

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



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

Réf:.....

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

**MASTER**

*Thème*

Production d'hydrogène solaire par l'électrolyse de l'eau

Présenté par :  
**Debilou housseyn**  
Soutenu le : 31 Mai 2015

Devant le jury composé de :

Mr .RECHID Naima

Mr .SAADI Aicha

Mr .DERGHAL Hamid

MAA

MCB

MAA

Président

Encadreur

Examineur

**Année universitaire : 2014 / 2015**



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail  
A ma très chère mère source de tendresse ;  
A mon très cher père, qui m'encourage  
Dans les instants délicats ;  
A mes chères sœurs ;  
A mes tantes et oncles ;  
A toute ma famille ;  
A tous mes amis ;*

*Housseyn*

*REMERCIEMENTS*



*Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos remerciements à notre encadreur .SAADI AICHA pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...*

# RESUME

---

## ملخص

ينتج الهيدروجين باستخدام الطاقة المتجددة خاصة الطاقة الشمسية، تحضا الجزائر بموقع جغرافي متميزة، يسمح لها باستعمال هذه الطاقات و علي الاخص منطقة بسكرة، لهذا السبب انجزنا دراسة تطبيقية معززة بنتائج تطبيقية معدات تجريبية انجزت علي مستوى المخبر البيداغوجي للطاقات المتجددة، متكون من لوح كهروضوئي يغذي محلل الماء الكهربائي مع اخذ بعين الاعتبار العوامل المؤثرة علي عمل النظام. كلمات المفتاح : الهيدروجين، المحلل الكهربائي للماء، (PEM)، لوح كهروضوئي، الالكتروود.

## RESUME

L'hydrogène produit en utilisant les énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire. L'Algérie bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de cette énergie, spécialement le site de Biskra. Pour cette raison une étude basée sur des résultats expérimentaux a été effectuée. Un banc d'essai a été réalisé au niveau de laboratoire pédagogique des énergies renouvelables, constitué d'un panneau PV alimente un électrolyseur de l'eau, en concédèrent les paramètres importantes qui influe sur le fonctionnement de système.

Mots clés : Hydrogène, Electrolyse de l'eau (PEM), Panneau PV, Electrode.

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

### Chapter I

#### **Les différentes méthodes de production d'hydrogène**

Tableaux I.1 : Comparaison des technologies de production d'hydrogène à partir du gaz naturel 9

Tableaux I.2 : les différents type de piles à combustible 18

# Liste des figures

---

Liste des figures

## Chapitre I

### Les différentes méthodes de production d'hydrogène

(Fig.I.1) : liaisons hydrogène dans l'eau .....	3
(Fig.I.2) : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde ...	6
(Fig.I.3) : Les différentes méthodes de production d'H <sub>2</sub> et leur application.....	7
(Fig.I.4) : Principe élémentaire d'une pile et aperçu extérieur .....	17

## Chapitre II

### Généralité Sur le système photovoltaïque

(Fig. II.1) : Le spectre du rayonnement solaire.....	21
(Fig.II.2) : Composantes du rayonnement solaire.....	22
(Fig.II.3) : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	24
(Fig.II.4): Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	26
(Fig.II.5): Circuit équivalent simplifié.....	26
(Fig.II.6): Cellules identiques en série.....	27
(Fig.II.7): Modules en séries avec cellules occultées.....	28
(Fig.II.8): Modules en séries avec diodes parallèles.....	29
(Fig.II.9): Cellules identiques en parallèles.....	29
(Fig.II.11) : Différentes zones de la caractéristique $I=f(V)$ , $T = 25^{\circ}\text{C}$ .....	30
(Fig.II.12) : Caractéristique puissance-tension.....	31
(Fig.II.13) : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	32
(Fig.II.14) : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	33
(Fig.II.15) : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	34

## Chapitre III

### Electrolyse de l'eau.

(Fig.III.1):L'électrolyse de l'eau.....	38
(Fig.III.2):L'électrolyse SOFC.....	42
(Fig.III.3) : Schéma de principe de la décomposition photochimique de l'eau.....	43
(Fig.III.4): L'électrolyse PEM.....	45
(Fig.III.5) : Coût de l'hydrogène en fonction du coût de l'électricité.....	46
(Fig.III.6) : Structure globale de lien entrée –sortie ou réactifs-produits.....	47

# Liste des figures

---

## Chapitre VI.

### Simulation et validation.

(Fig.VI.1): Montage électrique de l'expérience d'étude des caractéristiques I-V.....	53
(Fig.VI.2) : Expérience d'étude des caractéristiques I-V des PV.....	53
Fig.IV.3) : Eclairage solaire pour En deux jours différents dans le mois.....	54
(Fig.VI.4): Caractéristique pratique $E=f(C^{\circ})$ d' un PV.....	55
(Fig.VI.5) : Variation de l'angle.....	55
Fig.IV.6.) : Caractéristique $I=F(v)$ du PV avec variation de l'éclairage.....	56
(Fig.VI.7) : Caractéristique $P=F(v)$ du PV avec variation d'éclairage .....	56
(Fig.IV.8) : Caractéristique $I=F(v)$ du PV avec $E=(934w/m^2)$ .....	57
(Fig.VI.9) : Caractéristique $P=F(v)$ du PV avec $E=(934w/m^2)$ .....	58
(Fig.VI.10) : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	58
(Fig.VI.11) : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	59
(Fig.VI.12) : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	59
(Fig.VI.13).Schéma bloc d'un générateur photovoltaïque.....	60
(Fig.VI.14) : Caractéristique $I(V)$ , $T=25^{\circ}C$ d'un PV .....	61
(Fig.VI.15) : Caractéristiques $P(V)$ , $T=25^{\circ}C$ d'un PV.....	61
(Fig.VI.16).Schéma bloc d'une électrolyse de PEM.....	63
(Fig.VI.17) .La Caractéristique $P=F(T)$ du PEM.....	63
(Fig.VI.18) : Electrode de type Inox utilisé.....	65
(Fig.VI.19): Test de l'eau robinet.....	65
(Fig.VI.20): Test de l'eau robinet.....	66
(Fig.VI.21) : Test de l'eau minérale de début l'expérience.....	67
(Fig.VI.22): Test de l'eau minérale pendant l'expérience.....	67
(Fig.VI.23): Test de l'eau distillée .....	68
(Fig.VI.24): Test l'eau de robinet.....	68
(Fig.VI.25): Test avec l'eau minérale.....	69
(Fig.VI.26): Test avec l'eau distillée.....	69

## Liste des symboles

---

### Liste des symboles

FF : Facteur de forme

I : Courant de la sortie de la cellule ..... (A).

$I_p$  : Courant photovoltaïque (photo-courant)..... (A).

$I_d$  : Courant direct sous obscurité de la jonction..... (A).

$I_0$  : Courant inverse de la jonction..... (A).

$I_g$  : Courant de sortie de générateur solaire .....(A).

$I_{0g}$  : Courant de circuit ouvert de générateur solaire .....(A).

$I_{scg}$  : Courant de court circuit de générateur solaire ..... (A).

$I_c$  : Courant électrique .....(A).

$N_p$  : Nombre de module en parallèle

$N_s$  : Nombre de module en série.

$R_s$  : Résistance série..... ( $\Omega$ ).

T : Température de la jonction en degrés Kelvin..... ( $^{\circ}\text{K}$ ).

V : Tension de la sortie de la cellule..... (V).

$V_j$  : Tension au niveau de la jonction..... (V).

$P_{pv}$  : puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....(W)

$V_{pv}$  : tension de sortie du générateur photovoltaïque.....(V)

$I_{pv}$  : courant de sortie du générateur photovoltaïque.....(A)

q : la charge de l'électron.....(C)

$T_c$  : température de jonction.....( $^{\circ}\text{K}$ ).

$P_m$  : puissance optimale de panneau solaire.....(W)

$P_{max}$  : puissance maximale..... (W)

PC : puissance-crête.....(WC)

$V_{co}$  : Tension à vide.....(V)

R : constante molaire des gaz (= 8,314 4 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>),

T : température thermodynamique..... (K),

$E_0$  : tension de décomposition réversible dans les conditions normales (0C°. pression Atmosphérique)..... (V)

N : Nombre d'électrons mis en jeu dans le processus électrochimique,

F : constante de Faraday..... (96 487 C mol<sup>-1</sup>)

$P_{H_2} = P_{O_2} = P$  : pression de service de l'électrolyseur.....(Pa)

$E_{rev}$  : Tension réversible pour électrolyser l'eau.....(V).

$\Delta G$  : Énergie libre de la réaction d'électrolyse.....(J/mol)

## Liste des symboles

---

F : constante de Stefan Boltzmann.....	(96485.3415)
n : Nombre d'électrons échangés lors de la réaction (ici n=2).	
I : est le courant délivré par la pile à combustible.....	(A)
io : le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte.....	(A)
in : le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et a la pente de la droite de Tafel.....	(A)
R <sub>m</sub> : résistance totale de la pile à combustible.....	(Ω)
E <sub>th</sub> : Tension thermomètre.....	(V)
ΔH : Enthalpie libre de la réaction d'électrolyse.....	(J/mol).
V <sub>act</sub> : . Pertes d'activation.....	(V)
V <sub>ohm</sub> : . Pertes ohmiques.....	(V)
V <sub>conc</sub> : . Pertes de concentration.....	(V)

# Sommaire

# Sommaire

---

Dédicace

Remerciement

Résumé

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

## Chapitre I

### Les différentes méthodes de production d'hydrogène

I. Généralités sur L'hydrogène	3
I.1. Introduction	3
I.2. Caractéristiques de L'hydrogène	3
I.2.1. Propriétés et origine naturel	4
I.2.2. Les avantages et les inconvénients	5
I.3. Méthodes production de l'hydrogène	5
I.3.1. Production par les combustibles fossiles	7
I.3.1.A. Production à partir du gaz naturel	7
I.3.1.A.1. Le vaporeformage du gaz naturel (SMR)	7
I.3.1.A.2. Oxydation partielle (POX)	8
I.3.1.A.3. Le reformage autotherme (ATR)	8
I.3.1.B. Production à partir du charbon	9
I.3.1.C. Production à partir du nucléaire	10
I.3.2. Production à partir des énergies renouvelable	10
I.3.2.1. La biomasse (agriculture, forêts, algues, organiques)	10
A. Acétification de la biomasse	11
B. Production Photo-biologique (biophotolyse)	11
I.3.2.A. L'éolien	12
I.3.2.B. Le solaire	12

## Sommaire

---

I.3.2.C. L'hydraulique	13
I.3.2.E. D'autres sources renouvelable	13
I.3.3. Autres procédés chimiques	13
I.3.3.A. Produit secondaire du procédé Chlore-Soude	13
I.3.3.B. Décomposition par cycle thermochimique	14
I.3.4. La production par électrolyse	15
I.3.4.A. Fonctionnement de l'électrolyse	15
I.4. Les applications d'hydrogène	16
I.4.A. Utilisations chimiques	16
I.4.B. Utilisation énergétique	17
I.4.B.1. Piles à combustible	17
I.4.B.2. Autres applications énergétiques	18
Conclusion	19

### Chapitre II

#### GENERALITE SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

II .INTRODUCTION	20
II.1. Généralité sur le gisement solaire	20
II.1.1. Le gisement solaire	20
II.1.2. Rayonnement solaire	20
A. Spectre du rayonnement	21
B. Les différents types de rayonnement	21
II.1.2.C. Appareils de mesure de rayonnement solaire	22
II.2. Conversion photovoltaïque	23
II.2.1. L'effet photovoltaïque	23
II.2.2. Le principe de conversion photovoltaïque	23
II.2.3. La cellule solaire	24
II.2.3.1. Les type des cellules	24
II.2.3.2. Schéma équivalent	25
II.2.3.3. Module photovoltaïque	27

# Sommaire

---

A) Association en série	28
B) Association en parallèle	29
II.2.3.3.A. Caractéristique d'un module solaire	30
II.2.3.3.B. Paramètres caractérisant du module	31
II.2.3.3. Influence de l'éclairement sur un module le PV	32
II.2.3.4. L'influence de la température sur un module PV	33
II.2.4. coût d'un générateur photovoltaïque	34
II.2.5. Fonctionnement optimal du générateur	35
II.2.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	35
II.2.7. Avenir du photovoltaïque	36
CONCLUSION	37

## Chapitre III

### Electrolyse DE L'EAU

III .1. Electrolyse de l'eau	38
III .1.1. Fonctionnement de l'électrolyse	39
III.1.2. Qualité de l'eau d'alimentation	39
III.2.Les Electrode	40
III.2.1.électrolyte	40
III.2.2. L'électrolyse industrielle	40
III.2.3. Structures mono polaires et bipolaires	41
III.2.4. Electrolyse alcaline	41
III.2.4.Electrolyses SOFC	42
III.2.5.Photo-électrolyte de l'eau	43
III.2.5.A. Principe de base	43
III.2.6. Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane)	43
III.2.6.A. avantages de la technique	44
III.2.6.B. Inconvénients de l'électrolyse PEM	44
III.2.6.C. Panorama des acteurs et des applications	45
III.3. Coût de l'hydrogène par électrolyse	45

# Sommaire

III.4. MODELISATION DE L'ELECTROLYSERE	46
III.4.1. Modèle de électrolyser PEM	46
III.4.2. Relation de Nernst	47
III.4.3. Tension de la cellule	47
III.4.4. Tension réversible et tension thermomètre	48
III.4.5. Tension d'électrolyse	48
III.4.A. Pertes d'activation ( $V_{act}$ )	49
III.4.B. Pertes ohmiques ( $V_{ohm}$ )	49
III.4.C. Pertes de concentration( $V_{conc}$ )	49
CONCLUSION	50

## Chapitre VI

### SIMULATION ET VALIDATION

VI. INTRODUCTION	52
VI.1. Etudes des caractéristiques du système	52
VI.1.2. Les caractéristiques I-V des panneaux solaire	52
VI.1.3.Caractéristique de climatique	53
VI.2. .Influence de la variation d'éclairement et l'angle sur les caractéristiques du PV	55
VI.3. Influence de la variation de (E) sur les caractéristiques du PV	56
VI.4. .SIMULATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE (PV)	60
VI.4.1.A. Caractéristique Courant-Tension	61
VI.4.1.B. Caractéristique puissance-tension P(V)	61
VI.4.2. SIMULATION DE L'ELECTROLYSER DE PEM	62
VI.4.2.Caractéristique Pression-Temps	63
VI.5. Exemple de fonctionnement d'électrolyse avec un panneau PV	63
VI.6.L'électrolyse de l'eau	64
VI.6.1. Réalisation d'une électrolyse de l'eau	65
A) Electrode de type Aciers de nuance	65
B) Electrode de type graphite	68

# Sommaire

---

Conclusion	71
Annexes	

# INTRODUCTION GENERALE

# Introduction générale

---

## INTRODUCTION GENERALE

Avec la menace croissante de l'épuisement des ressources non-renouvelables de notre planète et des perturbations de l'écosystème à cause de l'utilisation d'énergies peu écologiques, le développement des énergies propres et renouvelables devient de plus en plus indispensable. Dans le cadre du développement durable. Ce changement stratégique radical sera obligatoire à moyen terme, le plus tôt sera le mieux. Quelles que soient les qualités de ces énergies de substitution elles ne seront adoptées que si leurs prix sont compétitifs par rapport à ceux des énergies fossiles.

