovoltaïque ont été considérés comme une meilleure alternative.

### II.4.1. Système autonome

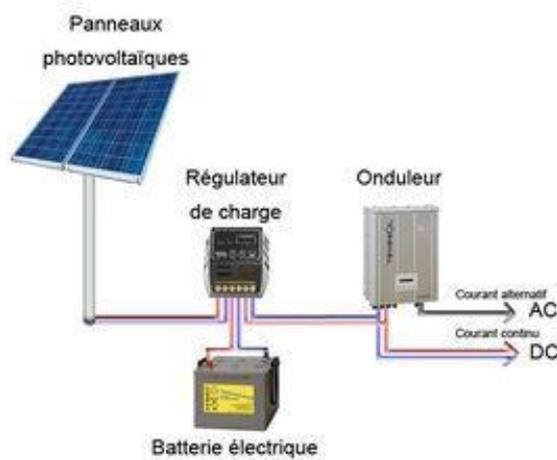
Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil).

#### ➤ Système autonome avec batterie

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée (Figure I.17). Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.



**Figure I.15** : Système PV autonome

### ➤ Les systèmes autonomes sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batteries sont représentés par une charge de type continu et sont alimentés directement par le générateur photovoltaïque (GPV), car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge. [12]

#### II.4.2. Système PV raccordé au réseau

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique [13].



**Figure I.16** : Système PV raccordé au réseau.

### II.4.3. Système PV hybride

Les systèmes PV hybrides intègrent un générateur PV avec un autre : éoliennes, groupe électrogène... et parfois même le réseau public. En règle générale, les systèmes de batterie stockent l'énergie afin de ne pas perdre d'énergie provenant de sources aléatoires telles que l'énergie solaire ou éolienne.

La difficulté de tels systèmes est d'équilibrer les différentes sources d'énergie pour les optimiser, car nous savons tous que la source de chaleur (diesel, gaz, etc.) et le réseau public sont toujours les recours de dernier recours.

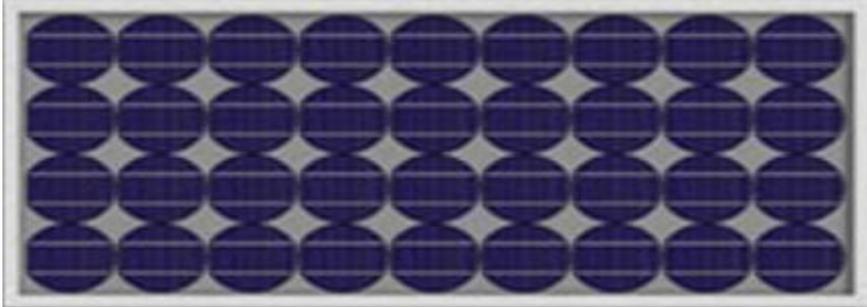
## II.5. Le générateur photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques représentent une partie de la production d'énergie électrique. Cette partie est principalement constituée d'un ou plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules sont assemblés à partir de cellules photovoltaïques en série/parallèle pour convertir l'énergie solaire en électricité [14].

### II.5.1. Module photovoltaïque

Pour produire plus d'électricité, les cellules solaires sont assemblées dans un module (Figure I.19). Plusieurs cellules en série augmentent la tension pour un même courant, tandis qu'en parallèle augmentent le courant tout en maintenant la tension. Les cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation en polymère EVA (éthylène acétate de vinyle), la face avant est

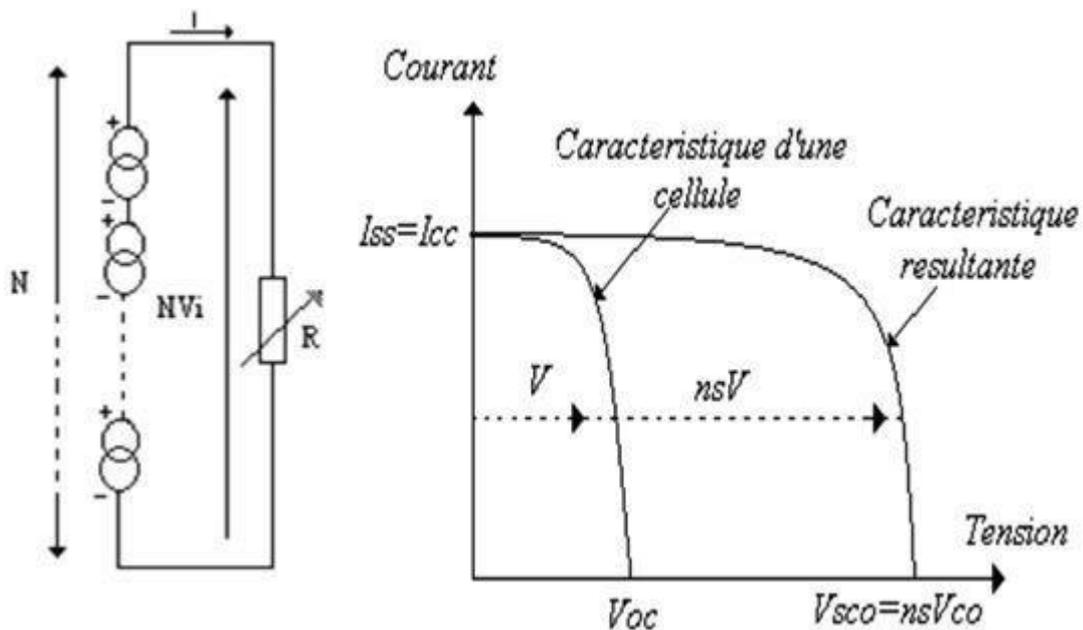
protégée par du verre trempé à haute transmittance et bonne résistance mécanique, et la face arrière est protégée par du polyéthylène [15].



**Figure I.17** : Module photovoltaïque

### II.5.1.1. Montage en série

Une association de  $N_s$  cellules en série (Figure I.20), permet d'augmenter la tension du générateur PV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. [15]



**Figure I.18** : caractéristiques de groupement série des cellules.

### II.5.1.2. Montage en parallèle

Une association parallèle de  $N_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. [16]

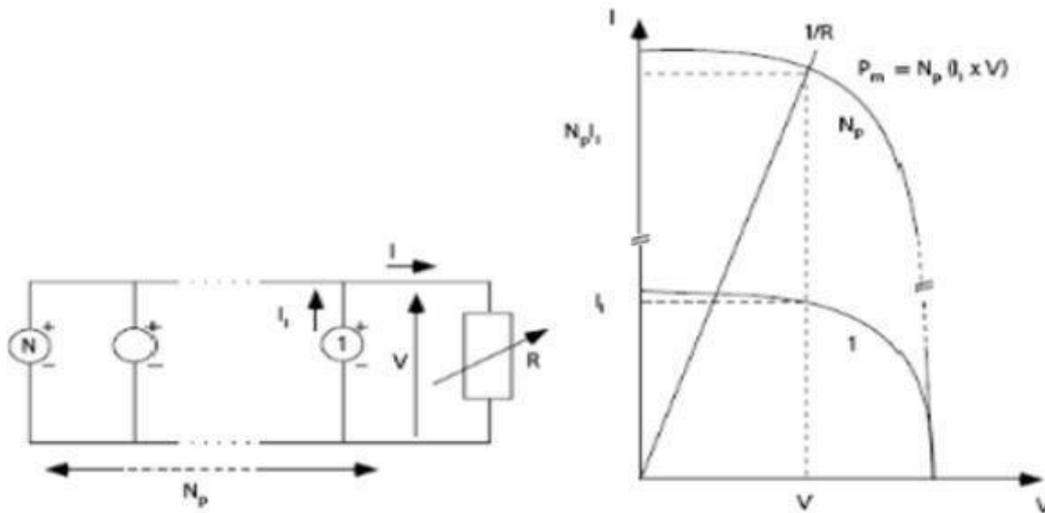


Figure I.19 : caractéristiques de groupement parallèle des cellules.

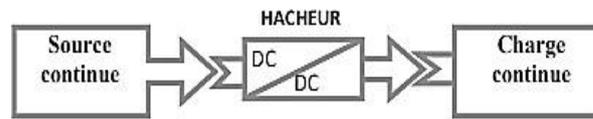
## II.6. Les convertisseurs statiques

Un convertisseur est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge, alors il portera le nom de convertisseur continu/continu (DC/DC), soit entre la batterie et la charge et il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu/alternatif (DC/AC). Ces convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa, et de maximiser la production de puissance des sources.

Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [17].

### II.6.1. Les convertisseur DC/DC (hacheur)

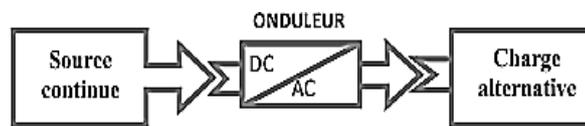
Un hacheur est un convertisseur CC/CC qui convertit l'énergie continue à un niveau de tension (ou de courant) donné en énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation est nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour alimenter des charges continues.



**Figure I.20** : Schéma de principe d'un hacheur.

### II.6.2. Les convertisseur DC/AC (onduleur)

Un onduleur est un composant électronique qui permet la conversion d'une tension continue en une tension alternative (sinusoïdale). Ils sont généralement utilisés pour générer une tension alternative et également pour contrôler les moteurs à courant alternatif.



