

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة بوابكر بكرايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En: Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Présenté par :

ZENAGUI Salah Izz El Arab

TABTI Mohammed El Amine

Sujet

## Production De L'hydrogène Par Voie Photovoltaïque

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M MERZOUG SM  
M MELIANI S-M  
M TIOURSI Mustapha  
M BENHABIB M C

Pr Université de Tlemcen  
Pr Université de Tlemcen  
Pr Université de Tlemcen  
Pr Université de Tlemcen

Président  
Examineur  
Encadreur  
Co-Encadreur

## *Remerciements*

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la sante et la volante d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, cz travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et la l'encadrement de **Mr TIOURSI Mustapha** on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nos remerciement s'adresse à **Mr BENHABIB M** pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.*

*Nos remerciement s'adresse également a tout nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

# *Dédicaces*

*A mes chers parents avec tout mon amour Je dédie cette thèse en premier à mon père. Tous les mots ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance pour ton dévouement et tes sacrifices, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'épauler. Je dédie cette thèse, puisse tu y trouver le fruit de tes efforts. A ma chère mère. Tous les mots ne pourraient témoigner de ma gratitude, aussi je te dédie cette thèse comme fruit de ton dévouement et l'expression de mon profond Amour.*

*A mon grand frère, Qui a toujours été là pour nous, supportant ses cadets avec son calme remarquable et cela malgré nos innombrables défaut, A mes petits frères et aussi ma grand sœur et toute ma petite famille , A tous mes amis , Qui l'accompagnent dans les péripéties de ma vie. Puisse dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.*

**Z.SALAH**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*À mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien inconditionnel, moral et financier, ses encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.*

*À ma sœur Souhila et à toute la famille TABTI.*

*À tout(es) mes cher(es) ami(es) Et toute la promotion 2022 command électrique à Tlemcen.*

**T.AMINE**

# SOMMAIRE

Contents

La liste des figures : .....	9
La liste des tableaux : .....	11
Nomenclature : .....	12
Introduction générale : .....	14
<b>I. Généralités sur l'hydrogène et ses applications</b> .....	<b>16</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>17</b>
<b>2. Propriété de l'hydrogène</b> .....	<b>17</b>
<b>3. Combustion hydrogène</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1. La combustion</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2. Explosion</b> .....	<b>21</b>
<b>4. Application d'hydrogène</b> .....	<b>21</b>
<b>4.1. Des applications stationnaires</b> .....	<b>21</b>
<b>4.2. Des applications mobiles</b> .....	<b>21</b>
<b>4.3. Des applications industrielles</b> .....	<b>21</b>
<b>5. Les modes de production d'hydrogène</b> .....	<b>22</b>
<b>6. le stockage de l'hydrogène</b> .....	<b>23</b>
<b>6.1. Sous pression</b> .....	<b>24</b>
<b>6.2. Sous forme liquide</b> .....	<b>24</b>
<b>6.3. Forme solide</b> .....	<b>24</b>
<b>7. Les multiples utilisations de l'hydrogène</b> .....	<b>25</b>
<b>8. L'hydrogène dans la transition énergétique</b> .....	<b>26</b>
<b>8.1. L'hydrogène et les enjeux de la transition énergétique</b> .....	<b>26</b>
<b>8.2. Pallier la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables avec la possibilité de stocker l'hydrogène</b> .....	<b>26</b>
<b>9. Impacts de l'hydrogène</b> .....	<b>26</b>
<b>Sur l'environnement</b> .....	<b>26</b>
<b>10. La production de l'hydrogène par les Énergies renouvelables</b> .....	<b>27</b>
<b>11. La production de l'hydrogène par l'énergie solaire</b> .....	<b>28</b>
<b>12. La production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau</b> .....	<b>28</b>

# SOMMAIRE

13.	Principe de fonctionnement l'électrolyse de l'eau .....	29
14.	Les Différentes Technologies D'électrolyseurs .....	30
14.1.	L'électrolyse alcaline.....	30
14.3.	L'électrolyse à haute température .....	32
15.	L'hydrogène comme vecteur d'énergie .....	32
16.	Conclusion .....	34
II.	Les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons(PEM) .....	36
1.	Introduction.....	37
2.	Historique .....	37
3.	Principe d'électrolyse de l'eau pour production d'hydrogène .....	38
4.	Les composants des électrolyseurs .....	38
5.	Conception des électrolyseurs .....	39
5.1.	Concept unipolaire.....	39
5.2.	Concept bipolaire.....	39
6.	Type d'électrolyse.....	40
7.	Electrolyseur de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM).....	40
7.1.	Description générale .....	40
7.2.	L'électrolyte .....	41
7.3.	Le catalyseur .....	41
7.4.	La membrane.....	42
7.5.	Principe de fonctionnement.....	42
7.6.	Rôles et propriétés des différents composants d'électrolyseur PEM.....	43
7.7.	Avantages de l'électrolyseur PEM .....	45
7.8.	Inconvénients de l'électrolyseur PEM.....	46
7.9.	Applications de l'électrolyseur PEM.....	46
8.	Comparaison de différentes technologies d'électrolyseurs.....	46
9.	Conclusion .....	47
III.	Les générateurs photovoltaïques.....	48
1.	Introduction.....	49
2.	L'énergie solaire .....	49
3.	Rayonnement solaire .....	49
3.1.	Rayonnement direct.....	50
3.2.	Rayonnement diffus .....	50
3.3.	Rayonnement réfléchi.....	50
3.4.	Rayonnement global .....	50
4.	Effet photovoltaïque .....	51

# SOMMAIRE

5.	Cellules photovoltaïques .....	51
5.1.	Principe de fonctionnement .....	52
5.2.	Les différents types de cellules photovoltaïques .....	52
6.	Générateur photovoltaïque .....	53
7.	Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) .....	58
8.	Protections classiques d'un GPV .....	59
9.	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	60
	Avantage : .....	60
	Inconvénients : .....	60
10.	Conclusion .....	60
IV.	Modélisation de l'électrolyseur .....	62
1.	Introduction .....	63
2.	Les Modèles utilisé pour l'électrolyseur PEM .....	63
2.1.	Modèle thermique .....	63
2.2.	Modèle électrochimique .....	64
2.3.	Modèle thermodynamique .....	65
3.	Modèle choisi .....	71
	Simulation de la caractéristique $I=f(V)$ : .....	72
4.	Conclusion .....	73
V.	Modélisation du générateur photovoltaïque .....	74
1.	Modèle choisi .....	76
1.1.	Modèle de simulation de la caractéristique I-V .....	76
1.2.	Paramètres de champ photovoltaïque .....	78
2.	Simulation de la caractéristique $I=f(V)$ .....	78
2.1.	résultats pour une température constante $T=25\text{ °C}$ et différents éclairagements .....	79
2.2.	résultats pour un éclairage constant $E=1000\text{ W/m}^2$ et différentes températures ...	80
2.3.	résultats pour une journée typique .....	81
VI.	Etude du couplage direct générateur PV / Electrolyseur .....	83
1.	Introduction .....	84
2.	première cas étudié 1 panneau PV et mise en série des cellules de l'électrolyseur .....	85
2.1.	calcul du nombre de cellules série ns optimal .....	85
2.2.	calcul du taux de production de $H_2$ .....	85
3.	deuxième cas étudié 2 panneaux PV en série et mise en série des cellules de l'électrolyseur .....	87
4.	Analyse et Interprétation .....	89
4.1.	Influence de la variation du nombre de cellules en série de l'électrolyseur .....	89

# SOMMAIRE

4.2. déduction de la relation entre le nombre de cellules PV( $N_s$ ) et nombre de cellules de l'électrolyseur ( $n_s$ ).....	91
5. Optimisation du taux de production de $H_2$ par la mise en série /parallèle des panneaux PV et des cellules de l'électrolyseur .....	93
5.1. aspect théorique sur l'influence de la mise en parallèle des cellules D'électrolyse ...	93
5.2. étude du couplage par la mise en série /parallèle des panneaux PV et des cellules d'électrolyseur .....	95
5.2.1. les cas :.....	95
5.2.1.1. cas où $N_{ps}=2$ ; $N_p=2$ .....	95
5.2.1.2. cas où $N_{ps}=2$ ; $N_p=4$ et $n_s=16$ .....	96
5.2.1.3. cas où $N_{ps}=2$ ; $N_p=8$ et $n_s=16$ .....	97
5.2.2. conclusion.....	98
5.2.3. Application à un cas réel.....	98
6. CONCLUSION : .....	101
CONCLUSION GENERALE.....	102
ANNEXES.....	105
Annexe 1 .....	106
Annexe 2 .....	107
Annexe 3.....	108
Bibliographiques .....	110
Résumé : .....	114

# LA LISTE DES FIGURES :

## La liste des figures :

Figure I.1 : Domaine d'explosivité du propane, du méthane et de l'hydrogène

Figure I.2 : Les procédés de la production hydrogène et leur application

Figure I.3 : Produire de l'hydrogène à partir de différentes sources

Figure I.4 : Les formes principales de stockage l'hydrogène.

Figure I.5 : Étapes de la production d'hydrogène jusqu'à son utilisation.

Figure I.6 : Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène.

Figure I.7 : Mécanisme de l'électrolyse.

Figure I.8 : Principe de l'électrolyse alcaline.

Figure I.9 : L'électrolyse PEM.

Figure I.10 : L'électrolyse SOEC.

Figure II - 1: Schéma de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse PEM

Figure II - 2: Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM

Figure II - 3:Formule chimique du Nafion.

Figure II - 4: Rendements des différentes technologies d'électrolyseurs.

Figure (III.1) : Composantes du rayonnement solaire au sol

Figure (III.2) : cellule photovoltaïque

Figure III.3: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Figure III.4: cellules photovoltaïque (a)monocristallines/ (b) poly cristallin/(c) amorphe

Figure III.5: caractéristiques  $I-V$  et  $P-V$  d'un générateur  $PV$

Figure III.6: caractéristiques  $I_{pv}-V_{pv}$  et  $P_{pv}-V_{pv}$  sous l'influence de ; (a) et (b): l'éclairement a température fixe, (c) et (d): la température à éclairement fixe.

Figure III.7: association de panneaux  $PV$  ; (n) en série ; (p) en parallèle ; (n,p) mixte

Figure III.8 Caractéristique d'un assemblage série/parallèle

Figure III.9: GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

# LA LISTE DES FIGURES :

Figure IV - 1: Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimique.

Figure IV.2 : Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale et simulé pour  $T_{el} = 80^{\circ}\text{C}$

Figure V.1: Courbes du panneau photovoltaïque montrant le point de puissance maximale  $P_{max}$  sur la courbe I-V et la courbe P-V

Figure V.2: Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque

Figure V.3 : Simulation de la caractéristique (I-V) avec différents éclairagements, pour  $T=25^{\circ}\text{C}$

Figure V.4 : Simulation de la caractéristique (P-V) avec différents éclairagements, pour  $T=25^{\circ}\text{C}$

Figure V.5: Simulation de la caractéristique (I-V) avec différentes températures, pour  $E=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure V.6 : Simulation de la caractéristique (P-V) avec les différentes températures, pour  $E=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure V.7 : Simulation de la caractéristique (I-V) avec des données réelles du site d'Ouargla

Figure V.8 Simulation de la caractéristique (P-V) avec des données réelles du site d'Ouargla

Figure-VI.1 : les courbes I(V) de journée typique à Ouargla.

Figure-VI.2 : caractéristiques I(V) pour différent heures.

Figure-VI.3 : caractéristiques I(V) pour différent heures de 2 PV mise en série.

Figure-VI.4 : la courbe I(V) d'électrolyseur avec différent nombre des cellules en série.

Figure-VI.5 : les courbes I(V) de PV et l'électrolyseur avec variation des PV en série.

Figure-VI.6 : la courbe I(V) d'électrolyseur avec différent nombre des cellules en parallèle.

Figure-VI.7 : les courbes I(V) de PV et l'électrolyseur avec variation des PV en parallèle.

Figure-VI.8 : les courbes I(V) pour 10h et 13h de 2 panneaux en parallèle.

Figure-VI.9 : les courbes I(V) pour 10h et 13h de 4 panneaux en parallèle

Figure-VI.10 : les courbes de I(V) pour 10h et 13h de 8 panneaux en parallèle

Figure-VI.11 : les courbes I(V) de 10h et 13

## La liste des tableaux :

Tableau- I.1 : Quelques propriétés physiques d'hydrogène.

Tableau -I.2 : Caractéristiques d'inflammation de l'hydrogène et du propane dans l'air À pression et température atmosphériques.

Tableau- I.3 : Comparaison de carburant En termes de prix, de santé et d'énergie et émission de dioxyde de carbone.

Tableau-IV. I : Données expérimentales d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-V) .

Tableau -V.1 : les caractéristiques de PV type BP 585F dont dans les conditions standards (E=1000 W/m<sup>2</sup> et T=25°C)

Tableau- V.2 : Les éclairissements et les températures de la journée 04/04/2004 à Ouargla.

Tableau-VI.1 : taux de production de H<sub>2</sub> pour 1 PV

Tableau-VI.2 : taux de production de H<sub>2</sub> pour 2 PV

Tableau-VI.3 : taux de production de H<sub>2</sub> pour ( N<sub>ps</sub>=8 et N<sub>p</sub>=16) PV

Tableau-VI.4 : le rendement de l'électrolyseur

## Nomenclature :

<b>h<math>\nu</math></b>	photons dont l'énergie
<b>E<math>_g</math></b>	l'énergie de bande gap
<b>P-N</b>	Positif –Négatif
<b>V<math>_{pv}</math></b>	tension de panneau
<b>V<math>_T</math></b>	tension thermique
<b>T</b>	température absolue en °K
<b>I<math>_D</math></b>	Courant de saturation de la diode
<b>I<math>_{ph}</math></b>	Photo courant
<b>A</b>	le facteur d'idéalité
<b>K</b>	constant de Boltzmann
<b>q</b>	charge de l'électron
<b>I<math>_{ph}</math></b>	Photo courant créer par la cellule
<b>I<math>_0</math></b>	Courant de diode
<b>R<math>_{sh}</math></b>	Résistances shunt
<b>R<math>_s</math></b>	Résistance série
<b>I<math>_{cc}</math></b>	Le courant de court-circuit
<b>G</b>	éclairage (W/m <sup>2</sup> )
<b>V<math>_{co}</math></b>	La tension de circuit ouvert
<b>P<math>_m</math></b>	la puissance maximale
<b>I<math>_m</math></b>	le courant maximal
<b>V<math>_m</math></b>	la tension maximale
<b>FF</b>	Le facteur de forme
<b>PV</b>	photovoltaïque
<b>GPV</b>	générateur photovoltaïque
<b>NOCT</b>	Nominal Operating CellTemperature
<b>F</b>	Constant de Faraday
<b>G<math>_{ref}</math></b>	Eclairage de référence
<b><math>\alpha</math></b>	Coefficients de variation du courant
<b><math>\beta</math></b>	Coefficients de variation de la tension
<b>T<math>_{amb}</math></b>	Température ambiante.

# NOMENCLATURE

$U_{el}$	La somme de la surtension anodique et cathodique (V)
$U_{ohm}$	La chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur
$N_s$	Nombre des cellules série d'électrolyseur
$N_p$	Nombre des cellules parallèles d'électrolyseur
$n_p$	Nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque
$n_s$	Nombre de module série dans le champ photovoltaïque
$n_{H2}$	Le taux de production d'hydrogène
$\eta$	Le rendement

# **Introduction générale :**

L'Algérie qui possède un important potentiel solaire, est bien placée pour produire l'hydrogène vert à des couts "très compétitifs".

La diminution des couts de production de l'hydrogène devient actuellement une nécessité vue son utilisation comme vecteur énergétique.

L'utilisation d'une source d'énergie renouvelable pour le produire par électrolyse de l'eau paraît actuellement comme une solution idéale d'un point de vue économique et environnemental. On produira de l'énergie verte à bas prix.

Le secteur de la production de ce vecteur énergétique qu'est l'Hydrogène devient un secteur stratégique. Il est l'un des points importants de la transition énergétique.

Les résultats des travaux trouvées dans la littérature montrent que d'un point de vue technico-économique, la meilleure solution est de coupler le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur d'une façon directe (sans convertisseurs de puissance)

L'objectif de notre travail est de faire une étude par simulation de l'association d'un générateur photovoltaïque et d'un électrolyseur afin de produire l'hydrogène.

Ce travail a été organisé et structuré en quatre chapitres:

Le premier chapitre présente d'une façon générale l'hydrogène et les applications de ce vecteur d'énergie.

Le deuxième chapitre, est consacré à la présentation de l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons PEM.

Dans le troisième chapitre, nous donnons un aperçu sur les systèmes Photovoltaïques

Les chapitres 4 et 5 concernent successivement la modélisation du l'électrolyseur PEM et générateur photovoltaïque.

Et dans le dernier chapitre, nous présentons nos résultats de l'étude sur la production d'hydrogène par couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur PEM.

Enfin une conclusion générale résumera notre travail et donnera les perspectives.

# **I. Généralités sur l'hydrogène et ses applications**

## 1. Introduction

Aujourd'hui, les énergies fossiles représentent plus de 80% de la consommation totale d'énergie dans le monde, les transports étant à 92% tributaires du pétrole. Alors que les réserves diminuent, la demande mondiale augmente régulièrement en raison de l'émergence des économies en développement. Ces ressources sont également concentrées géographiquement : plus de la moitié des réserves mondiales de pétrole brut se trouvent au Moyen-Orient, tandis qu'un tiers du charbon mondial se trouve aux États-Unis et un quart de ses réserves de gaz naturel se trouvent en Russie.

Dans quelques années, les générations futures seront confrontées à un grave problème : le manque de pétrole. Pour éviter cela, nous devons maintenant envisager des solutions alternatives qui nous permettent de continuer à utiliser différents modes de transport utilisant l'énergie en grande quantité sur Terre. La recherche se concentre sur plusieurs domaines : voiture pneumatique comprimée, voiture hybride, voiture solaire.

À la lumière de ces faits, l'un des plus grands défis auxquels la société est aujourd'hui confrontée est de faire en sorte que chacun ait accès à l'énergie dont il a besoin tout en respectant et en préservant l'environnement naturel. L'hydrogène est l'une des solutions à ce problème majeur et qui peut être une solution durable pour les générations futures.

## 2. Propriété de l'hydrogène

Premier élément dans la table périodique. Dans la condition normale c'est un gaz sans couleur, inodore et insipide, constitué par les molécules diatomiques,  $H_2$ . L'atome d'hydrogène, le symbole H, est constitué par un noyau avec une unité de charge positive et d'un électron. Son nombre atomique est 1 et son poids atomique 1, 00797. Il y a trois isotopes d'hydrogène : le protium, de masse 1, trouvé dans plus de 99.98% de l'élément normal ; le deutérium, de masse 2, trouvé dans la nature à approximativement 2%, et tritium, de masse 3, qui apparaît en petite quantité dans la nature. Il peut aussi être artificiellement produit par diverses réactions nucléaires, Dans Le tableau ci-dessous, nous découvrirons certaines propriétés de l'hydrogène. [1]

# I. GENERALITES SUR L'HYDROGENE ET SES APPLICATIONS

Propriété	Valeur numérique
Masse atomique	1.0079 g/mol
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	3.00 kWh/Nm <sup>3</sup> 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	3.55 kWh/Nm <sup>3</sup> 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m <sup>3</sup>
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm <sup>3</sup>
Densité liquide à 20.3K	70.79 kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/kg. K (293K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg. K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/ (m.K)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Constante du gaz	4 124.5 J/kg. K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition	20.268K
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm <sup>2</sup> /s (gaz naturel 0.16)
Pression critique	12.8 atm

**Tableau I.1 : Quelques propriétés physiques d'hydrogène. [1]**

Ces caractéristiques sont une expression des qualités et des défauts de l'hydrogène.

➤ **Qualités :**

1. le plus énergétique des combustibles par unité de masse (2,2 fois celle du gaz naturel)
2. ni toxique, ni polluant, le plus léger des gaz, ce qui est un facteur déterminant pour la sûreté et la sécurité d'une installation (vitesse de diffusion quatre fois celle du gaz naturel),

3. ses limites de détonation dans l'air couvrent un domaine étroit ce qui est un élément positif de sécurité dans un volume ouvert, puisque couplé à une grande vitesse de diffusion, les conditions de concentration pour une détonation sont très difficiles, voire quasi-impossibles, à obtenir.

➤ **Défauts :**

1. il est très abondant sur terre sous forme atomique (associé à l'oxygène et au carbone le plus souvent) mais très rare sous forme moléculaire  $H_2$ , il faut donc le fabriquer, sa densité énergétique volumique est faible (sept fois plus faible que celle du gaz naturel), ce qui pose des problèmes pour son stockage, il est inodore et incolore, ce qui ne facilite pas sa détection naturelle, il brûle avec une flamme invisible, ce qui est un facteur de risque supplémentaire,
2. enfin il a une mauvaise image, injustifiée, dans le public depuis notamment l'accident de l'Hindenburg en 1937 et la bombe H. [2]

## 3. Combustion hydrogène

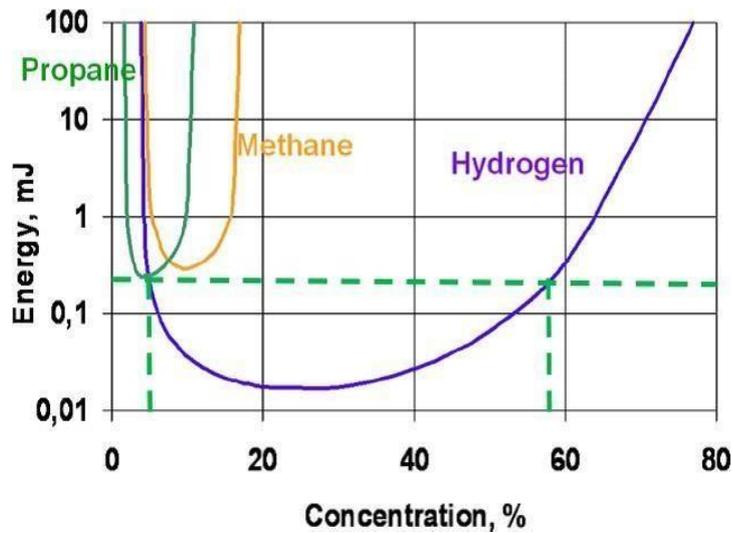
### 3.1. La combustion

Pour la combustion d'hydrogène, il doit y avoir plusieurs raisons et exigences

- La combustion de l'hydrogène exige La présence d'un carburant en concentration dans sa plage d'explosibilité (hydrogène, propane, méthane...).
- La présence d'un comburant (oxygène) en concentration supérieure à la concentration limite en oxygène.
- Une énergie d'inflammation qui dépasse l'énergie minimale d'inflammation (étincelle, point chaud ...)
- L'hydrogène possède un domaine d'explosivité large, 4%-75%, à pression et température ambiantes
- Son énergie minimale d'inflammation varie en fonction de la concentration en hydrogène et en oxygène à la stœchiométrie (pour chaque molécule d'hydrogène il y a une demi-molécule d'oxygène) donc, pour 29.5%

# I. GENERALITES SUR L'HYDROGENE ET SES APPLICATIONS

- en volume d'hydrogène dans l'air, sa valeur est de  $17\mu\text{J}$ . [3]



**Figure I.1 : Domaine d'explosivité du propane, du méthane et de l'hydrogène**

Par contre, la température d'auto inflammation, la température à partir de laquelle l'hydrogène s'enflamme spontanément si il est dans la plage d'inflammabilité, est plus élevée que celles de la plupart des autres gaz inflammables ( $585^{\circ}\text{C}/858^{\circ}\text{K}$ ). La flamme de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et est très chaude ( $2045^{\circ}\text{C}/2318^{\circ}\text{K}$ ). [3]

Propriétés	Unités	Hydrogène	Propane
Domaine d'explosivité	% vol	4 - 75	2,1 – 9,5
Energie minimale d'inflammation	$\mu\text{J}$	20	260
Température d'auto-inflammation	$^{\circ}\text{K}$	858	760
Vitesse de combustion	cm/s	265-325	30-40
Energie d'explosion	g TNT/g produit	24	10
	kg TNT/m <sup>3</sup> gaz	2,02	20,3

**Tableau I.2 : Caractéristiques d'inflammation de l'hydrogène et du propane dans l'air À pression et température atmosphériques. [3]**

## 3.2.Explosion

L'inflammation d'un nuage de gaz formé lors d'une fuite sur une canalisation ou sur un stockage peut, dans certaines configurations, donner lieu à une explosion. Cette explosion est une libération soudaine d'énergie entraînant la propagation d'un front de flamme et une onde de surpression. Il existe deux régimes d'explosion :

### 3.2.1. La déflagration

Dans ce cas, le front de flamme se déplace à vitesse subsonique. Les gaz frais sont comprimés par l'expansion du volume (effet piston). Il en résulte donc une augmentation continue de la surpression.

### 3.2.2. La détonation

La vitesse du front de flamme est supersonique, le mélange hydrogène- comburant est comprimé dans des conditions quasi adiabatique avec pour résultat la formation d'une onde de choc. [3]

## 4. Application d'hydrogène

L'hydrogène a de nombreuses applications où il peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final Comme le montre la figure I.2. Il a l'avantage de présenter une capacité de stockage (problématique avec l'électricité) et de pouvoir être produit sans émission de CO<sub>2</sub>. En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi :

### 4.1.Des applications stationnaires

Stockage d'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur grâce à la cogénération, ce qui permettrait le développement des bâtiments à énergie positive

### 4.2.Des applications mobiles

L'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques (électro-mobilité de 2e génération, dite 2G, la première correspondant aux véhicules électriques)

### 4.3.Des applications industrielles

L'hydrogène est un composant chimique très employé dans l'industrie.

Notons que l'hydrogène est déjà largement utilisé dans le domaine de l'aérospatial comme combustible pour la propulsion des fusées. [4]

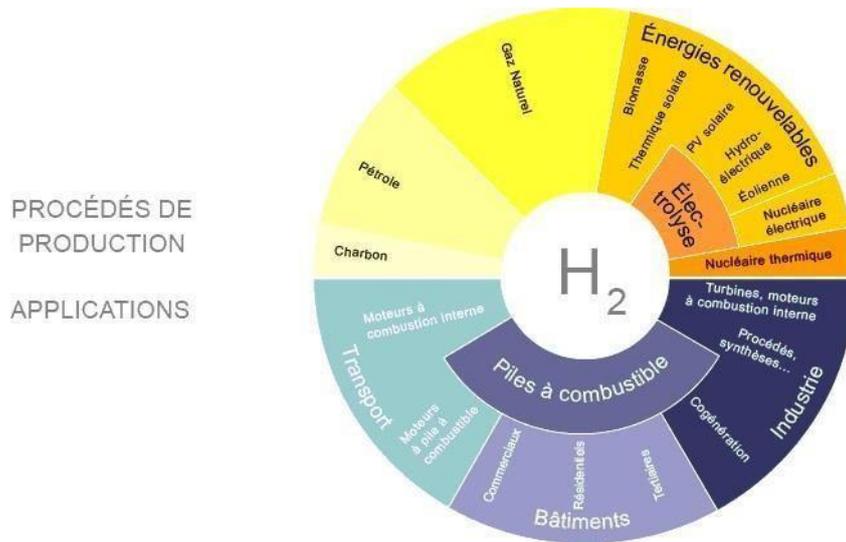


Figure I.2 : Les procédés de la production hydrogène et leur application

## 5. Les modes de production d'hydrogène

Aujourd'hui, il existe plusieurs filières technologiques qui permettent de produire de l'hydrogène à partir de différentes sources Comme le montre la figure I.2.

Les techniques de production consistent à extraire l'hydrogène  $H_2$  de la ressource primaire, les Différentes techniques de production existent :

- Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du  $CO_2$ . Le  $CO_2$  émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarboné.
- La gazéification permet de produire, par combustion, un mélange de  $CO$  et d' $H_2$  à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de  $CO_2$ ) ou de biomasse.
- une autre méthode utilise des composés organiques principalement constitués d'hydrogène et de carbone, comme le gaz naturel, le charbon ou la biomasse. Elle représente actuellement plus de 90% de la production d'hydrogène.
- la production de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Elle utilise soit un courant électrique pour l'électrolyse, soit une succession de réactions chimiques pour les cycles thermo-chimiques qui permettent de « casser » les molécules d'eau afin d'obtenir de l'hydrogène.