De l'avis de beaucoup d'experts, l'Hydrogène est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur. Il représente la forme énergétique la moins nocive pour l'environnement. Muni d'un cycle énergétique fermé, il rentre dans divers applications, tels que la production d'électricité, le chauffage des habitats et la fourniture de carburant pour le transport. Les réserves d'énergies fossiles étant très limitées, l'Hydrogène se présente comme un excellent alternatif dans un premier temps et un substitut par la suite. Il peut jouer un rôle même plus important que les énergies conventionnelles. En effet, il présente l'avantage d'être non polluant et il peut utiliser les mêmes moyens de transport que les énergies conventionnelles. Non seulement il peut subvenir aux besoins énergétiques locales mais il peut aussi être une importante commodité d'exportation.

Pour l'Algérie, il s'avère d'une importance capitale. Il permet non seulement d'augmenter et de diversifier ses réserves et ses exportations énergétiques mais aussi de subvenir à ses besoins énergétiques qui deviennent de plus en plus importants.

L'Hydrogène est très présent sur terre (eau, hydrocarbures, etc.) mais jamais à l'état simple, il est toujours sous forme de combinaisons avec d'autres éléments (oxygène, carbone, etc.). Il n'est pas une source d'énergie car il n'existe pas à l'état naturel, ce qui présente l'obligation de le produire [1].

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

L'électrolyse de l'eau pour la production de l'Hydrogène est le procédé le plus

# Introduction générale

---

répandu et le plus prisé. L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement.

Moyennant des panneaux photovoltaïques ; c'est très simple mais trop cher et l'alternance Jour/Nuit est habituellement un handicap pour l'énergie solaire. Ces inconvénients éventuellement majeurs poussent certains chercheurs à trouver des systèmes similaires mais plus avantageux, Parmi ces systèmes celui qui représente la cible de notre étude.

Cette étude a pour objet un dispositif de production d'hydrogène solaire à basse énergie dont l'électricité fournie à l'électrolyseur. Alors, ce travail a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre ; parle d'une façon générale sur les caractéristiques de l'Hydrogène, ses applications dans l'industrie et ses méthodes de production. Le deuxième chapitre présente une généralité sur un générateur photovoltaïque, le troisième chapitre étudie l'électrolyse de l'eau et le dernier chapitre nous permettra d'analyser la problématique, nos motivations, nos objectifs seront clairement affichés par une simulation qu'en expérimentation.

# *Chapitre 1*

## *Les différentes méthodes de production d'hydrogène*

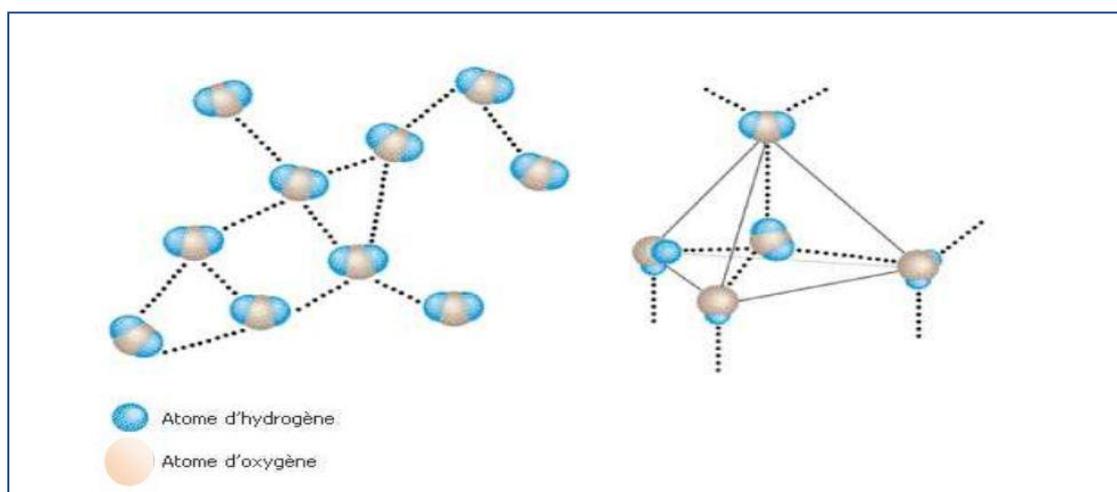
## I. Généralités sur L'hydrogène

### I.1. Introduction

Aujourd'hui utilisé dans le raffinage, la chimie ou l'industrie, l'hydrogène est souvent présenté comme un vecteur énergétique d'avenir pour le secteur des transports. Mais, possédant des caractéristiques physiques relativement mal adaptées à cet usage et n'existant pas sous forme pure, l'hydrogène présente, pour l'heure, un bilan encore contrasté. Pouvant offrir de bonnes performances environnementales, les filières hydrogène restent handicapées par des coûts trop élevés pour un développement de masse. Une application dans les transports pour le grand public nécessitera encore de nombreux travaux de recherche.

### I.2. Caractéristiques de L'hydrogène

Hydrogène (du grec « qui produit de l'eau »), élément de symbole H, incolore, inodore et insipide, de numéro atomique 1. On confondait l'hydrogène avec d'autres gaz, jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontre en 1766 que l'Hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Le chimiste montra plus tard que l'hydrogène était une substance indépendante, qui se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau (Voir Figure 1.1). En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma hydrogène [1].



(Fig.I.1) : liaisons hydrogène dans l'eau [1].

### I.2.1. Propriétés et origine naturel

Comme la plupart des éléments gazeux, l'hydrogène est diatomique (ses molécules sont constituées de deux atomes). Aux températures élevées, il se décompose en atomes libres. L'hydrogène a les plus bas points d'ébullition et de fusion de tous les éléments hormis l'hélium : l'hydrogène fond à  $-259,2^{\circ}\text{C}$  et bout à  $-252,77^{\circ}\text{C}$ . À  $0^{\circ}\text{C}$  et sous une pression de 1 atm, l'hydrogène est un gaz de densité 0,089. Sa masse atomique est de 1,007. L'hydrogène liquide fut obtenu pour la première fois, en 1898, par le chimiste britannique sir James Dewar. Il est incolore (bleu clair en couches épaisses), avec une densité de 0,070. Évaporé sous pression réduite à grande vitesse, il se transforme en un solide incolore [2].

Le gaz hydrogène est un mélange des deux formes différentes suivantes : l'ortho hydrogène (les spins des noyaux sont parallèles) et le para hydrogène (les spins sont antiparallèles). L'hydrogène ordinaire contient environ trois quarts de la forme ortho et un quart de la forme para. Ces deux formes ont des points de fusion et d'ébullition semblables à ceux de l'hydrogène ordinaire. En pratique, le para hydrogène pur est obtenu par adsorption d'hydrogène ordinaire sur du charbon actif vers  $-225^{\circ}\text{C}$ .

On connaît trois isotopes naturels de l'hydrogène: l'hydrogène ordinaire, le deutérium et le tritium. Le noyau d'un atome d'hydrogène ordinaire contient un proton. Le deutérium est présent dans l'hydrogène ordinaire jusqu'à 0,02 %, son noyau est constitué d'un proton et d'un neutron, et l'élément a une masse atomique de 2. Le tritium est un isotope instable et radioactif, dont le noyau atomique contient un proton et deux neutrons. Le tritium a une masse atomique de 3. On trouve l'hydrogène libre uniquement à l'état de traces infimes dans l'atmosphère.

Cependant, les spectres solaire et stellaire montrent que le gaz est abondant dans le soleil et dans les autres étoiles. C'est en fait l'élément le plus répandu dans l'Univers. L'hydrogène combiné avec d'autres éléments est largement répandu sur Terre, où le composé de l'hydrogène le plus important et le plus abondant est l'eau  $\text{H}_2\text{O}$ . Tous les constituants de la matière vivante, comme de nombreux minéraux, contiennent de l'hydrogène. C'est un constituant essentiel des hydrocarbures et d'une large variété d'autres composés organiques. Tout acide contient de l'hydrogène différencie les acides par leur facilité à libérer des ions hydrogène en solution.

### I.2.2. Les avantages et les inconvénients

En effet, les avantages de l'hydrogène sont nombreux [3]:

- C'est un atome très abondant sur Terre (sous forme d'eau)
- C'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel (voir ltableau 1.1).
- il n'est ni polluant, ni toxique.
- sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau.
- c'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air).
- son transport est aisé (en particulier par pipes).

#### ➤ Il convient aussi de mentionner ses inconvénients:

- Sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple).
- ses limites d'inflammabilité et de détonation avec de l'air sont plus larges que pour le gaz naturel (d'un facteur 5 environ), mais, de fait, seule compte la limite inférieure : 4% en volume dans l'air au lieu de 5,3% pour la limite inférieure d'inflammabilité et 13% au lieu de 6,3% en limite inférieure de détonation. En dehors d'une situation dite « confinée » (c'est-à-dire emprisonné avec de l'air dans un volume fermé), l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. En situation confinée, l'énergie explosive théorique par m<sup>3</sup> de gaz est 3,5 fois plus faible pour l'hydrogène et la surpression de détonation légèrement plus faible (14,7 bars contre 16, 8).
- l'énergie minimale à fournir pour l'enflammer est 10 fois inférieure à celles d'hydrocarbures classiques (20 J pour l'hydrogène, contre 260 J pour le propane).
- sa flamme est presque invisible, et sa combustion (non électrochimique), en présence d'air, génère des NOx.
- son image dans le public n'est pas bonne (il est considéré comme un gaz dangereux) et son acceptabilité n'est donc pas encore acquise.

### I.3. Méthodes production de l'hydrogène

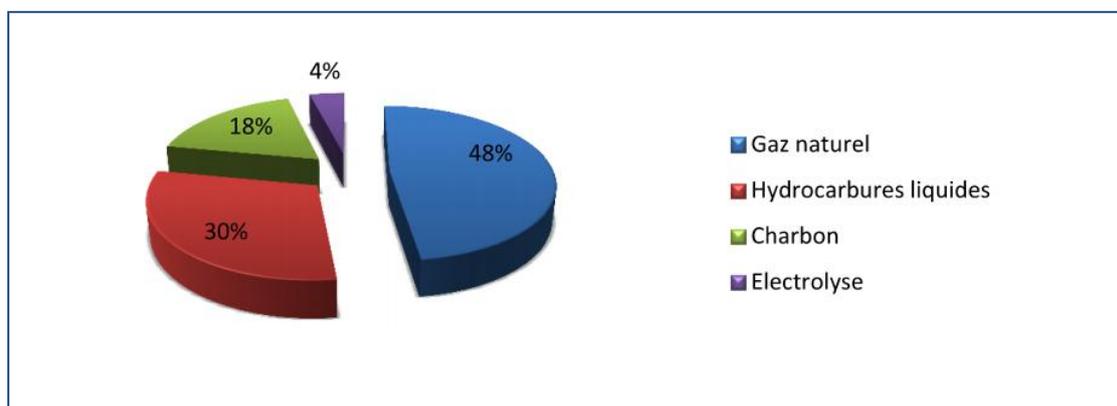
Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation

partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation.

Les cycles thermochimiques purs et hybrides par exemple sont à l'échelle de recherche et développement, tandis que les procédés photochimiques et photo biologiques sont encore au premier stade de la recherche.

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

- La matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois.
- L'énergie nécessaire pour la production : cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale, etc.).
- Le procédé de production : plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie quantique telle que la photolyse, à l'énergie électrique telle que l'électrolyse ou à l'énergie thermique tel le procédé thermochimique. Pour la plupart des procédés, il existe plusieurs types et le nombre est relativement important. [4].

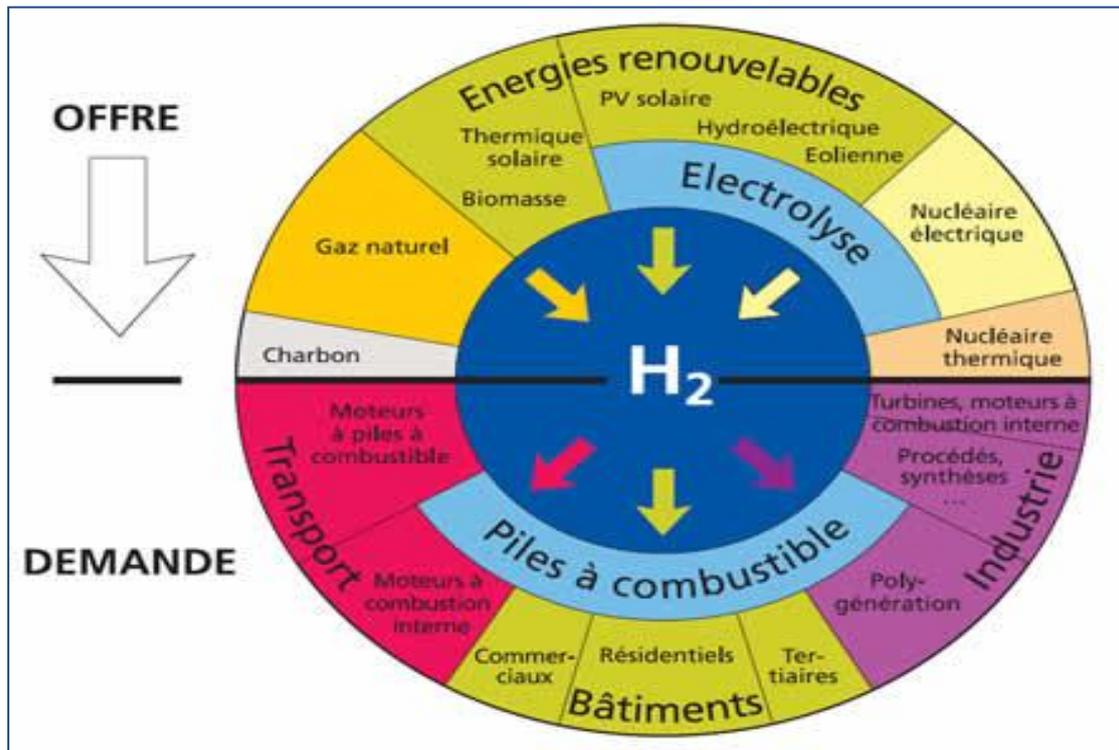


(Fig.I.2)

### Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde. [4]

Le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource, la quantité d'hydrogène exigée et la pureté souhaitée de l'hydrogène. Les chercheurs et les industriels développent un éventail de processus pour produire l'hydrogène de manière économiquement et écologiquement satisfaisante. Ces processus peuvent être séparés en quatre groupes de technologies:

- les technologies thermochimiques.
- les technologies nucléaires.
- les technologies électrolytiques.
- Les technologies photo lytiques.



(Fig.I.3) : Les différentes méthodes de production d'H<sub>2</sub> et leur application [4]

### I.3.1. Production par les combustibles fossiles

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus est présentée dans l'apparition de CO<sub>2</sub> comme sous-produit.