**Figure I.21** : Schéma de principe d'un onduleur.

## II.7. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

### II.7.1. Avantages

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni de déchet toxique par son utilisation.
- Pas de pollution, ni émissions ou odeurs discernables.
- Etre des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- Grande fiabilité.
- Etre combinés avec d'autres sources d'énergies pour augmenter la fiabilité du système.
- Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant [18].

### II.7.2. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

## **II.8. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part les différents types de production d'hydrogène et les modes de stockage ainsi le transport et les applications d'hydrogène. D'autre part nous avons donné un aperçu général sur les différentes notions importantes pour l'étude d'un système solaire photovoltaïque. Nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi les différents types des cellules photovoltaïques et les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.

---

# Chapitre II: modélisation du système de production d'hydrogène

## II.1. Introduction

La modélisation d'un système physique donné consiste à établir son modèle mathématique, afin de le simuler sous un logiciel mathématique (dans notre cas Matlab/Simulink), comprendre son fonctionnement et faciliter son dimensionnement.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la structure d'une cellule électrochimique (électrolyseur) couplée à des panneaux photovoltaïques, commençant par la modélisation d'une cellule photovoltaïque, Après nous allons passer à la modélisation d'un électrolyseur type PEM, et nous terminons par la modélisation de couplage générateur PV-Electrolyseur

## II.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série  $R_s$  mais aussi des courants fuites modélisés par une résistance parallèle  $R_p$ .

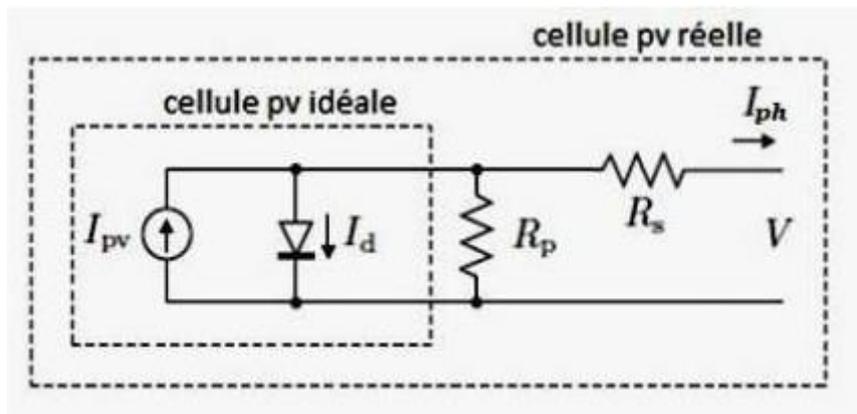


Figure II.1 : Modèle de la cellule PV.

### II.2.1 Générateur photovoltaïque idéal

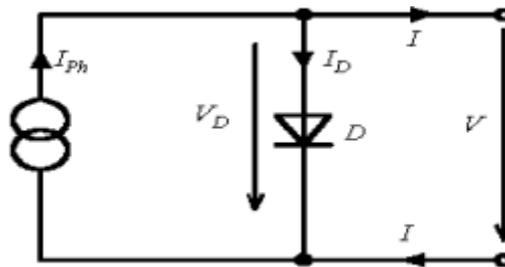
Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Si l'on

connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant  $I$  et le reste, le courant  $I_D$ , dans la diode. On a alors la relation [19] :

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

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_D \quad (\text{II.2})$$



**Figure II.2.** Modèle simplifié d'une cellule PV

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique V-I est donnée par la relation :

$$I_{D=I_S} \left( \exp \left( \frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec

$I_S$  : courant de saturation inverse de la diode

$V_T = \frac{A_0 k T}{q}$  : est la tension thermique, T est la température de la jonction en Kelvin, q est la

charge de l'électron, k est la constante de Boltzmann

$A_0$  : Le facteur de non idéalité de la jonction

$V_D$  : est la tension aux bornes de la diode.

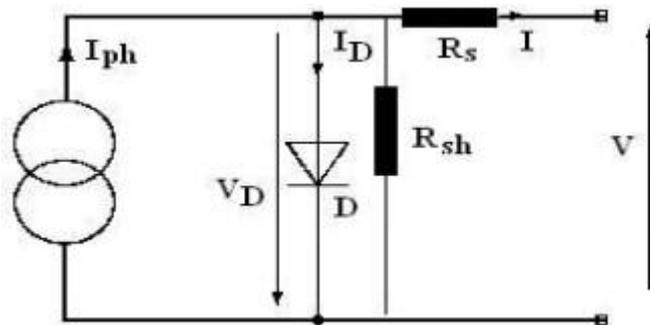
Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_S \left( \exp \left( \frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

## II.2.2. Générateur photovoltaïque “réel”

La cellule photovoltaïque convertit les photons du soleil directement en énergie électrique. Le modèle à cinq paramètres est utilisé pour calculer la puissance électrique du panneau photovoltaïque. Avec ce modèle, il est possible de modéliser une seule cellule solaire, un module photovoltaïque ou un générateur contenant plusieurs modules. L'une des caractéristiques de ce modèle est que ses paramètres peuvent également être obtenus à l'aide de données généralement fournies par les fabricants. Le modèle est capable de prédire les performances des modules de silicium monocristallin et poly cristallin avec environ 6% [20]. Le schéma électrique équivalent est représenté par la figure suivante :



**Figure II.3** : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

$I_{ph}$  : Photo courant proportionnel au rayonnement solaire de la cellule  $G$

$I_D$  : Courant de diode

$I_0$  : Courant de saturation de la diode

$q$  : charge électron

$k$  : constante de Boltzmann

$n$  : Facteur d'idéalité du facteur de cellule solaire compris entre 1 et 5 en pratique

$T$  : température du panneau (k)

$R_s$  : Résistance série

$R_{sh}$  : Résistance shunt

Selon la figure (II.3), le courant de la cellule est donné par l'équation suivante [21]

$$I = I_{ph} - (I_D + I_{sh}) \quad (\text{II.5})$$

et

$$I_{sh} = \frac{(V+R_S \cdot I)}{R_{Sh}} \quad (\text{II.6})$$

D'après le modèle simplifié d'un cellule PV, on a :

$$I_{D=} I_S \left( \exp \left( \frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

D'après l'équation(II.7) la tension de la diode se calcule en fonction du courant et de la tension :

$$V_D = V + I * R_S \quad (\text{II.8})$$

En remplaçant l'équation (II.8) dans (II.7) on obtient :

$$I_{D=} I_S \left( \exp \left( \frac{V+I \cdot R_S}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Le courant qui traverse la résistance parallèle ( $I_{sh}$ ), peut être exprimé en fonction de la tension de diode et la résistance parallèle

$$I = \frac{-V_D}{R_{Sh}} = \frac{V+I \cdot R_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II.10})$$

Par la subtilisation des équations (II.8), (II.9) et (II.10) on trouve l'équation (II.11) :

$$I = I_{Ph} - I_0 * \left[ \exp \left( \frac{V+I \cdot R_S}{V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V+I \cdot R_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II.11})$$

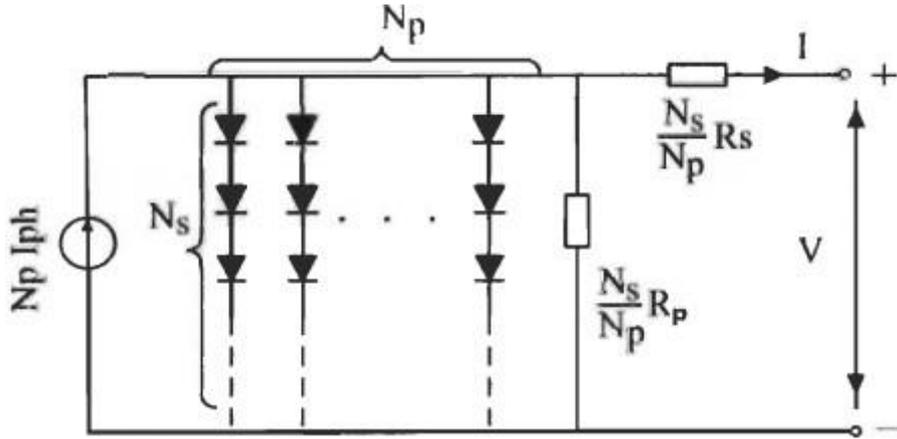
On remplacer  $V_T$  dans l'équation de courant :

$$I = I_{Ph} - I_0 * \left[ \exp \left( q \frac{V+I \cdot R_S}{A_0 K T} \right) - 1 \right] - \frac{V+I \cdot R_S}{R_{Sh}} \quad (\text{II.12})$$

Les cellules PV, généralement considérées comme ayant les mêmes caractéristiques, sont disposées en série et en parallèle pour former les modules PV le circuit équivalent du module PV peut être décrit comme illustré sur la figure (II.4) [22].