# I. GENERALITES SUR L'HYDROGENE ET SES APPLICATIONS

- Une autre filière utilise les énergies renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne (la lumière du Soleil et la force de vent).
- L'hydrogène peut également être produit via la production biologique par des algues, par réduction chimique, ou encore par la chaleur (thermolyse).
- L'hydrogène peut aussi être produit à partir l'énergie nucléaire. [5]

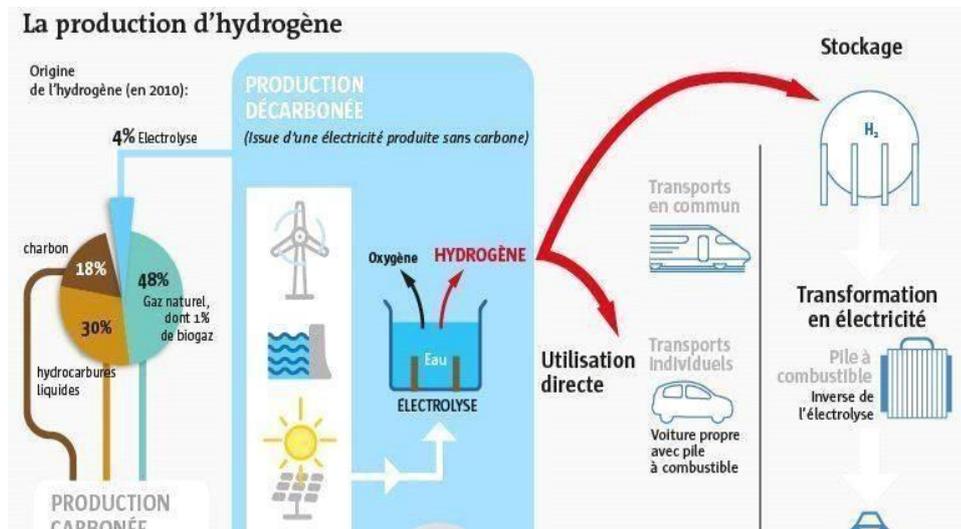


Figure I.3 : Produire de l'hydrogène à partir de différentes source

## 6. le stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz ultraléger qui occupe un volume substantiel dans des conditions de pression standard, c'est-à-dire la pression atmosphérique. Un litre de ce gaz ne pèse que 90 mg sous pression atmosphérique normale, ce qui signifie qu'il est 11 fois plus léger que l'air que nous respirons. Afin de stocker et de transporter efficacement l'hydrogène, ce volume doit être considérablement réduit.

Un volume d'environ 11 m<sup>3</sup> est nécessaire pour stocker seulement 1 kg d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir 100 km. Pour cette raison, sa densité doit être augmentée en Utilisant l'une des techniques suivantes :

1. Stockage haute pression sous forme gazeuse
2. Stockage à très basse température sous forme liquide
3. Stockage à base d'hydrure sous forme solide

Pour un transport plus facile et plus efficace, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs ou des bouteilles en composite. [6]

## 6.1.Sous pression

Le moyen le plus simple de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression.

Ainsi, à 700 bar, soit 700 fois la pression atmosphérique normale, l'hydrogène a une densité de 42 kg / m<sup>3</sup>, contre 0,090 kg / m<sup>3</sup> dans des conditions normales de pression et de température. A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 125 litres.

Aujourd'hui, la plupart des constructeurs automobiles ont opté pour la solution qui consiste à stocker l'hydrogène sous forme gazeuse, à haute pression. Cette technologie nous permet de stocker suffisamment d'hydrogène pour permettre à une voiture fonctionnant sur batterie à combustible de parcourir entre 500 et 600 km entre les pleins. [6]

## 6.2.Sous forme liquide

Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à convertir l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à une température très basse.

L'hydrogène se transforme en liquide lorsqu'il est refroidi à une température inférieure à - 252,87 ° C

.A -252,87 ° C et 1,013 bar, l'hydrogène liquide a une densité proche de 71 kg / m<sup>3</sup>. A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 75 litres.

Afin de maintenir l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés. [6]

## 6.3.Forme solide

Le stockage de l'hydrogène sous forme solide, c'est-à-dire stocké dans un autre matériau, est également une piste de recherche prometteuse.

Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques impliquant des mécanismes d'absorption de l'hydrogène par un matériau.

Un exemple consiste à former des hydrures métalliques solides par réaction d'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption est le résultat de la combinaison

chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes qui composent ces matériaux. Les matériaux les plus prometteurs sont composés de magnésium et d'allantes.

Seule une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, ce qui est actuellement le principal inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux génèrent actuellement un rapport poids d'hydrogène sur poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%. [6]



Figure I.4 : Les formes principales de stockage l'hydrogène

## 7. Les multiples utilisations de l'hydrogène

Actuellement, l'hydrogène a deux utilisations principales :

L'hydrogène produit aujourd'hui sert à plus de 80 % à la fabrication d'ammoniac indispensable à l'industrie des engrais. En plus de méthanol, il est aussi utilisé pour le raffinage des produits pétroliers, carburants et biocarburants. Le reste est utilisé pour d'autres productions chimiques, pour la synthèse de matières plastiques, pour certains processus de l'industrie du verre et pour la fabrication de circuits imprimés électroniques. Dans le monde, près de 60 millions de tonnes d'hydrogène sont produites par an, 900 000 tonnes en France.

Aujourd'hui, l'hydrogène est quasi-exclusivement utilisé pour des usages industriels dans la chimie et le raffinage. Demain, ses capacités en tant que vecteur d'énergie pourraient jouer un rôle majeur dans le domaine des transports, dans les filières gaz, dans la production d'électricité et de chaleur. [5]

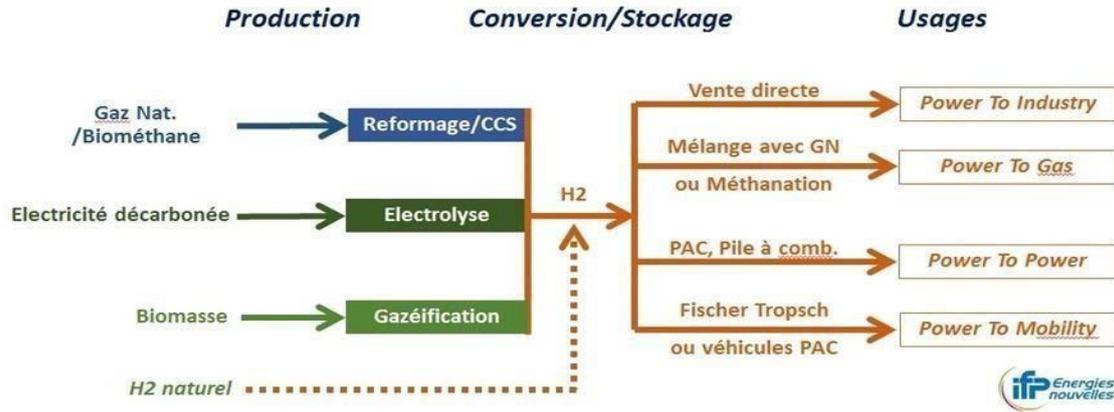


Figure I.5 : Étapes de la production d'hydrogène jusqu'à son utilisation.

## 8. L'hydrogène dans la transition énergétique

### 8.1. L'hydrogène et les enjeux de la transition énergétique

L'hydrogène pourrait répondre à deux enjeux essentiels de la transition énergétique : Décarboner le secteur des transports. Les véhicules électriques équipés d'une pile à combustible (PAC) transforment l'hydrogène en électricité et en vapeur d'eau :

Mais cette solution n'est favorable en termes environnemental que si l'hydrogène est produit à partir de sources décarbonées.

L'hydrogène présente des avantages par rapport aux batteries, en termes d'autonomie (500 à 700 km) et de temps de recharge (< 5 mn). [5]

### 8.2. Pallier la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables avec la possibilité de stocker l'hydrogène

L'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau en utilisant les excédents de la production électrique, éolienne et photovoltaïque notamment,

L'hydrogène ainsi produit peut être stocké puis reconverti en électricité, Le stockage est envisagé principalement en cavité saline. [5]

## 9. Impacts de l'hydrogène

### Sur l'environnement

Stabilité environnementale : l'hydrogène se produit naturellement dans l'atmosphère. Le gaz sera absorbé rapidement dans des secteurs bien-aérés.

- Effet sur les plantes ou les animaux : Aucun effet sur les animaux n'a été relaté dans des endroits déficients en l'oxygène. Aucun effet nuisible ne se produit sur la flore, excepté le gel produit en présence de gaz s'étendant rapidement.
- Effet sur la vie aquatique : Aucune preuve n'est actuellement disponible sur l'effet de l'hydrogène sur la vie aquatique. [1]

## 10. La production de l'hydrogène par les Énergies renouvelables

Pierre-Etienne Franc, en charge de l'activité mondiale énergie hydrogène du groupe Air Liquide, en est convaincu, « l'électricité est le vecteur principal qui permettra, avec l'hydrogène, de se passer un jour des énergies fossiles ». Un lien étroit et vertueux peut être tissé entre hydrogène et énergies renouvelables intermittentes, solaires et éoliennes, notamment. Lorsque le soleil brille -- ou que le vent souffle -- et seulement à ce moment-là, les panneaux photovoltaïques -- ou les éoliennes -- produisent de l'électricité. Lorsque la demande rencontre l'offre, tout se passe bien. Mais si l'électricité produite ne trouve pas preneur, elle est perdue. Sauf si elle peut être employée... à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. On parle alors de «Power to hydrogène».

Cet hydrogène propre et durable peut alors servir différentes applications dans lesquelles il se substituera aux ressources fossiles. Il pourra intéresser les industriels et représenter pour eux un moyen de décarboner leurs procédés. Il pourra aussi servir à alimenter des stations de recharge pour véhicules roulant à l'hydrogène (voitures, camions, bus, chariots élévateurs, bateaux), des véhicules qui n'émettent ni particules fines ni CO<sub>2</sub> et qui ne rejettent que de l'eau. À ce titre, on peut mentionner le projet **Hy Balance**, mené par Air Liquide au Danemark. Il s'agit du plus grand site européen de ce type avec un électrolyseur de 1,2 MW produisant de l'hydrogène décarboné destiné à l'industrie et la mobilité. Le projet GRHYD, mené par Engie du côté de Dunkerque, expérimente quant à lui, l'injection d'hydrogène vert à hauteur de 20 % dans les réseaux de chauffage au gaz naturel.

L'électricité produite par la pile à combustible alimentée en hydrogène répond par ailleurs à de multiples besoins comme l'alimentation électrique de zones isolées ou encore l'alimentation de secours de sites sensibles. Et l'hydrogène peut aussi être utilisé comme un moyen de stockage de l'énergie renouvelable produite localement Comme le montre la figure I.6. En somme cela permet d'assurer l'autonomie de sites dits « non

électrifiés », c'est-à-dire non reliés au réseau électrique national. [7]

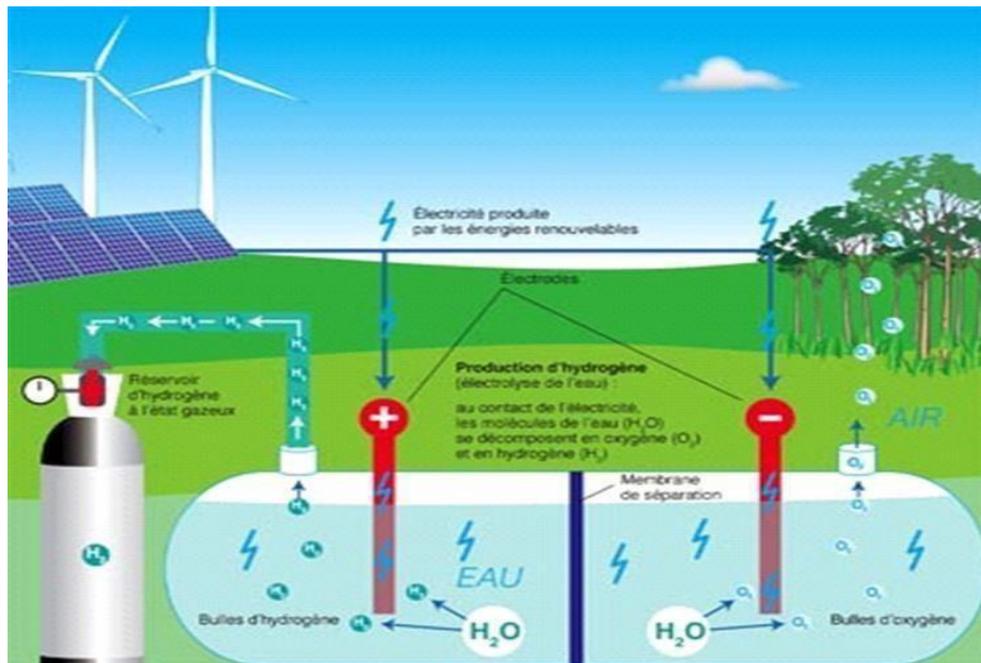


Figure I.6 : Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène.

## 11. La production de l'hydrogène par l'énergie solaire

Parmi les pistes explorées dans le secteur des énergies renouvelables, il y a celle de l'électrolyse de l'eau grâce à une cellule solaire.

Des ingénieurs belges ont mis au point un nouveau procédé pour produire de l'hydrogène à partir d'un système de panneaux solaires. Ce processus vise à diviser l'eau de l'air en deux parties : d'un côté l'hydrogène, de l'autre l'oxygène. Grâce à des panneaux solaires, ils utilisent 15 % de l'énergie solaire pour obtenir de l'hydrogène gazeux. Chacun peut produire jusqu'à 250 litres d'hydrogène par jour.

Les chercheurs ont mené à bien des études, pendant dix ans, pour parvenir à ce que chacun de ces panneaux solaires capables de transformer l'eau en hydrogène tout en produisant de l'électricité utilisable par ailleurs de 1,6 m<sup>2</sup> transforme 15 % de la lumière solaire en hydrogène gazeux à partir de la vapeur d'eau. Pour rappel, un panneau solaire classique transforme 18 à 20 % de l'énergie solaire en électricité. [7]

## 12. La production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau a toujours présenté un grand intérêt pour la production de l'hydrogène pur nécessaire aux procédés chimiques. Conforté par son utilisation comme

moyen de stockage fiable des énergies renouvelables en pleines expansions. Des atouts indéniables qui confèrent à la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau un avenir certain.

L'hydrogène produit est requise. Actuellement, le recours croissant aux sources renouvelables conduit au développement de l'électrolyse, procédé bien adapté à la valorisation de ces énergies nouvelles.

## 13. Principe de fonctionnement l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique, qui crée un champ électrique orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement (les cations se dirigent vers la cathode et les anions vers l'anode). Cette tension dépend essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de la réaction, ce potentiel théorique de la décomposition est de 1,481 V à 298 K mais les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1,7 à 2,1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85%, C'est ce que montre la figure I.7. [9]

La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit de manière globale :



Avec une enthalpie de dissociation de l'eau :  $\Delta H = 285 \text{ kJ/mole}$ .

Quand la tension appliquée est suffisante des réactions se produisent aux interfaces Electrolyte électrodes :

À l'anode : oxydation avec émission d'électrons



À la cathode : réduction avec capture d'électrons



# I. GENERALITES SUR L'HYDROGENE ET SES APPLICATIONS

Les ions d'hydrogènes sont transportés à travers l'électrolyte par la différence de potentielle électrique V. [9]

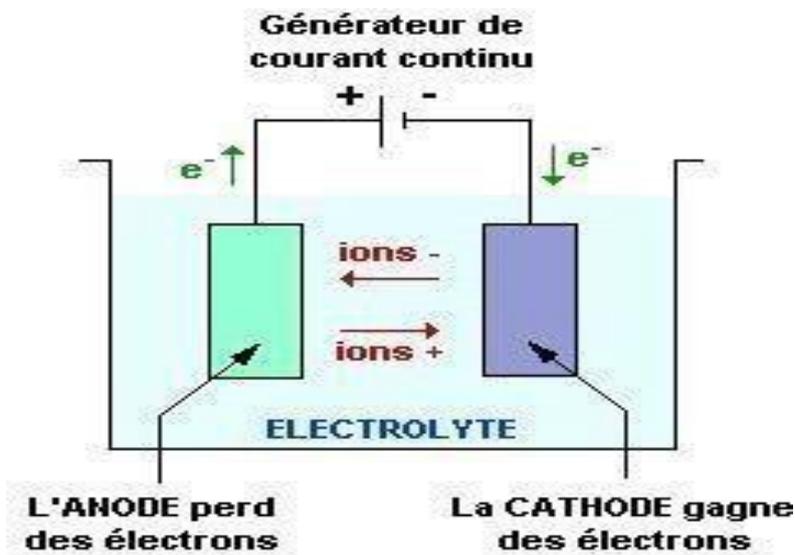


Figure I.7 : Mécanisme de l'électrolyse.

## 14. Les Différentes Technologies D'électrolyseurs

Il existe à ce jour trois types d'électrolyse dont la maturation va de la recherche en laboratoire à la commercialisation. Leur principale différence réside dans l'électrolyte utilisé.

### 14.1. L'électrolyse alcaline

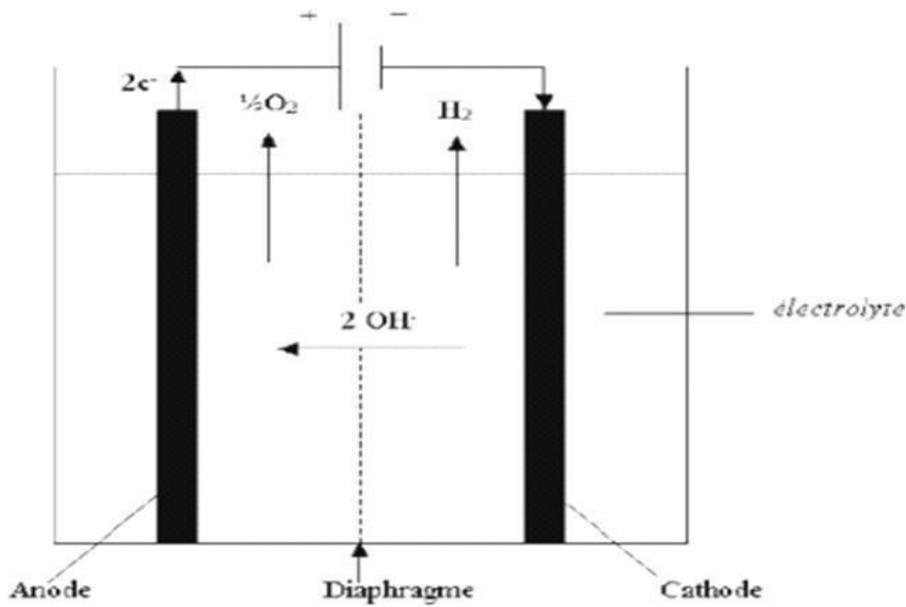
L'électrolyse alcaline constitue la solution de production d'hydrogène la plus utilisée de nos jours, et propose un coût d'investissement faible en comparaison avec les autres technologies d'électrolyse, notamment grâce à la simplicité des matériaux.

Bénéficiant déjà de rendements de 68 à 77%, l'électrolyse alcaline possède une marge d'amélioration limitée et une faible réactivité aux variations de puissance. Si ce dernier aspect est problématique pour un couplage avec des énergies intermittentes, il présente peu

D'inconvénients pour la production d'hydrogène à partir de l'hydroélectricité.

Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions Hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) et potassium ( $\text{K}^+$ ) [10]

Le principe de ce type d'électrolyse est représenté sur la figure I.8 ci-dessus :



**Figure I.8 : Principe de l'électrolyse alcaline.**

Les réactions sur les électrodes sont les suivantes :



## 14.2. Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane)

L'électrolyse acide se distingue de la précédente par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons. Les avantages de cette technologie sont l'absence d'électrolyte liquide, la compacité, la simplicité du design et du fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion, des performances sensiblement supérieures.

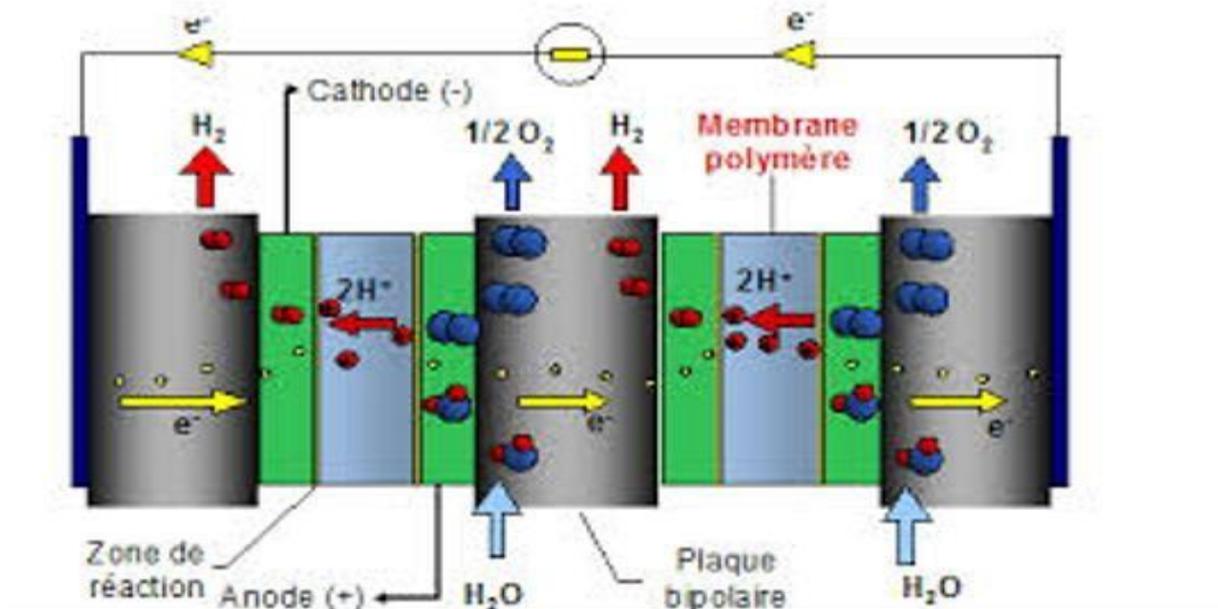


Figure I.9 : L'électrolyse PEM.

## 14.3. L'électrolyse 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 une conduction d'ions su peroxydes  $O^{2-}$ .

L'augmentation de la température lors d'une réaction d'électrolyse permet un apport d'énergie supplémentaire sans que l'énergie nécessaire à la décomposition moléculaire augmente

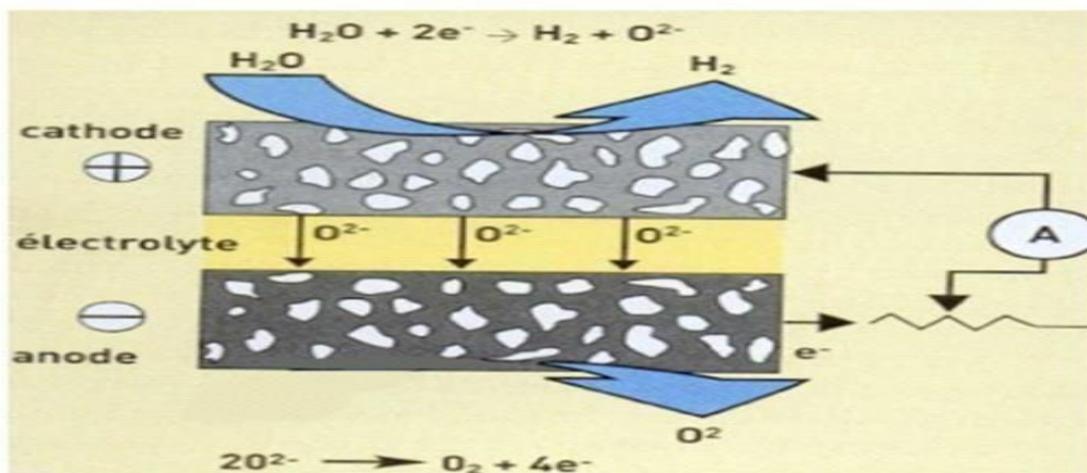


Figure I.10 : L'électrolyse SOFC

## 15. L'hydrogène comme vecteur d'énergie

Les scientifiques se sont tournés vers la soi-disant énergie dérivée de l'hydrogène, car ils cherchaient à trouver une énergie alternative pour le pétrole, et il existe actuellement de petits modèles aux premiers stades de leur développement. L'idée a été lancée au Danemark et déplacée en Allemagne, et les ingénieurs travaillent à sa mise en œuvre depuis 2007, malgré de nombreux obstacles tels que la disponibilité de vastes zones et la disponibilité d'une main-d'œuvre experte dans ce domaine.

Cela est dû à ce taux de conversion de l'énergie d'Hydrogène est deux à trois fois plus efficace que celui des moteurs conventionnels, ce qui veut dire qu'il peut vous permettre d'aller plus loin avec moins de carburant. Les véhicules à Hydrogène ne rejettent que de l'eau et ne génèrent aucune émission de CO<sub>2</sub>.

L'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources disponibles en grande quantité sur Terre : eau et électricité, biomasse, biogaz, gaz naturel... Parmi celles-ci, plusieurs sont indépendantes des énergies fossiles. De ce fait, l'hydrogène est un vecteur d'énergie durable.

Associé à la pile à combustible, l'hydrogène est un vecteur d'énergie sans émission locale de CO<sub>2</sub>, qui ne rejette que de l'eau. Une voiture électrique avec une pile à combustible émet 20% de gaz à effet de serre en moins, par rapport à un véhicule à combustion, lorsque son hydrogène est produit à partir de gaz naturel. L'hydrogène est donc un vecteur d'énergie propre

Respectueux de l'environnement.

L'hydrogène possède une très forte densité énergétique massique, c'est-à-dire qu'il renferme beaucoup d'énergie dans une petite masse. L'hydrogène, gaz très léger, concentre énormément d'énergie pour une masse donnée : 1 kg d'hydrogène contient trois fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence.

- Hydrogène 120 MJ/kg
- Méthane 50 MJ/kg
- Essence 43 MJ/kg

L'hydrogène peut être stocké sous différentes formes notamment gazeuses sous haute pression. Le remplissage de réservoirs d'hydrogène ou leur échange sont faciles et rapides. L'hydrogène et la pile à combustible assurent en particulier une autonomie

# I. GENERALITES SUR L'HYDROGENE ET SES APPLICATIONS

importante et un temps de recharge très court pour les véhicules qui en sont équipés. En cela, l'hydrogène est une solution performante de stockage d'énergie, et représente une alternative au stockage par batterie. [8]

Carburant	Prix actuel		valeur santé BTU/lb (LHV)	coût de l'énergie \$/million BTU	Émissions de dioxyde de Carbone	
	(\$/gal/onr /MCF)	\$/lb			Ibs CO2/ lb fuel	IbsCO2/M M BTU
Charbon, Bitumineux	\$ 50	\$ 0,025	12,603	\$ 1,98	2,95	234
l'essence	\$ 3,33	\$ 0,538	18,696	\$ 28,77	3,16	169
GN	\$ 8,45	\$ 0,185	20,267	\$ 9,11	2,74	135
Hydrogène	\$ 5,24	\$ 0,987	51,623	\$ 19,13	/	/

**Tableau I.3 : Comparaison de carburant En termes de prix, de santé et d'énergie et émission de dioxyde de carbone. [8]**

## 16. Conclusion

L'hydrogène en tant qu'énergie propre permettra certainement de réduire significativement les problèmes liés à la pollution et ainsi de protéger l'environnement. Ainsi, une économie basée sur l'hydrogène basée sur l'hydrogène renouvelable et non polluant est un objectif d'un immense attrait. Selon de nombreux experts, l'hydrogène est une source d'énergie future, du fait de sa facilité de transport et aussi de la disponibilité de sources de production, car il peut être utilisé dans plusieurs domaines.

L'électrolyse de l'eau est une technologie établie qui est utilisée depuis près d'un siècle pour diverses applications dans l'industrie et est également considérée comme un

processus fondamental qui peut également être utilisé pour illustrer le mécanisme de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Et en séparant les composants de l'eau, ils peuvent être dissociés avec de l'électricité produite par l'énergie solaire en hydrogène et oxygène. Dans un proche avenir, les convertisseurs hydroélectriques devraient occuper une place de plus en plus importante. Spécifiquement pour la production d'hydrogène.

La production d'hydrogène à partir de sources renouvelables, notamment à partir de l'énergie solaire, ouvre des horizons prometteurs dans le domaine de la protection de l'environnement et du développement durable. La disponibilité de l'énergie solaire suffit à l'investir de manière optimale.

# **II. Les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons(PEM)**

## 1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre en va présenter d'une manière introductive un outil de production d'hydrogène avec de l'énergie électrique un outil très importants qui se dit l'électrolyseur, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est utilisée lorsque l'on désire obtenir de l'hydrogène extrêmement pur.

L'intérêt de la production d'hydrogène par électrolyse réside dans les grands avantages qu'elle représente pour l'environnement à condition que l'on utilise de l'électricité d'origine renouvelable pour alimenter l'électrolyseur. Si l'on utilise de l'électricité d'origine photovoltaïque, d'origine éolienne, de la biomasse, ou de l'électricité provenant d'une centrale hydraulique nous obtiendrons de l'hydrogène à émission zéro, une énergie totalement propre, zéro émission. Les électrolyseurs sont de plusieurs type mais on va se concentrer sur l'un qui se dit : l'électrolyseur PEM (protons exchange membrane) et qui a une composition intéressante et spécial aussi avec un fonctionnement conduit par un principe très précis.