#### I.3.1.A. Production à partir du gaz naturel

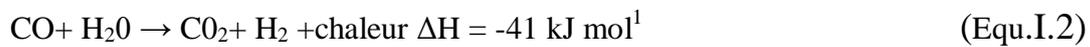
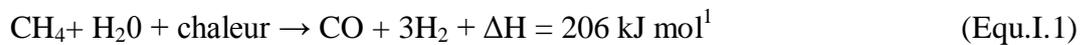
L'hydrogène peut actuellement être produit à partir du gaz naturel au moyen de trois processus chimiques différents

##### I.3.1.A.1. Le vaporeformage du gaz naturel (SMR)

Le reformage à la vapeur consiste à transformer les hydrocarbures légers d'hydrocarbures en gaz de synthèse (mélange H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>O) par réaction

avec la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel. Cette transformation a lieu à haute température (840 à 920°C) et à pression modérée (de l'ordre de 20 à 30 bars).

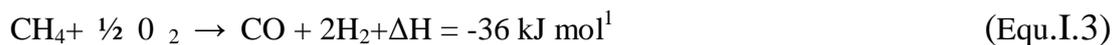
Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse (I. 1) et la conversion du CO (I. 2). On notera que ces réactions sont thermodynamiquement équilibrées, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire à la réaction chimique pour s'effectuer, une partie de la charge ne réagit pas et reste mélangée aux produits. Dans le cas du vaporeformage, ceci se traduit par une fraction significative de méthane (CH<sub>4</sub>) et de monoxyde de carbone (CO) en sortie d'unité.



### I.3.1.A.2. Oxydation partielle (POX)

L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. A haute température (classiquement de 900 à 1500 °C) et à pression élevée (classiquement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène (1.3) en tant qu'oxydant et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur.

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



### I.3.1.A.3. Le reformage aérothermes (ATR)

Le reformage Autotherme (ou ATR) est un procédé particulièrement intéressant. On l'utilise essentiellement sur gaz naturel. Il est basé sur l'association au sein d'un même réacteur d'une oxydation partielle à l'oxygène pur, suivie d'une zone catalytique de vaporeformage. Sa conception permet de compenser les réactions

endothermiques du vaporeformage par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle à de la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. Ils sont ensuite dirigés vers le réacteur (catalyseur à base de nickel, pression de 20 à 60 bars et température de 900 à 1100°C) pour la production de gaz de synthèse. Le rapport H<sub>2</sub>/CO « naturel » du gaz de synthèse obtenu est compris entre 2 et 2.8, mais le procédé possède la souplesse nécessaire pour ajuster ce rapport entre 1 et 3.5 selon les besoins de l'utilisateur final : Une augmentation de la quantité de vapeur d'eau injectée permet d'augmenter ce rapport, tandis que le recyclage total ou partiel du CO<sub>2</sub> en sortie de réacteur permet de le diminuer chacun des processus a des certains avantages et inconvénients.

La technologie	SMR	ATR ou POX
<u>Vantages</u>	■ Rendement élevé - Coûts pour de grandes unités	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Petite taille</u></li> <li>• <u>Coût pour des petites unités</u></li> <li>• <b>Simple système</b></li> </ul>
<u>Inconvénients</u>	■ <u>Complexité du système</u> - Sensible aux qualités du gaz naturel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Efficacités inférieure</u></li> <li>• <u>Purification de l'H<sub>2</sub></u></li> <li>• <b>Emissions / torchage</b></li> </ul>

**(Tableau.I.1): Comparaison des technologies de production d'H<sub>2</sub> à partir du gaz naturel**

**I.3.1.B. Production à partir du charbon**

L'hydrogène peut être produit à partir du charbon par une variété des procédés de gazéification (par exemple lit fixé, lit de fluidisation ou écoulement entraîné). Dans la pratique, des procédés entraînés à hautes températures d'écoulement sont favorisés pour maximiser la conversion du charbon en gaz, de ce fait évitant la formation des quantités significatives du charbon, goudrons et phénols. Une réaction typique pour le processus est donnée dans l'équation (1.4), dans laquelle le carbone est converti en oxyde de carbone et hydrogène.



Puisque cette réaction est endothermique, la chaleur additionnelle est exigée, comme avec la reformation du méthane. Le CO est encore convertie en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> par

la réaction de décalage d'eau-gaz, décrite dans l'équation (I.2).

La production d'hydrogène à partir du charbon est commercialement mûre, mais elle est plus complexe que la production de l'hydrogène du gaz naturel. Le coût de l'hydrogène résultant est également plus haut. Mais puisque le charbon est abondant dans beaucoup des régions du monde et sera employé probablement comme source d'énergie sans se soucier, il est intéressant d'explorer le développement des technologies propres pour son usage [5].

### **I.3.1.C. Production à partir du nucléaire**

Il existe 2 types d'énergie nucléaire:

- ° Nucléaire électrique : utilise l'énergie nucléaire pour l'électrolyse de l'eau puis libérer l'hydrogène.
- ° Nucléaire thermique: La production de chaleur pour la production d'hydrogène. L'énergie nucléaire recouvre:
  - ° Des applications civiles (production d'électricité, de chaleur, d'eau douce, de radio-isotopes, propulsion navale)
  - ° Des applications militaires (armes nucléaires, propulsion navale).

#### ➤ **Les inconvénients de l'énergie nucléaire sont:**

Des risques d'accident nucléaire grave sur un réacteur nucléaire ou au cours du cycle du combustible

De problèmes non résolus liés à la gestion à long terme des déchets radioactifs

Du risque de terrorisme nucléaire; pour l'utiliser comme toxique ou pour fabriquer une «bombe».

Du coût économique de la filière de production de l'électricité nucléaire.

### **I.3.2. Production à partir des énergies renouvelables**

Diverses sources sont exploitables :

#### **I.3.2.1. La biomasse (agriculture, forêts, algues, organiques)**

Elle pourrait être une source d'hydrogène attrayante puisque sa conversion en hydrogène donne lieu à l'émission d'une quantité de CO<sub>2</sub> équivalente à celle qui est nécessaire pour sa régénération; l'écobilan est donc à peu près nul.

Elle peut produire de l'hydrogène de plusieurs façons:

- Par gazéification pour donner du gaz de synthèse (CO + H<sub>2</sub>) qui lui-même après

purification-donne de l'hydrogène. Aujourd'hui, dans le monde, plus de 50 usines de gazéification de la biomasse fonctionnent même si elles ne sont pas dédiées à la fabrication d'hydrogène ;

- Par bio-photolyse de l'eau en utilisant certaines micro-algues ou certaines cyanobactéries ;
- Par photo-décomposition de composés organiques par des bactéries :

Une fois produit, l'hydrogène est soit utilisé (ou stocké) sur place, soit transporté via un réseau de pipes

### **A. Acétification de la biomasse**

Les procédés de gazéification de la biomasse représentent actuellement une capacité mondiale de production de plus de 430 millions de Nm<sup>3</sup> d'hydrogène par jour. La production d'énergie équivalente s'élève à une vingtaine de GW.

Le principe général de la gazéification consiste à mélanger une charge de charbon (soit sous forme de boue, soit à l'état solide) avec un oxydant (généralement de l'air ou de l'oxygène pur et de la vapeur d'eau) à une température de 1000 à 1500 °C. Les composés hydrocarbonés

Résultant réagissent alors avec l'eau selon la réaction suivante:



Il existe une grande variété de procédés de gazéification qui diffèrent par l'état de la charge initiale fournie au réacteur et par sa configuration globale.

Les unités de gazéification peuvent être couplées à une turbine à cycle combiné (IGCC, Intégrates Gâtification Combine Cycle) permettant ainsi d'atteindre des rendements électriques nets de l'ordre de 40 à 50 % (85 à 90 % de rendement global) [6].

### **B. Production Photo-biologique (biophotolyse)**

La production de l'hydrogène par bio photolyse repose sur le principe de la photosynthèse (I. 6) connue chez toutes les plantes. Le métabolisme des organismes utilisés est réorienté vers la production d'hydrogène (I. 7) au lieu de la synthèse des hydrates de carbone et la formation de la biomasse. La photosynthèse implique l'absorption de la lumière par deux photosystèmes distincts opérant en série pour la

dissociation de deux molécules d'eau et libérant de l'oxygène. Ainsi des électrons sont libérés et seront utilisés soit pour réduire le CO<sub>2</sub> (Cycle de Calvin) soit sont eux même réduits en hydrogène gazeux par une enzyme appelée hydrogénase. Cette dernière absente chez les plantes supérieures et spécifiques aux micro algues, quelques macro algues vertes et les cyanobactéries, peut réduire les protons en hydrogène gazeux sous certaines conditions [7]

### I.3.2.A. L'éolien

C'est une source qui est aussi en plein développement dans de nombreux pays. Les générateurs éoliens ont une puissance unitaire de plus en plus élevée, jusqu'à 2,5 MW (on étudie actuellement des prototypes 25 dans la gamme 4-6 MW), et le coût du kWh fourni est en baisse régulière 'il n'a cependant pas encore atteint les objectifs attendus autour de 3 à 4 centimes d'euros. L'électricité produite peut être partiellement ou totalement transformée en hydrogène par électrolyse de l'eau.

### I.3.2.B. Le solaire

Elle se présente sous deux formes : le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. La chaleur fournie par des capteurs solaires plans ne peut être utilisée que sur place, compte tenu de son bas niveau de température (60-80°C), pour le chauffage de l'eau et du bâtiment. Le solaire thermique à plus haute température (à concentration moyenne, dans la gamme 200- 250°C) n'est réaliste que dans les pays à fort ensoleillement direct et peut alors produire de l'électricité via une machine Thermique à cycle de Rankine, laquelle électricité produira de l'hydrogène par électrolyse. Des capteurs solaires à forte concentration peuvent fournir des calories à plus de 800°C utilisables pour la dissociation de l'eau par la voie thermo-chimique. La source solaire sur laquelle les plus grands espoirs sont fondés est le photovoltaïque. En effet, l'énergie solaire frappant la Terre représente quinze mille fois la consommation mondiale. La conversion de cette énergie solaire par l'intermédiaire d'une cellule photovoltaïque produit de l'électricité qui peut soit être utilisée sur place, soit réinjectée dans un réseau, soit fournir de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. La production des cellules est aujourd'hui en forte croissance (de l'ordre de 15% par an) et son prix est en baisse régulière mais encore trop élevé, d'un facteur 3 environ. Des sauts technologiques en cours d'étude (comme les cellules à couche mince) devraient

permettre d'atteindre les coûts objectifs dans quelques années. Certains pensent que la contribution énergétique globale de ce type de source pourrait atteindre 3,6% en 2025 [8].

### **I.3.2.C. L'hydraulique**

La production d'hydrogène hydraulique est très développée dans certains pays comme le Canada, fournit l'énergie renouvelable la moins chère.

On estime qu'on n'exploite aujourd'hui que 10% des ressources mondiales et quand on sait que l'hydraulique produit actuellement environ 20% de l'électricité dans le Monde, on voit que le développement de l'hydraulique pourrait contribuer beaucoup plus significativement aux bilans énergétiques du futur ; il faut toutefois noter que les sites à équiper sont généralement de plus en plus éloignés des centres de consommation d'où la nécessité de transformer cette énergie via le vecteur hydrogène en particulier. Il faut en effet noter que l'hydrogène est considéré comme un vecteur d'énergie plus économique que l'électricité quand les distances sont supérieures à 1000 km .

### **I.3.2.E. D'autres sources renouvelables**

Elles sont de moindre potentiel mais néanmoins intéressantes, sont déjà mises en œuvre ou envisagées quand les conditions locales s'y prêtent comme :

- l'énergie des marées.
- l'énergie des vagues 27.

la géothermie « chaude », comme en Islande et en Italie, en utilisant des calories à une température assez élevée (> 250°C) pour faire fonctionner un cycle thermodynamique (pour produire de l'électricité qui alimente un électrolyseur) avec un rendement suffisant pour amortir le système de production [9].

## **I.3.3. Autres procédés chimiques**

### **I.3.3.A. Produit secondaire du procédé Chlore-Soude**

L'hydrolyse d'une saumure (eau salée) conduit à la production de soude NaOH, de chlore Cl<sub>2</sub> et d'hydrogène H<sub>2</sub>. L'équation bilan de la réaction est la suivante:



Le procédé industriel initial utilisant du mercure a été abandonné pour des raisons environnementales. Il a été remplacé par le procédé à membrane (voir figure 1.7).

Les compartiments anodiques et cathodiques sont ici séparés par une membrane sélective conductrice de cations de 50 à 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. L'anode est alimentée par une saumure (concentration usuelle de NaCl: 180 à 200 g/L;  $1 < \text{pH} < 4,5$ ). Celle-ci oxyde les ions Cl en chlore gazeux  $\text{Cl}_2$ . La cathode réduit l'eau en hydrogène gazeux  $\text{H}_2$ . Les ions hydroxydes issus de la réaction se recombinaient avec les ions  $\text{Na}^+$  qui ont migré du compartiment anodique vers la cathode, à travers la membrane (d'une surface usuelle de là 3  $\text{m}^2$ ), pour former de la soude dont la concentration avoisine 25 % en masse.

Une différence de potentiel de 2 à 4 V est appliquée entre les deux électrodes afin d'ajuster le courant d'électrolyse (valeurs typiques : entre 2000 et 5000  $\text{A}/\text{m}^2$ ). Une centaine de cellules sont habituellement assemblées en série pour former le stack. La température de fonctionnement varie entre 80 et 95  $^\circ\text{C}$  [10].

### I.3.3.B. Décomposition par cycle thermochimique

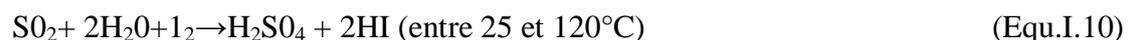
On peut dissocier une molécule d'eau en apportant de l'énergie au procédé uniquement sous forme de chaleur. Une température de 4500 $^\circ\text{C}$  serait alors nécessaire.

Pour abaisser cette température, on peut faire intervenir dans le procédé des composés chimiques dont les produits de réaction donneront lieu in fine à la production d'hydrogène.

Il existe plusieurs cycles thermochimiques dont les deux principaux sont le cycle Iode- Soufre et le cycle UT3

#### C. Le cycle Iode-Soufre

Il met enjeu la décomposition à haute température de deux acides



#### D. Le cycle UT-3

Il met enjeu de la chaux, du brome et de l'oxyde de fer.





### I.3.4. La production par électrolyse

L'électrolyse de l'eau était utilisée pour la production d'hydrogène et d'oxygène, l'électrolyse est la future utilisation des énergies renouvelables.