Donc l'expression du courant fourni par le module décrit :

$$I = N_P I_{Ph} - N_P I_0 * \left[ \exp \left( \frac{V}{N_S} + \frac{I R_S}{N_P} \right) - 1 \right] - \frac{N_P}{R_{Sh}} \left( \frac{V}{N_S} + \frac{I R_S}{N_P} \right) \quad (\text{II.13})$$



**Figure II.4 : Le circuit équivalent du module PV**

Où,  $N_s$  et  $N_p$  sont respectivement les nombres des cellules connectées en séries et en parallèles. Pour des modules supposés dépourvus de fuites ( $R_{sh}$  infinie et  $I_{Rsh} \sim 0$ ) la relation (II.12) est comme suite :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V + I R_s}{A_0 K T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.14})$$

A partir de cette équation il y a quatre paramètres inconnus :  $I_{ph}$  (photo-courant),  $I_0$  (courant de saturation), ( $A_0$  facteur d'idéalité) et ( $R_s$  résistance série) Il y a trois cas remarquables dans la caractéristique V-I :

- Dans le cas où  $V=0$  (cas de court-circuit) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{I_{cc} R_s}{A_0 K T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.15})$$

- Dans le cas où  $I=0$  (cas de circuit ouvert) :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{co}}{A_0 K T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.16})$$

- Dans le point de puissance maximale :

$$I_m = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_m + I_m R_s}{A_0 K T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.17})$$

Pour déterminer les paramètres inconnus on utilise la méthode explicite simplifiée :

On suppose que :

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (\text{II.18})$$

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{co}}{A_0 K T} \right) \right] \quad (\text{II.19})$$

$$I_m = I_{ph} - I_0 * \left[ \exp \left( q \frac{V_m + I_m * R_s}{A_0 K T} \right) \right] \quad (\text{II.20})$$

$$I_0 = I_{cc} * \left[ \exp \left( -q \frac{V_{co}}{A_0 K T} \right) \right] \quad (\text{II.21})$$

$$I = I_{cc} * \left[ \exp \left( q \frac{(V - V_{co} + (I * R_s))}{A_0 K T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.22})$$

$$I_m = I_{cc} * \left[ 1 - \exp \left( q \frac{(V_m - V_{co} + (I_m * R_s))}{A_0 K T} \right) \right] \quad (\text{II.23})$$

### II.2.3. Paramètres de champ photovoltaïque

$$I_{0(gén)} = N_P * I_{0(mod)} \quad (\text{II.24})$$

$$V_{r(gén)} = N_S * V_{r(mod)} \quad (\text{II.25})$$

$$R_{s(gén)} = \frac{N_S}{N_P} * R_{s(mod)} \quad (\text{II.26})$$

Donc l'équation de générateur est de la forme :

$$I_{gén} = I_{cc} - I_0 * \left[ \exp \left( q \frac{(V_{gén} + (I_{gén} * R_{s(gén)}))}{A_0 K T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.27})$$

$N_P$  : nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque

$N_S$ : nombre de module série dans le champ photovoltaïque

$I_{gén}$ : le courant délivré par le générateur

Et on peut écrire la relation comme suite :

$$= \frac{+I}{-I} \quad (\text{II.28})$$

$$V_{gén} = -I_{gén} * R_{s(gén)} + V_T * \log \left( \frac{-I_{gén} + I_{cc} + I_0}{I_0} \right) \quad (\text{II.28})$$

### II.2.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés<sup>2</sup> paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique V(I).

- **La puissance crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ).

**La caractéristique  $I=f(V)$**  : Courbe représentant le courant débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension de circuit-ouvert,  $V_{co}$** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement plein soleil.

- **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où  $V = 0$ . (Pratiquement  $I_{cc} = I_{ph}$ )

- **La puissance maximale  $P_{max}$** : C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale  $V_{max}$  et à une intensité maximale  $I_{max}$

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (\text{II.29})$$

**Rendement** : Rapport de la puissance électrique maximale  $P_{max}$  à la puissance de radiation incidente  $P_{inc}$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (\text{II.30})$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

- **Facteur de forme FF**: Rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de  $(I_{cc}, V_{co},)$

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (\text{II.31})$$

### II.2.5. Evolution de la caractéristique (V-I)

La courbe (V-I) de l'équation (III.27) est une courbe arbitraire de référence, applicable à un niveau d'éclairement et de température de la cellule en particulier. Pour d'autres valeurs d'éclairement et de température, l'évolution de l'équation (III.27) ce fait par les équations suivantes :

$$\Delta T = T_c - T_{c\text{ref}} \quad (\text{II.32})$$

$$I_0 = I_{0\text{ref}} * \left( \frac{T_c}{T_{c\text{ref}}} \right) * \exp(E_{\text{gap}} * \frac{q}{A*K} * \left( \frac{1}{T_{c\text{ref}}} - \frac{1}{T_c} \right)) \quad (\text{II.33})$$

$$V_{CO} = V_{CO\text{ref}} + \left( \frac{A*K*T}{q} \right) * \log \left( \frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) + \beta * \Delta T \quad (\text{II.34})$$

$$I_{CC} = \left( \frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) * I_{CC\text{ref}} + \alpha * \Delta T \quad (\text{II.35})$$

$$Vm = Vm_{\text{ref}} + \left( \frac{A*K*T}{q} \right) * \log \left( \frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) + \beta * \Delta T \quad (\text{II.36})$$

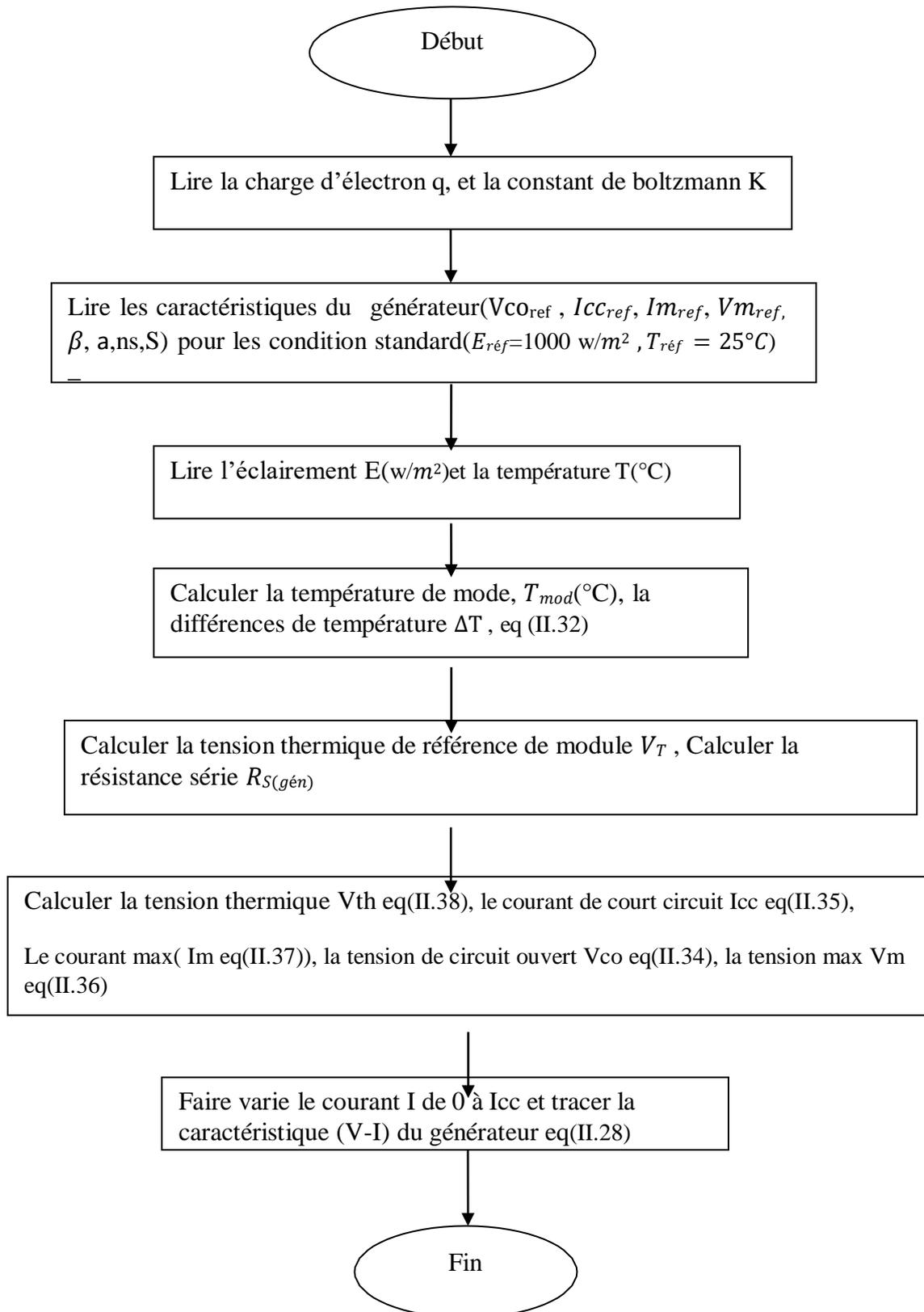
$$Im = \left( \frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) * Im_{\text{ref}} + \alpha * \Delta T \quad (\text{II.37})$$

$$Vth_{\text{mod}} = \frac{Vth_{\text{mod}(\text{réf})} * T_c}{T_{c\text{réf}}} \quad (\text{II.38})$$

a : Coefficient de variation du courant en fonction de la température

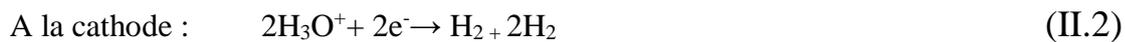
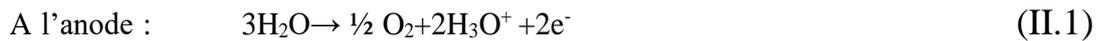
Q : Coefficient de variation de la tension en fonction de la température