## 2. Historique

L'histoire des électrolyseurs a commencé dans les années 1800 et continua son développement dans les années 1900 et dans le XXIème siècle. En 1800, William Nicholson et Anthony Carlisle sont les premiers à découvrir la production de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse de l'eau. Ils décrivent le procédé permettant de décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'électricité. Ils utilisèrent des électrodes de platine et des tubes de verre pour collecter le gaz sur chaque électrode. L'hydrogène se formait par bulles sur une électrode et l'oxygène sur l'autre électrode dans une proportion de deux volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène [11].

En 1820, Faraday énoncera le principe de l'électrolyse clarifié. En 1832, il établit les lois quantitatives de l'électrolyse. En 1834, il utilise le mot électrolyse pour la première fois. En 1900, fabrication de premier électrolyseur industriel bipolaire. En 1939, le premier électrolyseur dédié à la production d'oxygène à grande échelle (Productions des gaz > 104m<sup>3</sup>/h) est installé au Canada. Il est de technologie alcaline à plaques mono polaires. Il sera ensuite reconverti pour produire de l'hydrogène pour la fabrication d'engrais.

En 1948, le fabricant Lurgi apporte une innovation majeure en développant le procédé d'électrolyse sous pression, ce qui permettait de s'affranchir d'une unité de compression pour le stockage des gaz produits et de fonctionner à plus haute température.

En 1951, Lurgi présente le premier électrolyseur haute pression 30[bar].

## II .LES ELECTROLYSEURS A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS(PEM)

En 1958, la première installation de ce type est mise en place au Pérou à Cuzco. Depuis les années 60, le champ d'application de l'électrolyse s'est élargi, incitant les industriels et la recherche à développer des technologies innovantes.

En 1962 - 1966, Programme Gemini-Apollo et première cellule polymère.

En 1966, Premier électrolyseur SPE (Solid Polymère Electrolyte).

En 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de types Nafion, la société Dupont de Nemours utilisera la membrane conductrices de protons Nafion comme électrolyte.

En 1987, premier électrolyseur PEM (Polymère Electrolyte Membrane) de 100kW [12].

### 3. Principe d'électrolyse de l'eau pour production d'hydrogène

Elle s'effectue dans un système électrochimique appelé cellule d'électrolyse. L'électrolyse met en jeu le passage d'un courant électrique à travers un milieu ionique, ce qui provoque une réaction chimique sur les électrodes. Des électrodes métalliques sont normalement utilisées dans les électrolyseurs car elles sont conductrices de courant électrique. Il existe des composants ioniques liquides ou solides, dans les deux cas les ions libres peuvent constituer un flux ou courant. La cellule est constituée de deux électrodes, une anode et une cathode, placées de part et d'autre d'un conducteur ionique qui est l'électrolyte. Les deux électrodes sont connectées à un générateur de courant, qui à terme devrait être une source d'énergies renouvelables ou non renouvelables.

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est utilisée lorsque l'on désire obtenir de l'hydrogène extrêmement pur. L'intérêt de la production d'hydrogène par électrolyse réside dans les grands avantages qu'elle représente pour l'environnement à condition que l'on utilise de l'électricité d'origine renouvelable pour alimenter l'électrolyseur. Si l'on utilise de l'électricité d'origine photovoltaïque, d'origine éolienne, de la biomasse, ou de l'électricité provenant d'une centrale hydraulique nous obtiendrons de l'hydrogène à émission zéro, une énergie totalement propre, zéro émission.

Le principe de la réaction de l'électrolyse de l'eau est simple : les atomes composants les molécules d'eau sont dissociés pour former deux corps simples gazeux qui sont l'hydrogène ( $H_2$ ) et l'oxygène ( $O_2$ ).

### 4. Les composants des électrolyseurs

Les électrolyseurs comportent plusieurs cellules ; de telles cellules peuvent être placées de différentes manières (en série ou en parallèle) du moment que la configuration interne

## II .LES ELECTROLYSEURS A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS(PEM)

(composants) ne varie pas d'une cellule à l'autre. Les principales composantes sont :

- Les électrodes : est composée généralement de l'anode et de La cathode est sont généralement composées a base du composants électrochimiques.
- L'électrolyte : une solution électrochimique ou bien un solide utilise normalement pour être un passage des différentes opérations de décompositions de l'eau.
- La membrane : des plusieurs matières sont généralement utilisés comme membrane.

Les premiers électrolyseurs diffèrent de ceux d'aujourd'hui dans la construction de la membrane ou bien dans les types des matières utilisées [13].

### 5. Conception des électrolyseurs

Les électrolyseurs peuvent être classés en deux principaux concepts : les unipolaires et les bipolaires. Les unipolaires utilisent typiquement des électrolytes liquides alors que les bipolaires utilisent un polymère solide comme électrolyte [14].

#### 5.1. Concept unipolaire

Le premier électrolyseur utilisait un concept unipolaire. Les électrodes, anode et cathode sont suspendus dans un réservoir contenant une solution à 20 – 30 % d'électrolyte.

Chaque élément est connecté en parallèle et soumis à une tension de 1.9 à 2.5 Volts. Le concept est facile à réaliser et à réparer, mais il n'est pas aussi efficace qu'un électrolyseur moderne [4].

#### 5.2. Concept bipolaire

L'électrolyseur bipolaire est constitué de plusieurs couches pressées ensemble, Les éléments (ou cellules) sont connectés en série ce qui résulte en des tensions de piles plus élevées. Ces piles peuvent être petites car chaque couche est très mince. Les avantages des électrolyseurs bipolaires sont qu'ils permettent des densités de courant bien plus importantes et une pression de gaz hydrogène plus élevée. Originellement, une couche d'amiante était utilisée pour séparer les éléments mais aujourd'hui, des matériaux polymères tels que le Rhyton TM l'ont remplacée [4].

### 6. Type d'électrolyse

L'électrolyse de l'eau est un processus qui peut être classé dans 8 sous-groupes :

1. L'électrolyse alcaline.
2. L'électrolyse à haute température.
3. L'électrolyse acide.
4. L'électrolyse thermochimique.
5. L'électrolyse photochimique.
6. L'électrolyse photo-électrochimique.
7. L'électrolyse biochimique.
8. L'électrolyse d'un sel avec l'hydrogène comme sous-produit [13].

### 7. Electrolyseur de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM)

#### 7.1.Description générale

Il est le plus populaire et la plupart des électrolyseurs modernes sont construits selon ce concept. L'électrolyseur PEM est un dispositif électrochimique qui permet de transformer directement l'énergie électrique en énergie chimique hydrogène et oxygène en partant d'un passage électrochimique comme tous les autres électrolyseurs avec des différences dans le concept la composition et le principe de fonctionnement.

Leur électrolyte est une membrane solide permettant la conduction des ions. Donc ces électrolyseurs utilisent le concept bipolaire. Le platine est le catalyseur le plus utilisé pour ces électrolyseurs. Un catalyseur est appliqué de chaque côté de la membrane. Il est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène (faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène), et convertir l'énergie électrique en énergie chimique.

L'électrolyse de l'eau en milieu acide a lieu au sein d'un système électrochimique : la cellule électrochimique. Les différents éléments constituant cette cellule sont présentés sur le Figure (III-1).

## II .LES ELECTROLYSEURS A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS(PEM)

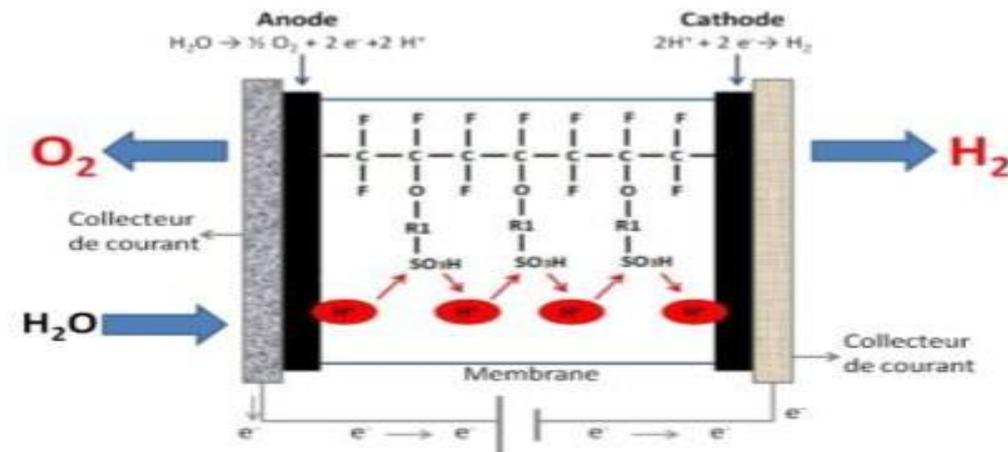


Figure II - 1:Schéma de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse PEM.

Cette cellule est plus communément appelé cellule d'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) mais peut aussi être désignée par le terme de cellule SPE (Solid Polymère Electrolyte).

La cellule est composée de deux électrodes (l'anode et la cathode), d'une membrane et de deux collecteurs de courant. Les différents éléments composant la cellule vont être détaillés après [15].

### 7.2.L'électrolyte

Dans l'électrolyseur de type PEM la membrane polymère permet aux ions  $H^+$  de passer du côté anode de la membrane au côté cathode ; elle sépare également les gaz hydrogène et oxygène. L'hydrogène est produit à l'anode et l'oxygène est produit à la cathode. Le polymère le plus souvent utilisé comme matériau constitutif de la membrane est le Nafion TM de Du Pont. Un catalyseur de platine est appliqué de chaque côté de la membrane afin de faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène.

### 7.3.Le catalyseur

Afin de convertir l'énergie électrique en énergie chimique, un catalyseur est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène. Le platine (Pt) est le catalyseur le plus commun pour cette réaction. Un catalyseur meilleur marché qui fonctionnerait aussi bien que le platine serait le bienvenu, cependant celui-ci reste à inventer. Si des catalyseurs moins efficaces sont utilisés sur la cathode, il se produira une plus grande perte de tension. L'efficacité énergétique de l'électrolyse de l'eau se situe entre 50 et 80 %, mais ces valeurs ne prennent en compte que le rendement lors de la conversion d'énergie électrique en énergie chimique.

### 7.4.La membrane

Est l'élément le plus nécessaire à toute l'opération d'électrolyse PEM car il est le moyen de la conduction protonique et des opérations électrochimique de l'électrolyseur. Actuellement, la membrane la plus utilisée est la membrane dite Nafion commercialisée et Fabriquée par Du Pont deNemours [16].

### 7.5.Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM consiste à séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau par apport d'énergie électrique, à des températures relativement basses, typiquement inférieure à 100°C.

Dans une cellule d'électrolyse de l'eau, le courant électrique est utilisé pour effectuer la dissociation de l'eau en ses constituants élémentaires que sont l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'oxygène (O<sub>2</sub>) moléculaires. En milieu acide, cette réaction se décompose en deux demi-réactions :

Anode:



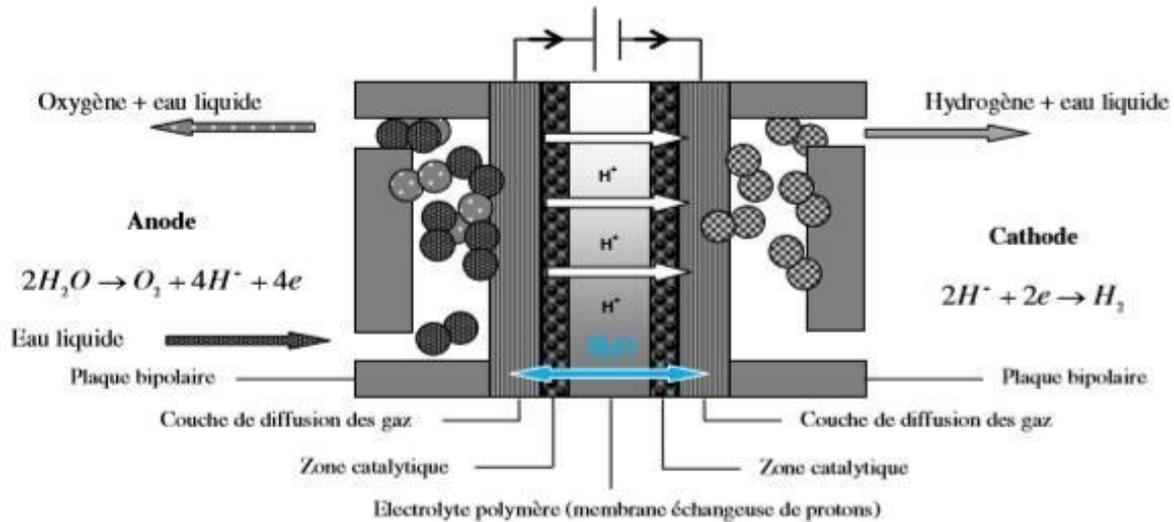
Cathode :



La demi-réaction (II.1) se produit à l'anode et la demi-réaction (II.2) se produit à la cathode. En milieu acide, les protons solvates sont transférés de l'anode à la cathode par migration à travers l'électrolyte (membrane polymère) sous l'effet du champ électrique.

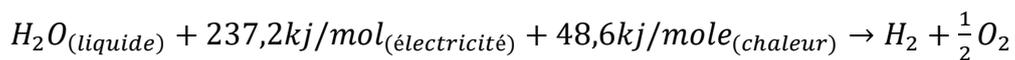
De manière générale, l'électrolyse de l'eau permet la production de gaz d'une grande pureté, en comparaison avec d'autres procédés tels que le reformage d'hydrocarbures pour la production d'hydrogène, bien que l'électrolyse soit actuellement plus coûteuse. Elle est représentée dans la Figure II.2 [12].

## II .LES ELECTROLYSEURS A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS(PEM)



**Figure II - 2: Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM [12].**

D'un point de vue énergétique, la réaction d'électrolyse de l'eau est simplement l'inverse de celle d'une pile à combustible.



285 kJ/mole représente le minimum de l'apport d'énergie pour d'imposer la molécule  $H_2O$ .

En terme de tension, ceci équivaut à :

$$\frac{\Delta G}{2F} = \frac{285 \cdot 10^3}{2 \cdot 96500} = 1,48 \text{ volts}$$

Cette tension est le potentiel électrochimique ou potentiel thermo neutre pour lequel  $H_2$  et  $O_2$  sont produits avec un rendement thermique de 100% ( $\Delta G = HHV = \text{high heat value}$ )

### 7.6. Rôles et propriétés des différents composants d'électrolyseur PEM

#### 7.6.1. La membrane Nafion (Du Pont de Nemours Co)

Est actuellement le matériau polymère commercial possédant ces caractéristiques, ce qui fait de lui le matériau le plus utilisé dans les cellules d'électrolyse PEM. La formule chimique du monomère est détaillée Figure I.3, sa température de transition vitreuse est de 117 °C, ce qui s'avère être une limitation pour l'utilisation de ce matériau à haute température. La conduction protonique de ce matériau provient de la présence des groupements sulfonés  $SO_3H$  lorsqu'il est hydraté. Ce type de matériau membranaire est très coûteux : c'est pourquoi de nombreuses recherches sont réalisées afin de créer de nouveaux matériaux polymères moins onéreux ayant des températures d'utilisation plus élevées pour remplacer le Nafion [15].

## II .LES ELECTROLYSEURS A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS(PEM)

La membrane joue le rôle d'un conducteur protonique puisque la migration des ions  $H^+$  est assurée par la transformation des groupements sulfoniques en ions  $SO_3^-$ . Elle nécessite d'être constamment humidifiée sous peine de voir sa conductivité diminuer [16].

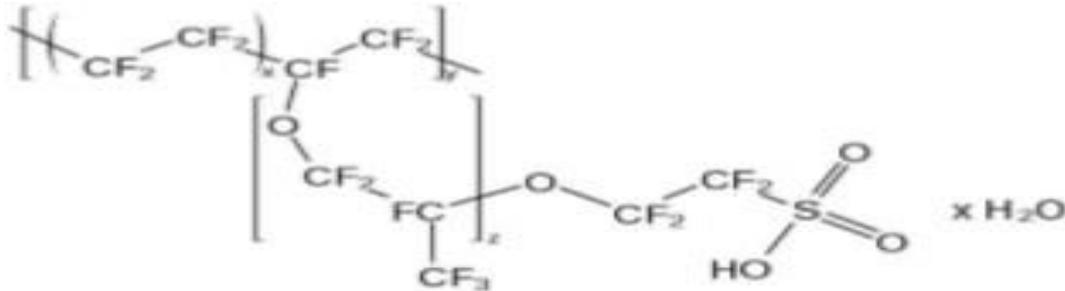


Figure II - 3:Formule chimique du Nafion.

### 7.6.2. Assemblage membrane électrodes (AME)

L'assemblage membrane électrodes (AME) est le cœur de la cellule d'électrolyse de l'eau. En son centre est située la membrane qui sert d'électrolyte conducteur de protons mais aussi de séparateur physique entre l'anode et la cathode. Pour la confection d'un AME, les matériaux d'électrodes préalablement choisis sont déposés sur la membrane. De nombreuses contraintes doivent être prises en compte lors de cette confection. Les matériaux catalytiques doivent permettre l'évacuation des gaz formés. Les électrodes doivent donc être poreuses tout en gardant une conductivité électronique suffisante afin de permettre les transferts électroniques. Chaque électrode est directement connectée à un collecteur de courant. Ils permettent le transport électronique entre les matériaux composant l'électrode et l'extérieur de la cellule PEM. En générale, des supports en titane poreux ( $TiO_2$ ) sont utilisés à l'anode alors que des couches de carbone (gaz diffusion layer (GDL)) servent à la cathode. Lors du fonctionnement de la cellule, trois réactions de transport/transfert ont lieu simultanément :

- ✓ le transfert électronique.
- ✓ le transport du réactif ( $H_2O$ ) jusqu'aux sites catalytiques.
- ✓ le transport des gaz formés.

Pour optimiser ces différents phénomènes de transport/transfert électronique et fluide, la structuration géométrique de l'AME (chemins de percolation, et porosité) et la connexion physique des électrodes aux collecteurs de courants doivent être optimales. Des monomères de Nafion sont souvent ajoutés dans la composition des matériaux d'électrodes pour favoriser les chemins de percolation et conférer une meilleure tenue mécanique aux interfaces électrodes/membrane et électrodes/collecteurs de courant [15].

### 7.6.3. Les électrodes

Les électrodes sont chacune le siège d'une réaction électrochimique. A l'anode a lieu l'oxydation de l'eau, et à la cathode la réduction de l'eau. Du fait que les réactions qui ont lieu ne soient pas les mêmes, les matériaux composant les électrodes seront différents. Toutefois, les deux électrodes seront composées d'un matériau électro catalytique. Le choix des électro catalyseurs dépend de nombreux paramètres tels que :

- ✓ Leurs activités électro catalytiques vis-à-vis des réactions concernées.
- ✓ La sélectivité pour une réaction donnée.
- ✓ La stabilité chimique vis-à-vis du milieu électrolytique.
- ✓ La stabilité électrochimique vis-à-vis du potentiel de fonctionnement de la cellule.
- ✓ Le coût d'élaboration et de mise en forme dans la cellule.
- ✓ La conductivité électronique.
- ✓ La stabilité mécanique.
- ✓ La morphologie (taille des cristaux, cristallinité, réseaux...) [15].

### 7.7. Avantages de l'électrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM a plusieurs d'avantages comme [17] :

- Ils sont plus propres pour l'environnement notamment pour ce qui est de l'électrolyte pour les électrolyseurs alcalins.
- En effet, ces derniers utilisent l'hydroxyde de potassium comme électrolyte qui est corrosif, irritant et sa préparation dégage des vapeurs toxiques de chlore et d'hydrogène.
- Les densités de courant sont plus élevées, leur permettant d'avoir des masses et volumes inférieurs à production de gaz équivalente
- Excellents rendements.

### 7.8.Inconvénients de l'électrolyseur PEM

L'électrolyseur possède des inconvénients comme [18]:

- ✓ Le coût élevé des membranes polymères.
- ✓ Des catalyseurs en métal noble.
- ✓ Processus de fabrication compliqués et coûteux.
- ✓ Le coût élevé des catalyseurs.
- ✓ Stock inférieur au MW.

### 7.9.Applications de l'électrolyseur PEM

Les applications des électrolyseurs PEM sont principalement la génération d'hydrogène sur des sites de stockage alimentant des piles à combustible. Ces systèmes peuvent alors servir d'énergie de secours pour des stations de télécommunications, des sites isolés (projet Myrte en Corse, Areva), ou pour des stations-service hydrogène alimentant de petites flottes de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible (ISE, Freiburg, Allemagne).

Certains acteurs tels que CETH<sub>2</sub> (Paris, France) sont principalement axés sur la production d'hydrogène ultra pur pour des applications médicales ou de recherche en laboratoire.

## 8. Comparaison de différentes technologies d'électrolyseurs

Depuis 1998, une étude bibliographique est menée sur l'électrolyse de l'eau en technologie alcaline dans le cadre du programme WE-NET. Cette étude a pour but de comparer cette technologie par rapport à l'électrolyse PEM de l'eau. La Figure (II.4) suivante permet ainsi d'esquisser une première comparaison. On constate que la technologie alcaline à haute température et haute pression (dite technologie avancée) possède actuellement les meilleurs rendements pour des densités de courant inférieures à 1 A/cm<sup>2</sup>.

## II .LES ELECTROLYSEURS A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS(PEM)

Quand les objectifs du programme WE-NET concernant l'électrolyseur PEM (rendement de 90% pour une densité de courant de 1 A/cm<sup>2</sup>) seront atteints, cette technologie sera alors beaucoup plus intéressante que celle citée précédemment, les conditions de température et de pression étant beaucoup moins pénalisantes d'un point de vue énergétique. En outre l'absence de liquides corrosifs (KOH pour l'électrolyse alcaline) favorisera son utilisation [16].

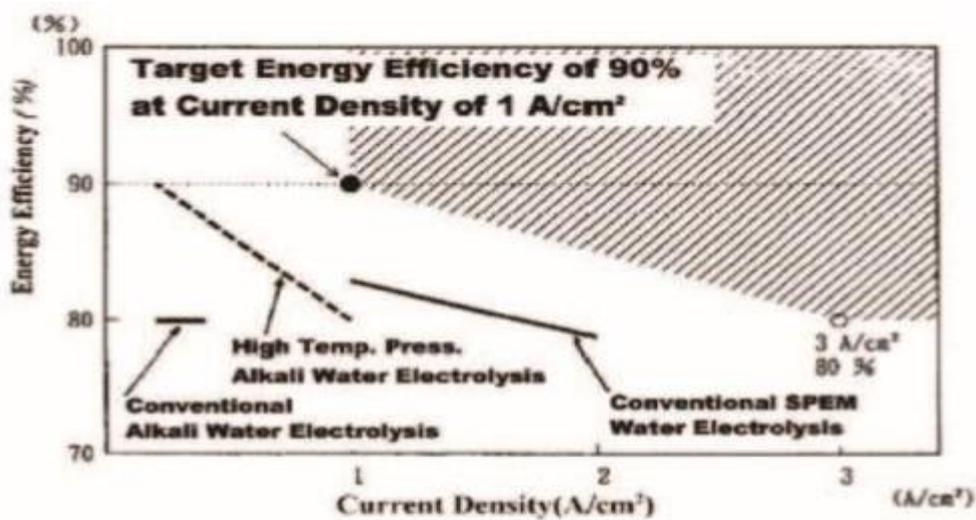


Figure II - 4: Rendements des différentes technologies d'électrolyseurs.

La très bonne fiabilité de la technologie alcaline est vraisemblablement un de ses principaux avantages. On annonce des durées de vie de 10 ans voire 30 ans avec une importante fréquence d'utilisation. La technologie alcaline est donc excellente d'un point de vue économique [16].

### 9. Conclusion

Nous avons dans ce chapitre donné un aperçu sur l'électrolyse de l'eau qui de l'avis des spécialistes représente la méthode la plus efficace et la moins complexe pour produire de l'hydrogène pur.

Notons, que cette technologie n'est pas encore arrivée à maturité et fait l'objet d'intenses recherches pour améliorer le fonctionnement et le rendement des électrolyseurs.

# **III. Les générateurs photovoltaïques**

## 1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, L'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but en utilisant plusieurs types de procédés parmi eux le moyen dit cellule photovoltaïque. [19]

Dans ce chapitre nous allons étudier le fonctionnement d'une cellule PV et en déduire son modèle mathématique. Nous avons aussi cité les différents types de cellule PV ainsi que les modes de montage ce qui conduit au module PV, l'association de ce dernier permet de réaliser un panneau PV.

## 2. L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{KWc} / \text{m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon. [20]

## 3. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80%d'hydrogène, 19%d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance,

# III. LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. [21]

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présenté un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 $\mu$ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K [22]

Diamètre de soleil  $D_s = 1.39.10^9\text{m}$  ;

Diamètre de la terre  $D_t = 1.27.10^7\text{m}$  ;

Distance moyenne soleil\_ terre  $L_{ts} = 1.5. 10^{11}\text{m}$  .

## 3.1. Rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [23]

## 3.2. Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [23]

## 3.3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...).Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo( $\epsilon$ )  $0 < \epsilon < 1$ . [23]

## 3.4. Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi. [23]

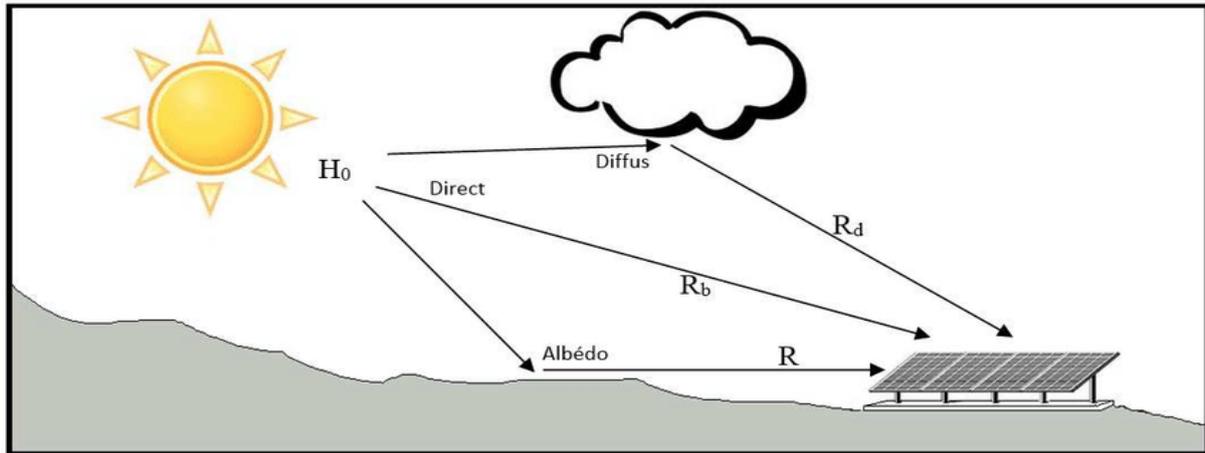


Figure (III.1) : Composantes du rayonnement solaire au sol

## 4. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux Appelés "semi-conducteurs" qui exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde. [24]

Cet effet est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques.

## 5. Cellules photovoltaïques

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



Figure (III.2) : cellule photovoltaïque

# III. LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

## 5.1. Principe de fonctionnement

Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière Permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $E=h\nu$  .....(I-2) à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse.

Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

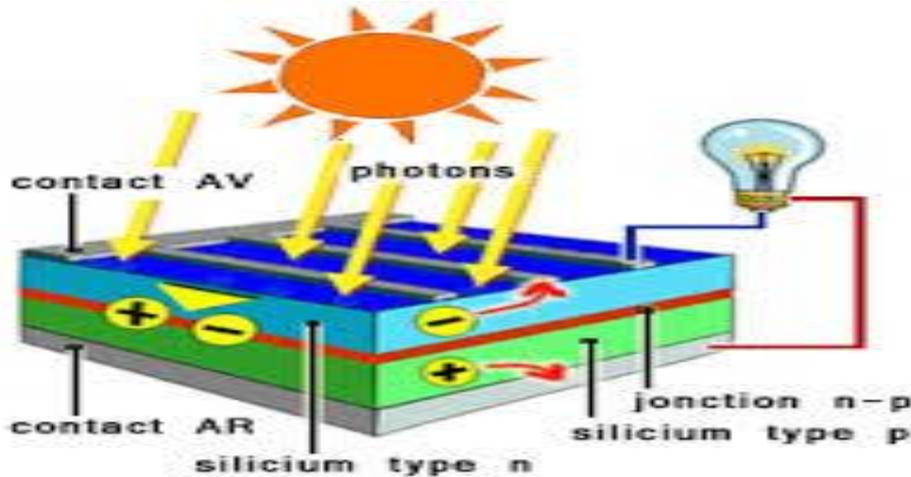


Figure III.3: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## 5.2. Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

# III. LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

**a. Les cellules monocristallines :**

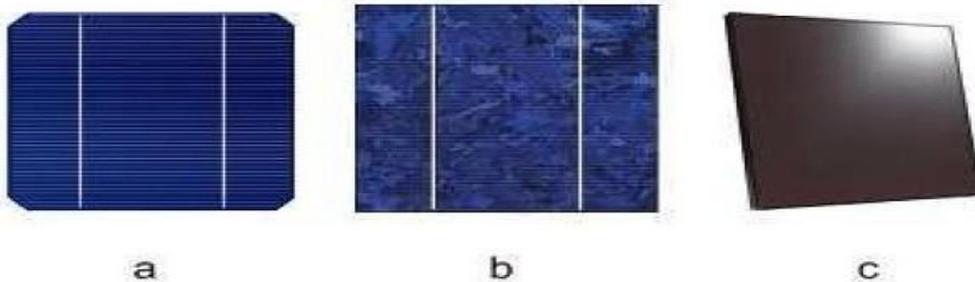
Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) cependant, elles coûtent trop chères dues à leur fabrication complexe.