Une autre possibilité réside dans l'utilisation de l'électricité produite par des centrales nucléaires, et plus particulièrement lors des heures creuses. L'hydrogène permettrait ainsi le stockage de l'électricité sous forme chimique, et une réutilisation ultérieure lorsque les besoins se font sentir. En outre, le rendement de l'électrolyse est en pratique de l'ordre de 65%, bien que, théoriquement, il est possible d'atteindre 80 ou 85%. Enfin, étant donné le prix élevé de l'électricité, le coût de l'électrolyse est bien supérieur à celui du reformage. Ainsi, afin d'augmenter la rentabilité du processus, il faudrait une électricité à plus faible coût

#### I.3.4.A. Fonctionnement de l'électrolyse

Du point de vue de la réaction électrochimique, il s'agit de la réaction inverse à celle qui a lieu dans une pile. La cellule électrolytique est formée de deux électrodes, une cathode et une anode, d'un électrolyte et d'un générateur de courant. L'électrolyte est soit une membrane polymère échangeuse de protons soit une membrane céramique conductrice d'ions oxygène. Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions sont les suivantes :

- à l'anode, des électrons sont formés suite à l'oxydation de l'eau en oxygène et en protons (oxydation)



- à la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se réduisent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (réduction)



Ainsi, grâce à du courant, l'eau est dissociée en hydrogène et en oxygène. Étant donné que l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285kJ/mole, il faut nécessairement un apport d'énergie électrique. Le potentiel théorique correspondant est de 1.48V à 25°C, mais pratiquement, il s'agit plutôt d'un potentiel entre 1.7 et 2.3 V, ce qui correspond aux rendements cités ci-dessus

## I.4. Les applications d'hydrogène

### I.4.A. Utilisations chimiques

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

Le gaz est préparé en laboratoire par action d'un acide dilué sur un métal, comme le zinc, et par électrolyse de l'eau. De grandes quantités du gaz sont produites industriellement à partir de différents gaz combustibles.

**L'hydrogène** est séparé du gaz à l'eau, du gaz naturel et du gaz de houille, par liquéfaction des autres constituants du gaz ou par conversion catalytique du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone, facilement éliminé.

Dans de nombreuses réactions d'électrolyse, l'hydrogène est un sous-produit important. Des quantités considérables d'hydrogène sont utilisées dans la synthèse de l'ammoniac et du méthanol. L'hydrogénation des huiles pour la production de graisses comestibles, du charbon pour former le pétrole de synthèse, et des huiles du pétrole pour enrichir la fraction d'essence, sont des procédés qui nécessitent de grandes quantités d'hydrogène.

On a utilisé l'hydrogène, gaz le plus léger, pour gonfler les ballons et les dirigeables.

Cependant, il s'enflamme très facilement, et plusieurs dirigeables, dont l'Hindenburg (aéronef allemand), ont été détruits par des incendies d'hydrogène. L'hélium a 92 % de la puissance de levage de l'hydrogène et est ininflammable. C'est pourquoi on l'utilise dès que possible.

L'hydrogène est en général stocké dans des cylindres d'acier, sous des pressions

comprises entre 120 et 150 atm. Le gaz est également utilisé dans les chalumeaux à hautes températures pour la coupe, la fonte et le soudage des métaux [11].

Les raffineries s'efforcent de produire à partir de pétroles bruts variés le maximum de produits commercialisables (essence, diesel, kérosène, naphtha, ...) qui doivent répondre à des normes précises. Dans le schéma de raffinage, un certain nombre d'unités de traitement sous-produisent de l'hydrogène (cracking thermique ou catalytique, reformeur catalytique...) alors que d'autres en sont consommatrices (hydrocracking, hydrotraitement, désulfuration...) [12].

### I.4.B. Utilisation énergétique

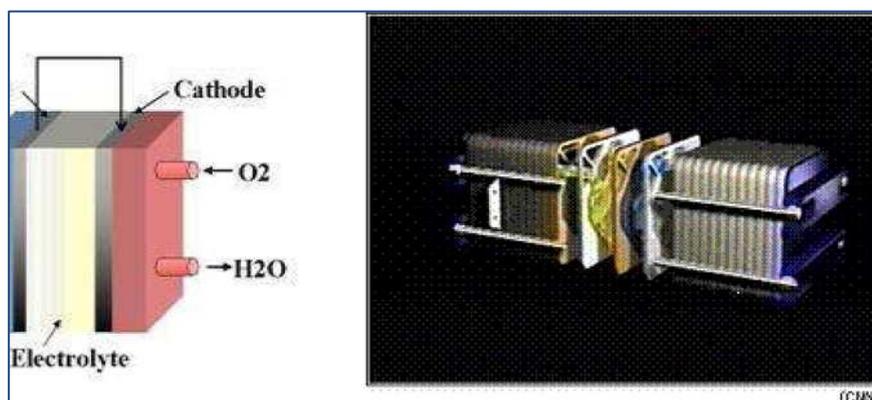
#### I.4.B.1. Piles à combustibles

Il est extrêmement simple : il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte ; c'est la réaction inverse de l'électrolyse. Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé.

Le *Tableau 1.2* ci-après détaille les divers types de piles couramment développées et la figure 1.5 décrit le principe de fonctionnement du type dit « acide à polymère solide » (EMFC). Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50% [11].



(Fig.I.4) : Principe élémentaire d'une pile et aperçu extérieur [11]

Type de pile	Electrolyte	T(°C)	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transports. Gamme : 1-100 Kw
Acide polymère (PEMFC et DMFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transport, stationnaire Gamme : 10mW-
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (Liquide)	200	Stationnaire, transports Gamme : 200kW-10 MW
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondus (liquide)	650	Stationnaire Gamme : 500kW-10 MW
Oxyde solide (PCFC)	Céramique (solide)	400 à 600	Stationnaire, transports Gamme : 1kW-10 MW
Oxyde solide (SOFC)	Céramique (solide)	600 à 1000	Stationnaire, transports Gamme : 1kW-10 MW

(Tableau 1.2) : Les différents types de piles à combustible

#### I.4.B.2. Autres applications énergétiques

Les domaines potentiels d'application de l'hydrogène-énergie sont extrêmement nombreux et variés, à commencer par tous ceux qui sont déjà couverts par le pétrole (et ses dérivés) et le transport, avec des moteurs thermiques alimentés directement en hydrogène, comme le démontre le constructeur BMW depuis des années, ou avec des piles à combustible, couplées ou non à des batteries (ou super capacités) dans des montages hybrides, comme l'ont démontré une quinzaine de constructeurs automobiles dans le Monde avec plus de 150 prototypes déjà réalisés. L'hydrogène stocké à bord a fait l'objet de démonstrations par la majorité des constructeurs, d'autres n'excluant pas de le fabriquer à bord grâce un reformeur d'alcool ou d'essence adapté. On peut y ajouter une application, en cours de test chez le constructeur BMW: les APU (Auxiliary Power Unit), piles à combustible utilisées comme source auxiliaire d'énergie électrique pour alimenter les équipements de bord (poids-lourds, utilitaires, véhicules de haut de gamme, avions) comme la climatisation et tous les autres services électriques, dont il est prévu que la puissance nécessaire atteindra 5 kW vers 2005[12].

- l'industrie, qui consomme aujourd'hui la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde et qui pourrait reconverter sans grande difficultés ses systèmes actuellement alimentés en fuel ou gaz naturel.

## Conclusion

Le développement de l'hydrogène est poussé par trois éléments moteurs :

- Le CO<sub>2</sub> : quelles que soient les hypothèses que l'on puisse retenir sur le niveau des réserves des combustibles fossiles, le problème le plus urgent est de tout mettre en œuvre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, et en particulier le CO<sub>2</sub>,
- L'indépendance énergétique : de nombreux pays (Islande, USA, Japon, Europe ...) affichent leur volonté de diminuer leur dépendance énergétique en diversifiant leurs sources d'énergie et –par conséquence- en recourant à l'hydrogène et ainsi améliorer leur situation géopolitique.

L'épuisement inéluctable des ressources fossiles attendu vers la fin de ce siècle et qu'on souhaite conserver comme matière première (plastiques, ...) plutôt que les brûler.

Or on ne peut modifier la situation du jour au lendemain, d'autant que la demande énergétique mondiale continue de croître pour doubler au moins vers 2050. La seule solution est donc de diversifier les approvisionnements et de transformer **à la source** (pour des raisons techniques et économiques) ces combustibles fossiles, dont on ne pourra se priver pendant longtemps encore –et probablement jusque vers la fin de ce siècle-, pour capturer et stocker le gaz carbonique, et ensuite transporter et distribuer cette énergie par le biais d'un vecteur propre : le choix de l'hydrogène paraît le plus judicieux, d'autant plus que la mise en œuvre de ce gaz permettra une transition graduelle à partir du gaz naturel dont l'utilisation va se généraliser dans les prochaines décennies.

Aujourd'hui produit chimique, l'hydrogène redeviendra le vecteur d'énergie qu'il fût un temps en tant que composé principal du gaz de ville. Qu'il soit produit par reformage de gaz naturel, par électrolyse ou thermochimie en s'appuyant sur l'énergie nucléaire, ou à partir des énergies renouvelables, l'hydrogène sera simple à fabriquer, à stocker, à transporter, à distribuer et à transformer dès lors que les travaux de R&D en cours dans tous les laboratoires de recherche du Monde auront abouti.

Sur le plan de la sécurité et de la réglementation, des travaux ont été réalisés mais la commercialisation de tels systèmes nécessite la mise en place d'un contexte réglementaire adapté et la démonstration au public des vrais risques présentés par de telles technologies. Le travail d'éducation et de sensibilisation du public est une étape essentielle pour le développement des technologies de l'hydrogène.

# *Chapitre 2*

## GENERALTE SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAIQA

## **II.INTRODUCTION**

Comme on le sait, l'Hydrogène est considéré comme le porteur potentiel d'énergie du futur. On entend par hydrogène solaire, l'hydrogène produit en utilisant les énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire. L'existence d'une importante nappe phréatique, en combinaison avec une insolation très importante font de l'Algérie une place de choix pour la production d'hydrogène solaire. Cette production offrira non seulement à l'Algérie une énergie propre mais aussi et surtout permettra d'augmenter et de diversifier ses ressources énergétiques.

Dans le prochain chapitre, on va parler sur la production de l'hydrogène solaire (en général) et (spécialement) par électrolyse de l'eau dont l'apport énergétique pour la dissociation de l'eau qui se déroule dans l'électrolyseur est fait par des systèmes : photovoltaïques ou thermiques. Le potentiel de production s'avère très important particulièrement au sud [12].

### **II.1. Généralité sur le gisement solaire**

#### **II.1.1. Le gisement solaire**

La connaissance du gisement solaire pour une région donnée, est nécessaire pour les applications solaires, tels que le dimensionnement du système de conversion, la méthode la plus précise est la mesure directe avec les appareils de la mesure.

#### **II.1.2. Rayonnement solaire**

Le soleil est une étoile parme 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 tous les éléments chimiques connus depuis que L'angevines 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, 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.

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  $0,5 \mu\text{m}$ , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ  $5780^\circ \text{K}$ .

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

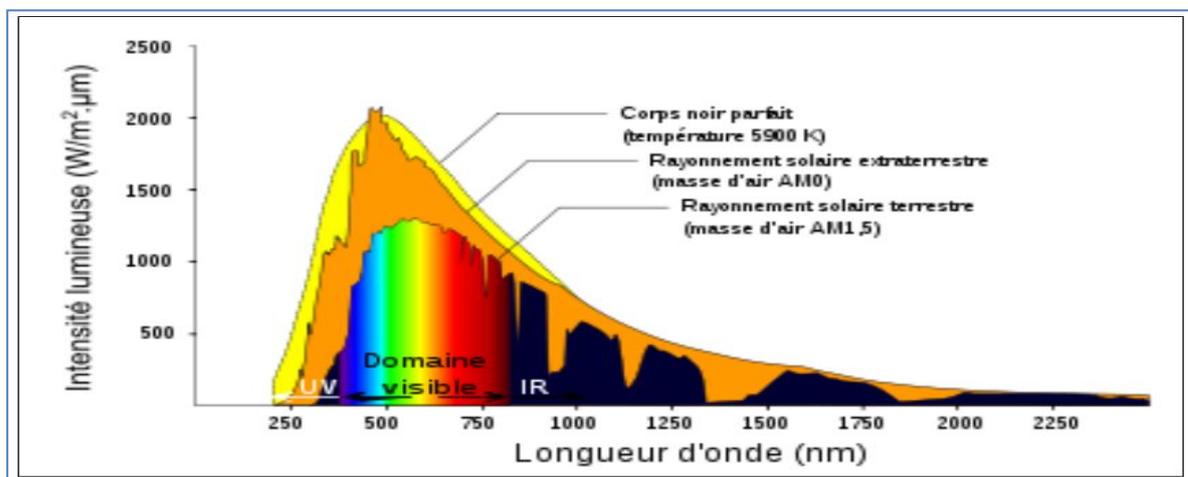
-Diamètre de la terre :  $D_t = 1.27.10^7 \text{m}$

-Distance moyenne soleil-terre :  $L_{ts} = 1.5.10^{11} \text{m}$

### A. Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$ . Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800\text{K}$ . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de  $AM_0$ . Sa distribution en énergie est répartie en: ,[13].

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



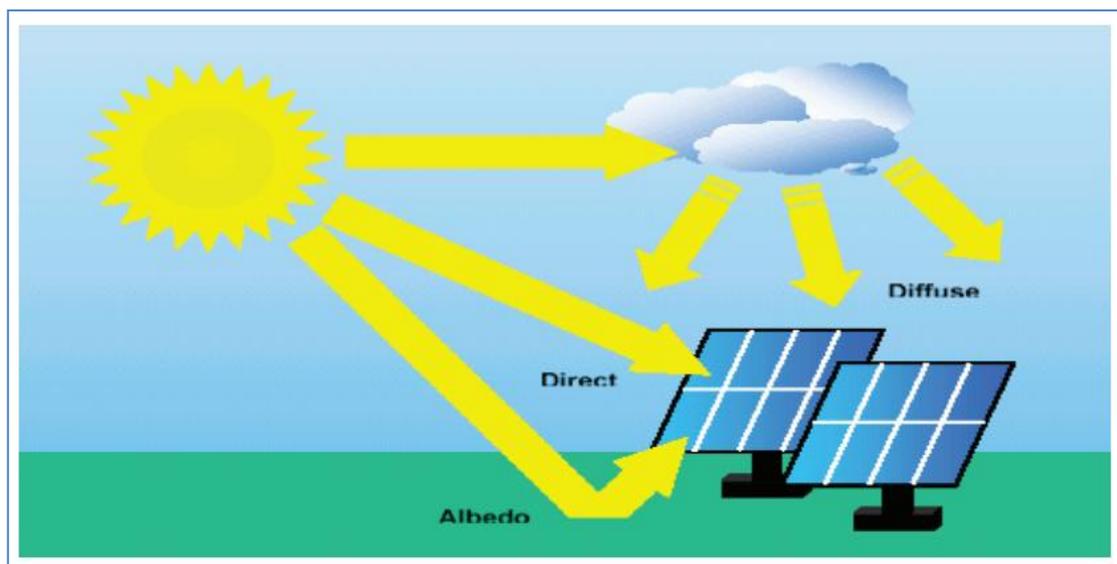
(Fig. II.1) : Le spectre du rayonnement solaire [13].

### B. Les différents types de rayonnement

- ✓ **Le rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- ✓ **Le rayonnement diffus** est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

- ✓ **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- ✓ **Le rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du Soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point [14]



(Fig.II.2) : Composantes du rayonnement solaire [14].

### II.1.2.C. Appareils de mesure de rayonnement solaire

- ✓ **le pyranomètre :**  
C'est un appareil qui est utilisé pour la mesure du rayonnement global reçu par une surface plane.
- ✓ **L'héliographe :**  
Cet instrument mesure la durée d'ensoleillement journalière.

- ✓ **Pyrhéliomètre** : C'est un radiomètre qui mesure le rayonnement direct reçu par une surface normale aux rayons du soleil [15].

### II.2. Conversion photovoltaïque

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [16].