## II.2.6. L'organigramme pour tracer la caractéristique (V-I)



### II.3. Modélisation d'électrolyseur

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium ( $H_3O^+$ ) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits ( $H_2$  et  $O_2$ ), selon les réactions suivantes [2] :



Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM

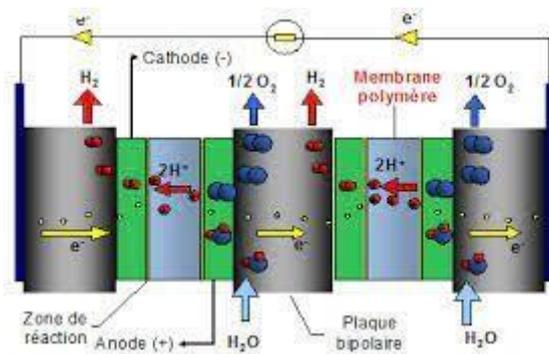
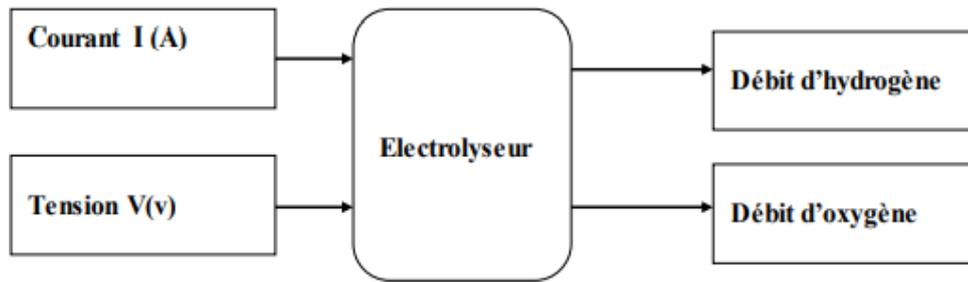


Figure II.5 : L'électrolyse PEM

#### II.3.1. Modèle d'électrolyseur

Un électrolyseur à eau composé de plusieurs électrolyseurs connectés en série et en parallèle. Le modèle d'électrolyseur considéré ici est basé sur unicellulaire. Calcul de la tension de fonctionnement et du débit requis. La teneur en hydrogène et en oxygène se fait par cellule, tandis que la valeur correspondant à l'ensemble de l'unité d'électrolyse se trouve simplement multiplier par le nombre de batteries en série et en parallèle.

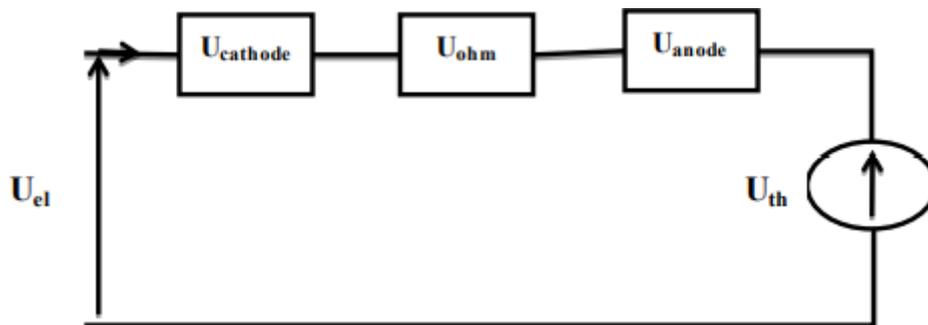
Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur sont représentées ci-dessous :



**Figure II.6** : Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur

L'électrolyseur utilisé dans cette étude est de type PEM membrane échangeur de proton de gamme de laboratoire constitué d'une cellule avec le composé Pt/Nafion/Pt, EME électrode membrane électrode, dans laquelle le platine métallique est en plaqué à la surface de membrane, [3]. La figure dans l'Annexe présente les caractéristiques typiques de tension en fonction de la densité de courant pour une cellule d'électrolyseur à des différentes températures de fonctionnement. L'électrolyseur est une charge pour le système, son point de fonctionnement est défini en fonction de sa connexion avec la source d'énergie.

Le schéma équivalent d'électrolyseur :



**Figure II.7** : Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique

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

$$U_{el} = U_{cathode} + U_{ohm} + U_{anode} + U_{th} \quad (\text{II.39})$$

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

$U_{ohm}$ : Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur  $R_{el}$

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

$U_{th}$ : Tension théorique

Suivant la loi de Tafel, la tension d'une cellule s'exprime en fonction de la densité de courant par

$$V_e = a + b * \text{Log}(I) + c * I \quad (\text{II.40})$$

Les paramètres a, b et c pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression). Pour un électrolyseur constitué de nombre des cellules série s et parallèles p.

D'après l'équation (II.33) la relation tension-courant de la loi de Tafel, pour cette configuration d'électrolyseur, est donnée par l'équation suivante :

$$V_{N_{cellules}} = s * \left( a + b * \text{Log} \left( \frac{I_e}{P} \right) + c * \frac{I_e}{P} \right) \quad (\text{II.41})$$

$V_{N_{cellules}}$ : La tension totale d'électrolyseur

$I_e$ : Le courant total d'électrolyseur.

- **Volume de production d'hydrogène**

Par l'utilisation de la loi des gaz parfaits le volume de gaz produit est calculé par l'équation suivante :

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{ItRT}{ZFP} = Q * t \quad (\text{II.42})$$

Tel que

$$n = \frac{I * t}{Z * F}$$

Par l'utilisation de la méthode d'intégration de trapèze, on a calculé le volume d'hydrogène pendant un intervalle du temps.

- **Débit de production d'hydrogène**

$$Q = \frac{N_{cellules} * R * I * T}{Z * F * P} = \frac{N_{cellules} * 8.32 * I * T}{2 * 96500 * 0.1013} \quad (\text{II.43})$$

V : volume d'hydrogène produit (ml)

Q : Débit de production d'hydrogène (ml/s)

T : Température de l'électrolyte

R : Constant des gaz parfaits

Z : Nombre d'électron requis pour libérer une molécule

N cellules : Nombre de cellules d'électrolyseur s\*p

F : Constant de Faraday

P : Pression atmosphérique

T : Temps correspondant à la production de volume V

$I_f$ : Le courant de fonctionnement d'électrolyseur

- **Le rendement d'électrolyseur**

Le rendement d'électrolyseur est donné par l'équation suivante [38]:

$$\eta_{el} = \frac{1.32 * s}{V_f} \quad (\text{II.44})$$

$V_f$ : La tension du point de fonctionnement.

s : Nombre de cellules séries

### II.3.2. La caractéristique courant-tension d'électrolyseur

Pour notre étude nous avons choisi l'électrolyseur de type PEM. A partir des graphes expérimentaux avec différentes températures (Voir L'annexe 1), on a choisi le graphe de la température T=80 °C et les points (V-I) qui sont indiqués sur le tableau suivant :

**Tab. II.1:** Données expérimentaux d'électrolyseur extrait des caractéristiques (V-I)

<b>T=80°C</b>	
<b>Courant (A)</b>	<b>Tension(V)</b>
0.14286	1.6857143
0.28571	1.7333333
0.42857	1.762069
0.5714	1.7896552
0.85714	1.8275862
1.000	1.85
1.2857143	1.873333
1.7142857	1.9066667
2.000	1.933333
2.5714286	1.973333
3.000	2.0071429
4.000	2.0821429
5.000	2.15

Pour déterminer les facteurs  $a$ ,  $b$  et  $c$  nous choisissons 3 points à partir du graphe de notre électrolyseur avec  $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , et on a remplacé les valeurs des courant et tension de ses point dans l'équation. Nous obtenons donc, le système d'équations suivant :

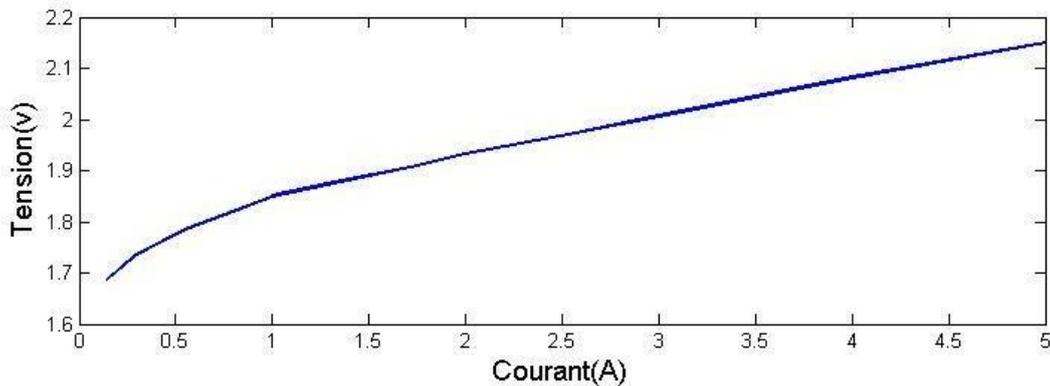
$$\begin{aligned} 1.6857143 &= a + b * \log\left(\frac{1}{7}\right) + c * \left(\frac{1}{7}\right) \\ 1.85 &= a + b * \log(1) + c * (1) \\ 2.15 &= a + b * \log(5) + c * (5) \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