**b. Les cellules polycristallines :**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire).

**c. Les cellules amorphes :**

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).



**Figure III.4: cellules photovoltaïque (a)monocristallines/ (b) poly cristallin/(c) amorphe**

## 6. Générateur photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis- à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension

de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ✓ Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- ✓ Protection mécanique et support.
- ✓ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur

## a. Paramètres du générateur photovoltaïques :

### ❖ Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) :

Exprimée en Volts, est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et aussi de la différence entre le niveau HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) du donneur et le niveau LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) de l'accepteur. Elle varie peu avec l'éclairement solaire :

$$V_{CO} = V_t * \ln [(I_c / I_s) + 1] \dots\dots(\text{III-1})$$

Ou  $V_t$ ,  $I_{cc}$  et  $I_s$  sont respectivement la tension thermique, le courant de court-circuit et le courant de saturation de la cellule.

### ❖ Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :

Exprimé en Ampère, il est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement sans application de tension extérieure. Il est proportionnel à l'éclairement et dépend principalement de la mobilité des porteurs de charges. C'est l'intensité du courant la plus grande que peut fournir un générateur PV.

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), L'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = I_{ph} / [1 + (R_s/R_p)] \dots\dots(\text{III-2})$$

# III. LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

$I_{ph}$  est le courant photo-généré de la cellule,  $R_s$  est la résistance série qui tient compte des contacts face avant et arrière de la cellule et  $R_p$  la résistance parallèle qui rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule.

## ❖ Point de puissance maximale $P_{max}$ :

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule  $P=V.I$ , pour que  $P$  soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit  $V.I$  est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale  $P_{max}$ .

## ❖ Facteur de forme $FF$ :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale)

$$FF = I_{max}.V_{max}/I_{cc}.V_{co}.....(III-3)$$

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule.

## ❖ Rendement ( $\eta$ )

C'est le rapport de la puissance maximale fournie ( $P_{max}$ ) sur la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_{inc}$ )

$$\eta = P_{max}/P_{inc}.....(III-4)$$

$P_{inc}$  : la puissance incidente sur la cellule.

$V_{max}$  : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

$I_{max}$  : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

## **b. Les caractéristiques I-V et P-V d'un générateur photovoltaïque :**

Les caractéristiques I-V et P-V sont des courbes qui représentent respectivement le courant  $I$  débité par un générateur photovoltaïque et sa puissance en fonction de la tension aux ses bornes.

### III. LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

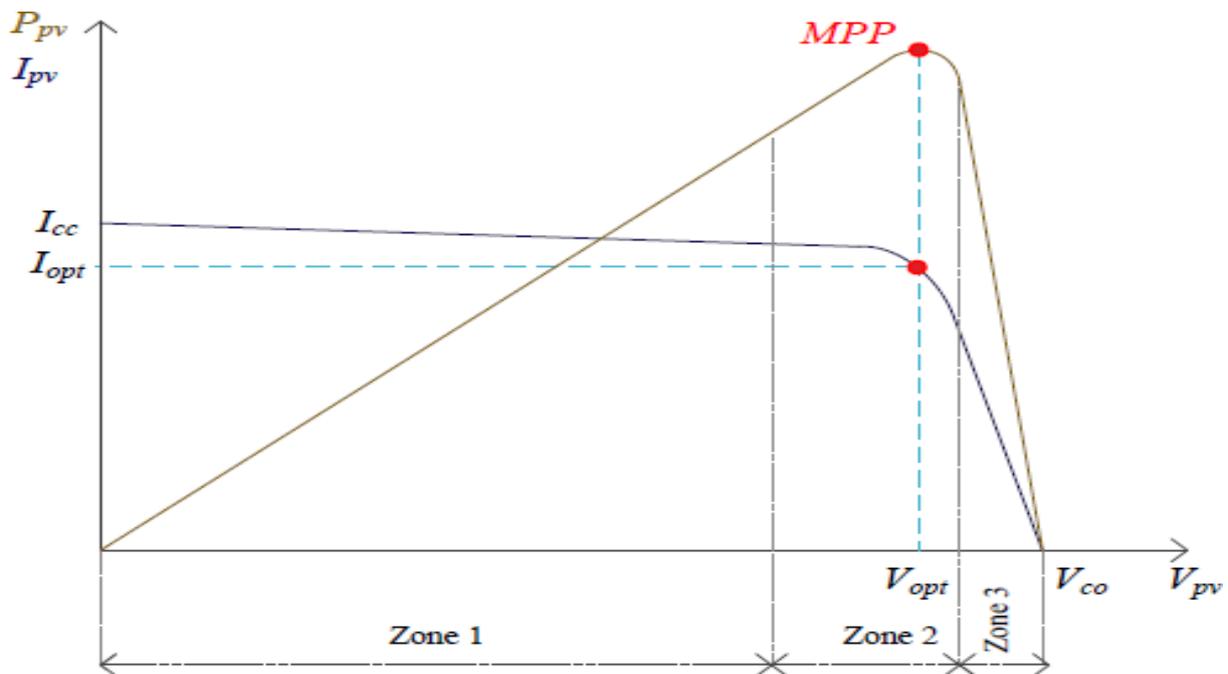


Figure III.5: caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV

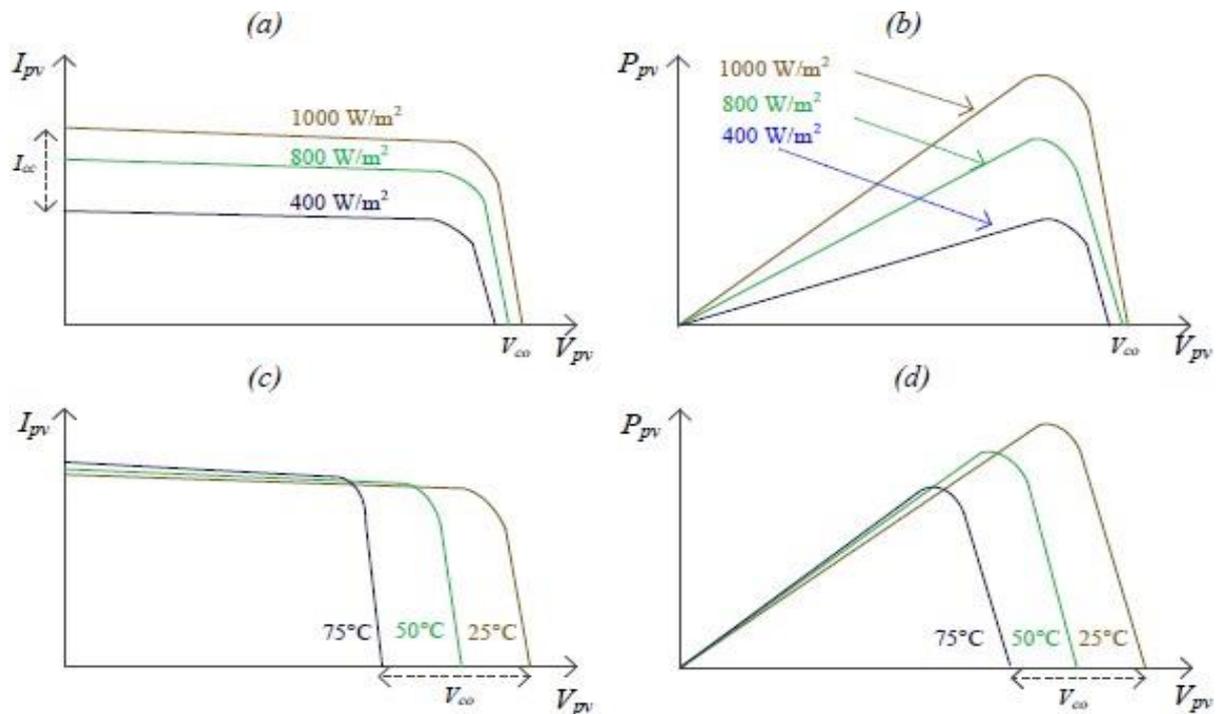
La figure ci-dessous montre les caractéristiques courant-tension  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  et puissance-tension  $P_{pv}$ - $V_{pv}$  d'un générateur photovoltaïque pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés.

La figure ci-dessus montre que la caractéristique I-V d'un générateur PV se dévise en trois zones :

- La zone (1):** courant reste constant quelle que soit la tension, le générateur PV fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (2):** représente la région préférée pour le fonctionnement d'un générateur PV ou le point optimale.
- La zone (3):** le générateur PV est assimilable à un générateur de tension.

Les conditions météorologiques ainsi que les demandes coté consommateur, rend complexe la possibilité d'un fonctionnement optimal. Remédier aux problèmes d'optimisation et de gestion des systèmes photovoltaïques, impose généralement un étage d'adaptation comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques ; contrôlés par des stratégies de poursuite en temps réel du point de fonctionnement à puissance maximale dites "MPPT" (*Maximum Power Point Tracking*).

### III. LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES



**Figure III.6: caractéristiques  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  et  $P_{pv}$ - $V_{pv}$  sous l'influence de ; (a) et (b): l'éclairement à température fixe, (c) et (d): la température à éclairement fixe.**

Les caractéristiques tension-courant et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclairagements. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant photovoltaïque et de la puissance produite, figure I.5 (a) et (b). L'accroissement du courant de court-circuit  $I_{cc}$  est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ . Par ailleurs, une augmentation de la température à éclairement fixe, engendre une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 à 2.5 mV/°C pour une cellule cristalline, ainsi qu'une légère augmentation de courant, figure I.5 (c) et (d)

En se référant à la figure I.5, il est évident qu'une hausse de l'éclairement et une baisse de la température favorisent l'exploitation des champs photovoltaïques. Cependant, ces deux conditions ne sont que rarement vérifiées simultanément dans l'année. En outre, sachant que l'éclairement est le paramètre prépondérant pour fonctionner en plein régime ; le peu de retour d'expérience, nous informe que le rendement d'une installation solaire même au Sahara n'est pas aussi élevé qu'attendu. À titre d'exemple, sous les conditions météorologiques proches des conditions STC (1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C) la température sur la surface des cellules peut

atteindre une température moyenne de 80 °C, donc leurs rendements va chuter de plus de 50% par rapport à sa valeur maximale.

#### 7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de 0.6 Volt pour des cellules en silicium. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Généralement, le nombre de cellules d'un module PV standard est de 36 ou 72 cellules. Cependant, il peut varier en fonction des applications spécifiques. La connexion des panneaux photovoltaïques entre eux est généralement conditionnée par des contraintes liées à l'application envisagée, au niveau de puissance et à la qualité de l'énergie. Une connexion série permet d'avoir le niveau de tension voulu. Quant à la connexion parallèle, elle est essentielle pour atteindre le niveau de puissance requis.

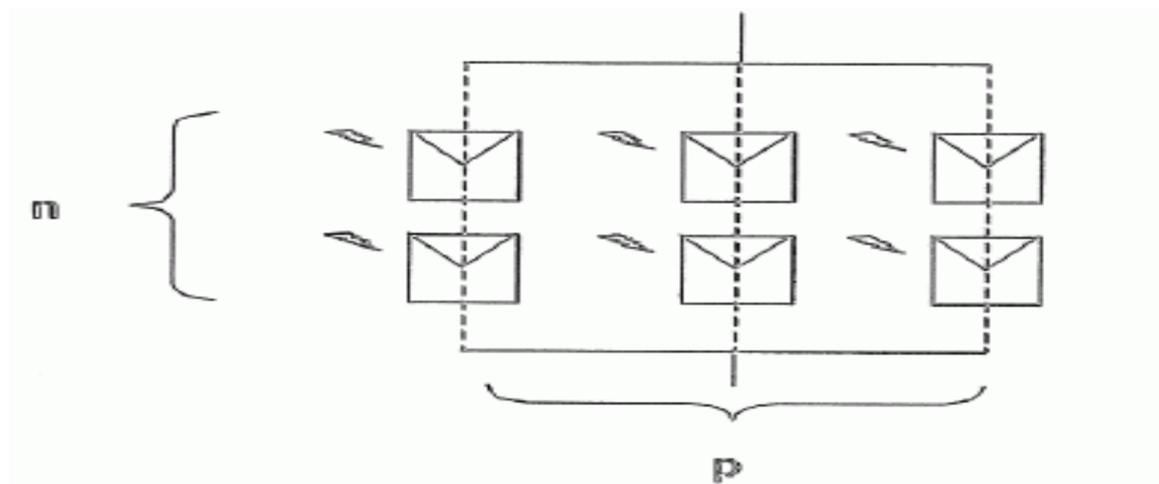


Figure III.7: association de panneaux PV ; (n) en série ; (p) en parallèle ; (n,p) mixte

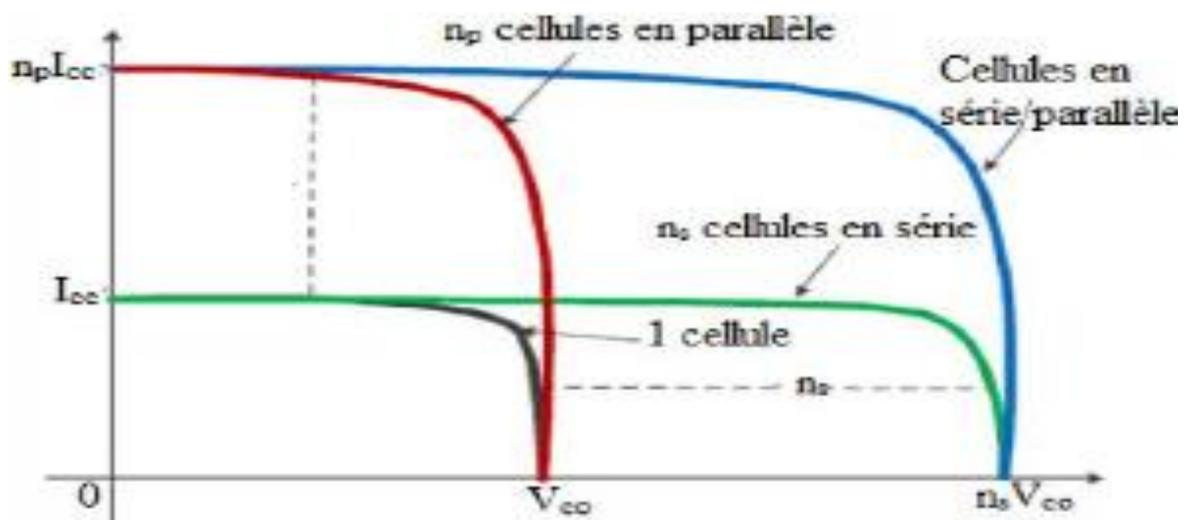


Figure III.8 Caractéristique d'un assemblage série/parallèle

## 8. Protections classiques d'un GPV

Les générateurs photovoltaïques sont destinés à produire de l'énergie électrique durant plusieurs années, alors nous devons assurer la protection électrique de l'installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant différentes pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- **Diode anti-retour** : a fin d'établir la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV. Ou bien quand une charge en connexion joue le rôle du générateur en basculant du récepteur.
- **Diode by-pass** : permette la protection lors de la mise en série de modules PV et ainsi de ne pas perdre la totalité de la chaîne et éviter les points chauds.

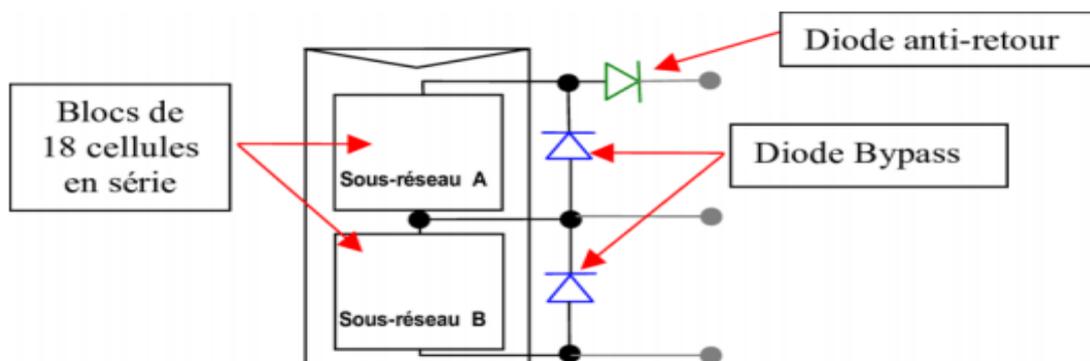


Figure III.9: GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

## 9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### Avantage :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, vu la petite taille des installations et leur fonctionnement silencieux.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques.

### Inconvénients :

- Le coût très élevé des investissements.
- Faible rendement de conversion.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïques autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.

## 10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné des généralités sur le système photovoltaïque en, expliquant le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur photovoltaïque(GPV).

L'augmentation de la puissance passe par la mise en série/parallèle des cellules photovoltaïques. Nous avons donc montré l'effet de mise en série/parallèle ainsi que l'effet de l'irradiation et de la température sur les caractéristiques non linéaires courant-tension.

Nous avons signalé que le rendement de ce type de générateur reste faible et ce a est dû à La faiblesse du rendement du l'unité, c'est-à-dire le cellule photovoltaïque telle qu'elle conçue actuellement.



# **IV. Modélisation de l'électrolyseur**

## 1. Introduction

Parmi les objectifs de notre travail est de créer un modèle représentatif du fonctionnement d'une cellule d'électrolyse à membrane polymère PEM donc dans ce chapitre IV en va présenter la modélisation en manière générale et aussi en va définir notre modèles qui sera mis en place avec ces principes et ces détails de fonctionnements.

## 2. Les Modèles utilisé pour l'électrolyseur PEM

Un électrolyseur est défini comme un appareil qui sépare l'eau ( $2H_2O$ ) en hydrogène ( $2H_2$ ) et oxygène ( $O_2$ ). L'électrolyse de l'eau peut être classée processus inverse de l'hydrogène qui est introduit dans une pile à combustible.

En termes de réaction électrochimique se produisant dans la pile à combustible pour générer de l'électricité DC, elle convertit DC énergie électrique en énergie chimique stockée dans hydrogène.

Il y a plusieurs modèles pour mettre en fonctionnements l'électrolyse de l'eau :

### 2.1. Modèle thermique

La plupart des modèles proposés sont adaptés pour l'électrolyse PEM. Modèle se base sur le bilan énergétique total d'un électrolyseur et qui s'exprime par l'équation:

$$C_t * \frac{dT}{dt} dt = \dot{Q}_{th} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{ea} \quad (IV-1)$$

Avec  $Q_{th}$  : Puissance thermique dégagée par la réaction, (W)

$$Q_{th} = N_s * (U_{cell} - U_{th}) * I \quad (IV-2)$$

$\dot{Q}_{loss}$ : Flux échangé avec l'extérieur, (W)

$$Q_{loss} = \frac{1}{R_t} * (T - T_a) \quad (IV-3)$$

$\dot{Q}_{eau}$ : Flux échangé avec l'eau d'alimentation, (W)

$$Q_{eau} = h_e * (T - T_{eau}) \quad (IV-4)$$

Où T (J.K-1) : Température de l'électrolyseur,  $T_a$  (°C) : Température ambiante

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

$T_{eau}$  (°C) : Température de l'eau,  $N_s$  (°C) : Nombre des cellules,  $U_{cell}$  (V): Tension d'une cellule,  $U_{th}$  (V): Tension thermo-neutre d'une cellule,  $I$ : Intensité (A),  $R_t$  : Résistance thermique,  $h_e$  : Coefficient d'échange .

Calcul de la température avec le modèle thermique statique :

$$T = T_{ini} + (\Delta t) / C_t * (Q_{th} - Q_{loss} - Q_{eau}) \quad (IV-5)$$

$T_{ini}$  : Température initiale (K),  $C_t$  : Capacité thermique de l'appareil,  $\Delta t$ : Intervalle de temps (s).

Les trois paramètres mentionnés ci-après doivent être déterminés expérimentalement. Il s'agit de la capacité thermique de l'appareil, de la résistance thermique et du coefficient d'échange [25].

## 2.2. Modèle électrochimique

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

$$U_c = U_{rev} + \eta_a - \eta_c + U_{RSP} \quad (IV-6)$$

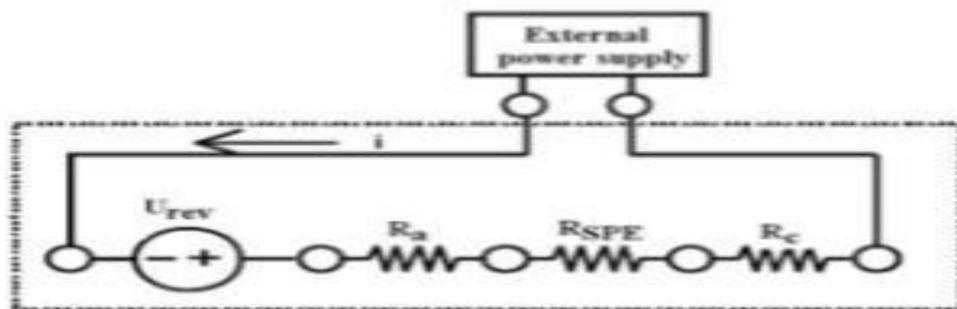
Où :

$\eta_a$ : Surtension anodique (V),  $\eta_c$ : Surtension cathodique (V).

$R_{SPE}$  : Résistance globale ( $c m^2 \Omega$ ).

Le schéma électrique équivalent de l'électrolyseur utilisé pour le modèle

Électrochimique se représente sous la forme suivante Figure (V.1):



**Figure V - 1: Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimique.**

La densité de courant traversant une électrode se superpose au courant dû à la réaction :



# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

Que l'on peut calculer par la relation de Butler-Vollmer. Alors, on aura l'intensité en fonction de la surtension et l'intensité à l'anode:

$$I = I_0 * \left[ \exp\left(\frac{a v_e F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-(1 - a a) v_e F \eta}{RT}\right) \right] \quad (\text{IV-8})$$

Où :  $I_0$  : Intensité aux électrodes (A),  $I$  : Intensité (A).

$\alpha$  : Coefficient de transfert de charge 0,5 [26].

$v_e$  : Coefficient stœchiométrique à l'anode  $v = 2$  et à la cathode  $v = -2$  [26].

$\eta$  : Surtension (V).

Alors les surtensions à l'anode et à la cathode s'expriment :

Anode :

$$\eta_a = \frac{RT}{F} \mathbf{F} \sinh^{-1} \left( \frac{I}{2I_0 a} \right) \quad (\text{IV-9})$$

Cathode :

$$\eta_c = \frac{RT}{F} \mathbf{F} \sinh^{-1} \left( \frac{I}{2I_0 c} \right) \quad (\text{IV-10})$$

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

$$E = a + b * \log(I) + c * I \quad (\text{IV-11})$$

Les Trois (3) paramètres sont à déterminer On peut déterminer les paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression) par une régression linéaire portant sur la variable  $I$ .

Les 3 paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont déterminés à partir de résultats expérimentaux et un sous-programme que nous avons développé. Ces paramètres dépendent de la température  $T$  et de la pression partielle en oxygène  $P_{O_2}$ . Dans notre cas, le prototype fonctionne à pression atmosphérique que l'on ne peut pas faire varier. Les paramètres ne sont donc déterminés qu'en fonction de la température [25].

## 2.3. Modèle thermodynamique

Pour quantifier clairement les interactions dynamiques, l'électrolyseur PEM est considéré comme ayant quatre auxiliaires: anode, cathode, membrane et accessoire de tension.

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

Chaque auxiliaire la dynamique et l'interaction entre eux sont envisagées. La tension auxiliaire calcule la tension appliquée à l'électrolyseur niveau en utilisant l'équation de Nernst, la polarisation ohmique et polarisation d'activation. Calculs auxiliaires de la membrane teneur en eau, traînée électroosmotique, diffusion d'eau et conductivité de la membrane. L'anode auxiliaire dynamiquement calcule les débits d'oxygène et d'eau et partiels pressions. De même, les pressions partielles d'hydrogène et d'eau et leurs flux sont obtenus dans le sous-système cathodique.

L'accessoire de stockage montre la dynamique de stockage dès l'hydrogène dans une bouteille en tenant compte de l'hydrogène initial niveau et compressibilité de l'hydrogène.

## 2.3.1. Modèle d'anode

Le craquage à l'eau et la réaction de dégagement d'oxygène ont lieu dans le compartiment anodique. La réaction demi-cellule est donnée comme :



L'oxygène évolue sous forme de gaz, les ions hydrogène se déplacent vers la cathode à travers la membrane, tandis que les électrons sont entraînés par l'alimentation électrique ducircuit extérieur. Le débit total d'oxygène est égal à l'oxygène généré soustrait du débit d'oxygène de sortie, l'entrée d'oxygène est supposée égale à zéro. De l'eau est fournie en continu au compartiment anodique, tandis qu'une petite quantité d'eau est entraînée vers la cathode par les ions hydrogène (traînée électroosmotique  $\dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{eod}}}$  et diffusion  $\dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{diff}}}$ ). Le mécanisme de transport de l'eau est décrit en détail plus loin dans la Section membrane [27].

Le taux de génération d'oxygène et le taux de consommation d'eau peuvent être écrits comme suit :

$$\dot{N}_{\text{O}_2} \rightarrow \dot{N}_{\text{O}_2\text{ai}} - \dot{N}_{\text{O}_2\text{ao}} + \dot{N}_{\text{O}_2\text{g}} \quad (\text{IV-13})$$

$$\dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{an}}} \rightarrow \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{ai}}} - \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{ao}}} - \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{eod}}} - \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{diff}}} \quad (\text{IV-14})$$

Les vitesses molaires des espèces peuvent être calculées à partir du rapport des pressions partielles à la pression anodique :

$$y_{\text{O}_2} = P_{\text{O}_2} \div P_{\text{an}} \quad (\text{IV-15})$$

La quantité d'oxygène générée dans l'anode peut être calculée en temps réel à partir de l'équation de Faraday :

$$\dot{N}_{\text{O}_2\text{g}} = (\mathbf{n} * \mathbf{I}) \div (\mathbf{4} * \mathbf{F}) \quad (\text{IV-16})$$

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

$$N_{O2ao} = y_{O2} * N_{ao} \quad (IV-17)$$

$$N_{H2Oao} = (1 - y_{O2}) * N_{ao} \quad (IV-18)$$

$$N_{ao} = N_{O2ao} + N_{H2Oao} \quad (IV-19)$$

Où le débit total de sortie de l'anode  $\dot{N}_{ao}$ , est obtenu par :

$$N_{ao} = K_{ao} * (P_{an} - P_{an0}) \quad (IV-20)$$

La pression totale de l'anode est la somme des pressions partielles de l'oxygène et de l'eau, qui sont dérivées de la loi des gaz parfaits :

$$P_{O2} = (N_{O2} * R_u * T_{el}) \div V_{an} \quad (IV-21)$$

$$P_{H2Oan} = (N_{H2Oan} * R_u * T_{el}) \div V_{an} \quad (IV-22)$$

$$P_{an} = P_{O2} + P_{H2Oan} \quad (IV-23)$$

La pression de saturation doit être définie pour les calculs d'humidité relative dans le module de membrane. Cependant, cela ne dépend que de la température [28]:

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24 * T - 10.554 * T^2 + 0.16636 * T^3 \quad (IV-24)$$

A est l'activité de la vapeur d'eau et est calculée comme suit :

$$a = P_{cat}/P \quad (IV-25)$$

### 2.3.2. Modèle de cathode

La cathode est le compartiment dans lequel le gaz hydrogène évolue. La réaction à lieu dans la cathode est donnée comme [27] :



Les ions hydrogène se combinent entre eux et les électrons, qui proviennent de l'alimentation électrique, génèrent de l'hydrogène gazeux. L'hydrogène gazeux produit s'accumule dans la cathode, si la pression de travail est réglée à une valeur supérieure à la pression atmosphérique. L'hydrogène est évacué vers le réservoir de stockage lorsque la pression souhaitée est atteinte. La quantité du débit d'hydrogène est égale à l'hydrogène généré soustrait par la quantité d'hydrogène prélevée à la sortie. L'hydrogène et l'eau dans la cathode peuvent être calculés comme suit:

$$N_{H2} \rightarrow N_{O2ai} - N_{O2ao} + N_{O2g} \quad (IV-27)$$

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ELECTROLYSEUR

$$N_{H_2O_{an}} \rightarrow N_{H_2O_{ai}} - N_{H_2O_{ao}} - N_{H_2O_{eod}} - N_{H_2O_{diff}} \quad (IV-28)$$

Le taux molaire de l'hydrogène peut être calculé comme suit:

$$Y_{H_2} = P_{H_2} \div P_{cat} \quad (IV-29)$$

La quantité d'hydrogène généré par la réaction chimique peut être calculée en temps réel à partir de l'équation de Faraday:

$$P_{H_2} = (N_{H_2} * R_U * T_{el}) \div V_{cat} \quad (IV-30)$$

$$N_{H_2co} = Y_{H_2} * N_{co} \quad (IV-31)$$

$$N_{H_2O_{co}} = (1 - Y_{H_2}) * N_{co} \quad (IV-32)$$

$$N_{co} = N_{O_{2co}} + N_{H_2O_{co}} \quad (IV-33)$$

Où l'écoulement du sous-système cathodique  $\dot{N}_{co}$ , est :

$$N_{co} = k_{co} * (P_c - P_{co}) \quad (IV-34)$$

Les pressions partielles de l'hydrogène et de l'eau peuvent être calculées à partir de la loi des gaz parfaits et la pression cathodique est égale à la somme des pressions partielles de l'hydrogène et de l'eau:

$$P_{H_2} = (N_{H_2} * R_U * T_{el}) \div V_{cat} \quad (IV-35)$$

$$P_{H_2O_{cat}} = (N_{H_2O_{cat}} * R_u * T_{el}) \div V_{cat} \quad (IV-36)$$

$$P_{cat} = P_{O_2} + P_{H_2O_{cat}} \quad (IV-37)$$

La pression de saturation doit être définie pour les calculs d'humidité relative dans le module de membrane. Cependant, cela ne dépend que de la température [28]:

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24 * T - 10.554 * T^2 + 0.16636 * T^3 \quad (IV-38)$$

A est l'activité de la vapeur d'eau et est calculée comme suit:

$$a = P_{act} / P \quad (IV-39)$$

### 2.3.3. Modèle de membrane

La membrane est considérée là où les ions hydrogène et l'eau peuvent être transportés dans le modèle.