#### II.2.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [16].

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différent, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

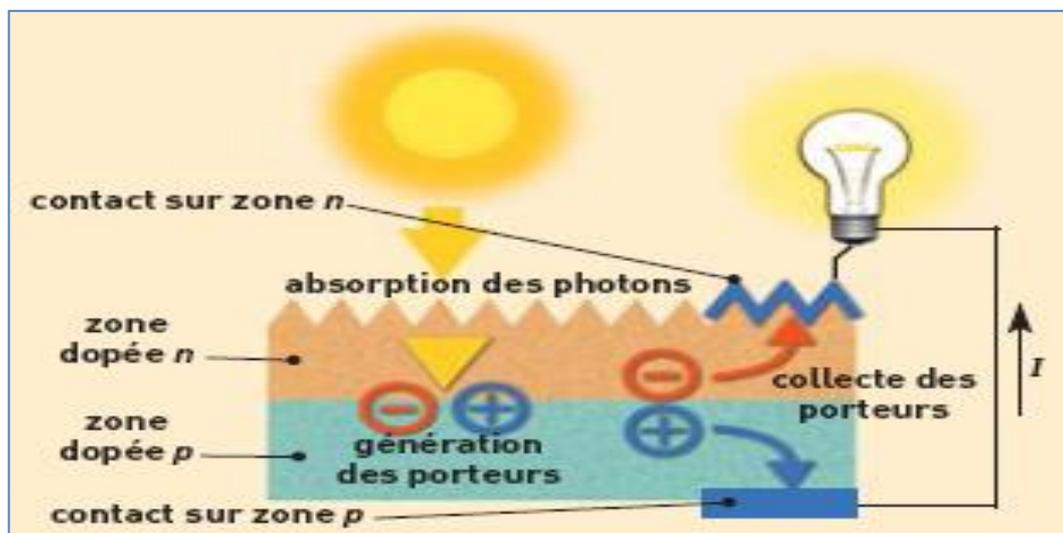
Parmi les matériaux semi conducteurs les plus utilisés on trouve, le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

#### II.2.2. Le principe de conversion photovoltaïque

- ✓ Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en

excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule. Voir la figure (II.3).



(Fig.II.3) : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [16].

### II.2.3. La cellule solaire

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [17].

#### II.2.3.1. Les type des cellules

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

- **Cellule au silicium mono cristallin**

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique.

Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois du silicium amorphe, mais sont nettement plus chers.

- **Cellule au silicium poly cristallin**

Le silicium poly- cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que pour les photopiles mono cristallines). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser

- **Cellule au silicium amorphe**

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin les cellules sont constituées par des couches très minces [18].

### II.2.3.2. Schéma équivalent

Le schéma d'une cellule solaire peut se présenter sous diverses variantes. la configuration la plus usuelle est considérée ci dessous [19].

Pour des raisons de simplicité, la majorité des auteurs adopte certaines simplifications qui restent toujours acceptables dans la limite de l'utilisation normale. Dans l'étude qui suit,  $R_{sh}$  est supposée assez grande pour qu'on puisse négliger son courant de fuite .Dans ce cas, le circuit équivalent de la cellule se réduit comme suit :

L'équation de la tension sera donnée donc par:

$$V = -R_s I + (\alpha_0 . k . T / q) \ln(1 + (I_p - I_0) / I_0) \quad (\text{Equ.II.1})$$

V : Tension de la sortie de la cellule.

$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ ).

I : Courant de la sortie de la cellule (A).

$\alpha$  : Angle de commande du hacheur.

T : Température de la jonction en degrés Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$I_p$  : Courant photovoltaïque (photo-courant) (A).

$I_0$  : Courant inverse de la jonction (A).

Si la charge est infinie (circuit ouvert), la cellule présentera en ses bornes la tension à vide  $V_0$  dont la valeur est obtenue de la relation suivante :

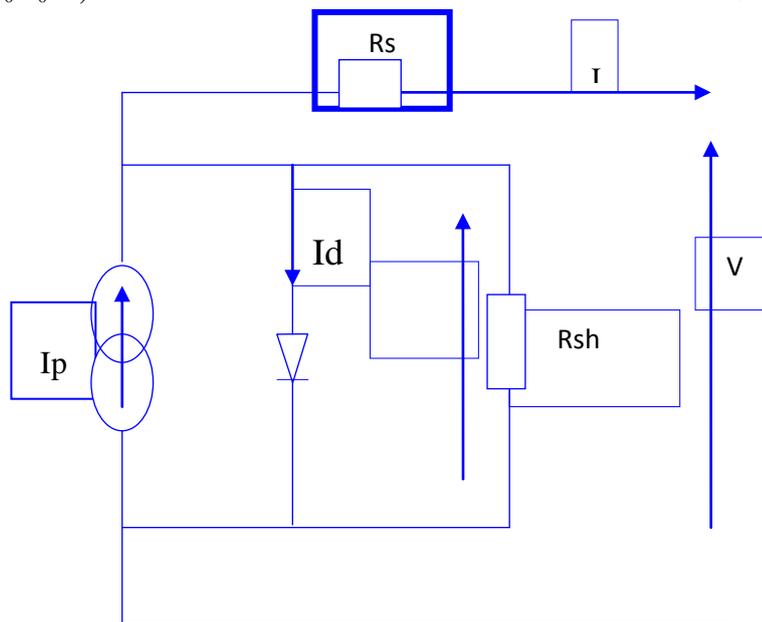
$$V_0 = (a_0 \cdot k_0 \cdot T / q) \ln(1 + I_p / I_0) \quad (\text{Equ.II.2})$$

comme l'ordre de grandeur de  $(I_p / I_0)$  est d'environ  $10^{10} : 10^{14}$ , l'équation précédente devient :

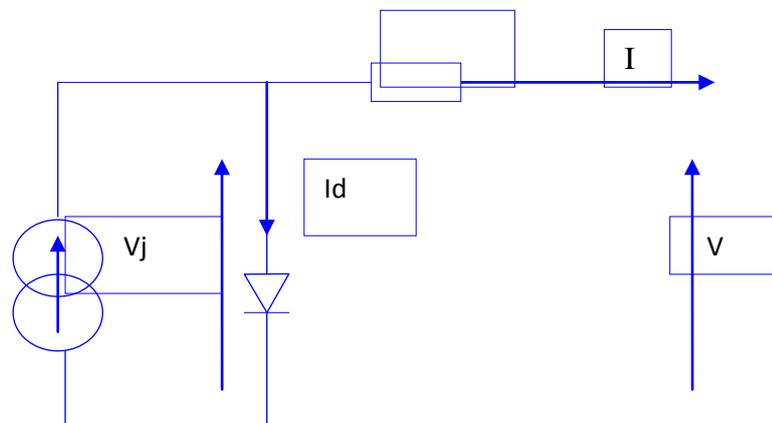
$$V_0 = (1 / A) \cdot \ln(I_p / I_0) \quad (\text{Equ.II.3})$$

avec

$$A = q / (a_0 \cdot k_0 \cdot T) \quad (\text{Equ.II.4})$$



**(Fig.II.4): Circuit équivalent d'une cellule solaire**



**(Fig.II.5): Circuit équivalent simplifié**

$V_j$  : Tension au niveau de la jonction.

$N_p$  : Nombre de module en parallèle.

$N_s$  : Nombre de module en série.

$I_p$  : Courant photovoltaïque (photo-courant) (A).

$I_d$  : Courant direct sous obscurité de la jonction (A).

$V_j$  : Tension au niveau de la jonction.

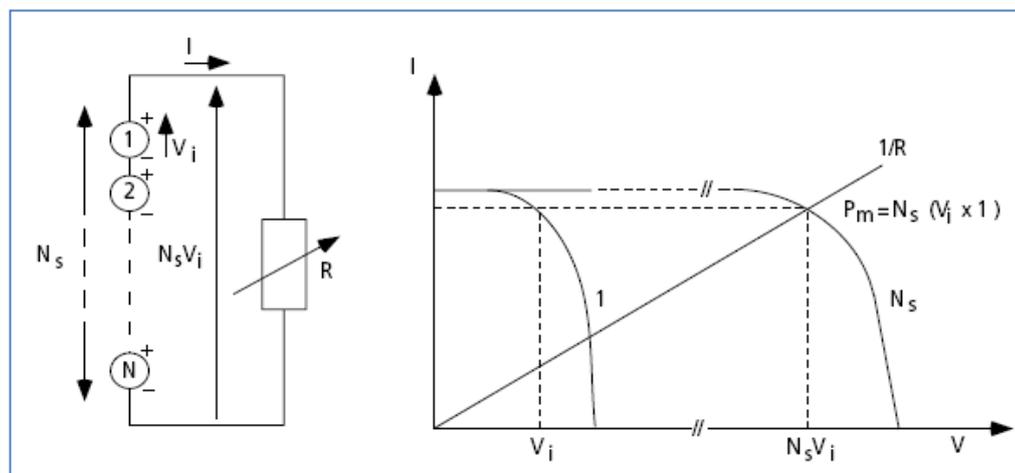
### II.2.3.3. Module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque [20].

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

#### A. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série (voir figure (II.6)).

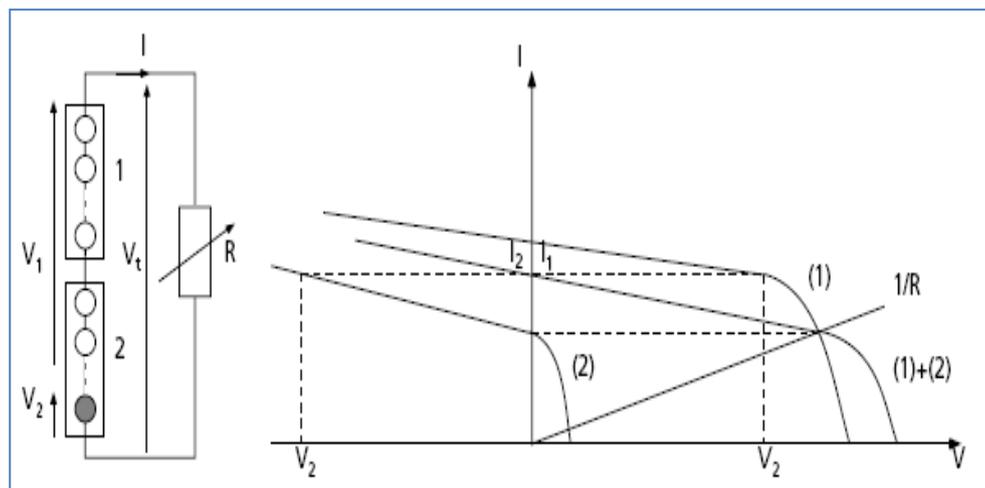


(Fig.II.6): Cellules identiques en série [20].

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée (voir figure II.7). Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse égale à la somme des tensions délivrées par les autres cellules [21].

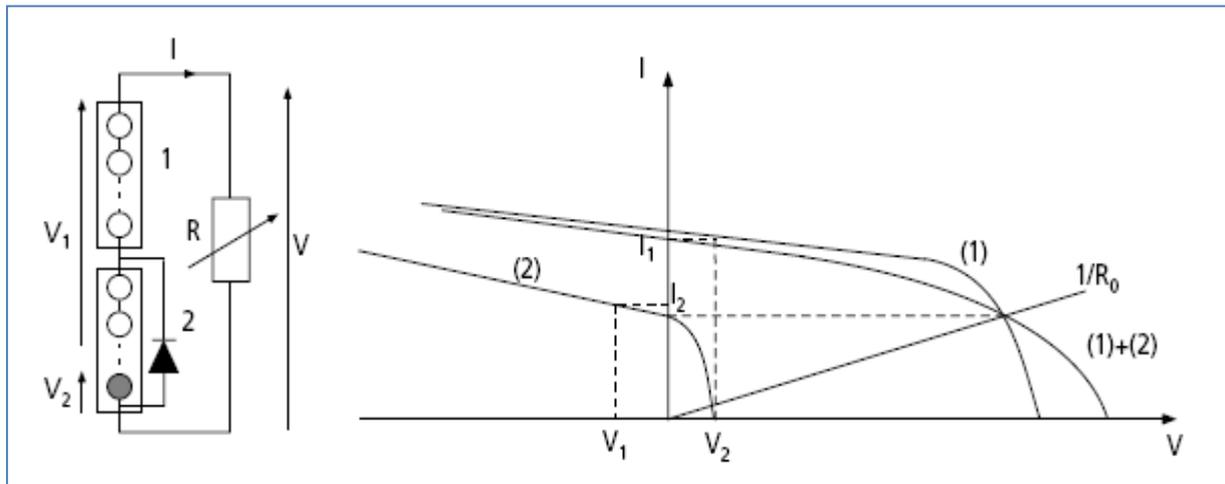
La puissance que devra dissiper cette cellule sera de

$$P=V \cdot I. \quad (\text{Equ.II.5})$$



(Figu.II.7): Modules en séries avec cellules occultées [21].

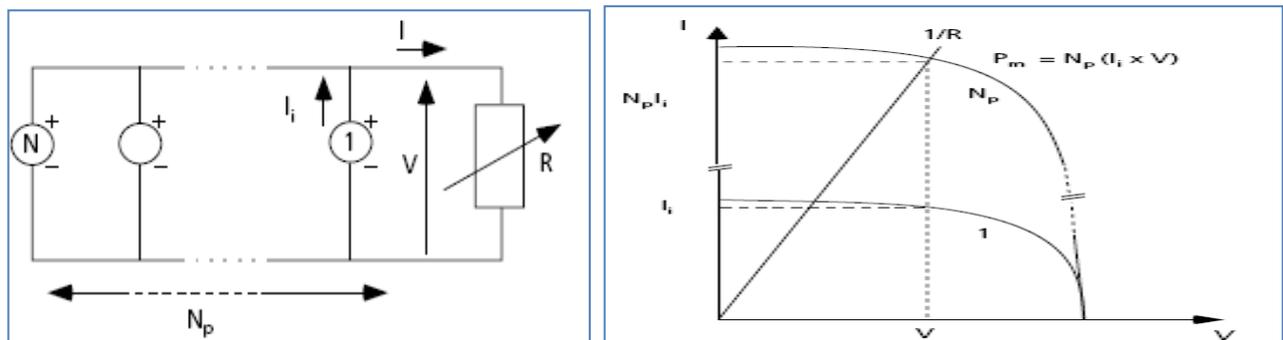
En fonctionnant ainsi, on provoque l'échauffement de la cellule (hot spot), ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module (voir figure II.8). La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. En court-circuit, le courant traversant la diode est  $I_1 - I_2$ . La puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à l'ordre du watt, ce qui évite toute destruction. La diode parallèle est inopérante en fonctionnement normal et ne diminue pas le rendement des modules [22].



(Fig II.8): Modules en séries avec diodes parallèles [22].

### B. Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [23].



(Fig.II.9): Cellules identiques en parallèles [23].

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nul et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante.