La solution de ce système d'équations donne les 3 facteurs :

$$\begin{cases} a = 1.8018 \\ b = 0.0632 \\ c = 0.0482 \end{cases}$$

En fin le modèle d'une cellule d'électrolyseur est écrit comme suit :

$$V = 1.801 + 0.0632 * \log(I) + 0.0482 * I \quad (\text{II.46})$$



**Figure II.8** : les courbes (V-I) d'électrolyseur expérimentale simulé pour  $T_{el}=80^{\circ}\text{C}$

#### II.4. Modélisation de couplage (GPV-Electrolyseur)

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

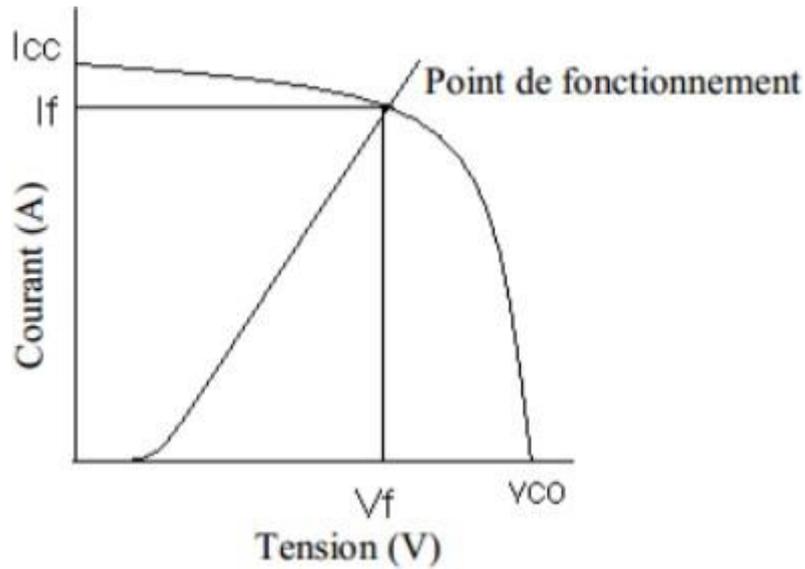


Figure II.9 : point de fonctionnement du système

#### II.4.1. Calcul du point de fonctionnement :

##### Les conditions de couplage :

- La tension de l'électrolyseur doit être égale à la tension du générateur *photovoltaïque* :

$$1.801 + 0.0632 * \log(I) + 0.0482 * I = -I_{\text{gén}} * R_{s(\text{gén})} + V_{\text{th}} * \log\left(\frac{-I_{\text{gén}} + I_{\text{cc}} + I_0}{I_0}\right) \quad (\text{II.47})$$

- Le courant du générateur doit être égal au courant de l'électrolyseur :  $I_g = I_e$

$$f(t) = 1.801 - 0.0632 * \log(I) - 0.0482 * I - I_{\text{gén}} * R_{s(\text{gén})} + V_{\text{th}} * \log\left(\frac{-I_{\text{gén}} + I_{\text{cc}} + I_0}{I_0}\right) = 0 \quad (\text{II.48})$$

L'équation (II.40) est une équation non linéaire. La résolution de cette équation se fera par la méthode de Newton-Raphson d'écrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.49})$$

$f'(x_n)$  : Le dérivé de la fonction  $f(x_n)$

$x_n$  : La présente itération.

$x_{n+1}$  : L'itération suivante.

- **Le rendement global du système :**

Le rendement global est calculé par :

$$\eta_s = \frac{I_f * 1.23 * s}{E * \delta} \quad (\text{II.50})$$

E : éclairement ( $W / m^2$ ),  $\delta$  : surface de générateur ( $m^2$ ).

- **Le rendement d'adaptation :**

$$\eta_u = \frac{I_f * V_f}{I_m * V_m} \quad (\text{II.51})$$

- **Le rendement de générateur photovoltaïque :**

$$\eta_s = \frac{I_f * V_f}{E * \delta} \quad (\text{II.51})$$

## II.5. Dimensionnement d'électrolyseur :

Pour assurer l'adaptation de l'électrolyseur au générateur PV avec l'éclairement de  $E=569W/m^2$ . Nous avons calculé les nombres des cellules séries et parallèles d'électrolyseur, en suivant les étapes suivantes et finalement nous arrondissons les valeurs de s et p à des nombres entiers car ils sont souvent décimaux

- **Calcule p et s d'électrolyseur**

Pour calculer p et s on résout l'équation suivant :

$$V_f = V_{max} = s * (1.801 + 0.0632 * \log(\frac{I_{max}}{p}) + 0.0482 * (\frac{I_{max}}{p}))$$

$$I_{cellule} = I_{max}/p$$

La résolution de ce système est :

$$s=8 \quad p=1$$

## **II.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles mathématiques décrivant le comportement du module photovoltaïque et de l'électrolyseur. La modélisation de chaque composant du système a été élaborée à partir de ces modèles. Nous avons défini les paramètres du champ et du cellule photovoltaïque, nous avons déterminé les points de fonctionnement, les différents rendements et la production en hydrogène. Nous avons vu la modélisation d'électrolyseur, les caractéristiques courant-tension électrolyseur et aussi la modélisation de couplage (GPV- électrolyseur).

---

# Chapitre III : Commande et simulation du système de production d'hydrogène

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la simulation de la chaîne de production d'hydrogène en utilisant un système de conversion photovoltaïque à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Nous décrivons dans cette partie la caractérisation expérimentale des composants du système de couplage PV-électrolyseur, ensuite les résultats de simulation sont présentés pour justifier les modèles mathématiques appliqués au chapitre II.

### III.2 Résultats de Simulation

#### III.2.1 Le module photovoltaïque

Nous avons choisi le module photovoltaïque du type **poly cristallin (Kyocera KG200GT)** avec les caractéristiques dans les conditions standards ( $E=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25 \text{ °C}$ ) voir le tableau (III.1) :

**Tab (III.1).** Caractéristique de module photovoltaïque type **Kyocera KG200GT**

$I_{CC}$	<b>8.21A</b>
$V_{OC}$	<b>32.9V</b>
$V_{MPP}$	<b>26.3V</b>
$I_{MPP}$	<b>7.61A</b>
$N_S$	<b>54</b>
$K_V$	<b>-0.123V/K</b>
$K_i$	<b>0.0032A/K</b>

#### III.2.1 .1. Influences de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ :

➤ **Influence de l'éclairement :**

Les figures (III.1) et (III.2) donnent respectivement les caractéristiques de  $I(v)$  et  $p(v)$  en fonction du rayonnement solaire incident de la température ambiante, on constate que les variations du photo courant sont proportionnelles à l'éclairement solaire incidente. Par

conséquent, le courant de sortie du générateur  $p$  est fortement influencé par l'éclairement. Il ressort très clairement des figures que l'augmentation de l'éclairement implique une augmentation de la puissance de sortie des modules pv .

L'expression du courant  $I_{ph}$ , est donnée dans l'équation

$$I_{Ph} = [I_{CC} + K_i (T - 298)] \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (\text{III.1})$$

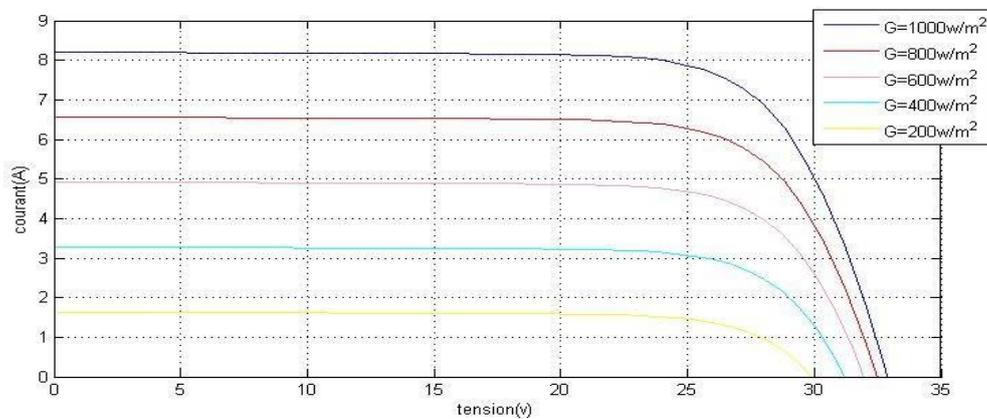
Avec :

$I_{CC}$  : Courant de court-circuit à  $T_{ref} = 25^\circ \text{C}$  et  $G^* = 1 \text{kW} / \text{m}^2$