Deux événements essentiels liés à l'eau sont disponibles dans le module membrane. Ce sont la diffusion et la traînée électroosmotique de l'eau. L'acton et suette ont rapporté que  $3.5e^4$  molécules d'eau sont transportées avec chaque proton vers la cathode, tandis que les ions

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

hydrogène traversent la membrane. a proposé un modèle pour le transport de l'eau à travers la membrane [27]:

$$N_{H_2O_{eod}} = \frac{nd * i * A * M_{H_2O}}{F} \quad (IV-40)$$

$$nd = 0.016 * T - 2.8955 \quad (IV-41)$$

Un autre problème avec la membrane est l'absorption d'eau, qui joue un rôle vital pour la mobilité ionique. L'absorption d'eau de la membrane (y) est définie:

$$y = 0.043 + 17.81 * a - 39.85 * a^2 + 36 * a^3 \quad 0 < a \leq 1 \quad (IV-42)$$

$$y = 14 + 1.4 * (a - 1) \quad 1 < a \leq 3 \quad (IV-43)$$

$$y_m = \frac{y_{cat} + y_{an}}{2} \quad (IV-44)$$

Un autre mécanisme important dans la membrane est le transport de l'eau par diffusion.

$N_{H_2O_{diff}}$  est la diffusion de l'eau en moles peut être exprimée comme:

$$N_{H_2O_{diff}} = D_w * \left( \frac{C_{wc} - C_{wa}}{t_{me}} \right) * A * M_{H_2O} \quad (IV-45)$$

Le coefficient de diffusion de l'eau peut être calculé comme suit:

$$D_w = D_y * \exp \left[ 2416 * \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (IV-46)$$

$$D_y = 10^{-10} \quad y_m < 2 \quad (IV-47)$$

$$D_y = 10^{-10} [1 + 2 * (y_m - 2)] \quad 2 \leq y_m \leq 3 \quad (IV-48)$$

$$D_y = 10^{-10} [3 - 1.67 * (y_m - 3)] \quad 3 \leq y_m \leq 4.5 \quad (IV-49)$$

$$D_y = 1.25 * 10^{-10} \quad y_m \geq 4. \quad (IV-50)$$

La concentration en eau  $C_w$  est définie par:

$$C_{wa} = \frac{\delta_{me.dry}}{M_{me.dry}} * y_{an} \quad (IV-51)$$

$$C_{wc} = \frac{\delta_{me.dry}}{M_{me.dry}} * y_{cat} \quad (IV-52)$$

La densité de l'eau dans cette équation est calculée comme suit:

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

$$M_{me. dry} = \frac{0.14395}{0.0112^{+1+(1-\frac{T}{649.727})^{0.0510}}} \quad (IV - 53)$$

La quantité totale d'eau transportée de l'anode à la cathode est la somme du transport par traînée électroosmotique et diffusion:

$$N_{H_2O_m} = N_{H_2O_{diff}} + N_{H_2O_{eo}} \quad (IV-54)$$

## 2.2.4. Modèle de Tension

Les électrolyseurs fonctionnent en mode courant ou en tension mode. Lorsqu'ils fonctionnent en mode tension, la tension est appliquée à l'électrolyseur et en fonction des conditions de fonctionnement l'électrolyseur tire le courant de la source et après quelques cycles transitoires, il a sa valeur de régime permanent. Ce le mode convient lorsque la source photovoltaïque est utilisée pour un électrolyseur. Cependant, la plupart des produits disponibles dans le commerce les électrolyseurs fonctionnent en mode courant et sous une tension de un électrolyseur est donné comme [27] :

$$V_{el} = E + V_{act} + V_{ohm} \quad (IV-55)$$

Où E est la tension en circuit ouvert,  $V_{act}$  est la polarisation d'activation,  $V_{ohm}$  est la polarisation ohmique. La tension de circuit ouvert, E, est définie comme l'équation de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{R * T}{2 * F} * \left[ \left( \frac{P_{H_2} * P_{O_2}}{a_{H_2O}} \right) \right] \quad (IV-56)$$

Où  $E_0$  est le potentiel standard, R est le gaz universel constante, T est la température de la cellule et  $a_{H_2O}$  est l'activité de l'eau entre l'anode et l'électrolyte pour plus de simplicité, on suppose ici pour être 1. La tension standard  $E_0$  est :

$$E_0 = \Delta G / (2 * F) \quad (IV-57)$$

Où  $\Delta G$  est l'énergie libre de formation de Gibbs.

La polarisation d'activation est obtenue par :

$$V_{act} = \frac{R * T}{2 * a * F} * \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (IV-58)$$

a est le coefficient de transfert de charge, i est la densité de courant et  $i_0$  est la densité de courant d'échange.

La polarisation ohmique est calculée par :

$$V_{ohm} = i * R_{ohm} \quad (IV-59)$$

Où la résistance de membrane  $R_{ohm}$ , est :

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (IV-60)$$

$\sigma_m$  est la conductivité de la membrane qui est calculé à partir de la teneur en eau de la membrane  $t_m$ , la température de l'électrolyseur  $T_{el}$ , comme suit :

$$\sigma_m = (0.00154 * \gamma_m - 0.00326) * \exp(1268 * (\frac{1}{303} - \frac{1}{T})) \quad (IV-61)$$

## 2.3.5. Modèle de stockage

Le  $H_2$  produit par l'électrolyseur est stocké dans une bouteille. Constant débit  $H_2$  remplit la bouteille jusqu'à ce que sa pression atteigne la pression cathodique de l'électrolyseur. La dynamique de stockage est obtenue comme suit [29]:

$$P_b - P_{bi} = \frac{z * NH_2 * R * T}{M_{H_2} * V_b} \quad (IV-62)$$

$P_b$  est la pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal),  $P_{bi}$  est la pression initiale du réservoir de stockage en (Pascal),  $R$  est la constante de gaz universelle (J / kmol · K),

$T$  est la température de fonctionnement (K),  $V_b$  est le volume du réservoir (m<sup>3</sup>),  $Z$  est le facteur de compressibilité en fonction de la pression :

$$Z = \frac{P * V_m}{R * T} \quad (IV-63)$$

Où,  $P$  et  $V_m$  sont la pression et le volume molaire respectivement

## 3. Modèle choisi

Pour faire nos simulations, nous avons choisi le modèle empirique de Tafel. Selon ce modèle, La relation entre le courant et la tension est donné par l'expression suivante :

$$V_e = a + b * \log(I) + c * I$$

A partir des courbes expérimentales, les différentes constantes seront déterminées.

La surface par cellule étant égal à 23 cm<sup>2</sup> [31] le tableau suivant donne la tension en fonction du courant.

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

T=80 °C	
Courant (A)	Tension (V)
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	1.8733333
1.7142857	1.9066667
2.000	1.9333333
2.5714286	1.9733333
3.000	2.0071429
4.000	2.0821429
5.000	2.15
6.000	2.201
7.000	2.26

**Tab IV. I : Données expérimentales d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-IV)**

Il faut donc déterminer les facteurs a, b et c. Nous choisissons 3 points de la courbe Expérimentale (T=80 °C par exemple) et par identification avec l'équation de Tafel, on obtient :

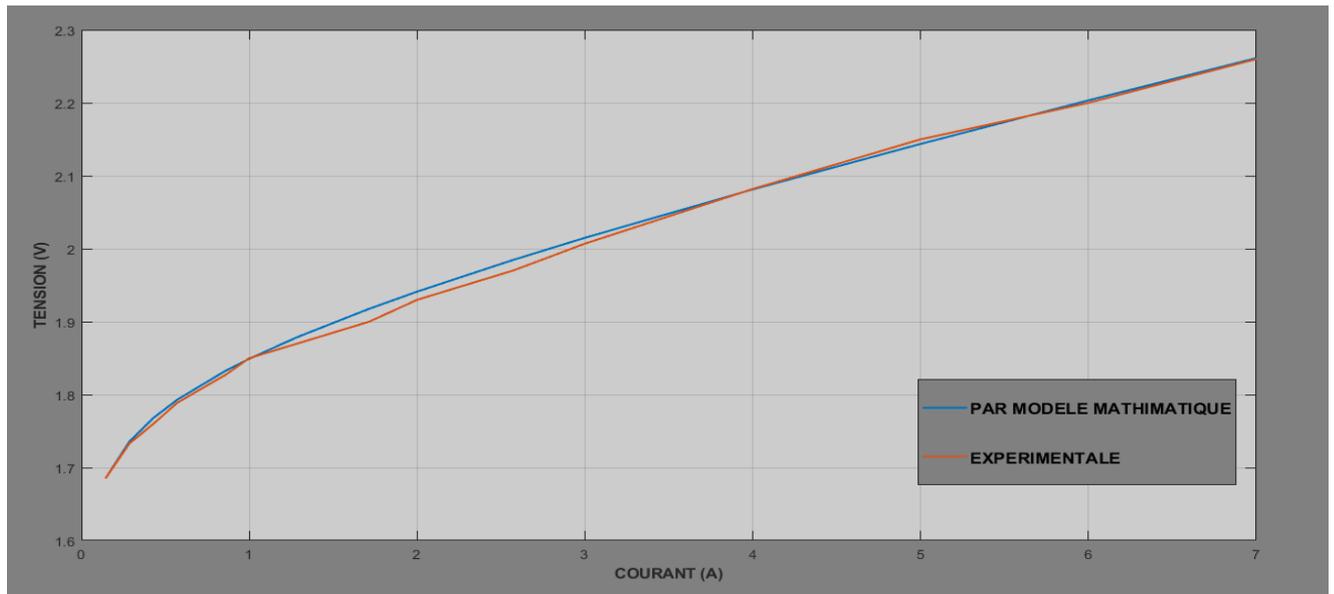
$$V = 1.8018 + 0.0632 * \log (I) + 0.0482 * I$$

Donc cet électrolyseur, peut être modélisé par cette équation.

### **Simulation de la caractéristique I=f(V) :**

Il apparaît clairement selon le résultat obtenu (figure IV.9) que le modèle choisi décrit bien le comportement de la cellule d'électrolyse.

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR



**Figure IV.2 : Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale et simulé pour  $T_{el} = 80^{\circ}\text{C}$**

## 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différents modèles existants pour les électrolyseurs de type PEM.

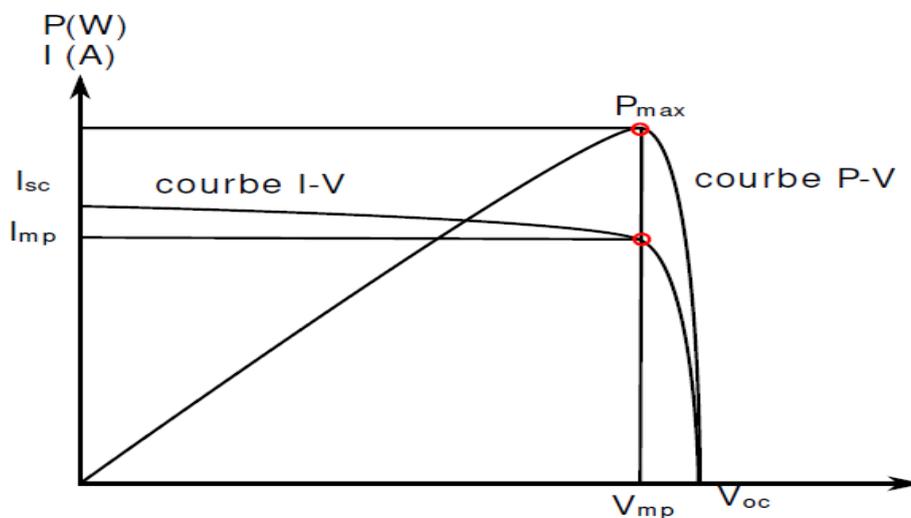
Pour notre travail, nous avons choisi le modèle de TAFEL qui nous paraît simple et reflétant bien la caractéristique courant/tension.

A partir de la courbe expérimentale et de l'électrolyseur considéré (millet), nous avons simulé la courbe qui paraît correspondre avec celle expérimentale.

# **V. Modélisation du générateur photovoltaïque**

# V. MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Un panneau photovoltaïque a une courbe caractéristique très différente des autres types de générateurs électriques. Des courbes typiques I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque sont montrés sur la Figure (V.1), On peut observer que la courbe P-V a un extremum, appelé point de puissance maximale (MPP, Maximum power point) pour lequel la puissance de sortie est maximale à irradiation et température fixes. Pour optimiser le fonctionnement du générateur photovoltaïque, ce dernier doit fonctionner le plus proche possible de ce point. Le voltage doit correspondre au  $V_{mp}$  en tout temps. Toutefois, ce point de puissance maximale dépend étroitement du rayonnement solaire et la température ambiante, qui varient selon les conditions climatiques locales.



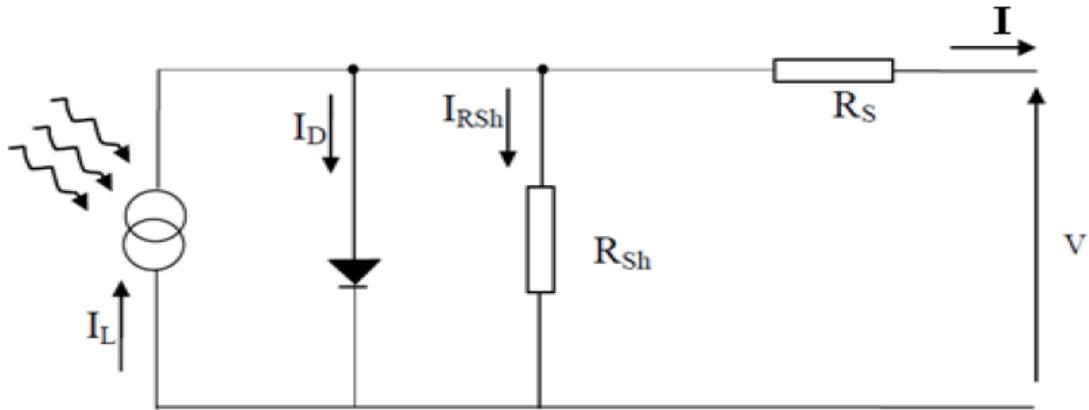
**Figure V.1: Courbes du panneau photovoltaïque montrant le point de puissance maximale  $P_{max}$  sur la courbe I-V et la courbe P-V**

Un module photovoltaïque convertit directement l'éclairement solaire en électricité, son courant et sa tension de sortie dépendent essentiellement de l'éclairement et de la température. A cet effet, la prédiction des performances d'une cellule/module/générateur PV nécessite l'élaboration d'un modèle mathématique permettant l'étude de son fonctionnement pour les différentes conditions météorologiques (éclairement, température, etc.). De nombreux travaux portent sur le développement des modèles mathématiques pour la simulation de la caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule/module/générateur PV, d'autres sont orientés vers la modélisation des performances des modules PV en terme de puissance électrique produite.

## 1. Modèle choisi

### 1.1. Modèle de simulation de la caractéristique I-V

Parmi les modèles trouvés dans la littérature, nous avons choisi le modèle à une diode pour la simulation



**Figure V.2: Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque**  
**D'après le circuit du module photovoltaïque et en appliquant la loi des nœuds, on trouve la relation entre le courant et la tension :**

$$I = I_L - I_D - I_{RSH} \quad (\text{V.1})$$

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + (I \cdot R_s)}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (\text{V.2})$$

Tel que :

$$V_{th} = \frac{A \cdot T_c \cdot K}{q} \quad (\text{V.3})$$

A : facteur d'idéalité.

$$I_{RSH} = \left( \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \right) \quad (\text{V.4})$$

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + (I \cdot R_s)}{V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{V.5})$$

Pour des modules supposés dépourvus de fuites ( $R_{sh}$  infinie et  $I_{RSH} \sim 0$ ), cette relation devient comme suit :

$$I = I_L - I_D$$

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + (I \cdot R_s)}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (\text{V.6})$$

On remplace  $V_{th}$  dans l'équation de courant et on obtient :

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{(V + (I \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot K} \right) - 1 \right] \quad (\text{V.7})$$

# V. MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Cette équation montre qu'il y a quatre paramètres inconnus :  $I_L$  (photo-courant),  $I_0$  (courant de saturation),  $A$  (facteur d'idéalité) et  $R_s$  (résistance série)

Il y a trois cas remarquables dans la caractéristique I-V :

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

$$I_{CC} = I_L - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{(I_{CC} \cdot R_s)}{A \cdot T_c \cdot K} \right) - 1 \right]$$

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

$$0 = I_L - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{c0}}{A \cdot T_c \cdot K} \right) - 1 \right]$$

- Pour le point de puissance maximale :

$$I_m = I_L - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{(V_m + (I_m \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot K} \right) - 1 \right]$$

Pour déterminer les paramètres inconnus, on utilise la méthode explicite simplifiée :  
On suppose que :

$$I_{CC} = I_L$$

$$0 = I_L - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{c0}}{A \cdot T_c \cdot K} \right) \right]$$

$$I_m = I_L - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{(V_m + (I_m \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot K} \right) \right]$$

$$I_0 = I_{CC} \left[ \exp \left( - q \frac{V_{c0}}{A \cdot T_c \cdot K} \right) \right] \quad \text{(V.8)}$$

$$I = I_{CC} \left[ 1 - \exp \left( q \frac{(V - V_{c0} + (I \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot K} \right) \right]$$

$$I_m = I_{CC} \left[ 1 - \exp \left( q \frac{(V_m - V_{c0} + (I_m \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot K} \right) \right] \quad \text{(V.9)}$$

$$R_s = \frac{\frac{A \cdot T_c \cdot K}{q} \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{CC}} \right) + V_{c0} - V_m}{I_m} \quad \text{(V.10)}$$

Pour déterminer le facteur d'idéalité  $A$  :

$$\frac{dP}{dV} = 0 = \frac{dI}{dV} V + I \frac{dV}{dI}$$

$$A = \frac{q (2 V_m - V_{c0})}{KT \left[ \frac{I_{sc}}{I_{cc} - I_m} + \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]} \quad \text{(V.11)}$$

## 1.2. Paramètres de champ photovoltaïque

$$I_0(\text{gen}) = N_p * I_0(\text{mod})$$

$$V_r(\text{gen}) = N_s * V_r(\text{mod})$$

$$R_s(\text{gen}) = \frac{N_s}{N_p} * R_s(\text{mod})$$

Donc l'équation de générateur est de la forme :

$$I_{\text{gen}} = I_{\text{CC}} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{(V_{\text{gen}} + (I_{\text{gen}} * R_{s(\text{gen}}))}{A * T_c * K}} \right) - 1 \right] \quad (\text{V.12})$$

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

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

$I_{\text{gen}}$  : le courant délivré par le générateur

Et on peut écrire la relation (V-I) comme suit :

$$V_{\text{gen}} = - I_{\text{gen}} * R_{s(\text{gen})} + V_{\text{th}} * \log \left( \frac{- I_{\text{gen}} + I_{\text{CC}} + I_0}{I_0} \right) \quad (\text{V.13})$$

## 2. Simulation de la caractéristique I=f(V)

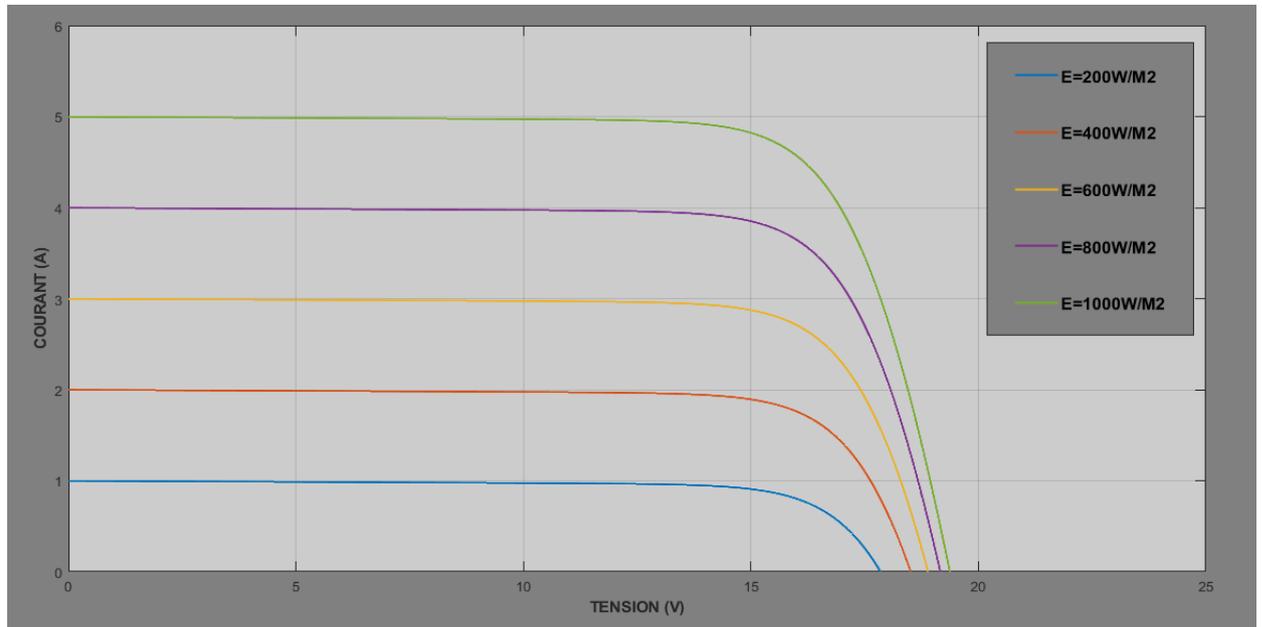
Nous avons choisi le module photovoltaïque du type **BP 585F** dont les caractéristiques dans les conditions standards ( $E=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ) sont montées sur le tableau suivant :

<b>Pm(w)</b>	<b>85</b>
<b>Vco(v)</b>	<b>22.03</b>
<b>Icc(A)</b>	<b>5</b>
<b>Vm(v)</b>	<b>18</b>
<b>Im (A)</b>	<b>4.72</b>
<b><math>\alpha(\text{mA/C}^\circ)</math></b>	<b>3.2</b>
<b><math>\beta(\text{mV/C}^\circ)</math></b>	<b>-80</b>
<b>Ns</b>	<b>36</b>
<b>NOCT (C°)</b>	<b>47</b>

**Tab V.1 : les caractéristiques de PV type BP 585F dont dans les conditions standards ( $E=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ )**

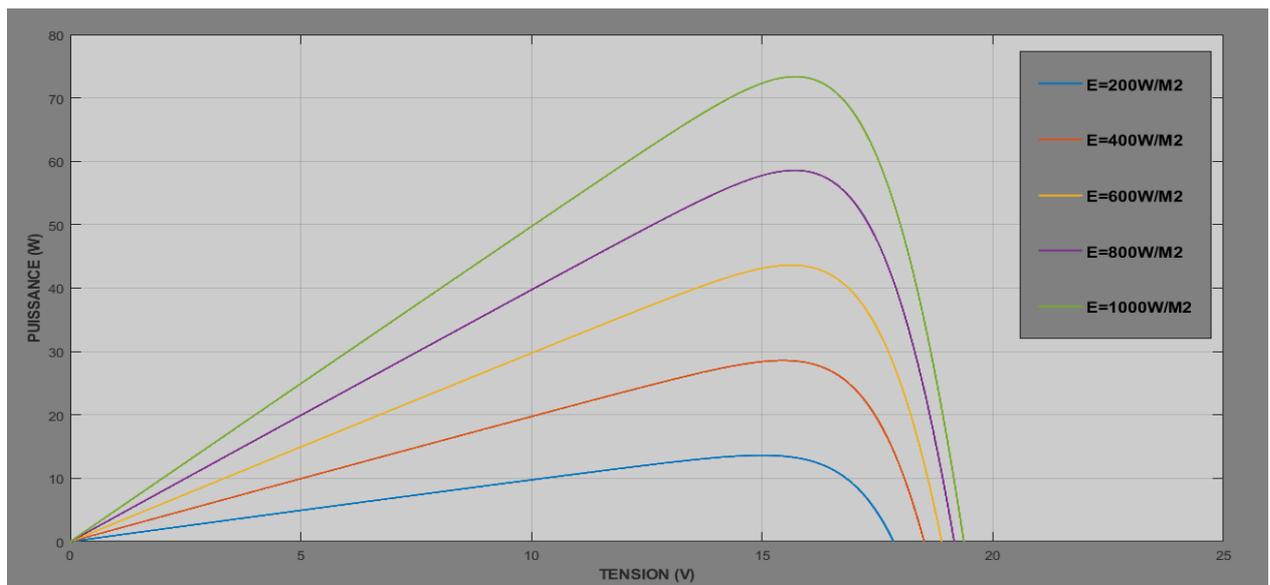
## 2.1.résultats pour une température constante $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et différents éclairagements

Pour étudier les performances du module, nous avons varié l'éclairage avec une température fixe ( $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La figure montre la variation du courant en fonction de la tension.



**Figure V.3 : Simulation de la caractéristique (I-V) avec différents éclairagements, pour  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**

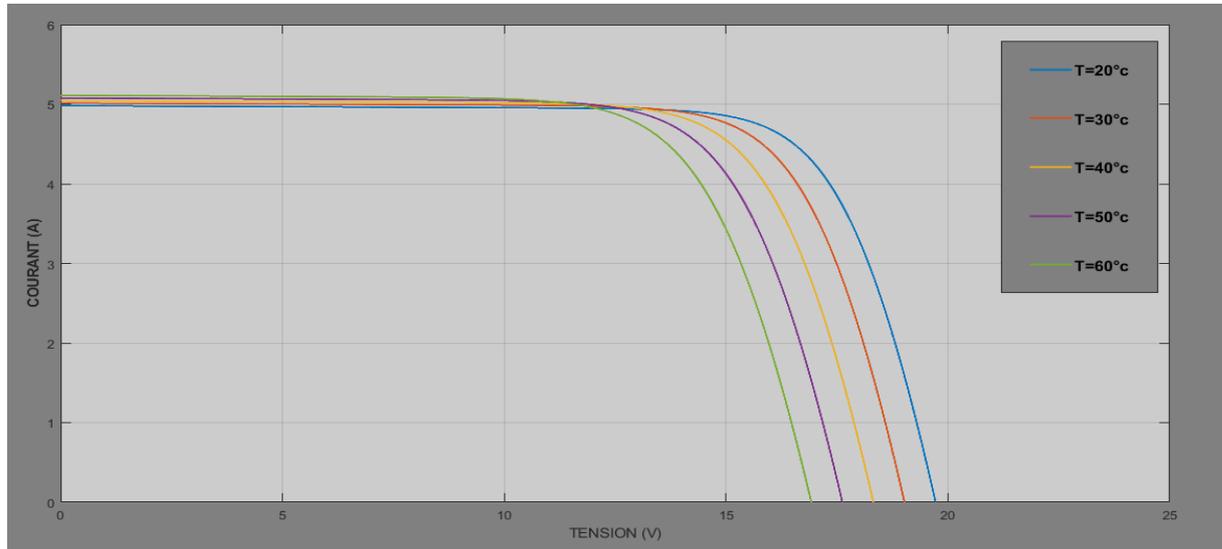
La figure ci-dessous (Figure V.4) représente la puissance électrique délivrée par le module en fonction de la tension.