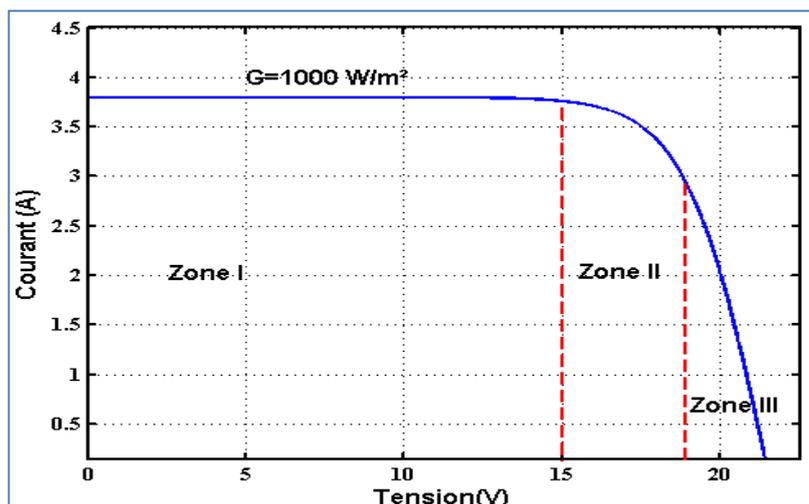
Bien que la cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour. Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une

partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. Cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche. En effet, cette diode est traversée, en fonctionnement normal, par le courant de la branche, ce qui introduit une perte de puissance permanente [24].

### II.2.3.3.A. Caractéristique d'un module solaire

#### ✓ Caractéristique courant-tension (I-V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décale le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température (Figure II.10).



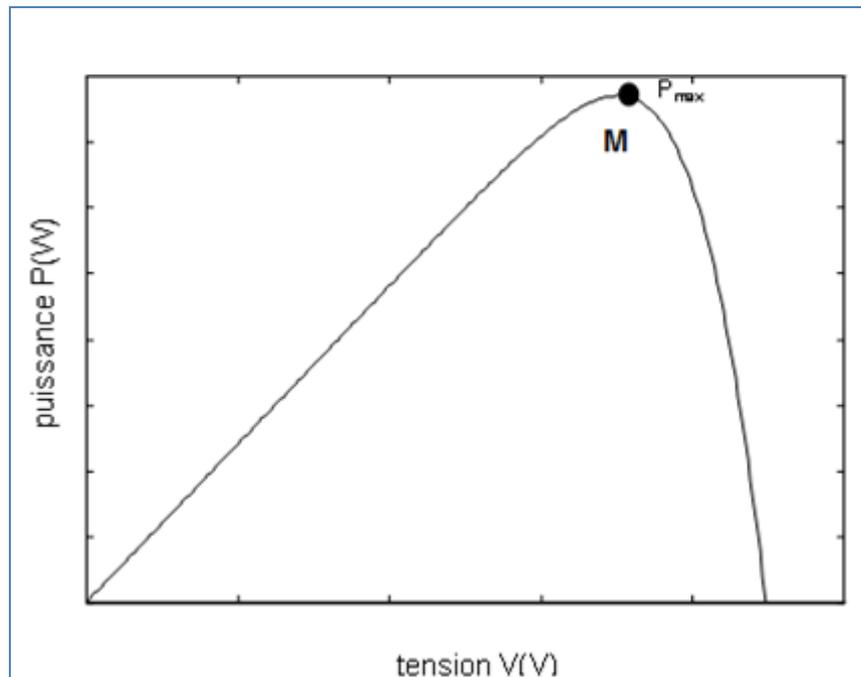
(Fig.II.11) : Différentes zones de la caractéristique  $I=f(V)$ ,  $T = 25^{\circ}\text{C}$ .

- fonctionnement comme générateur de courant: le point de fonctionnement appartient à la zone (I)
- fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone (III). La tension est proche de la tension à vide  $V_{oc}$  et le courant est faible.
- fonctionnement optimal: quand le point de fonctionnement appartient à la zone (II), l'utilisation est meilleure; la puissance absorbée est maximisée.

#### ✓ Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance débitée par la cellule dépend du point de fonctionnement de cette dernière, C'est le produit de l'intensité de courant débité par la tension en ses bornes ;

(Figure II.12). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par la cellule qui est donnée par :



(Fig.II.12) : Caractéristique puissance-tension

### II.2.3.3.B. Paramètres caractérisant du module

Les paramètres principaux qui caractérisant un module:

#### ➤ La puissance de crête, P

Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).

#### ➤ Point de fonctionnement optimum, (U<sub>m</sub>, I<sub>m</sub>)

Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil.

$$P_{\max} = U_{\max} * I_{\max}.$$

#### ➤ Rendement énergétique maximum $\eta_m$

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale fournie (P<sub>max</sub>) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P<sub>i</sub>) :

$$\eta_m = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{I_{\max} \cdot V_m}{\phi \cdot S}$$

(Equ.II.6)

- $S$  : Surface de la cellule solaire.
- $\phi$  : Flux incident.
- $I_{max}, V_m$  : Coordonnées des points de fonctionnement.
- **Facteur de la 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) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{Opt}} = \frac{U_{max} \cdot I_{max}}{U_0 \cdot I_{CC}} \quad (\text{Equ.II.7})$$

### II.2.3.3. Influence de l'éclairement sur un module le PV

La figure (II.13) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [25].

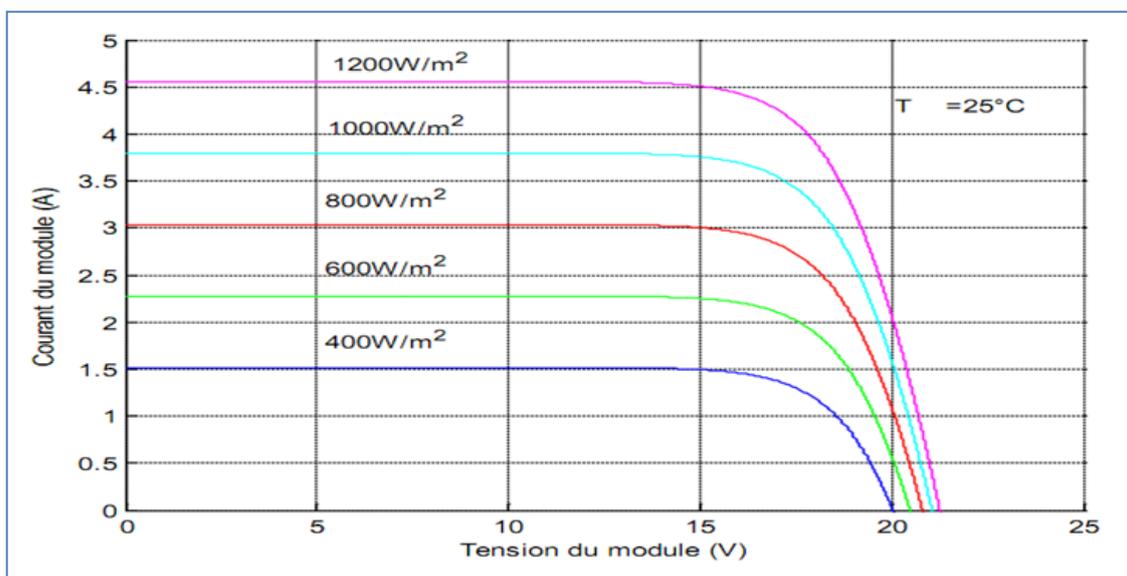
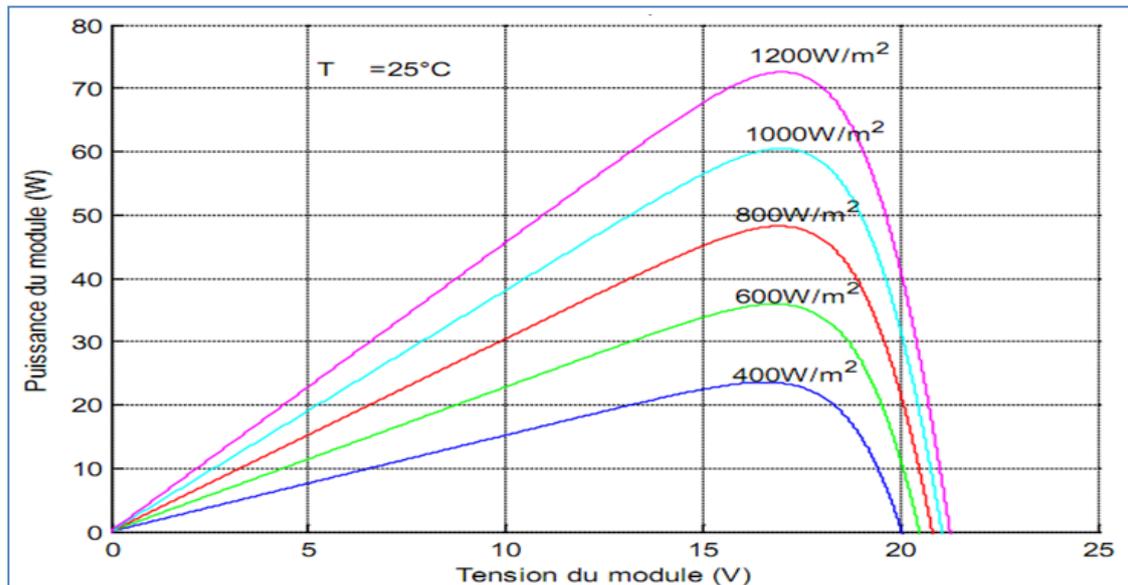


Figure (II.1 3) : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$  [25].

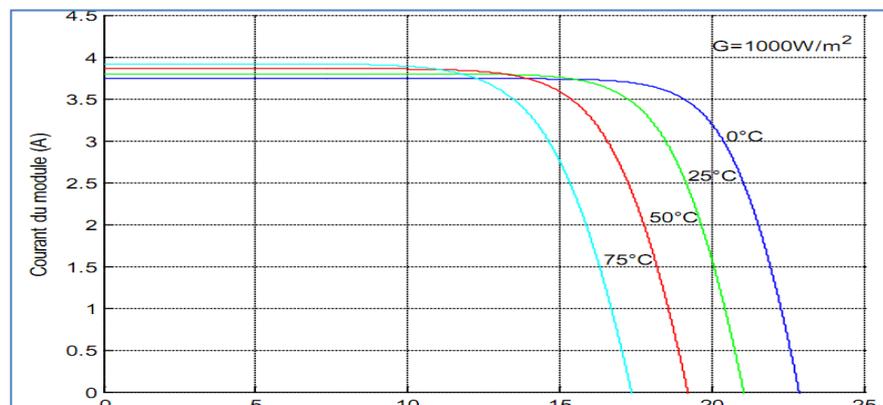


(Fig.II.14) : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

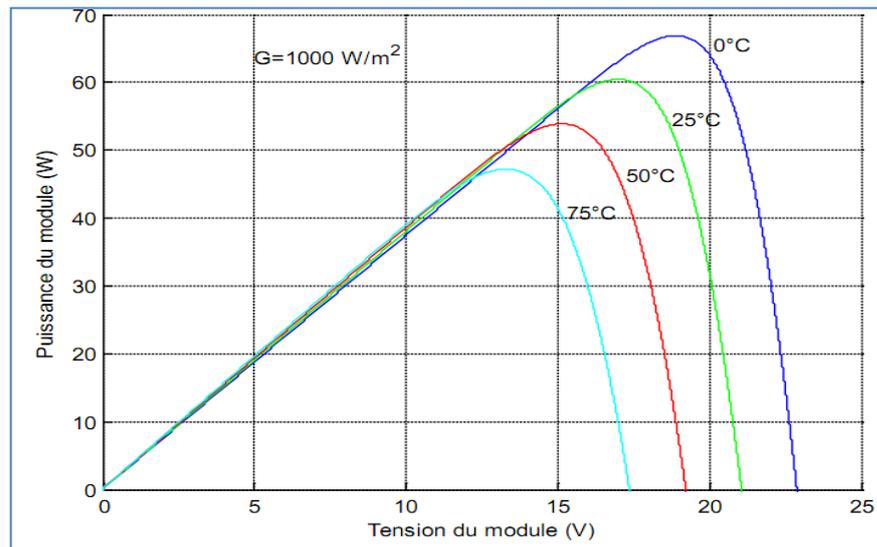
La figure (II.14) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ .

#### II.2.3.4. L'influence de la température sur un module PV

La figure (II.15) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.



(Fig.II.15) : L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .



(Fig.II.16) : L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

La figure (II.16) représente la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ . La figure (II.16) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

#### II.2.4. coût d'un générateur photovoltaïque

Les consommateurs qui songent à acheter un générateur photovoltaïque doivent tenir compte des faits suivants :

- l'énergie photovoltaïque a fait ses preuves. Les générateurs sont fiables et ont une durée de vie utile de 30 ans.
- ils sont évolutifs : on peut ajouter des panneaux pour accroître la puissance électrique et répondre à des besoins nouveaux. Leur attrait est indiscutable dans les localités isolées qui ne sont pas rattachées à des services publics, où le coût d'installation d'une ligne de transport d'électricité peut atteindre entre 18000\$ et 6000 \$ le kilomètre, selon le terrain. Un générateur de base portable, doté d'un panneau de 50 watts, d'un onduleur de faible puissance et d'une batterie, coûte environ 700 \$ et peut alimenter trois lampes à haut rendement énergétique, un petit téléviseur et une pompe à eau. Les générateurs plus puissants, coûtant environ 8 000 \$ peuvent alimenter plusieurs lampes, un téléviseur, une chaîne stéréo, un four à micro-ondes et une pompe à eau, mais pas tout en même temps. Grâce à de nouvelles techniques de production, les générateurs photovoltaïques coûtent de moins en moins cher et se prêtent à un nombre accru d'applications – deux facteurs qui devraient propager l'emploi de cette source d'énergie écologique[26].

### II.2.5. Fonctionnement optimal du générateur

Dans les conditions données, c'est au point de puissance maximale que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. c'est pourquoi ce point est souvent qualifié de point de puissance optimale, terme traduisant mieux le caractérisé relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie, l'utilisation du générateur étant le plus souvent considérée comme optimal en ce point. ce point est alors noté  $(V_{opt}, I_{opt})$ .

Le point de fonctionnement  $(V_p, I_p)$  du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge, seule une charge dont la caractéristique passe par le point  $(V_{opt}, I_{opt})$  permet d'en extraire la puissance optimale disponible dans conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors

$$R_{opt} = V_m / I_m = V_{opt} / I_{opt}$$

Etant donné que ce point dépend totalement des conditions telles que l'éclairement  $E$  et la température  $T$ , il en est de même de l'impédance de charge optimal [27].

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeur optimales  $R_{opt}$  lorsque les condition les varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire.

### II.2.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients. Ceux peuvent être résume comme suite [28] :

#### ✓ Avantages

la technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de utilisation sur les engins spatiaux .
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et

adaptable à des besoins énergétiques divers. les systèmes peuvent être dimensionnés pour des

application de puissance allant du milli Watt au Méga Watt .

Leur coût de fonctionnement sont faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grande dimension.

### ✓ Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).  
les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour de faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire dans certaines démonstrations, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité des performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

### II.2.7. Avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparé aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables plus mûres. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engager une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation a été dans le domaine des télécommunications. Après certains puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de PV. A nos jours, quelques dizaines de villages sahariens des régions de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie [29].

### CONCLUSION

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. À cet effet nous avons constaté que l'énergie solaire est une énergie propre et disponible, qui peut être utilisé localement ou injecté au réseau.

On peut dire aussi que les différents éléments qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque. Ainsi que leurs principes de fonctionnement de chaque élément, ce nous permet d'aborder le dimensionnement de notre système.