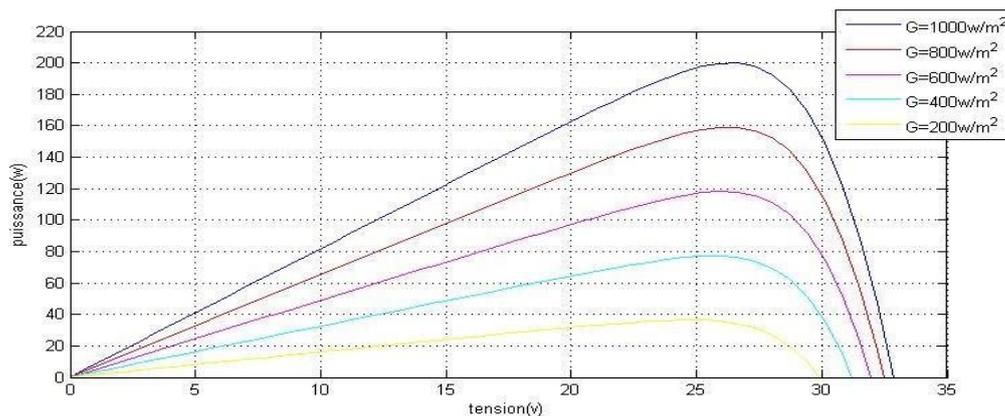
$K_i$  : Coefficient de la température de court circuit

$G^*$  : Référence d'irradiation  $1 \text{kW} / \text{m}^2$

$T_{ref}$  : Température ambiante ( $25^\circ \text{C}$ )



**Figure(III.1) :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant -tension  $I(V)$



**Figure( III.2) :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension  $P (V)$ .

➤ **Influence de la température :**

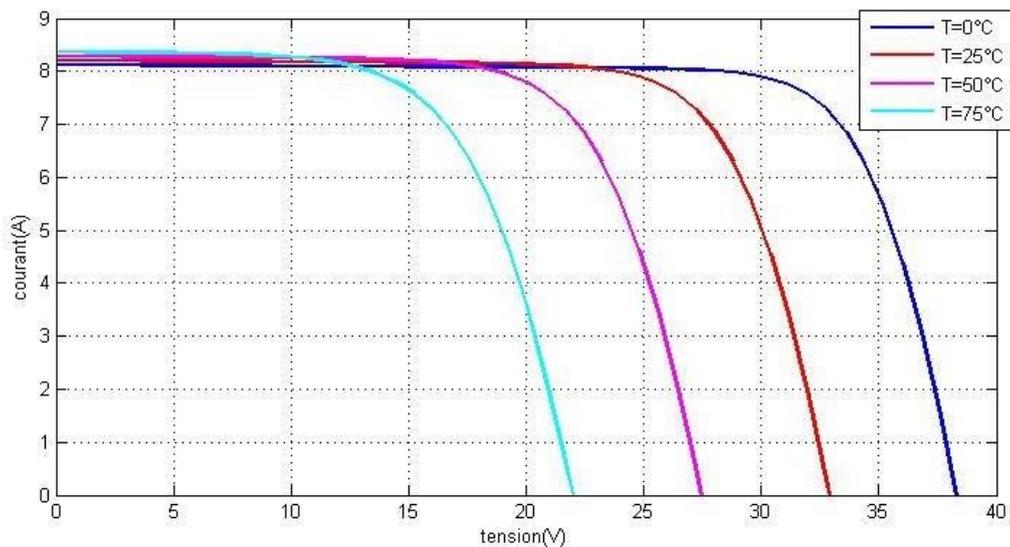
La température est un paramètre très important dans le comportement du module. On peut voir sur la figure (III.3), la caractéristique  $I(V)$  pour une valeur d'éclairement constante et différentes valeurs de température, que le court courant  $I_{CC}$  . Varie peu avec la température. Inversement, une température accrue diminue la tension en circuit ouvert et entraîne une réduction de la puissance maximale disponible dans les modules  $PV$  figure (III.4), la tension en circuit ouvert du module  $PV$  en fonction de la température et de l'irradiation et est par la relationsuivante :

$$V_{CO} = V_{OC}^* + \alpha_2(T - T^*) - (I_{CC} - I_{CC}^*)R_S \quad (III.2)$$

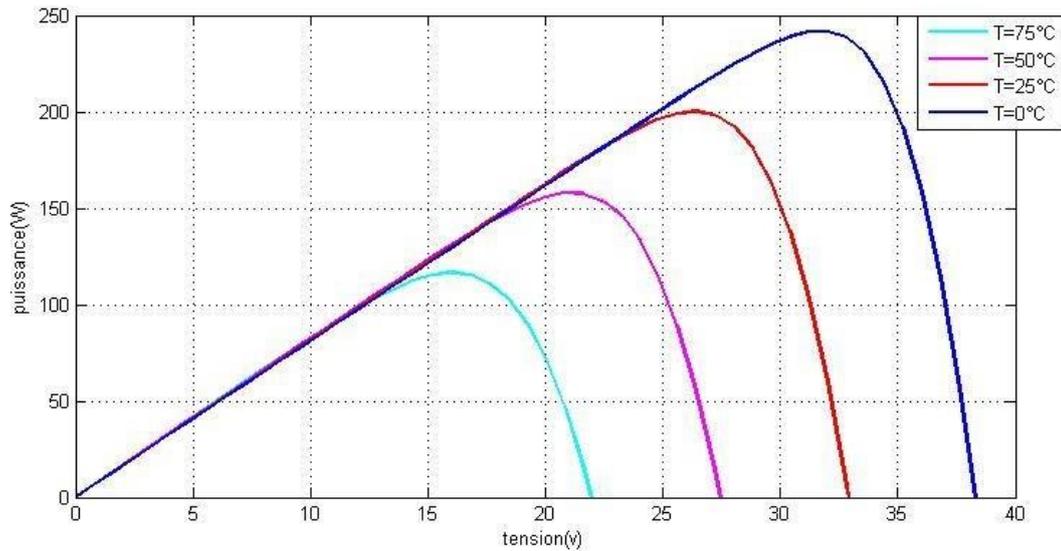
Avec :

$V_{OC}^*$  Et  $I_{CC}^*$  : représentent respectivement la tension à vide et le court circuit à  $T=25^\circ\text{C}$  et  $G=1\text{kW}/\text{m}^2$

$\alpha_2(\text{V}/^\circ\text{C})$  : coefficient obtenu empiriquement



**Figure( III.3) : Influence de la température sur la caractéristique courant - tension  $I(V)$**



**Figure( III.4) :** Influence de la température sur la caractéristique puissance -tension.

### III.2.2 Le couplage PV-électrolyseur :

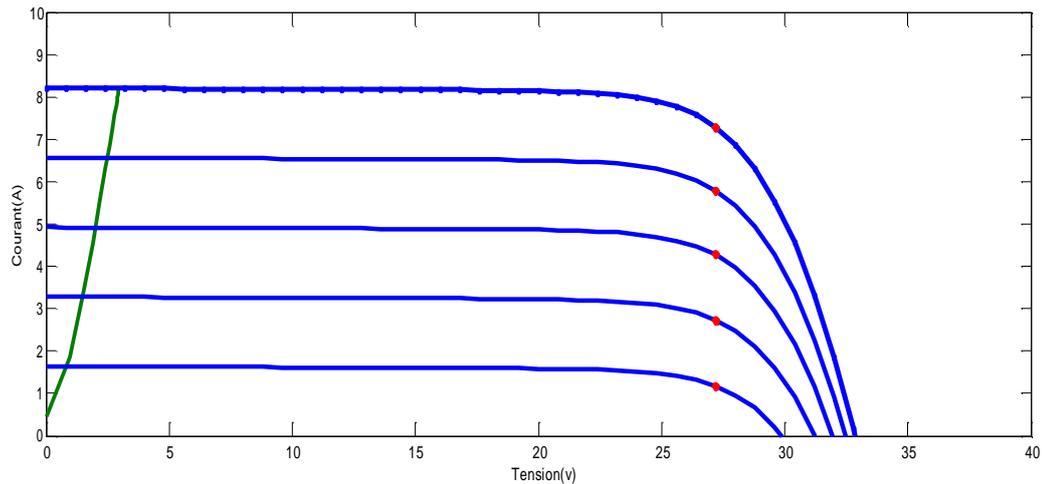
Pour exécuter notre programme de couplage nous avons choisi les données de l'éclairement,  $E(W/m^2)$  et de température  $T (^{\circ}C)$ . Nous présentons les résultats de simulation de couplage direct entre un panneau solaire **Kyocera KG200GT** et une seule cellule d'électrolyseur de type PEM.

Après l'exécution de notre organigramme de couplage direct sous MATLAB nous avons trouvé les résultats suivants :

- **Les caractéristiques (I-V) du couplage**

Nous présentons les résultats de simulation entre un panneau solaire **Kyocera KG200GT** et l'électrolyseur avec **une seule** cellule et le couplage entre eux.

L'excitation du couplage par un programme MATLAB représente les résultats suivants :



**Figure( III.5) :** caractéristique (I-V) du couple, une cellule d'électrolyseur- module PV

La figure (III.5) représente la caractéristique (I-V) de générateur photovoltaïque et l'électrolyseur dans le cas d'utilisation d'une seule cellule avec différentes valeurs d'éclairements et de températures.