**Figure V.4 : Simulation de la caractéristique (P-V) avec différents éclairagements, pour  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$**

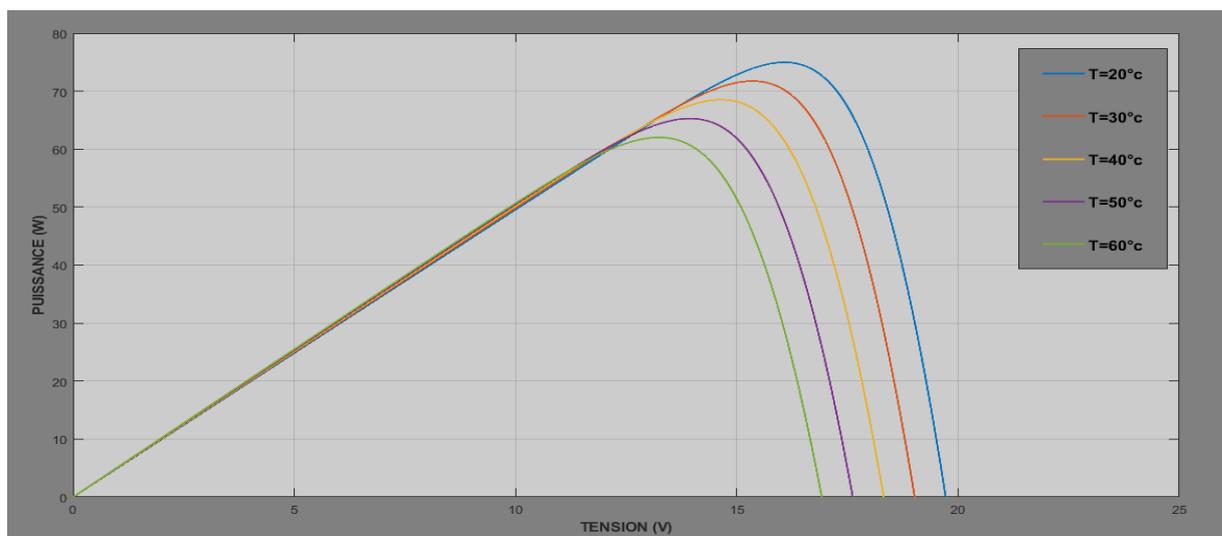
## 2.2. résultats pour un éclairement constant $E=1000 \text{ W/m}^2$ et différentes températures

A partir des résultats de simulation, on a observé que la variation de la température influe sur la tension et le courant, tel que le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) qui augmente légèrement avec l'augmentation de la température, par contre la tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ ) diminue avec l'augmentation de la température, comme indiqué sur la figure suivante (fig V.5) :



**Figure V.5: Simulation de la caractéristique (I-V) avec différentes températures, pour  $E=1000\text{W/m}^2$**

Les cellules sont assez sensibles aux variations de la température. En effet, les résistances internes du module augmentent avec l'augmentation de cette dernière. Quand la température d'une cellule augmente, le courant augmente faiblement mais la tension diminue, ce qui diminue la puissance. La **Figure V.5** montre que la variation de la puissance est opposée à celle de la température.



**Figure V.6 : Simulation de la caractéristique (P-V) avec les différentes températures, pour  $E=1000\text{W/m}^2$**

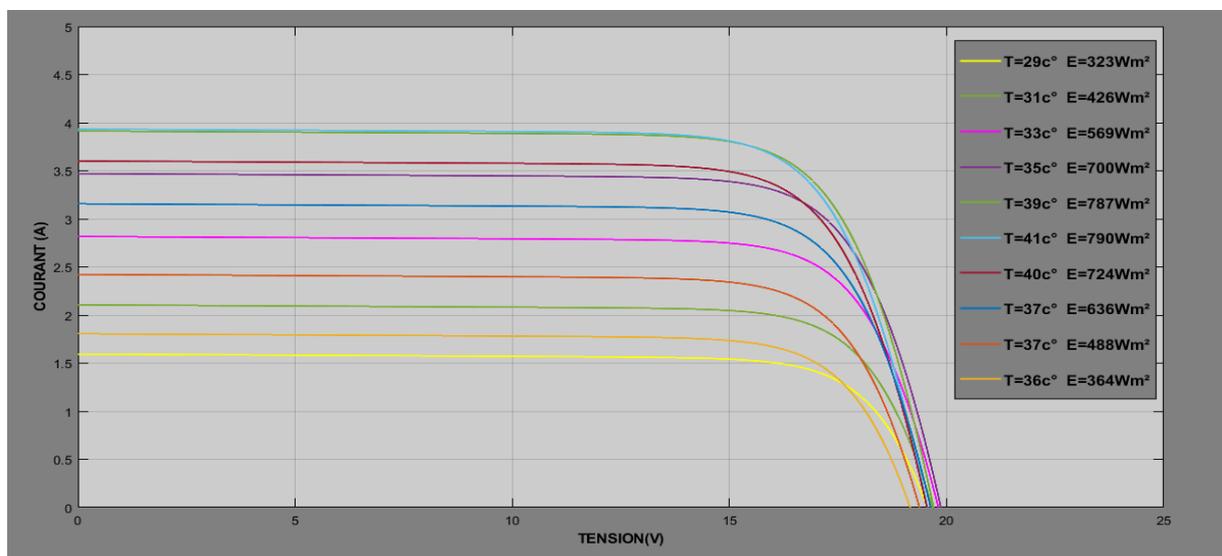
## 2.3.résultats pour une journée typique

Dans le but de tester le module pour des données réelles, on a utilisé les données trouvées dans la littérature (journée du 04/04/2004 à Ouargla) [30] ; Ces données sont visibles dans le tableau suivant :

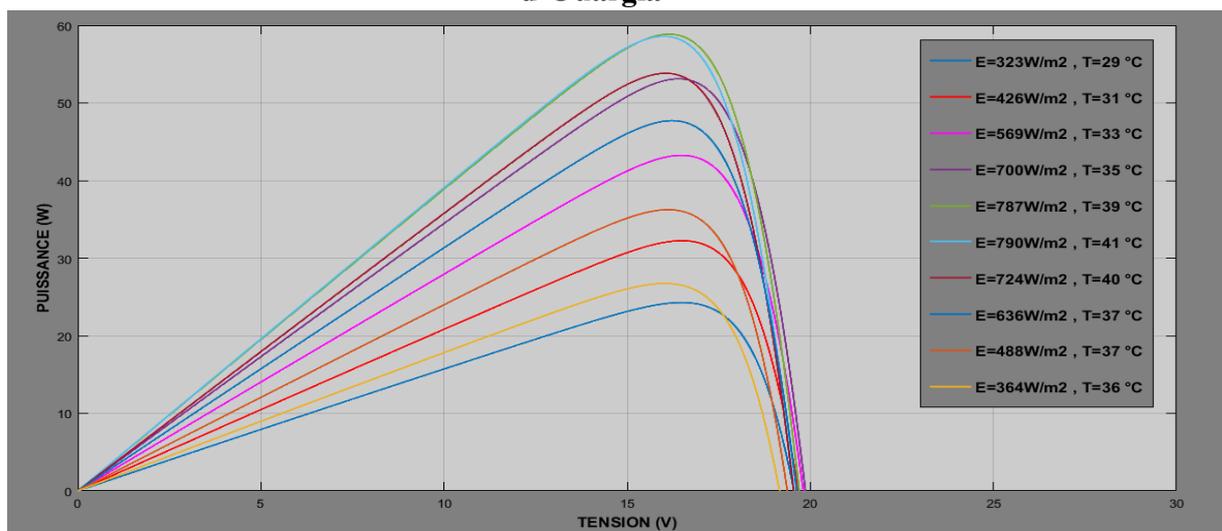
Heure	8 :00	9 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00	17 :00
E(w/m <sup>2</sup> )	323	426	569	700	787	790	724	636	488	364
T(c°)	29	31	33	35	39	41	40	37	37	36

**Tab V.2 : Les éclairagements et les températures de la journée 04/04/2004 à Ouargla [30]**

La simulation pour cette journée donne les résultats montrés sur les figures suivantes :



**Figure V.7 : Simulation de la caractéristique (I-V) avec des données réelles du site d'Ouargla**



**Figure V.8 Simulation de la caractéristique (P-V) avec des données réelles du site d'Ouargla**

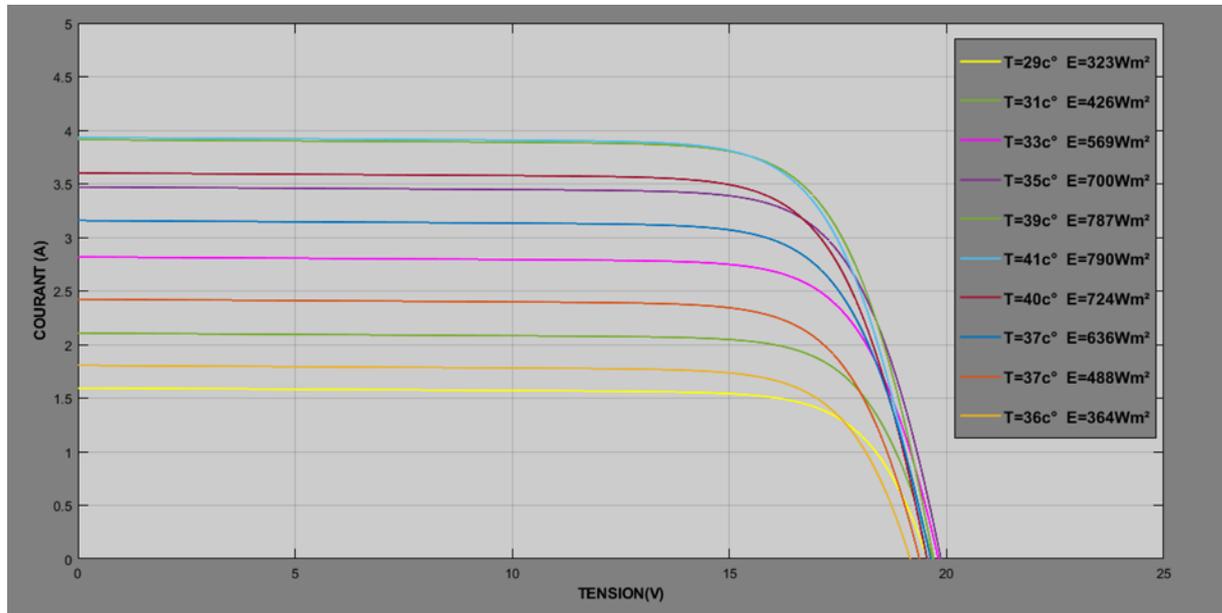


# **VI. Etude du couplage direct générateur PV / Electrolyseur**

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

## 1. Introduction

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de la simulation du couplage direct générateur PV/Electrolyseur en prenant comme données, la variation de l'irradiation solaire pour une journée typique correspondant au 04 /04/2004 à Ouargla. Les courbes courant-tension sont présentés sur la figure (VI.1).



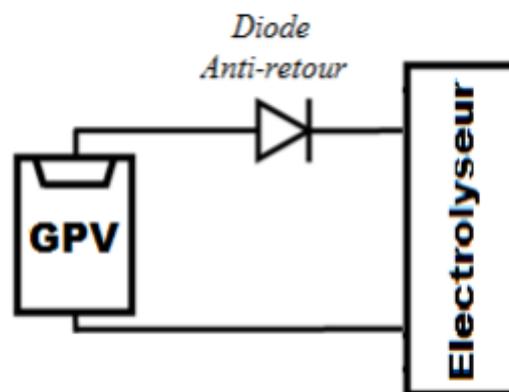
**Figure-VI.1 : les courbes I(V) de journée typique à Ouargla.**

Le panneau utilisé est le **BP 585F** dans les caractéristiques sont données en annexe 3

Les caractéristiques de l'électrolyseur choisi sont donnés (chapitre 4).

Notons que le but de cette étude est d'optimiser ce couplage d'un point de vue énergétique et d'un point de vue production d'hydrogène.

L'élément clé de cette optimisation est le nombre de cellules d'électrolyse et leur disposition en série et/ou en parallèle.



# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

## 2. première cas étudié 1 panneau PV et mise en série des cellules de l'électrolyseur

### 2.1. calcul du nombre de cellules série $n_s$ optimal

La tension par cellule est donné par :

$$V_{cell} = 1.8018 + 0.0632 * \log(I_{cell}) + 0.0482 * I_{cell} \quad (\text{voir chapitre 4})$$

La tension de l'électrolyseur est donc

$$V_{ely} = n_s v_{cell} \quad (\text{VI.1})$$

$n_s$  = nombre de cellules d'electrolyse en serie

Au point de fonctionnement optimal (puissance PV maximale), nous avons :

$$\begin{cases} V_{ely} = V_{PVmax} \\ I_{ely} = I_{PVmax} \end{cases} \quad (\text{VI.2})$$

$$\text{Et : } I_{cell} = I_{ely} = I_{PVmax} \quad (\text{cellules mise en série})$$

Nous pouvons donc, en déduire pour chaque heure de la journée, le nombre de cellules  $n_s$  qu'il faut mettre en série pour utiliser le maximum de puissance que peut fournir le générateur PV par :

$$n_{sopt} = \frac{V_{pmax}}{1.8018 + 0.0622 \log I_{PVmax} + 0.0482 I_{PVmax}} \quad (\text{VI.3})$$

### 2.2. calcul du taux de production de H2

Nous calculons, pour chaque heure, le taux pour une journée entière.

Le taux de production d'H2 (voir chapitre 2) peut être calculé par :

$$n_{H2} = \frac{\eta_F n_s I_{cell}}{n_e F} \quad \left( \frac{\text{moles}}{\text{s}} \right) \quad (\text{VI.4})$$

$$\eta_F = \text{rendement faradique de la cellule} = 100\%$$

$$n_e = \text{nombre d'électrons} = 2$$

$$n_s = \text{nombre de cellules en série}$$

$$F = \text{contant de FARADAY}$$

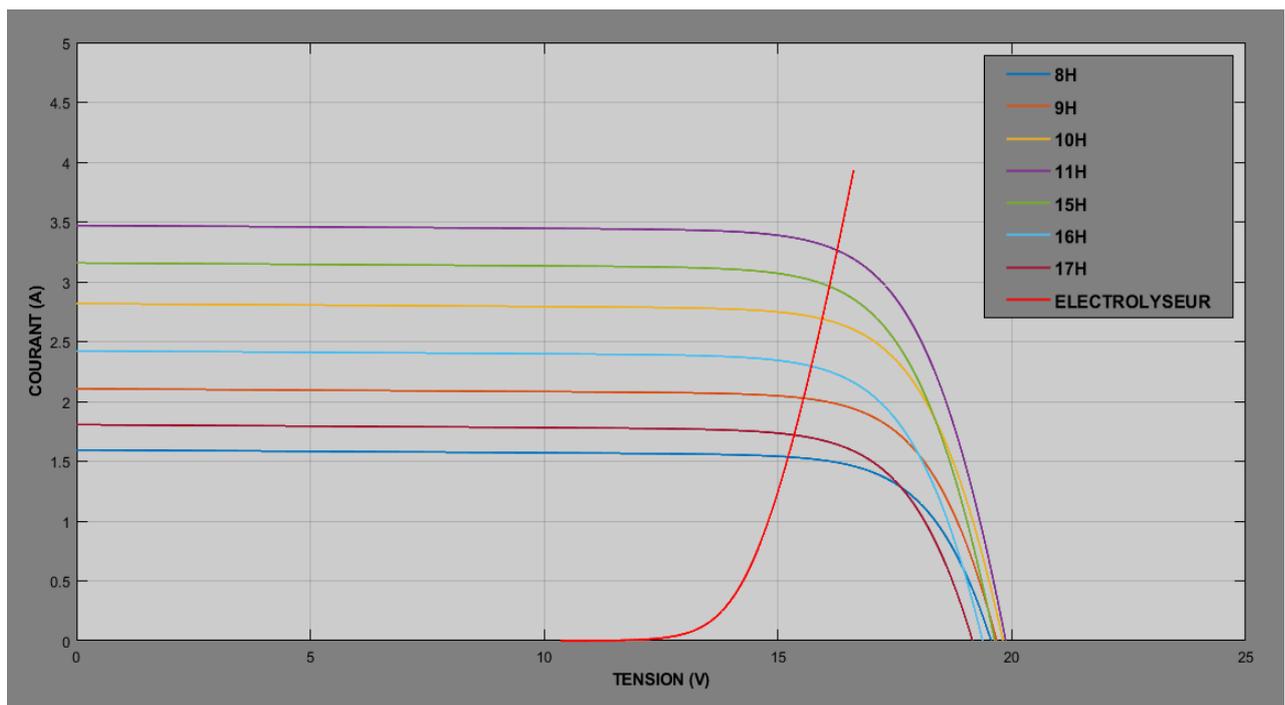
Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant (tableau VI.1)

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

heure	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
$P_{PVmax}$	24.3	32.3	43.25	53.1	58.87	58.6	53.82	47.72	36.25	26.71
$I_{PVopt}$	1.6	2.1	2.8	3.46	3.9	3.93	3.6	3.15	2.42	1.8
$V_{PVopt}$	15.18	15.38	15.44	15.34	15.09	14.91	14.95	15.15	14.98	14.83
$n_{sopt}$	8	8	8	8	7	7	7	8	8	8
$n_{H2opt}(10^{-6})$ mole/s	66.32	87.04	116	143.36	141.4	142.35	130.55	130.52	98.8	74.56
$n_{H2opt}(10^{-4})$ g/s	1.34	1.75	2.34	2.89	2.85	2.87	2.63	2.63	1.99	1.50
$n_{H2opt}(10^{-3})$ L/s	1.48	1.94	2.6	3.21	3.16	3.18	2.92	2.92	2.21	1.66

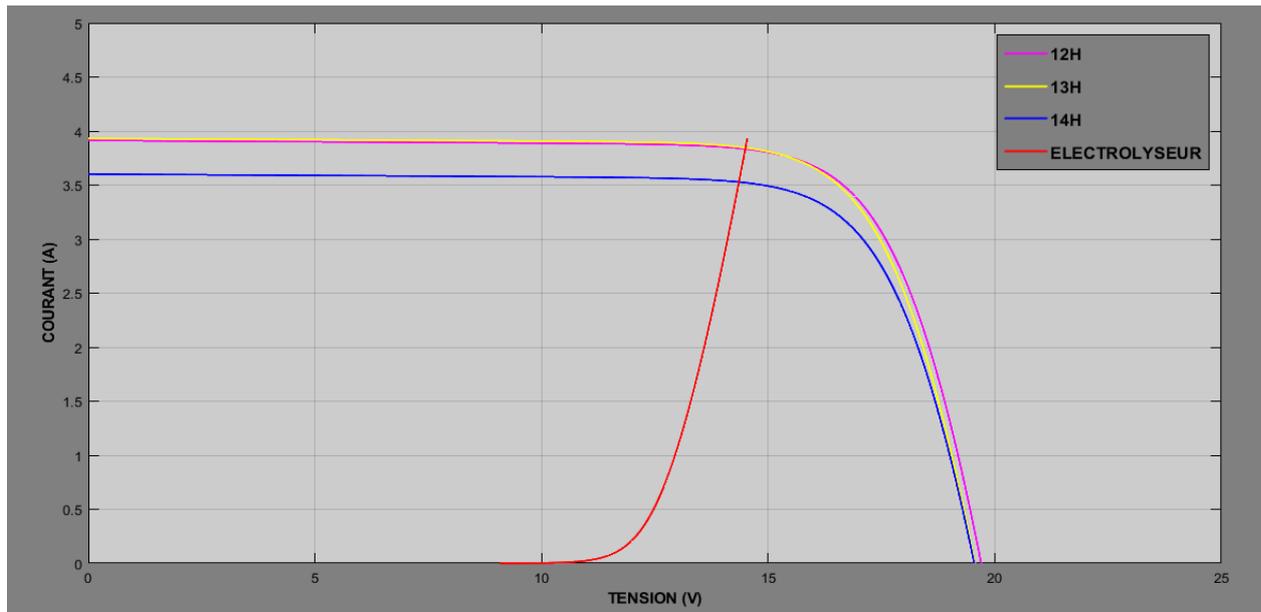
**Tab(VI.1) : taux de production de H2 pour 1 PV.**

La figure (VI.2) donne les caractéristiques I(V) du panneau PV et de l'électrolyseur



**(a) : les courbes I(V) pour ns=8**

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR



(b) : les courbes I(V) pour ns=7

Figure-VI.2 : caractéristiques I(V) pour différent heures.

Le taux de production journalier peut être déduit en écrivant que :

$$\begin{aligned}n_{H_2\text{journee}} &= (\sum n_{H_2}) 3600 \\ &= 4.07 \text{ moles} \\ &= 8.22 \text{ gr} \\ &= 91.35 \text{ L}\end{aligned}$$

### 3. deuxième cas étudié 2 panneaux PV en série et mise en série des cellules de l'électrolyseur

Nous avons vu que le taux de production de H<sub>2</sub> est une fonction du produit (ns\*I<sub>pv</sub>). En mettent 2 panneaux PV en série, la tension augmente et le courant inchangé.

Pour l'adaptation en tension, il faut donc augmenter le nombre de cellules ns de l'électrolyseur.

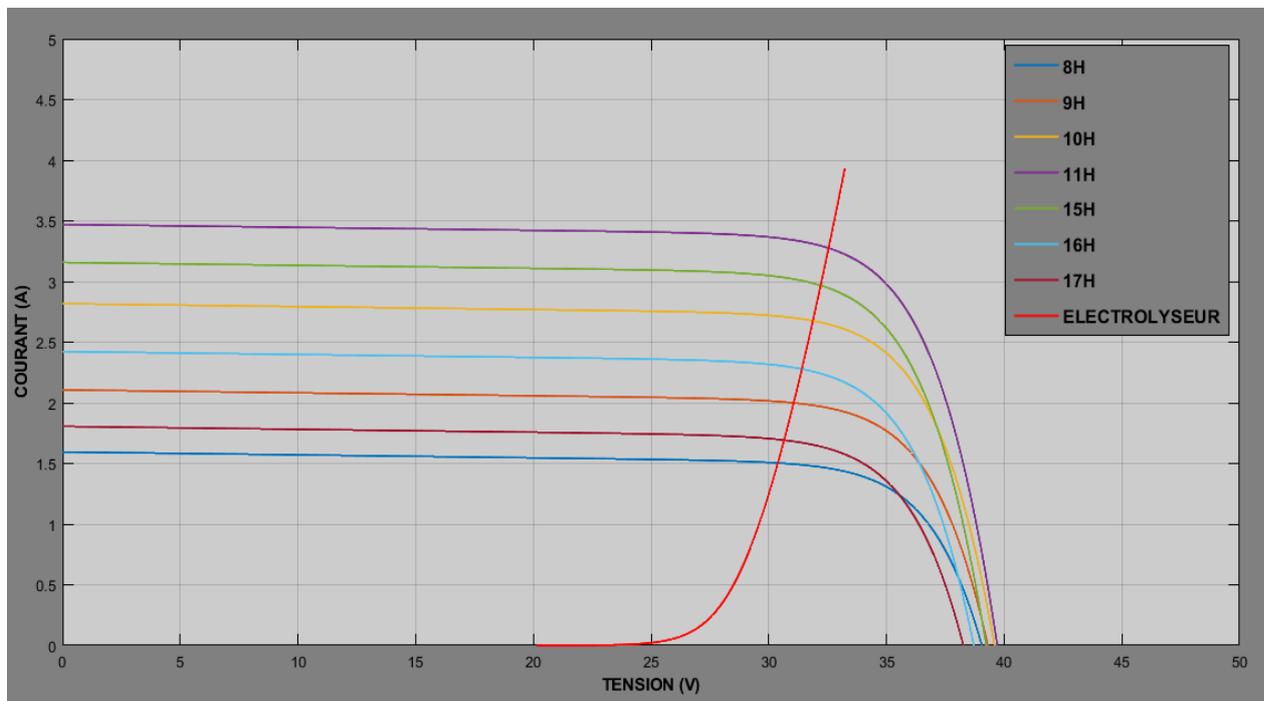
En utilisant les mêmes équations (VI.1) ;(VI.2) ;(VI.3) et(VI.4), nous présentons dans le tableau suivant (tableaux VI.2), les résultats obtenus.

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

Heure	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
P_PVmax	48.6	64.6	86.5	106. 2	117. 7	117. 2	107.6 4	95.4 4	72.5	53.42
I_PVopt	1.6	2.1	2.8	3.46	3.9	3.93	3.6	3.15	2.42	1.8
V_PVopt	30.37	30.76	30.8 8	30.6 8	30.1 8	29.8 2	29.9	30.3	29.96	29.66
n_sopt	16	16	16	15	15	15	15	15	15	16
$n_{H2opt} (10^{-6})$ mole/s	132.6 4	174.0 8	232	268. 8	303	305. 4	279.7 5	244. 8	187.9 5	149.1 2
$n_{H2opt} (10^{-4})$ g/s	2.68	3.5	4.68	5.78	5.7	5.74	5.26	5.26	3.98	3
$n_{H2opt} (10^{-3})$ L/s	2.96	3.88	5.2	6.42	6.32	6.36	5.84	5.84	4.42	3.32

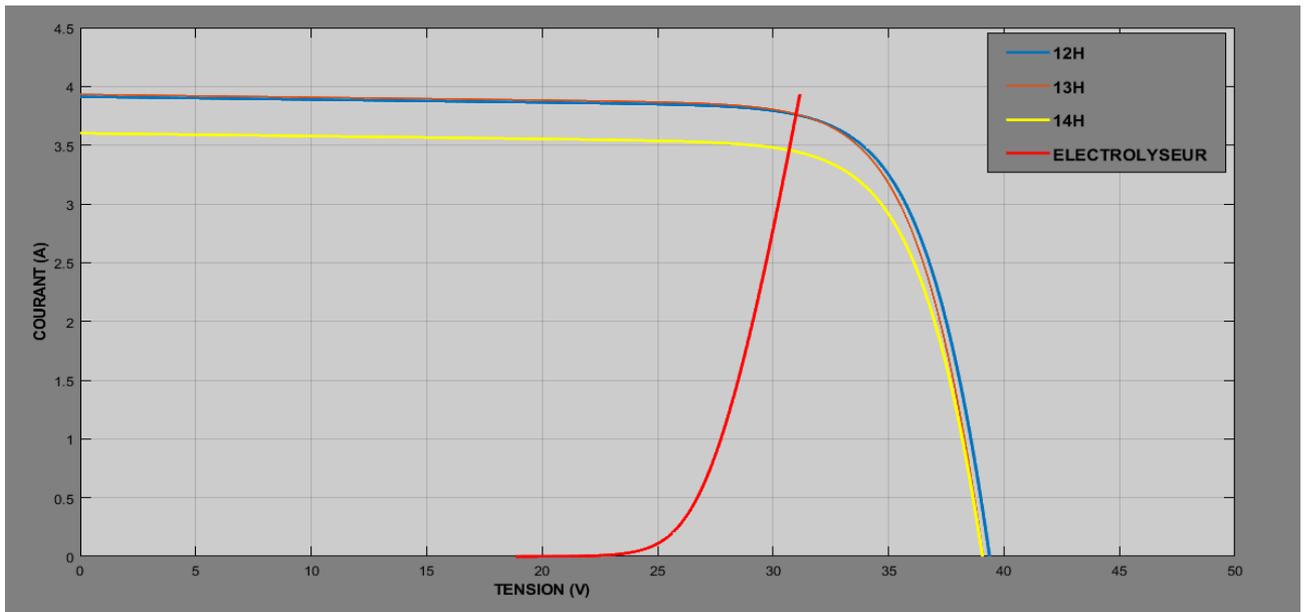
**Tab-VI.2 : taux de production de H2 pour 2 PV**

Dans ce cas, les résultats sont donnés sur la figure (VI.3).



**(a) :les courbes I(V) pour ns=16**

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR



(b) :les courbes I(V) pour ns=15

Figure-VI.3 : caractéristiques I(V) pour différent heures de 2 PV mise en série.