Le potentiel de production de l'hydrogène utilisant un système photovoltaïque de captage de l'énergie solaire a été évalué. Cette estimation est basée sur le cas le plus défavorable. On a donc une estimation du minimum théorique que l'on peut obtenir. Toutefois les résultats montrent que ce potentiel est important. Adrar et Tamanrasset sont certainement les sites les plus en vue, tenant compte de l'intensité de l'insolation et des ressources en eau. Il est à noter que les besoins en eau pour un système PV - électrolyseur n'est pas très importante. L'énergie solaire, étant une énergie diffuse, l'hydrogène solaire représente la méthode de conversion et le vecteur d'énergie ayant les meilleures qualités aussi bien énergétiques qu'environnementales. Des données moyennes ont été également utilisées pour mettre en évidence avec précision les variations saisonnières.

# *Chapitre 3*

## *ELECTROLYSE DE L'EAU*

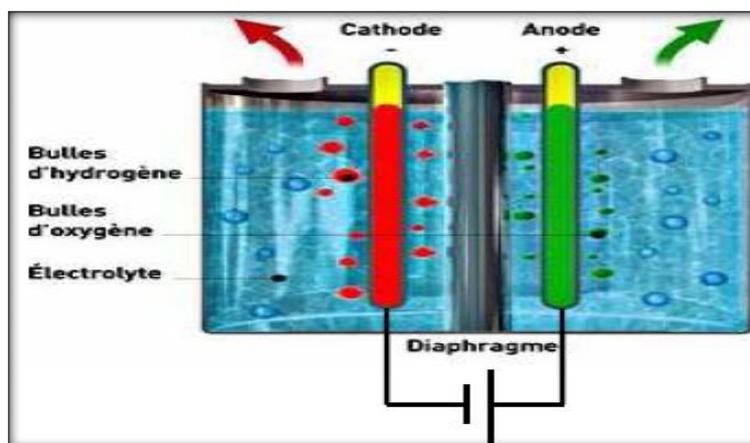
### III. Introduction

L'hydrogène est un vecteur énergétique: il doit donc être fabriqué avant d'être stocké et utilisé. On peut l'obtenir, essentiellement, par reformage ou gazéification d'hydrocarbures, par électrolyse de l'eau ou par thermochimie. Le choix du procédé de fabrication se fait en fonction de nombreux paramètres : type d'énergie primaire disponible, pureté, débits, .... De fait, la thermochimie est au stade du laboratoire et l'électrolyse représente aujourd'hui moins de 1% de la capacité totale de production de cet hydrogène et n'est utilisée que si l'électricité est soit fatale (cas des renouvelables comme l'éolien ou le photovoltaïque), soit bon marché et/ou si une pureté élevée de l'hydrogène produit est requise. Le recours croissant aux sources renouvelables conduit aujourd'hui au développement de l'électrolyse, procédé séduisant pour la valorisation de ces énergies nouvelles.[30].

#### III .1. Electrolyse de l'eau

Jusqu'aux années 50, l'électrolyse de l'eau était utilisée pour la production d'hydrogène et d'oxygène. Aujourd'hui, l'électrolyse fournit seulement un petit pourcentage de l'hydrogène du monde, lequel est fourni aux applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grande pureté.

Désormais, l'électrolyse est associée à une future utilisation des énergies renouvelables. Cela pourrait être intéressant au vu de la non-simultanéité de la production par ces procédés avec les besoins des industriels individus.



(Fig.III.1):L'électrolyse de l'eau [30].

### III.1.1. Fonctionnement de l'électrolyse

Du point de vue de la réaction électrochimique, il s'agit de la réaction inverse à celle qui a lieu dans une pile combustible. La cellule électrolytique est formée de deux électrodes, une cathode et une anode, d'un électrolyte et d'un générateur de courant. L'électrolyte est soit une membrane polymère échangeuse de protons soit une membrane céramique conductrice d'ions oxygène.

Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions sont les suivantes

- l'anode, des électrons sont formés suite à l'oxydation de l'eau en oxygène et en protons (oxydation)



- À la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se réduisent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (réduction) [31].

### III.1.2. Qualité de l'eau d'alimentation

L'eau introduite dans l'électrolyseur doit être la plus pure possible car les impuretés demeurent dans l'appareil et s'accumulent au fil de l'électrolyse. Elles finissent par perturber les réactions électrolytiques par:

- la formation de boues
- action des chlorures (les halogénures en général) qui détruisent la protection par nickelage ou le nickel massif des anodes; après une première épuration, l'eau traverse un filtre à charbon actif, puis subit une déminéralisation totale par passage sur un fibre à couche mixte à échangeur d'ions. On souhaite obtenir une résistivité électrique supérieure à 2.cm (Soit  $2 \times 10^4 \text{ Q} \cdot \text{m}$ ) [32].

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



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

Cette décomposition nécessite un apport d'énergie électrique, dépendant essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction. Le potentiel théorique de la décomposition est de

481 V à 298 K 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 %. La consommation électrique des électrolyseurs industriels (auxiliaires compris) est généralement

de 4 à 6 kWh/Nm<sup>3</sup>. A noter qu'il convient d'éliminer en permanence la chaleur dégagée liée aux irréversibilités. L'alimentation minimale en eau d'un électrolyseur est de 0.8 l/Nm<sup>3</sup> d'hydrogène. En pratique, la valeur réelle est proche de 1 l/Nm<sup>3</sup>.

### III.2. Les électrodes

Les électrodes sont souvent faites de métaux inertes comme du platine, mais ce qu'il faut retenir, c'est qu'elles constituent une interface entre le liquide et le solide. C'est à dire, que l'électrode est comme un pont qui sert à faire traverser les électrons, du fil à l'électrolyte et vice versa. Pour des raisons budgétaires, nous utiliserons surtout des électrodes faites de métaux bon marché et dont la conductibilité varie. Beaucoup de points importants de cette expérimentation résident dans le type d'électrodes et dans leur espacement. Ces facteurs ne proviennent pas vraiment de livres ou de documents en particulier, ils proviennent surtout de résultats d'expériences effectuées dans les quatre dernières années.

#### III.2.1. électrolyte

L'électrolyte sera constitué d'une solution aqueuse contenant des ions. Cette solution sera produite par la dissolution d'un sel ou d'une base forte dans de l'eau. Pourquoi des ions? La réponse est très simple :

les ions sont des éléments chimiques ou des radicaux qui ont un manque ou un surplus d'électrons. Ceux-ci étant maintenant chargés, ils peuvent conduire le courant et, ainsi, donner lieu à la réaction d'électrolyse

#### III.2.2. L'électrolyse industrielle

Elle est réalisée généralement à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25% en masse à **80°C** jusqu'à 40% à **160°C**). La potasse est préférée à la soude, essentiellement pour des raisons de conductivité supérieure à niveau de température équivalent et de meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates.

Il existe de nombreux fournisseurs proposant des technologies très diversifiées, notamment en termes de nature de l'électrolyte et de technologie associée, allant d'un possible couplage amont avec une alimentation électrique renouvelable (photovoltaïque ou éolien), à la fourniture finale directe d'hydrogène sous pression.

### III.2.3. Structures mono polaires et bipolaires

Les premiers appareils d'électrolyse disposaient d'électrodes **mono** polaires (c'est-à-dire que chaque anode est connectée au pôle positif et chaque cathode au pôle négatif, les cellules d'électrolyse fonctionnent alors en parallèle.

Les systèmes bipolaires, développés par la suite, utilisent des plaques jouant le rôle d'anode d'un côté et de cathode de l'autre, les cellules d'électrolyse fonctionnent alors en série. La conduction électrique s'opère à l'intérieur de l'électrode au travers de son épaisseur, permettant ainsi une limitation de la chute ohmique. Les assemblages bipolaires offrent l'avantage d'une densité de courant plus élevée et d'une meilleure compacité.

Cette conception introduit cependant une difficulté supplémentaire: l'électrode présente une face en milieu oxydant (anode) et une en milieu réducteur (cathode). Néanmoins, la grande majorité des systèmes industriels reposent sur la technologie bipolaire, alors que quelques fournisseurs d'électrolyseurs de petite capacité proposent encore des structures mono polaires.

Dans tous les cas, les recherches sur les matériaux sont fondamentales. Les cellules d'électrolyse doivent être étanches, isolées électriquement et résistantes à la corrosion dans des conditions de température et pression parfois élevées. Electrolyse alcaline L'électrolyse alcaline (l'électrolyte est généralement de la potasse) est proposée en modules de petite ou moyenne capacité (0,5-800 Nm<sup>3</sup>/h d'hydrogène). Les modules comprennent généralement : une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse, une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur et un système de contrôle. Certaines technologies d'électrolyseurs fonctionnent directement sous pression. Les modules de petite capacité opèrent typiquement de 3 à 30 bars.

### III.2.4. Electrolyse alcaline :

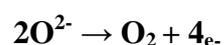
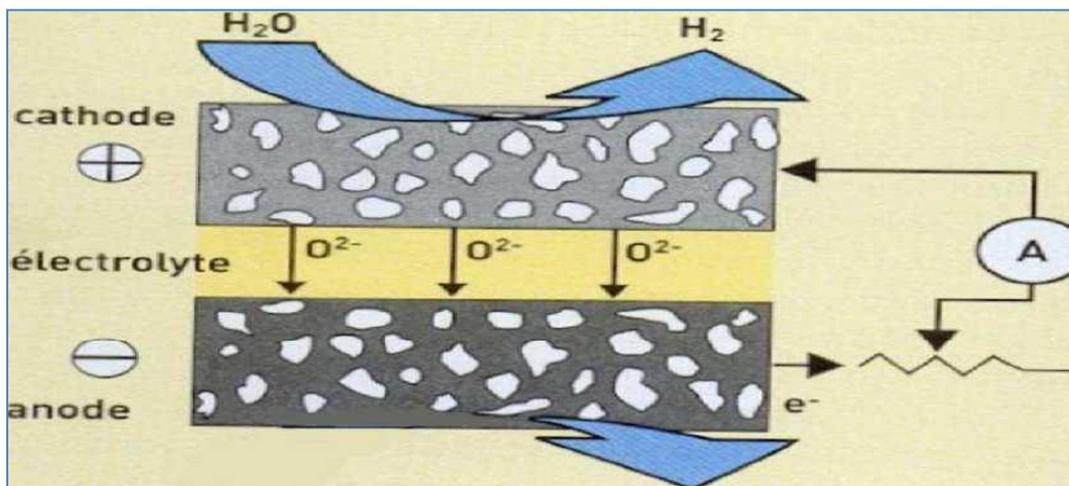
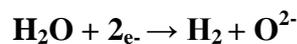
L'électrolyse alcaline est le procédé le plus mature, employé en industrie. Les électrolyseurs se présentent en modules de petite ou moyenne capacité (0,5-800 Nm<sup>3</sup>/h d'hydrogène), utilisant une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium ou potasse dont la concentration varie en fonction de la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

équivalent et de meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates.

Les modules comprennent généralement : une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse, une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur et un système de contrôle. Certaines technologies d'électrolyseurs fonctionnent directement sous pression [33]. Les modules de petite capacité opèrent typiquement de 3 à 30 bars.

### III.2.4. Electrolyses SOFC

Cette technologie est directement issue des développements de la pile à combustible de type SOFC. Fonctionnant vers 900 -1000°C. Elle se révèle intéressante si on l'alimente à la fois en électricité et en chaleur pour maintenir la température élevée souhaitée, le rendement peut alors être supérieur à 80%. Elle est essentiellement destinée à être couplée à un système solaire à concentration ou à un réacteur nucléaire à haute température. Elle est au stade du développement dans divers laboratoires dans le monde entier.

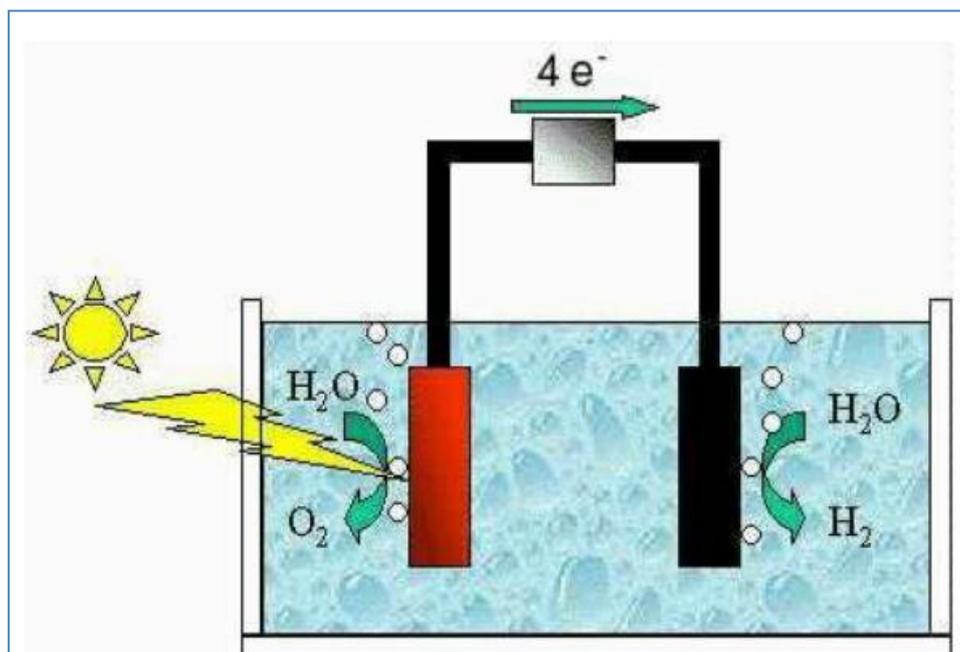


(Fig.III.2):L'électrolyse SOFC [33].

### III.2.5. Photo-électrolyte de l'eau

#### III.2.5.A. Principe de base

La photo électrolyse de l'eau est la dissociation par le courant électrique produit par l'éclairement d'une photo catalyseur à semi-conducteur. Des cellules photo électrochimiques (PEC) (électrodes photo actives) immergées dans un électrolyte aqueux ou dans l'eau et illuminées par la lumière solaire peuvent décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Sous leur forme la plus simple, elles peuvent être décrites comme des dispositifs photovoltaïques/électrolytiques intégrés ou monolithiques. Une large variété de processus PEC et de photo catalyse susceptibles de dissocier l'eau sont étudiés de par le monde Bien qu'intrinsèquement simples, les aspects scientifiques et de développement des matériaux de cellules PEC pour la production d'hydrogène en sont encore au stade préliminaire de la recherche fondamentale. [34]



(Fig.III.3) : Schéma de principe de la décomposition photochimique de l'eau [34]

### III.2.6. Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane)

Le principe de l'électrolyse PEM diffère de celui de l'électrolyse alcaline par le fait que l'électrolyte est un électrolyte solide, composé d'une membrane conductrice de protons ; les électrodes sont déposées de part et d'autre de ce matériau polymère. Le premier électrolyseur basé sur un électrolyte solide a été développé dans les années 1960 par General Electric ; le concept a ensuite été amélioré par

W.T. Grubb avec l'utilisation d'une membrane de polystyrène sulfoné.