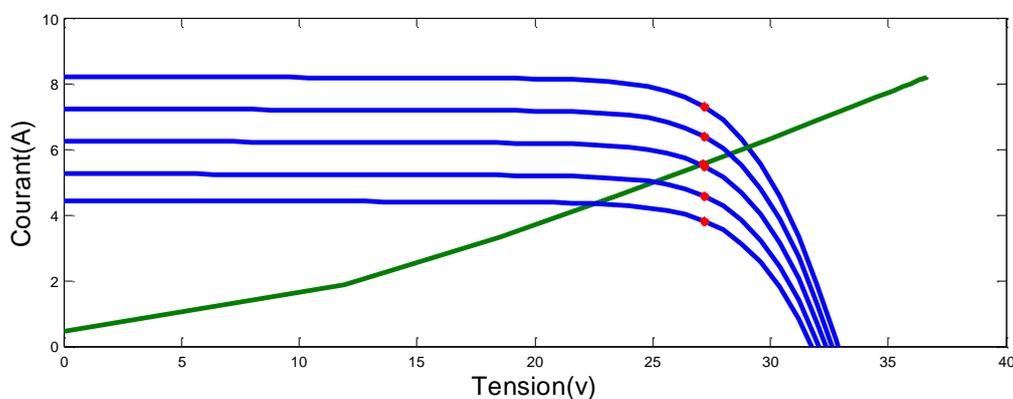
Le fonctionnement d'électrolyseur est défini par les points d'intersection entre la courbe (I-V) de GPV et l'électrolyseur.

Dans ce cas nous avons observé que la courbe d'électrolyseur ne passe pas par les points de puissance maximaux de générateur photovoltaïque.

- **Résultat de simulation après le dimensionnement d'électrolyseur :**

Après le dimensionnement nous avons exécuté notre programme sous MATLAB :

- **Caractéristique de couplage :**



**Figure (III.6) :** caractéristique (I-V) de couplage avec  $s=8$ ,  $p=1$

La figure III.6 représente la caractéristique (I-V) de générateur photovoltaïque et l'électrolyseur avec  $s = 8$ ,  $p = 1$  avec les différentes valeurs d'éclairements et de température. Dans ce cas nous observons un rapprochement remarquable entre les points de puissance maximale et les points de fonctionnement de système, surtout pour les moyens éclairements.

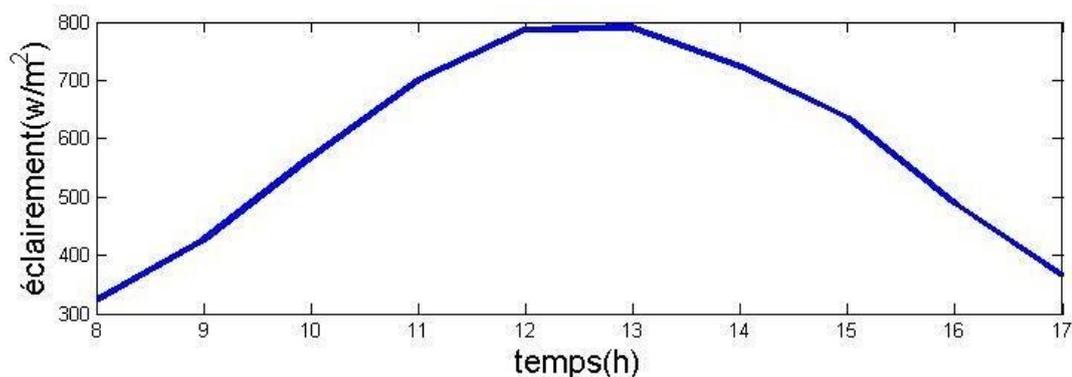
Le choix judicieux de nombre de cellules série et parallèles d'électrolyseur améliore le résultat d'adaptation de système de telle sorte les points de fonctionnement du système seront le plus proche possible des points de puissance maximal (MPP) de GPV.

Les résultats de simulation pour une journée aléatoire sont présentés dans le tableau (III.2) suivant :

**Tab. III.2** :Les résultats de simulation

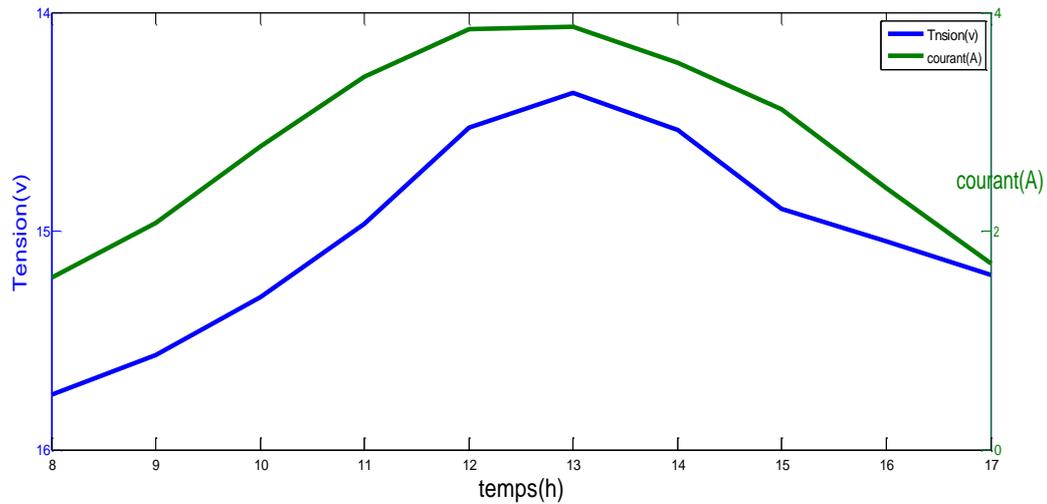
Heure	8 :00	9 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00	17 :00
<b>E(w/m<sup>2</sup>)</b>	323	426	569	700	787	790	724	636	488	364
<b>T(°C)</b>	29	31	33	35	36	38	37	36	34	33
<b>I(A)</b>	1.572	2.076	2.773	3.412	3.844	3.865	3.543	3.109	2.394	1.706
<b>V(v)</b>	15.75	15.57	15.30	14.97	14.53	14.37	14.54	14.9	15.05	15.20
<b>Q(ml/s)</b>	0.25	0.33	0.44	0.542	0.610	0.614	0.563	0.494	0.380	0.271
<b>V(L)</b>	0	1.043	2.430	8.198	6.272	8.476	10.59	12.49	14.07	15.24

### ➤ Eclairement



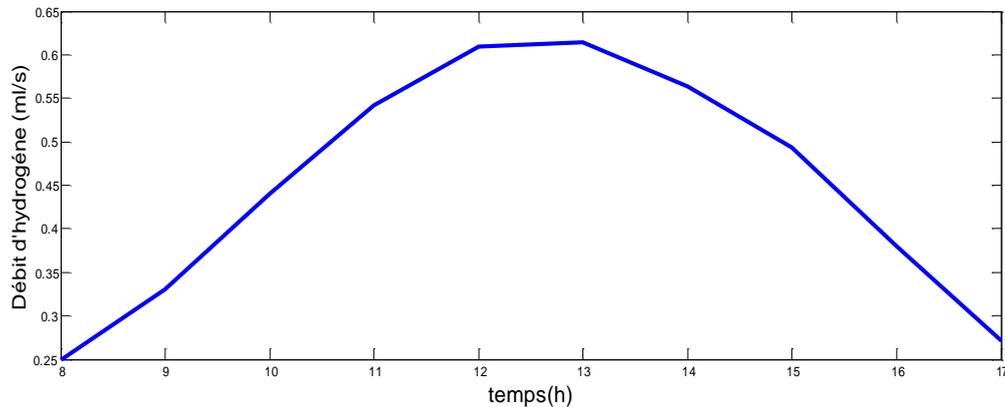
**Figure( III.7)** :variation de l'éclairement en fonction de temps

➤ Tension et courant d'électrolyseur



**Figure( III.8) :** Variation de courant et tension en fonction de temps

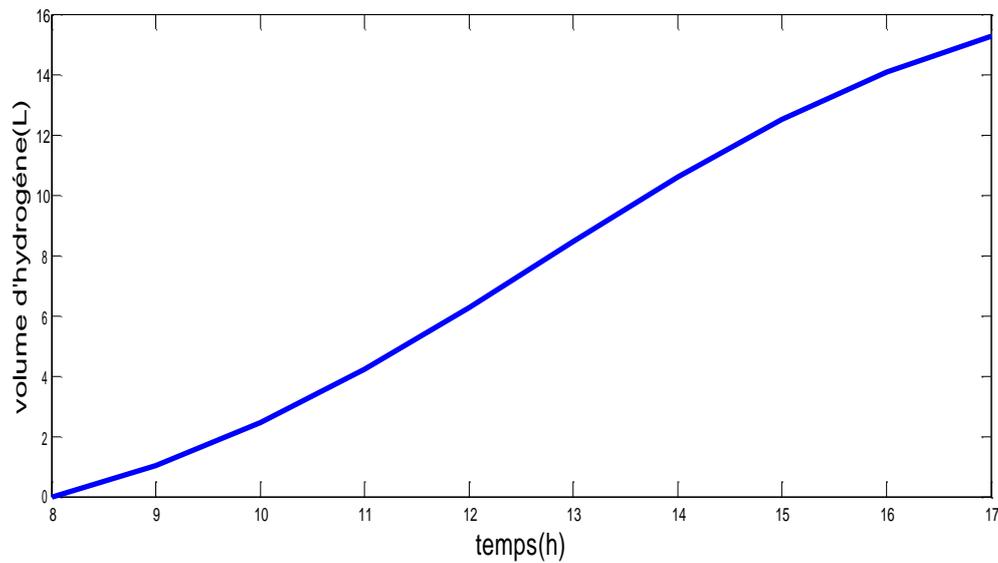
➤ Débit d'hydrogène



**Figure( III.9) :** Evolution de débit en fonction de temps

Les figures (III.8, III.9) montrent que le débit de production d'hydrogène varie proportionnellement avec le courant appliqué au borne de l'électrolyseur parce que les courbes de ces paramètres prend leur valeurs maximaux entre 12h et 13h et prend les valeurs minimaux à 8h et 17h.