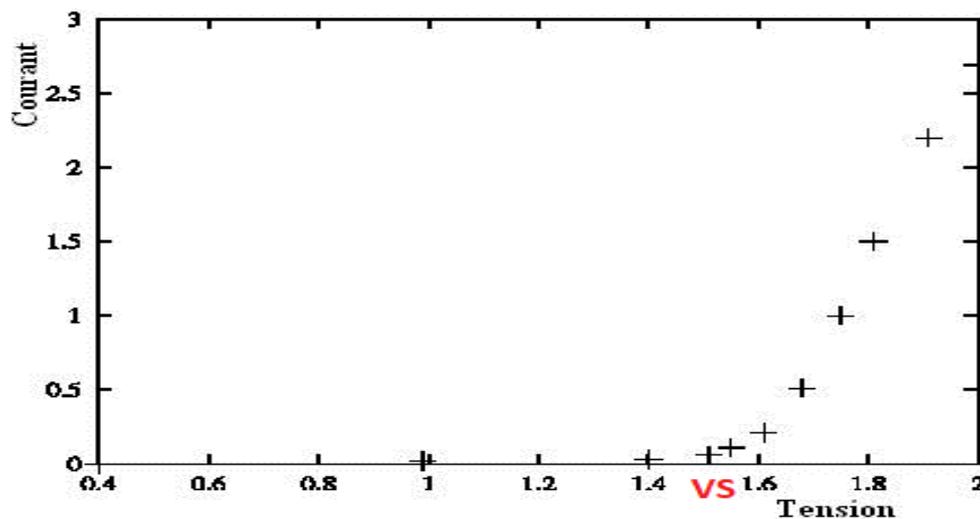
Le taux de production journalier dans ce cas est égal à :

$$\begin{aligned}
 n_{H_2 \text{ journée}} &= (\sum n_{H_2}) 3600 \\
 &= 8.14 \text{ moles} \\
 &= 16.44 \text{ gr} \\
 &= 182.7 \text{ L}
 \end{aligned}$$

## 4. Analyse et Interprétation

### 4.1. Influence de la variation du nombre de cellules en série de l'électrolyseur

Pour 1 cellule la courbe I(V) est de la forme suivante :



Vs étant la tension minimale requise pour l'initiation de l'électrolyseur.

Cette caractéristique peut être représentée par les équations suivants :

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

$$\begin{cases} I_{cell} = 0 & \text{pour } V_{cell} \leq V_{scell} \\ I_{cell} = a_{cell}(V_{cell} - V_{scell}) \end{cases} \quad (VI.5)$$

$a_{cell}$  = pente de la droite pour une cellule.

Si on met  $n_s$  cellules en série, on aura :

$$V_{ely} = n_s v_{cell}$$

$$I_{ely} = I_{cell}$$

En remplaçant dans l'équation (VI.5), nous obtenues

$$I_{ely} = a_{cell} \left( \frac{V_{ely}}{n_s} - V_{scell} \right)$$

$$\Rightarrow I_{ely} = \left[ \frac{a_{cell}}{n_s} \right] (V_{ely} - n_s V_{scell})$$

La pente de la courbe I(V) de l'électrolyseur est donc égale à :

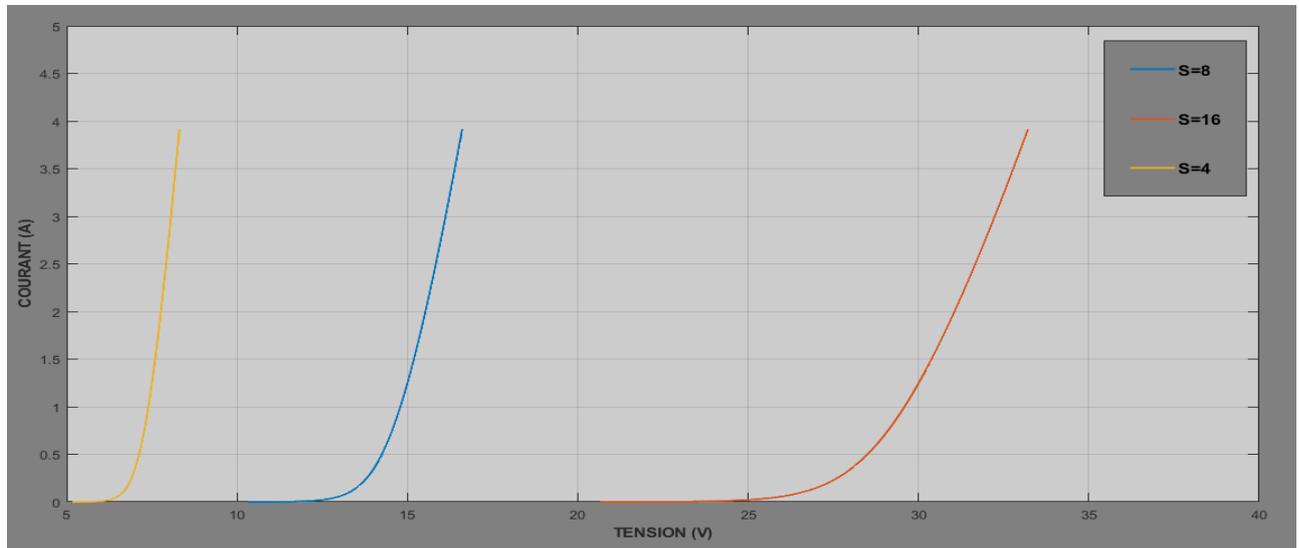
$$a_{ely} = \frac{a_{cell}}{n_s}$$

La tension seuil de l'électrolyseur devient :

$$V_{s_{ely}} = n_s V_{s_{cell}}$$

La pente varie inversement avec  $n_s$  et la tension seuil augment avec l'augmentation de  $n_s$ .

Cette variation en fonction de  $n_s$  est illustrée sur la figure suivante (VI.4)



**Figure-VI.4 : la courbe I(V) d'électrolyseur avec différent nombre des cellules en série.**

Ceci explique les résultats obtenus précédemment. En effet, l'augmentation du nombre de panneaux en série nécessite la diminution de la pente et l'augmentation de la tension seuil pour suivre le déplacement du point de fonctionnement optimal (voir figure VI.6)

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GÉNÉRATEUR PV / ÉLECTROLYSEUR

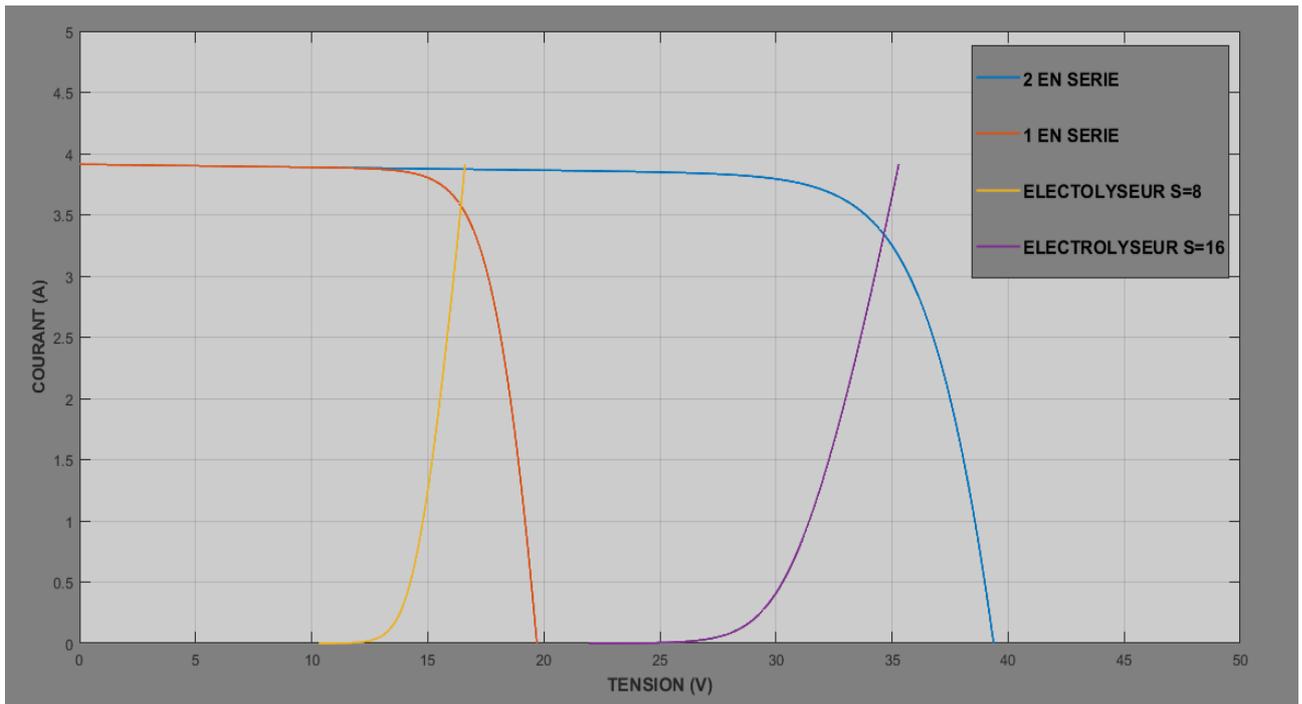


Figure-VI.5 : les courbes I(V) de PV et l'électrolyseur avec variation des PV en série.

## 4.2. déduction de la relation entre le nombre de cellules PV ( $N_s$ ) et nombre de cellules de l'électrolyseur ( $n_s$ )

### 4.2.1. résultat de la simulation

- Pour 1 PV ( $N_s=36$ )  $\longrightarrow n_{sopt} = 8$  (11h) et  $n_{sopt} = 7$  (13h)
- Pour 2 PV ( $N_s=72$ )  $\longrightarrow n_{sopt} = 16$  (11h) et  $n_{sopt} = 15$  (13h)

Le rapport  $\frac{n_s}{N_s} = \frac{8}{36} = 0.22$  (à 11h)

Et  $\frac{n_s}{N_s} = \frac{7}{36} = 0.195$  à (13h)

### 4.2.2. Interprétation théorique

Au point de fonctionnement optimal ( $P=P_{max}$ ) ; nous avons :

$$V_{ely} = V_{pvopt}$$

$$\implies n_{sopt} v_{cell_{elyopt}} = N_s v_{cell_{pvopt}}$$

$$\implies n_{sopt} = N_s \left( \frac{v_{cell_{pvopt}}}{v_{cell_{elyopt}}} \right) \quad \text{(VI. 6)}$$

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

Dans notre cas :

$$\text{➤ A 11h : } V_{cell_{pvopt}} = 0.42 V$$

$$V_{cell_{elyopt}} = 1.9 V$$

$$\text{D'où } \frac{n_{sopt}}{N_s} = \frac{0.42}{1.9} = 0.22$$

$$\implies n_{sopt} = 0.22 N_s$$

$$\implies n_{sopt} (11h) = 0.22 * 36 = 8 \text{ cellule}$$

$$\text{➤ À 13h: } V_{cell_{pvopt}} = 0.42 V$$

$$V_{cell_{elyopt}} = 2.13 V$$

$$\text{D'où } \frac{n_{sopt}}{N_s} = \frac{0.42}{2.13} = 0.195$$

$$\implies n_{sopt} = 0.195 N_s$$

$$\implies n_{sopt} (13h) = 0.195 * 36 = 7 \text{ cellule}$$

## 4.2.3. Conclusions

### a) Conclusion 1 :

Dans le cas se mise en série (PV et électrolyseur) le rapport entre les nombres des cellules  $N_s$  et  $n_s$  est constant.

Cette étude préliminaire nous permet donc de savoir le nombre de cellules d'électrolyse quel que soit le nombre de panneaux PV mis en série pour que le couplage se fait toujours au point de puissance maximale.

Il n'est pas nécessaire de refaire les calculs.

Par exemple, si on met 3 panneaux en série, le nombre de cellules  $N_s$  sera égale à  $(36*3)=108$  cellules et par conséquent, le nombre de cellules optimal de l'électrolyseur doit être égale à :  $n_{sopt} = 0.22*108 = 24$  cellules en série

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

## b) Conclusion 2 :

On sait que le taux de production de H<sub>2</sub> est donné par :

$$n_{H_2} \left( \frac{mol}{s} \right) = \frac{1}{2F} n_s I_{cell_{ely}} = \frac{1}{2F} n_s I_{pv}$$

On sait d'autre part que la mise en série des panneaux PV, ne change pas le courant I<sub>pv</sub>.

Dans ce cas,  $n_{H_2}$  n'est fonction que de  $n_s$ .

Ceci a pour conséquence que la mise en série ; c'est-à-dire l'augmentation de N<sub>s</sub> et  $n_s$  ne fait augmenter  $n_{H_2}$  que faiblement, même en fonctionnant au point de puissance maximale.

L'augmentation conséquente de  $n_{H_2}$  passe par l'augmentation de N<sub>s</sub>,  $n_s$  et I<sub>pv</sub>.

L'augmentation nécessaire de I<sub>pv</sub> se fait par la mise en parallèle des panneaux PV et la mise en parallèle aussi des cellules d'électrolyseur.

## c) Conclusion 3 :

Pour la journée considérée dans cette étude, les points de Puissance maximale sont disposés de façon aléatoire, ceci implique la difficulté pour suivre le point optimal au cours de la journée surtout que les données varient d'une journée à une autre.

## 5. Optimisation du taux de production de H<sub>2</sub> par la mise en série /parallèle des panneaux PV et des cellules de l'électrolyseur

### 5.1.aspect théorique sur l'influence de la mise en parallèle des cellules D'électrolyse

Nous avons vu précédemment (ch.VI.4) que pour la mise en série,

$$I_{cell} = I_{ely} = \left[ \frac{a_{cell}}{n_s} \right] (V_{ely} - n_s V_{scell})$$

Si on met maintenant  $n_p$  branches en parallèle,

$$I_{ely} = n_p I_{cell}$$

$$\implies \frac{I_{ely}}{n_p} = \left[ \frac{a_{cell}}{n_s} \right] (V_{ely} - n_s V_{scell})$$

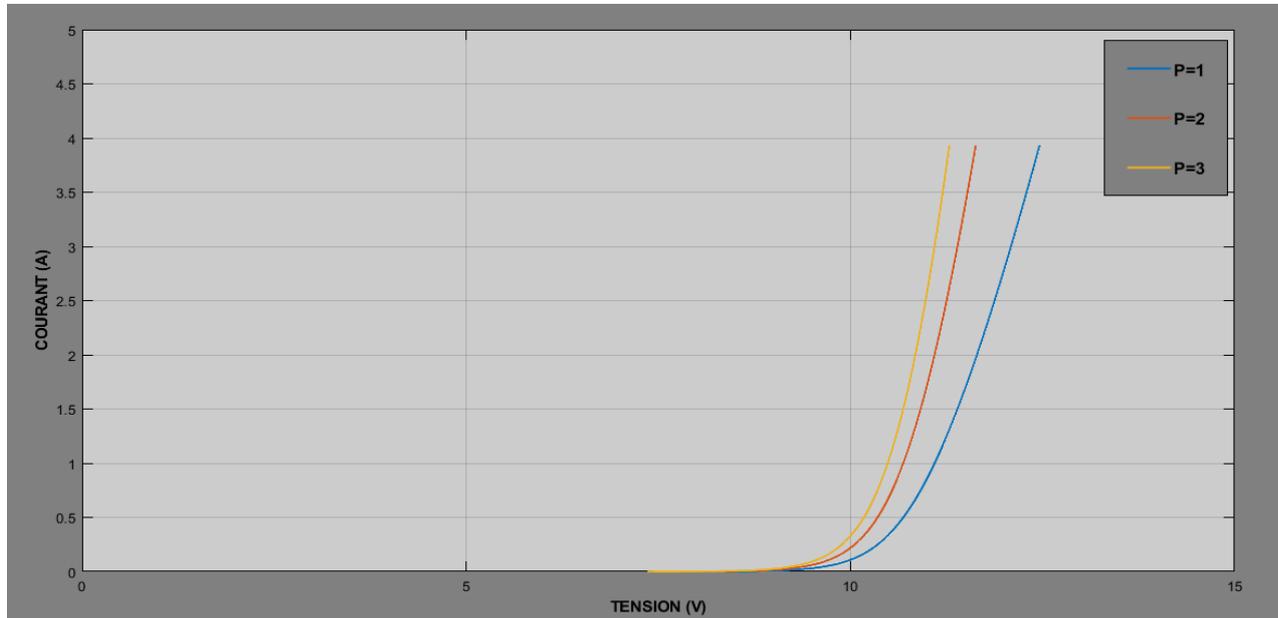
$$\implies I_{ely} = \left[ \frac{n_p}{n_s} a_{cell} \right] (V_{ely} - n_s V_{scell}) \quad \text{(VI.7)}$$

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

La pente devient égale à  $(\frac{n_p}{n_s} a_{cell})$  et la tension seuil est égale à  $n_s V_{scell}$ .

La pente augmente si en augmentant  $n_p$  sans changement de la tension seuil.

Ceci est illustré sur la figure suivante (figure VI.7)



**Figure-VI.6 : la courbe I(V) d'électrolyseur avec différents nombres de cellules en parallèle.**

## Conséquences :

Si  $N_p$  (nombre de branches en parallèle du PV) augmente, le courant  $I_{pv}$  augmente. En maintenant  $n_s$  le nombre de cellules d'électrolyse constant, on doit augmenter le nombre  $n_p$  de branches en parallèle pour suivre le point de fonctionnement optimal. Ceci est illustré sur le schéma ci-dessous:

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

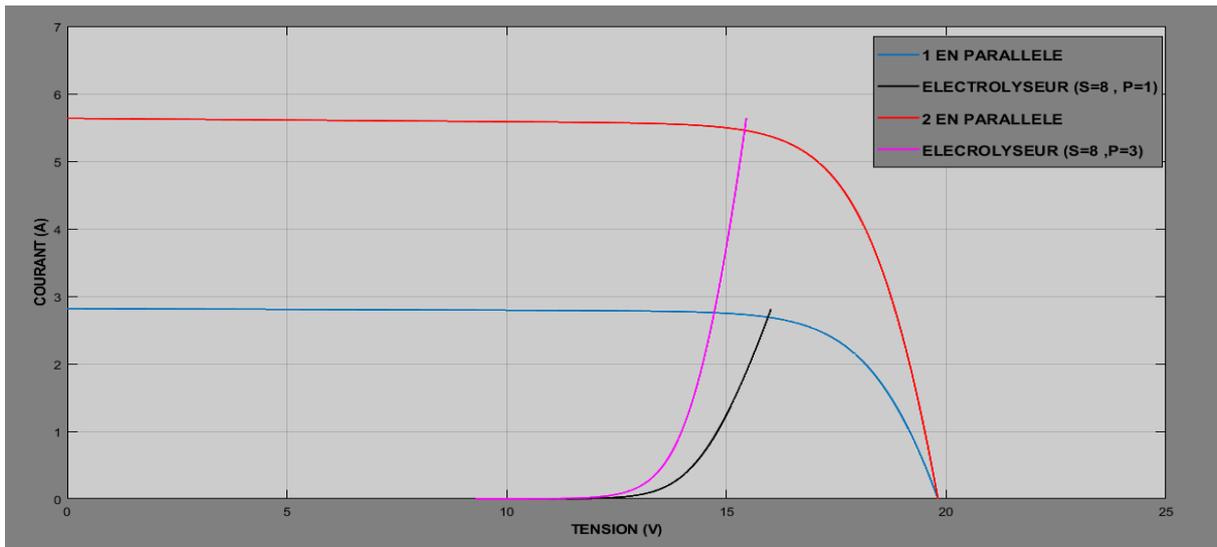


Figure-VI.7 : les courbes I(V) de PV et l'électrolyseur avec variation des PV en parallèle.

## 5.2.étude du couplage par la mise en série /parallèle des panneaux PV et des cellules d'électrolyseur

### 5.2.1. les cas :

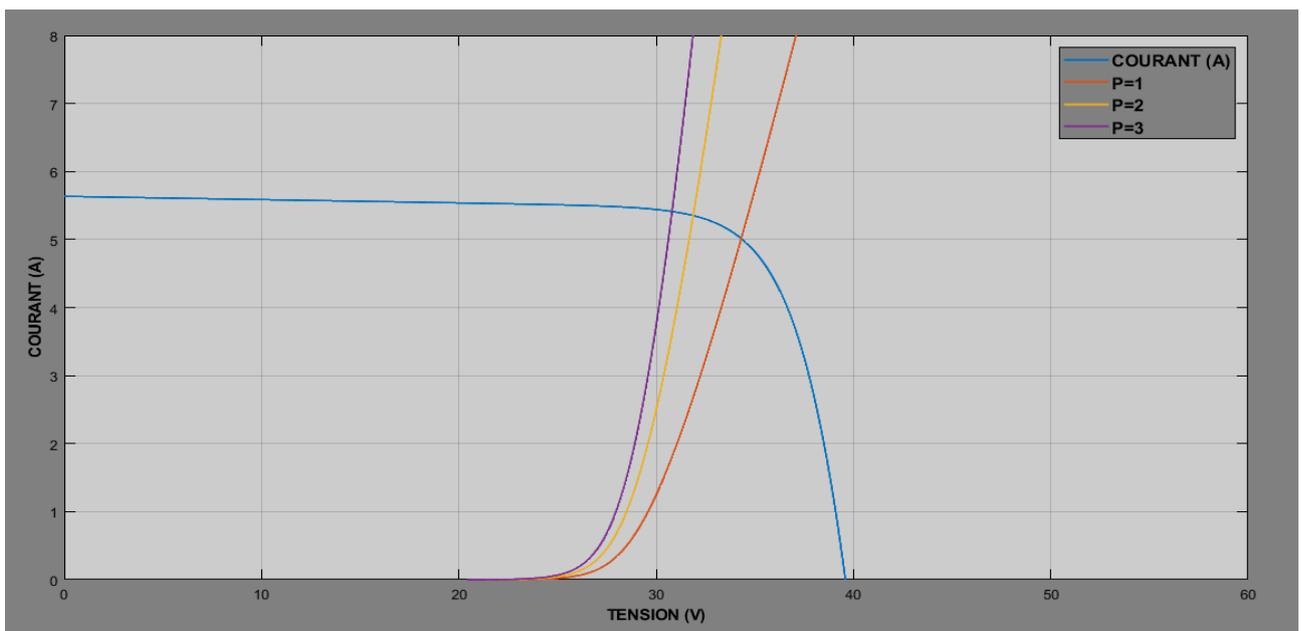
#### 5.2.1.1. cas où $N_{ps}=2$ ; $N_p=2$

**$N_{ps}$**  : nombre de panneaux en série.

**$N_p$**  : nombre de panneaux en parallèle.

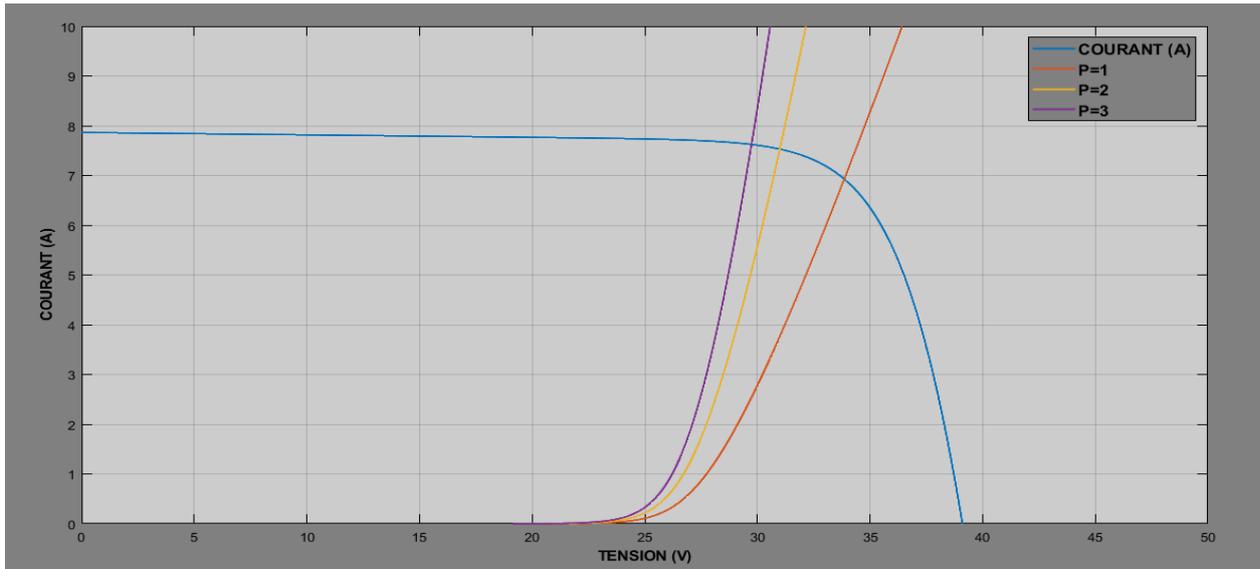
Dans ce cas,  $n_s = 0.22 \cdot 72 = 15.84$ , on arrondit à  $n_s = 16$ .

La figure (VI.8) montre les résultats de la simulation pour 10h(a) et 13h (b)



(a) :10h

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR



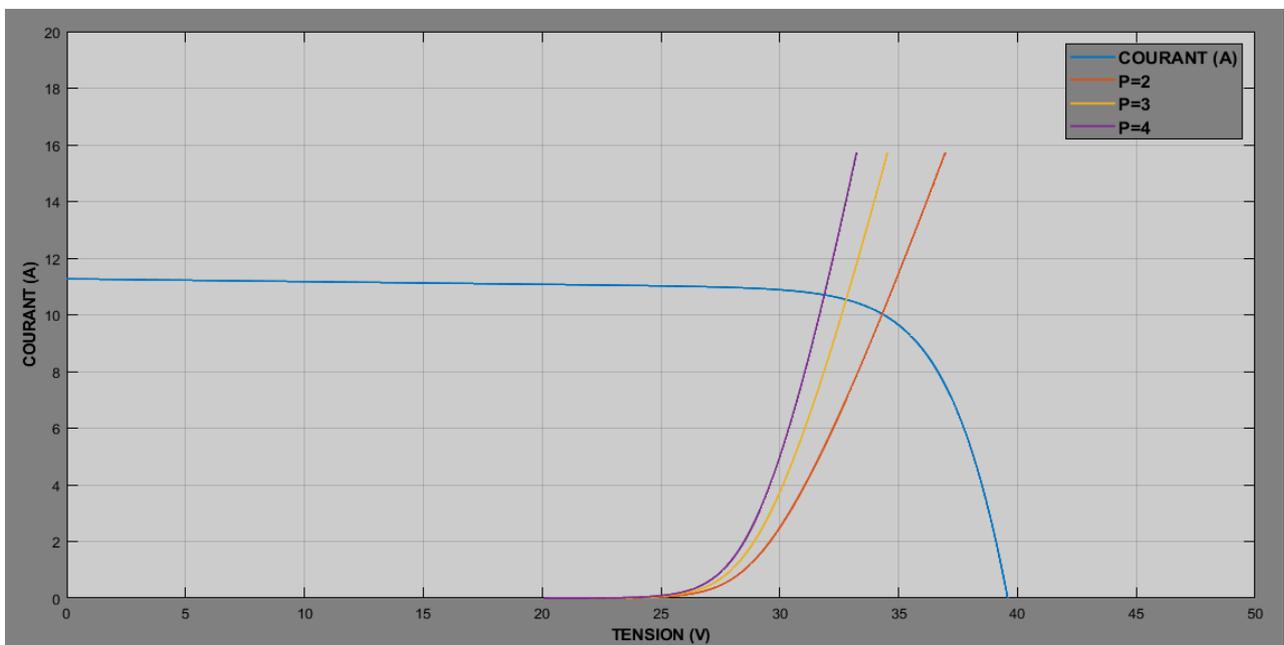
(b) :13h

Figure-VI.8 : les courbes I(V) pour 10h et 13h de 2 panneaux en parallèle.

La caractéristique I(V) de l'électrolyseur passe le point optimal pour  $n_p=1$ .

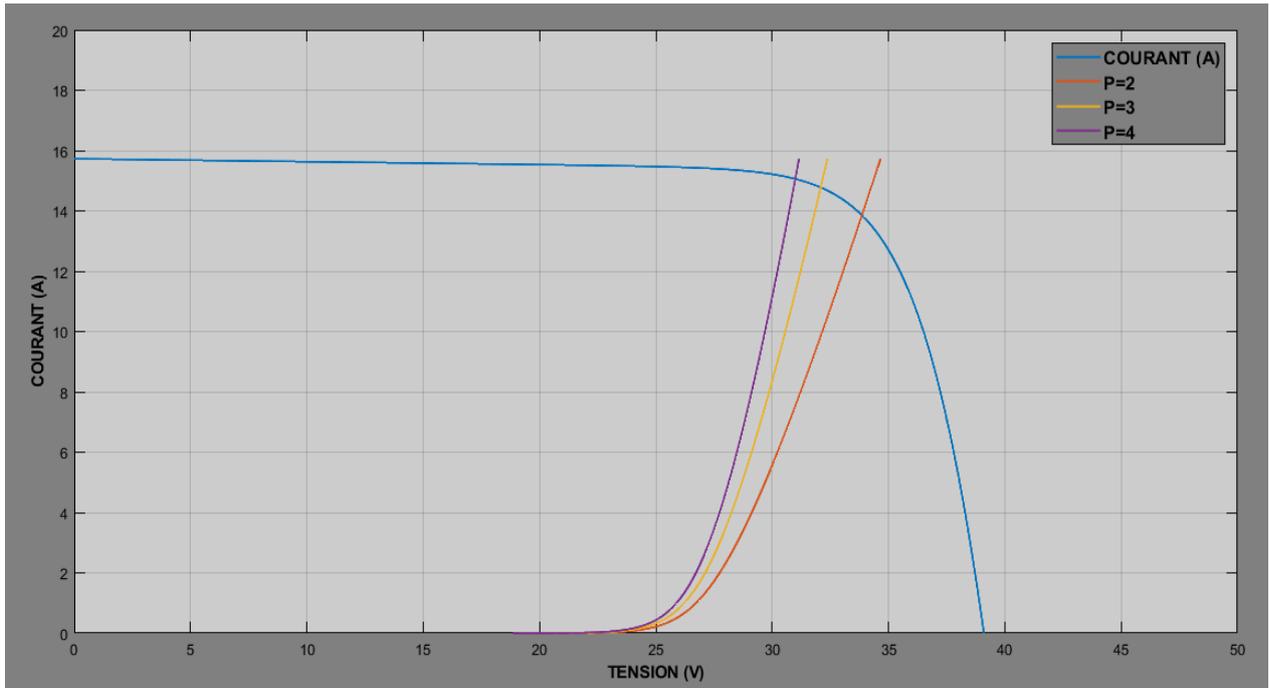
## 5.2.1.2. cas où $N_{ps}=2$ ; $N_p=4$ et $n_s=16$

Les courbes correspondantes à ce cas sont données sur la figure (VI.9)



(a) :10h

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR



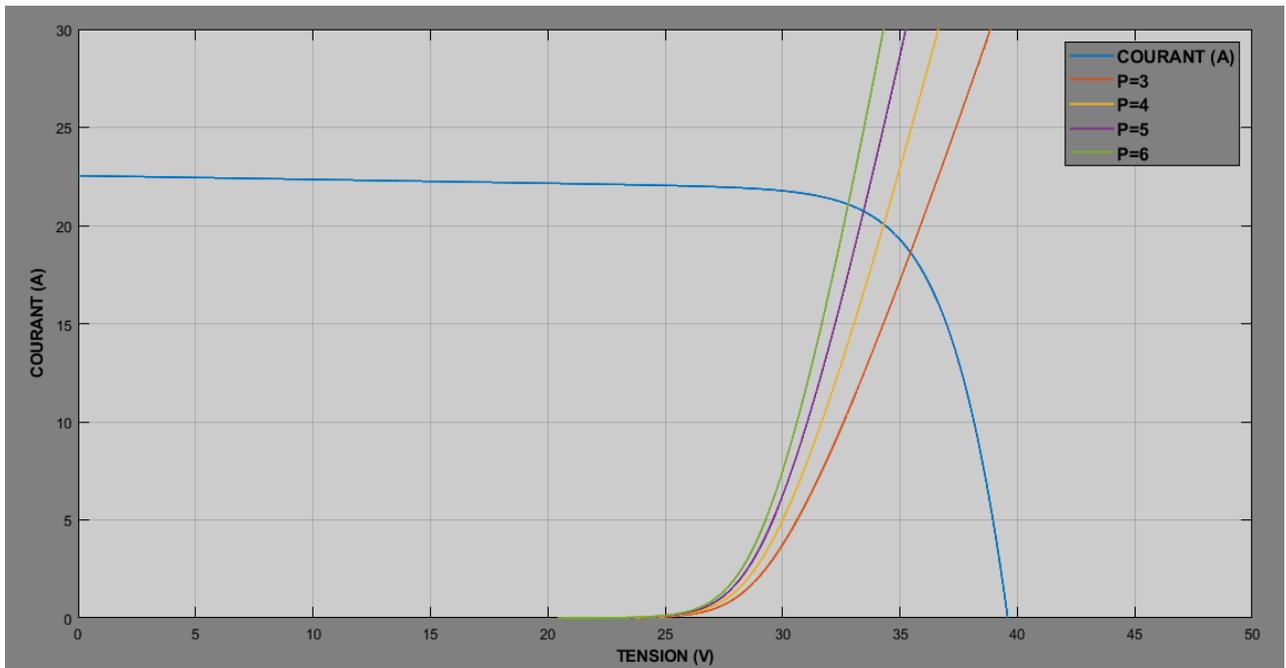
(b) :13h

Figure-VI.9 :les courbes I(V) pour 10h et 13h de 4 panneaux en parallèle

L'optimisation se fait pou  $n_p=2$ .

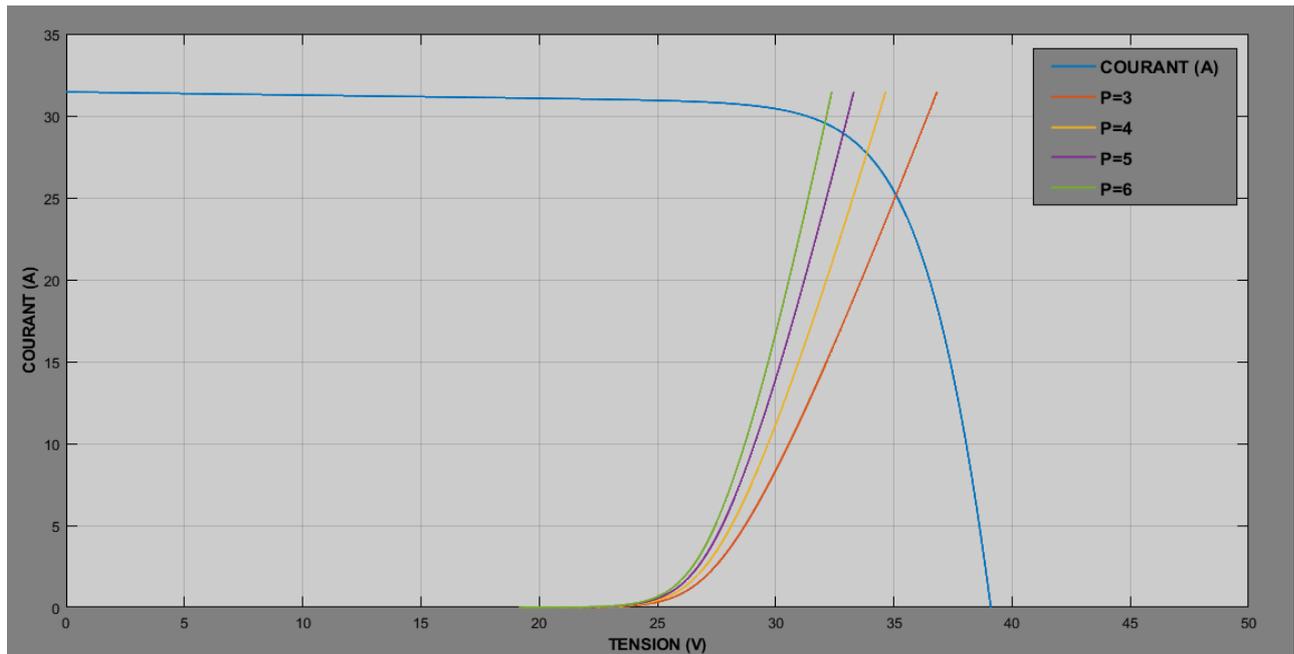
### 5.2.1.3. cas où $N_{ps}=2$ ; $N_p=8$ et $n_s=16$

De la même manière la simulation donne les résultats montrés sur la figure(VI.10)



(a) :10h

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR



(b) :13h

Figure-VI.10 :les courbes de I(V) pour 10h et 13h de 8 panneaux en parallèle

Dans ce cas le np obtenu est égale à 4.

### 5.2.2. conclusion

Vu les résultats des simulations dans différents cas, nous pouvons conclure qu'on s'approche du fonctionnement optimal pour :

$$n_s = 0.22 \text{ Ns} = 0.22 (36 * N_{ps})$$

$$n_s = 8 \text{ Nps}$$

Et  $n_p = 0.5 \text{ Np}$

Bien sûr, ceci est valable pour le panneau choisi et pour l'électrolyseur choisi.

### 5.2.3. Application à un cas réel

Nous intéressons dans ce qui suit, au dimensionnement à l'optimisation du couplage dans le cas où la quantité d'hydrogène désirée est de 1kg par jour. Ceci correspond à la quantité nécessaire pour une autonomie de 100km pour un véhicule à hydrogène utilisant une pile à combustible.

Le taux de production d'hydrogène est donnée par

$$n_{H2d} \left( \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right) = \frac{1}{2F} (n_s * n_p) I_{\text{cell}_{\text{ely}}}$$

Alors :  $(n_s * n_p) = \frac{2F * n_{H2d}}{I_{\text{cell}_{\text{ely}}}}$

1kg /jour correspond à 0.017 mol/s.

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

Nous fixons une densité de courant égale à 300mA/cm<sup>2</sup> ce qui donne un courant égal à :

$$I=j*s = 0.300*23 = 6.9 \text{ A}$$

La surface de la cellule d'électrolyseur est égale à 23cm<sup>2</sup> [31]

Avec ces données, le calcul de (n<sub>s</sub> \* n<sub>p</sub>) donne :

$$(n_s * n_p) = \frac{0.017*2*96500}{6.9} = 475 \text{ cellules} \quad \text{(VI.8)}$$

Fixons ns=60 cellules en série,

$$D'où Nps = \frac{ns}{8} = \frac{60}{8} = 7,5 \text{ (on arrondit à 8)}$$

À partir de la formule (VI.8), nous déduisons :

$$np = \frac{475}{60} = 8 \text{ cellules en parallèle}$$

Et connue np= 0.5 Np  $\implies$  Np=16 cellules

Avec ces données, calculons la quantité d'H<sub>2</sub> produite pour la journée considérée précédemment à Ouargla.

Les résultats du calcul sont rassemblés dans le tableau suivant (tab-VI.3)

Heure	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Popt	330 3.17	4392. 53	5879. 55	7218. 4	8003. 73	7969	7331. 48	6490. 26	4930. 22	3630. 38
lopt	27.2	35.7	47.6	58.82	66.3	66.81	61.3	53.55	41.14	30.6
Vopt	121. 44	123.0 4	123.5 2	122.7 2	120.7 2	119.2 8	119.6	121.2	119.8 4	118.6 4
n <sub>H2opt</sub> mole/s	0.00 901	0.011 8	0.015 5	0.018 6	0.020 6	0.020 4	0.018 7	0.016 9	0.013 2	0.009 83
n <sub>H2opt</sub> g/s	0.01 8	0.023	0.031	0.037	0.040	0.041	0.036	0.034	0.026	0.019
n <sub>H2opt</sub> L/s	0.2	0.25	0.34	0.41	0.44	0.45	0.4	0.37	0.28	0.21

**Tab-VI.3 : taux de production de H<sub>2</sub> pour (Nps=8 et Np=16) PV**

Pour la journée entière, la quantité d'H<sub>2</sub> produite est donc :

$$n_{H2journée} = (\sum n_{H2}) 3600 = 546.1 \text{ moles} = 1,103\text{kg}$$

Le panneau utilisé (voir annexe 3) a les dimensions suivant :

Longueur = 1,188 m

Largeur = 0.53 m

D'où une surface par panneau égale à 0,63 m<sup>2</sup>

Le nombre de panneau dans notre cas est égale à :

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

$$(N_{ps} * N_p) = 8 * 16 = 128 \text{ panneaux}$$

D'où une surface nécessaire égale à :

$$S = 128 * 0,63 = 80,64 \text{ m}^2$$

La caractéristique I(V) du GPV et de l'électrolyseur est représenté sur la figure suivante(VI.11).

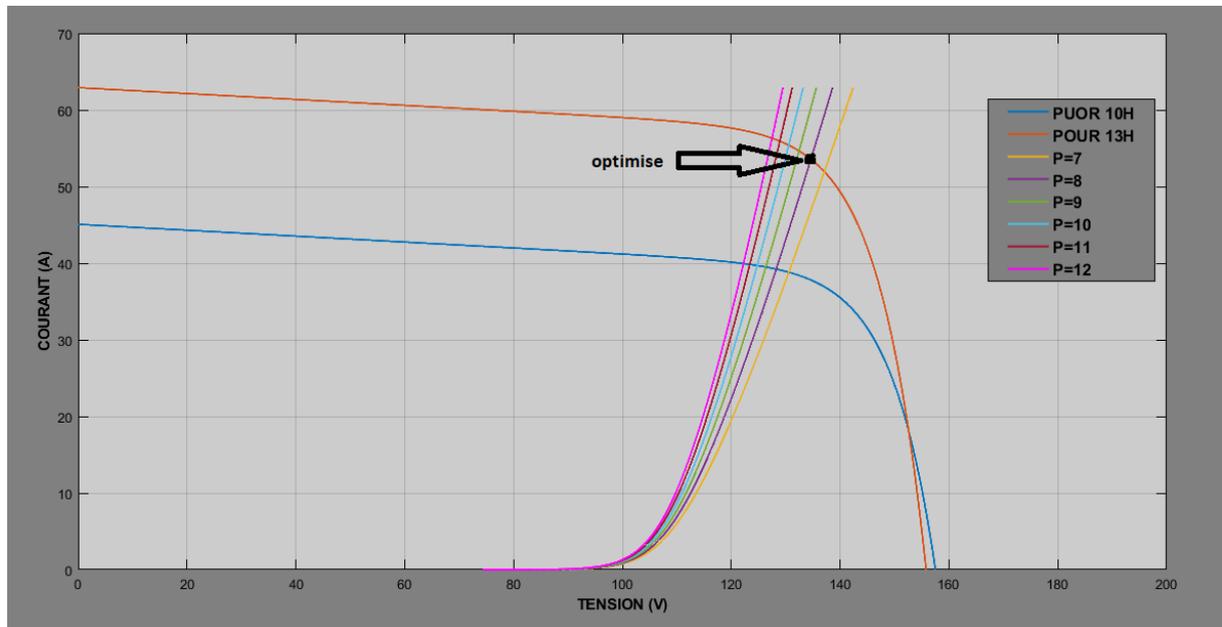


Figure-VI.11 : les courbes I(V) de 10h et 13h

Calcul de rendement :

$$\eta = \frac{\text{puissance d'H}_2 \text{ produit}}{\text{puissance PV}} = \frac{P_{H_2}}{P_{PV}} \text{ (w)} \quad \text{(VI.9)}$$

$$P_{H_2} = (n_s * n_p) * P_{H_2 \text{ cellule}}$$

$$= (n_p * n_s) * [\eta_F * \frac{I_{\text{cell}}}{2F} * HHV_{H_2}]$$

$$\frac{HHV_{H_2}}{2F} = \frac{\Delta G}{2F} = 1,481 \text{ volts}$$

En fin ; le rendement peut s'exprimer par :

$$\eta = \frac{(n_s * n_p) I_{\text{cell}} * 1,481}{V_{PV} * I_{PV}} = 1,481 \frac{n_s * I_{PV}}{V_{PV} * I_{PV}}$$

$$\eta = 1,481 \frac{n_s}{V_{PV}}$$

# VI. ETUDE DU COUPLAGE DIRECT GENERATEUR PV / ELECTROLYSEUR

Le tableau suivant(VI.4) donne les résultats du calcul de rendement pour chaque heure.

Heure	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h
Vopt	121.44	123.04	123.52	122.72	120.72	119.28	119.6	121.2	119.8	118.6
$\eta(\%)$	73.1	72.22	71.94	72.4	73.6	74.5	74.3	73.3	74.14	74.9

**Tab-VI.4 : le rendement de l'électrolyseur**

## 6. CONCLUSION :

Nous avons montré qu'il est possible de trouver le nombre de cellules que ce soit pour l'électrolyseur ou pour le générateur photovoltaïque afin que le point de fonctionnement du système soit égal on prendre du point de puissance maximale.

Nous avons appliqué cette méthode d'optimisation pour un cas réel qui correspond à la production d'une façon optimale d'1kg d'H<sub>2</sub>. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

# **CONCLUSION GENERALE**

# CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude par simulation de la production d'hydrogène à partir de couplage direct entre un générateur photovoltaïque et un électrolyseur de type PEM (proton exchange membrane). Ce travail est une contribution à l'étude de ce type de système avec comme objectif l'optimisation du couplage générateur photovoltaïque/Électrolyseur.

L'objectif majeur est de produire le maximum d'hydrogène à moindre coût. La presque totalité des travaux effectués sur le sujet montrent que le couplage direct sans intermédiaires (convertisseurs de puissances) est la solution adéquate.

Dans les premiers chapitres (à caractère bibliographique), nous avons successivement donné :

- un aperçu sur l'hydrogène comme vecteur énergétique du futur (proche)
- un aperçu sur les générateurs photovoltaïques GPV
- un aperçu sur l'électrolyse de l'eau, sur les différents types d'électrolyseurs en mettant un accent sur la technologie PEM.

Nous avons modélisé et simulé la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque en partant d'un modèle à une diode. Nous avons aussi modélisé et simulé la même caractéristique pour un électrolyseur PEM.

Nous avons ensuite, dimensionné l'électrolyseur afin que le point de fonctionnement du système soit le plus près possible du point correspondant au maximum de puissance délivrée par le GPV.

Nous avons pris comme données, celles d'une journée typique sur un site réel, en l'occurrence la ville d'Ouargla.

Une étude préliminaire, nous a permis de trouver les relations entre le nombre de cellules du générateur PV et celui de l'électrolyseur pour s'approcher le plus possible du fonctionnement optimal du système.

En fin, nous avons utilisé les résultats obtenus pour dimensionner le système pour qu'il puisse produire 1 Kg d'Hydrogène par jour qui est la quantité nécessaire pour faire fonctionner une pile à combustible d'un véhicule électrique avec une autonomie de 100 Km.

Les perspectives de ce travail peuvent être résumées comme suit :

- Etude du stockage de l'hydrogène produit,
- Etude en fonction de la température de l'eau
- Etude de l'influence de la température de l'électrolyseur,

# ANNEXES

## Annexe 1

Propriétés physique et chimique	Valeurs numériques
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119930 kJ/kg (50020 kJ/kg)
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	141860 kJ/kg
Densité gazeuse à 20.3 K	1.34 kg/m <sup>3</sup>
Densité liquide à 20.3 K	70.79 kg/m <sup>3</sup>
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/m. K
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112 kJ/kg
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante de gaz	4124.5 J/kg K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K (813 K)
Température de flamme dans l'air à 300 K	2318 K (2148 K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4 - 75 (5.3 - 15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13 - 65 (6.3 – 13.5)
Energie minimale d'inflammation (J)	20 (290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m3)	2.02 (7.03)
Surpression de détonation	14.7 (16.8)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm/s (0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 km/s (7 fois le G. Naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (1.8 km/s)
Mélange stoechiométrique dans l'air	29.53 % (9.48 %)

**Tableau :** Quelques propriétés chimiques et physiques sur l'hydrogène normal et comparaisons avec le gaz naturel (valeurs en gras entre parenthèses) [32]

## Annexe 2

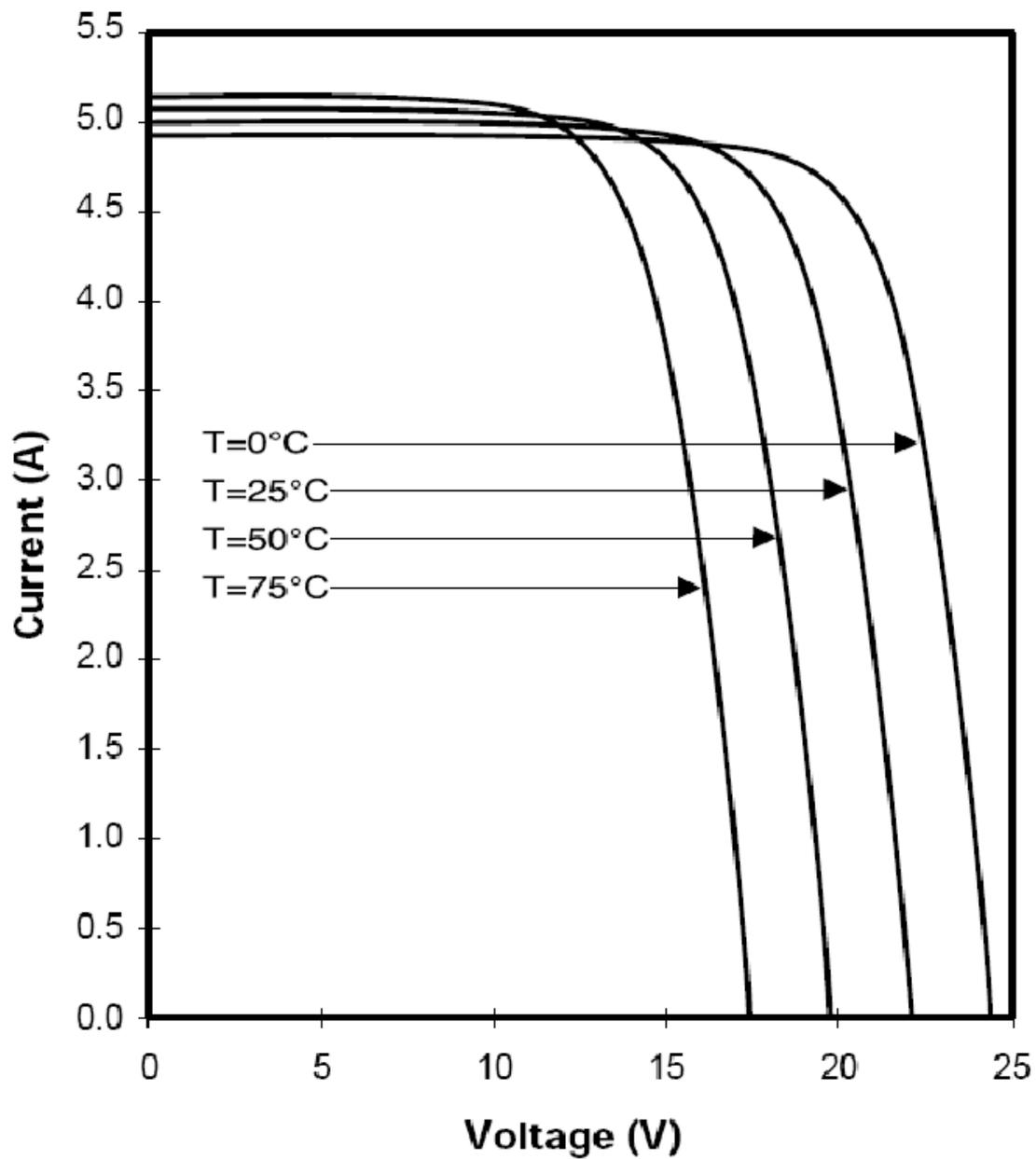
Age	4.6 milliards d'années	
Diamètre équatorial	1 382 530 km	
Circonférence	4 372 544 km	
Distance par rapport à la Terre	149 598 000 hm	
Composition (éléments /pourcentage	Hydrogène	73.46 %
	Hélium	24.85 %
	Oxygène	0.77 %
	Carbone	0.29 %
	Fer	0.16 %
	Néon	0.12 %
	Azote	0.09 %
	Silicium	0.07 %
	Magnésium	0.05 %
	Soufre	0.04 %
	Autre éléments	0.01%
Température	Noyau	15 000 000 k
	Zone radiative	1 500 000 k
	Zone de convection et photosphère	6 000 k
Densité (eau=1)	1.41	

**Tableau :** carte d'identité de soleil

[33] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine.

## Annexe 3

## BP 585 I-V Curves



**Figure :** Variations de caractéristique (I-V) d'un panneau photovoltaïque **BP585F** avec différentes températures [34].



# **Bibliographiques**

## Bibliographiques

- [1] : Lenntech [info@lenntech.com](mailto:info@lenntech.com)
- [2]: Encyclopédie de l'énergie (<https://www.encyclopedie-energie.org>)
- [3]: Fiche 7.1 Révision février 2015 Source : INERIS AFHYPAC ([www.afhypac.org](http://www.afhypac.org)).
- [4]: [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org),
- [5]: [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr),
- [6]: [energies.airliquide.com](http://energies.airliquide.com),
- [7]: [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com),
- [8]: <https://energies.airliquide.com>,
- [9]: Mounir SAHLI, 2010 « Etude de la production d'hydrogène par l'électrolyse et pile à combustion », Mémoire de Magister, Université de Mousouri de Constantine.
- [10] : <https://www.encyclopedie-energie.org>,
- [11] J.LABBE, "L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolé" . Thèse de doctorat, École des Mines de Paris - France, 21 Décembre 2006.
- [12] I.RAHALI, "Optimisation du fonctionnement d'un électrolyseur à travers un convertisseur DC/DC" université Mohamed Khider, Biskra, 10-5-2017 pp 34-36.
- [13] O.RALLIERES. "Modélisation et caractérisation de pile à combustible et électrolyseur PEM". Thèse de doctorat, Université de Toulouse - France, 14 Novembre 2011<sup>e</sup> doctorat, École des Mines de Paris - France , 21 Décembre 2006
- [14] E.VARKARAKI, N. LYMBEROPULOS, A. ZACHARIOU, "Hydrogen based emergency back-up system for telecommunication applications", Journal of Power Sources, 118 (2003) pp.14-22.
- [15] T.AUDICHON, "Synthèse et caractérisation de matériaux électrocatalytiques : activation anodique de l'eau dans un électrolyseur PEM", Thèse de doctorat, l'université de Poitiers UFR des sciences fondamentales et appliquées Institut de chimie des milieux et matériaux de

Poitiers - IC2MP (Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006), École doctorale : Sciences pour l'environnement - Gay Lussac (La Rochelle) ,13-11-2014.

[16] R.SCHMID, G. Strategist, M. Electrolysis for grid balancing. (2012).

[17] W. DONITZ, E. Erdle, High-temperature electrolysis of water vapor-status of development and perspectives for application. Int. J. Hydrogen Energy 10, 291–295 (1985).

[18] J.H.RUSSEL, L.J. Nuttall, A.P.Fickett, " Hydrogen generation by solid polymer electrolyte water electrolysis". Chem. Soc. Div. Fuel Chem. Prepr. 18, 24–40 (1973).

[19] N.Benhaddouche .La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite .Mémoire de Master, Université Abou-Baker Bel kaïd-Tlemcen, 2014.

[20] S.Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 2010

[21] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems », Ph.D, P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.

[22] F.Hananou et AI.Rouabah. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque .Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2014.

[23] M.N.Mechalikh et CH.E.Hamada. Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2013.

[24] KH. Ayache. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique. Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de SoukAhras, 2014.

[25]TIJANIij. Alhassan Salami, "Nur Afiqah Binti Kamarudin, Fatin Athirah Binti Mazlan ", Investigation of the effect of charge transfer coefficient (CTC) on the operating voltage of polymer electrolyte membrane (PEM) electrolyzer, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi MARA, 40450 Shah Alam, Selangor, Malaysia

[26]FAULKNER LR, BARD Allen J. "Electrochemical methods: fundamentals and applications". 2nd ed. John wiley and sons, inc.; 2001.

[27]T.Yigit, Selamet OF, "Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system", International Journal of Hydrogen Energy (2016).

- [28] W.Abtew, A.Melesse, Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations;Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2013.
- [29]WANG, C. 2006. “Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems.” Ph.D. thesis, the Montana State University.
- [30] Baouia. S « Etude et analyse d’un système photovoltaïque » Mémoire d’ingénieur, univ.Ouargla 2004.
- [31] 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
- [32] J.P. Jonchère Fiche 3.1 – Final : octobre 2003 1ère émission : 2001 - Révision du 16 oct. 2003Source : RAPPORT D’ÉTUDE 10/06/2008 N° DRA-08-95313-07833B Les techniques de production de l’hydrogène et les risques associés.
- [33] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine.
- [34]<http://www.posharp.com/Businesses/daacacf6-2fa0-4fe2-b6f5-0211a36989a/aPanel/BP585F.pdf>. visité le 12-05-2014

# Résumé :

# Résumé

## Résumé :

Il est très avantageux de produire de l'Hydrogène en utilisant une énergie renouvelable et particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque. Actuellement, l'électrolyse de l'eau paraît comme un moyen efficace pour produire de l'Hydrogène.

D'un point de vue technico-économique, il est établi que le couplage direct sans interfaces électroniques (convertisseurs) permet d'obtenir les meilleurs rendements.

Ce travail est une contribution à l'étude de ce type de système avec comme objectif l'optimisation du couplage générateur photovoltaïque/Electrolyseur.

## ملخص :

من المفيد جدا إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية الكهروضوئية. في الوقت الحالي ، يبدو أن التحليل الكهربائي للماء وسيلة فعالة لإنتاج الهيدروجين

من وجهة نظر تقنية واقتصادية ، ثبت أن الاقتران المباشر بدون واجهات إلكترونية (محولات) يجعل من الممكن الحصول على أفضل العوائد.

هذا العمل هو مساهمة في دراسة هذا النوع من النظام بهدف تحسين اقتران المولد الكهروضوئي / المحلل الكهربائي

## Summary:

It is very advantageous to produce Hydrogen using renewable energy and particularly photovoltaic solar energy. Currently, the electrolysis of water seems to be an effective way to produce Hydrogen.

From a technical and economic point of view, it has been established that direct coupling without electronic interfaces (converters) makes it possible to obtain the best yields.

This work is a contribution to the study of this type of system with the objective of optimizing the photovoltaic generator/Electrolyser coupling.