➤ **Volume d'hydrogène**



**Figure (III.10) :** Evolution de volume en fonction de temps

La Figure (III.10) montre que le volume de l'hydrogène augmente proportionnellement pendant l'intervalle de temps.

### III.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système constitué d'un module photovoltaïque et l'électrolyseur, nous avons déterminé que notre système constitué de ces deux éléments les points de fonctionnements, la production en hydrogène. Le résultat de simulation du premier cas (une seule cellule d'électrolyseur) sont très faibles cela due au non-adaptation de système. Pour améliorer l'adaptation de système nous avons changé les dimensions d'électrolyseur, les résultats obtenus montre une nette amélioration dans le transfert de puissance entre le générateur PV et l'électrolyseur.

## Conclusion générale

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite. L'utilisation de cette électricité pour la production d'hydrogène via l'électrolyse de l'eau est présentée comme étant donc un moyen écologique de production d'un vecteur d'énergie " L'hydrogène". Les énergies renouvelables non polluantes ayant des ressources importantes dans notre pays, mais l'intermittence de leur production nécessite de trouver des moyens de stockage efficaces et respectant l'environnement.

Notre contribution dans ce travail est orientée vers l'étude des éléments de la chaîne de système photovoltaïque de production d'hydrogène pour améliorer l'adaptation entre les éléments du système, augmenter le rendement global du système et rendre cette méthode de production compétitive par rapport aux autres méthodes classiques de production.

Dans ce travail nous avons présenté la modélisation des éléments constituant le système de production d'hydrogène solaire tels que le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur et ensuite la simulation de couplage direct PV-Electrolyseur pour les différents éclairagements et températures.

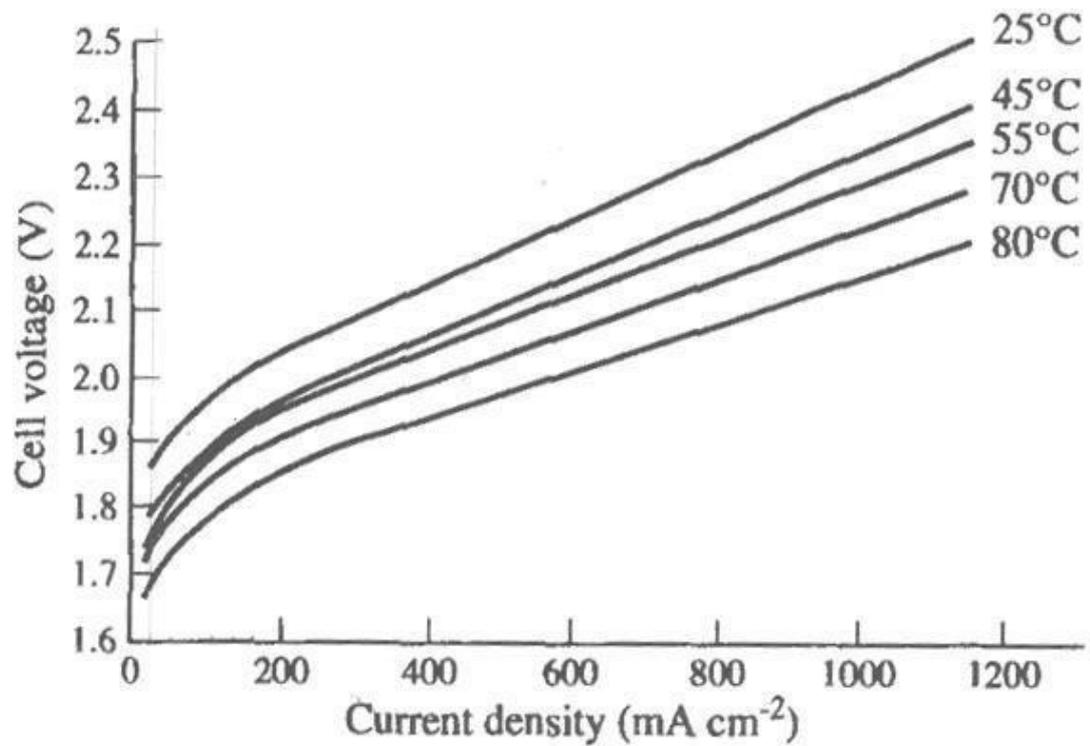
Les résultats obtenus permettent de voir dans le premier cas de couplage direct entre le GPV et l'électrolyseur d'une seule cellule que le volume d'hydrogène produit est très faible et une désadaptation entre le GPV et l'électrolyseur, les résultats obtenus dans le deuxième cas montrent un rapprochement considérable entre les points de puissances maximales du GPV et celle des points de fonctionnements de système et une nette amélioration des performances de système ce qui signifie une augmentation de volume d'hydrogène produit par le système.

## Bibliographies

- [1] : P. Marion, S. Vinot, production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles, fiche 3.1.1, Mémento de l'Hydrogène, AFH2, 2009.
- [2] : Khadidja BOUZIANE. Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyseur de l'eau, thèse de magister, UKMO, 2011.
- [3] : M. Kitano, K. Tsujimaru, M. Anpo, App Catalysis A : General, 314 ( 2006) 179- 183
- [4] : J.P. Jonchère « production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles » mémento de l'hydrogène 1ère émission : 2001 .
- [5] : Mémento de l'Hydrogène « liquéfaction, stockage et transport de l'hydrogene sous forme cryogenique »fiche 4.3 – révision de juillet 2011 source : afh2.
- [6] : Zhiming ZHANG. Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible, thèse de doctorat, UEVE, 2010.
- [7] : Office fédéral des questions conjoncturelles « Centrales photovoltaïques » Guide pour le dimensionnement et réalisation de projets 1996.Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [8] : B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », Solar Energy, vol. 4, no. 3, p. 1–19, Jul. 1960.
- [9] :Narimene DEBILI. Etude et optimisation en environnement Matlab/ Simulink d'un système de pompage photovoltaïque, thèse de magister en électronique, UC1, 2015.
- [10] : AkassewaTchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec .stockagehybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [11] : A, Labouret. M, Villoz. « Energie solaire photovoltaïque » le manuel du professionnel.3eme édition Dunod, 2006
- [12] : Yousef KHERIDLA, Kaddour KHINECHE. Modélisation et simulation d'un système de production d'hydrogène par voie photovoltaïque, thèse de master académique, UKMO, 2014.
- [13] : A. MOHAMMEDI « Etude d'un système de pompage photovoltaïque » Master en électrotechnique option : Electromécanique. Université de Bejaia, année 2010.
- [14] : E. Schiller, « Le pompage photovoltaïque » manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, universités d'Ottawa, EIER / CERR, 1998.
- [15] : T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, AFME, 1982.
- [16] : Sabrina MILOUDI. Etude d'un système photovoltaïque autonome à base d'hydrogène vert. Thèse de master académique, UKMO, 2016.

- [17] : S. MEZZAI, k. TADJINE « Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) » mémoire Master en Electrotechnique. Université Abderrahmane Mira-Bejaia 2015.
- [18] : B. Tarek, B. AMAR Radhia, “Étude D'un Système D'énergie Renouvelable Avec Système De Stockage”, Diplôme De Master, Université D'el-Oued, 2014.
- [19] : AkassewaTchapo SINGO. Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Thèse Doctorat , Université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [20] : M'RAOUI Abdelhamid. Étude de la production d'hydrogène par des sources renouvelables, Thèse Doctorat , UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN.
- [21] : MERAHI REDA. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse Doctorat , Université des Frères Mentouri Constantine.
- [22] : XUEYANG JIANG. ÉTUDE COMPARATIVE DE STRUCTURES DE CONVERTISSEURS POUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTÉS À UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE MOYENNE TENSION, thème MAÎTRISE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRE, 2019.

(Annexes 1)



**Figure** : Variations de caractéristique (I-V) d'électrolyseur avec différentes températures

[Source] P. Millet et al, « Design and performance of a solid polymer electrolyte water electrolyzer» International Journal of hydrogen Energy. Vol. 21, N°.2, pp. 87 - 93, 1996.