### III.2.6.A. avantages de la technique

La membrane polymère utilisée comme électrolyte solide est la source des nombreux avantages inhérents aux électrolyseurs PEM notamment en terme de pureté de l'hydrogène produit, de la compacité des systèmes et du fonctionnement à haute pression. De plus, l'électrolyse PEM est une technique fiable et durable souvent sur plus de 60 000 h.

Grâce à l'utilisation d'une membrane fine (20-300  $\mu\text{m}$ ) capable de fournir une très bonne conduction des protons, il est possible d'atteindre des densités de courants très élevées. Ce fonctionnement à forte densité de courant et l'utilisation d'un électrolyte mince procurent une excellente compacité à ce type d'électrolyse. Le fonctionnement à fortes densités de courant engendre bien entendu une réduction du rendement électrique de la production d'hydrogène, mais il peut être intéressant de pouvoir absorber de grandes quantités d'énergie, même à un faible rendement, comme l'illustrent les récentes fluctuations du cours de l'électricité qui ont donné lieu à un prix négatif du MWh. L'électrolyse PEM de l'eau permet de produire un hydrogène de grande pureté.

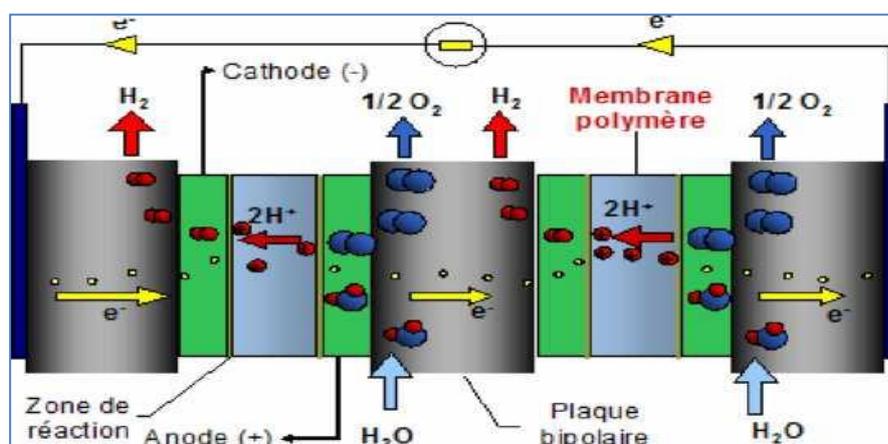
### III.2.6.B. Inconvénients de l'électrolyse PEM

Les principaux inconvénients des électrolyseurs PEM sont eux aussi inhérents aux propriétés des membranes polymères utilisées comme électrolyte solide. Les matériaux utilisés comme catalyseurs, mais aussi ceux qui composent les plaques bipolaires et les collecteurs de courant, doivent résister à l'environnement acide provoqué par l'utilisation d'une membrane Nafion), mais aussi aux potentiels élevés surtout lors du fonctionnement à forte densité de courant. Bien souvent, seuls les métaux nobles, donc rares et onéreux, peuvent résister à ce type de conditions. Le passage à une production de masse des électrolyseurs aura donc pour seule conséquence l'augmentation du prix des catalyseurs.

A température de fonctionnement des électrolyseurs est généralement limitée à 80-90°C du fait de la nature des membranes PFSA. Cependant, en les modifiant légèrement (dopage par de l'acide phosphorique, réseaux interconnectés de polymère des températures de fonctionnement de 130 °C ont pu être rapportées.

### III.2.6.C. Panorama des acteurs et des applications

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.



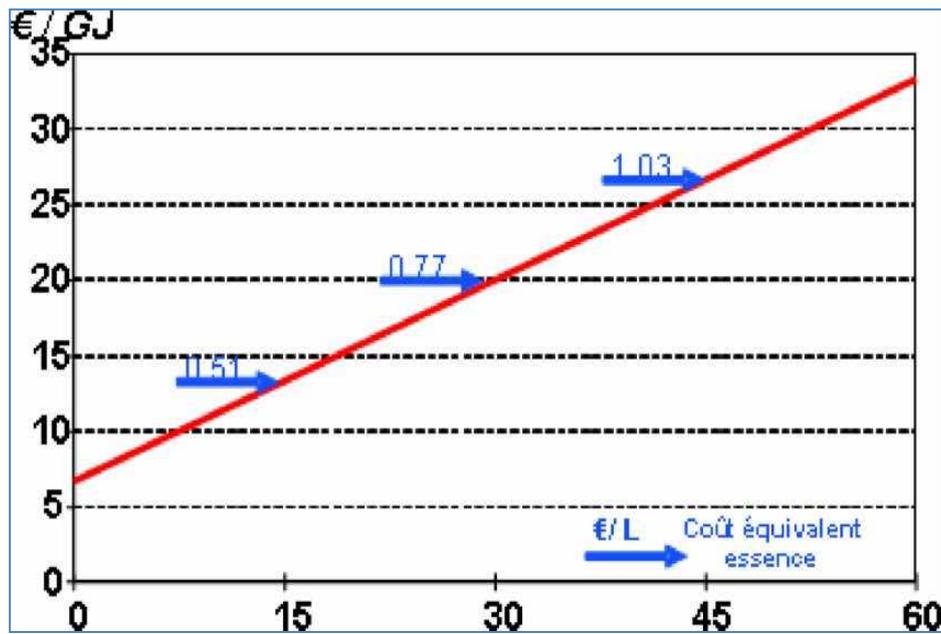
(Fig.III.4): L'électrolyse PEM [34].

### III.3. Coût de l'hydrogène par électrolyse

Evoquer la distribution d'un nouveau vecteur, même à un stade préliminaire, exige non seulement une analyse du cycle de vie, mais aussi une analyse économique globale (coût capital, coûts opératoires et maintenance). Le coût de l'hydrogène produit localement par électrolyse est d'abord et avant tout lié à celui d'électricité et à son mode de production. Dans le cas d'une électricité « verte », ce sont les coûts en capitaux du système renouvelable (photovoltaïque, éolien...) qui influenceront. Les chiffres varient, selon les auteurs et les hypothèses retenues (taille et performances de l'unité, coût capital...) entre 10 et 40 \$/GJ, avec un assez large consensus autour de 15-25 \$/GJ.

Des résultats similaires sont rapportés Figure. (III.6) en fonction du coût de l'électricité, en mettant en évidence le coût équivalent essence (en €/l...hors taxes) à performances énergétiques équivalentes. Ces chiffres sont à considérer avec

prudence, compte tenu du faible retour d'expérience sur les performances réelles de ces systèmes et des coûts associés, mais montrent qu'une analyse économique, même préliminaire, ne permet pas de disqualifier cette nouvelle filière qui reste encore à développer, notamment pour des applications captives

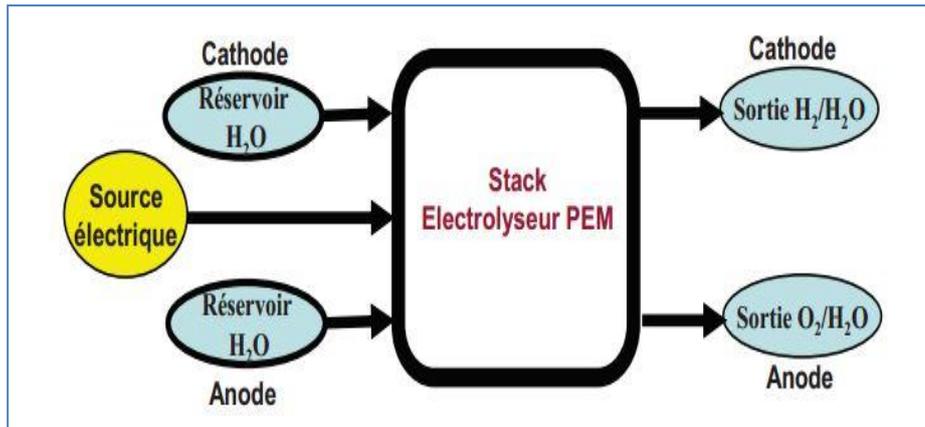


(Fig.III.5) : Coût de l'hydrogène en fonction du coût de l'électricité [34].

### III.4. MODELISATION DE L'ELECTROLYSERE

#### III.4.1. Modèle de électrolyser PEM :

L'électrolyseur PEM a un fonctionnement inverse à celui de la pile à combustible de type PEMFC qui produit, que nous utilisons est de type PEM (Proton Exchange Membrane). De manière générale, l'opération d'électrolyse consiste à diviser une molécule en ses éléments simples sous l'action d'un courant électrique. Dans le cas présent, l'eau est divisée en hydrogène et oxygène gazeux. Dans un électrolyseur PEM, c'est la membrane qui transporte les électrolytes (proton) et non le milieu aqueux. Avec ce procédé l'électrolyse de l'eau distillée ou de la vapeur d'eau est possible.



(Fig.III.6) : Structure globale de lien entrée –sortie ou réactifs-produits [35].

### III.4.2. Relation de Nernst:

L'abandon dans un électrolyte (sous courant nul), une électrode prend une tension  $E_{th}$ . Cette tension, qui correspond à un équilibre entre les espèces présentes, Par ailleurs, l'équation de Nernst exprime la tension de décomposition réversible sous la forme [35] :

$$E_{rev} = E_0 + \frac{RT}{NF} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{A_{H_2O}} \quad (\text{Equ.III.4})$$

avec

$R$  : constante molaire des gaz ( $= 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),

$T$  (K) : température thermodynamique  $T$  (K),

$E_0$  (V) : tension de décomposition réversible dans les conditions normales ( $0^\circ \text{C}$ , pression Atmosphérique)

$N$  : Nombre d'électrons mis en jeu dans le processus électrochimique,

$F$  : constante de Faraday ( $= 96\,487 \text{ C mol}^{-1}$ )

$P_{H_2} = P_{O_2} = P$  (Pa) : pression de service de l'électrolyseur,

$A_{H_2O}$  : activité de la solution,

### III.4.3. Tension de la cellule:



$$\begin{cases} \Delta G(298K) = 237 \text{ kJ/mol} \\ \Delta H_o(298K) = 286 \text{ kJ/mol} \end{cases}$$

**III.4.4. Tension réversible et tension thermomètre**

La tension réversible  $E_{rev}$  d'une cellule d'électrolyseur correspond à l'énergie libre  $\Delta G^0$  nécessaire pour décomposer la molécule d'eau . Ces deux grandeurs sont reliées par la formule suivante :

$$E_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} \quad (\text{Equ.III.6})$$

Où :

$E_{rev}$  : Tension réversible pour électrolyser l'eau (V).

$\Delta G$  : Énergie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol) ,

F : Constante de Faraday ;  $F = 96493 \text{ C/mol}$ ,

n : Nombre d'électrons échangés lors de la réaction (ici  $n=2$ ).

Dans ce cas  $E_{rev} = 1,22 \text{ V}$  à 298K.

La tension thermoneutre ( $E_{th}$ ) correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur . Cette tension ne dépend que faiblement de la température. Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_{th} = \frac{\Delta H}{nF}$$

$E_{th}$  : Tension thermoneutre (V) .

$\Delta H$  : Enthalpie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol).

F : Constante de faraday (C/mol).

n: Nombre d'électrons échangés lors de la réaction.

Dans ce cas  $E_{th} = 1.48\text{V}$  à 298K .

On constate que deux types de fonctionnement sont possibles en tension de l'électrolyseur :

- $E_{rev} < U < E_{th}$  : Un apport extérieur de chaleur est nécessaire aux cellules d'électrolyse
- $U > E_{th}$  : La chaleur est alors produite par la réaction.

**III.4.5. Tension d'électrolyse :**

De nombreux travaux comme par exemple proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la électrolyse PEM comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide  $E_{th}$ , la surtension d'activation  $V_{act}$ , la surtension ohmique  $V_{ohm}$  et la surtension de concentration  $V_{conc}$ .

$$V = E_{th} - (V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}). \quad (\text{Equ.III.7})$$

#### III.4.A. Pertes d'activation ( $V_{act}$ ):

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$V_{act} = A \cdot \ln\left(\frac{I + i_n}{i_0}\right) \quad (\text{Equ.III.8})$$

$V$  où  $I$  : est le courant délivré par la pile à combustible.

$i_0$  : le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte

$i_n$  : le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et  $A$  la pente de la droite de Tafel.

#### III.4.B. Pertes ohmiques ( $V_{ohm}$ ) :

Les pertes ohmiques sont dûes à la résistance qu'oppose les électrodes et les plaques Bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_m (I + i_n) \quad (\text{Equ.III.9})$$

Où  $R_m$  est la résistance totale de la pile à combustible.

#### III.4.C. Pertes de concentration ( $V_{conc}$ ) :

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression Partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéro, et d'une constante  $B$  appelée constante des circuits de gaz.

Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite  $i_L$ , pour lequel tout le de transport ou de transfert de masse :

$$V_{conc} = -B \ln\left(1 - \frac{I_{fc} + i_n}{i_L}\right) \quad (\text{Equ.III.10})$$

### CONCLUSION

Un électrolyseur est un dispositif qui utilise l'énergie électrique pour faire des réactions chimiques. Dans le cadre de notre étude, les électrolyseurs employés réalisent l'électrolyse de l'eau afin de produire de l'hydrogène.

Dans ce chapitre nous avons présentons les plusieurs type d'électrolyse et dans ces dernier nous prendront deux types :

Premier type électrolyse de l'eau si soumettre à la expérience, ainsi une modélisation d'électrolyse de type PEM qui sera simulé dans le chapitre suivant

# *Chapitre 4*

## SIMULATION ET VALIDATION

## VI. INTRODUCTION

L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé. L'utilisation de l'énergie solaire un courant continu dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement [36].

Dans ce chapitre nous avons d'abord simuler les différentes partie de système proposé des travaux pratiques sur les panneaux solaires , afin que toutes les mesures de la radiation de la lumière et la différent démarche qui ont mené à le courant après le changement de la température et de l'angle de situation de la panneaux, pour l'observation des caractéristiques des panneaux dans un journée .Après nous ferons une simulation de la électrolyse PEM à partir les équations d'Nernst pris compte la modélisation présenté dans le chapitre III.

Nous observons l'influence de l'électrodes et l'eau sur l'analyse, de puis en fait à partir le programme MATLAB une simulation de la panneaux et sortir des caractères de courant et de tension .En fin , en fait une comparaisons entre les deux méthodes de résultat pratique et simulation.

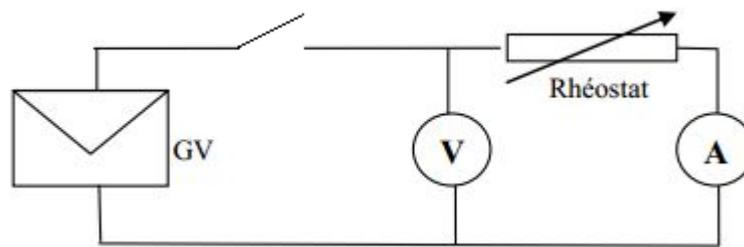
### VI.1. Etudes des caractéristiques du système

Nous avons élaboré deux montages; l'un pour étudier les caractéristiques I-V des Panne aux solaires et l'autre pour étudier les caractéristiques d'électrolyseur à l'aide D'un générateur électrique.

#### VI.1.2. Les caractéristiques I-V des panneaux solaire

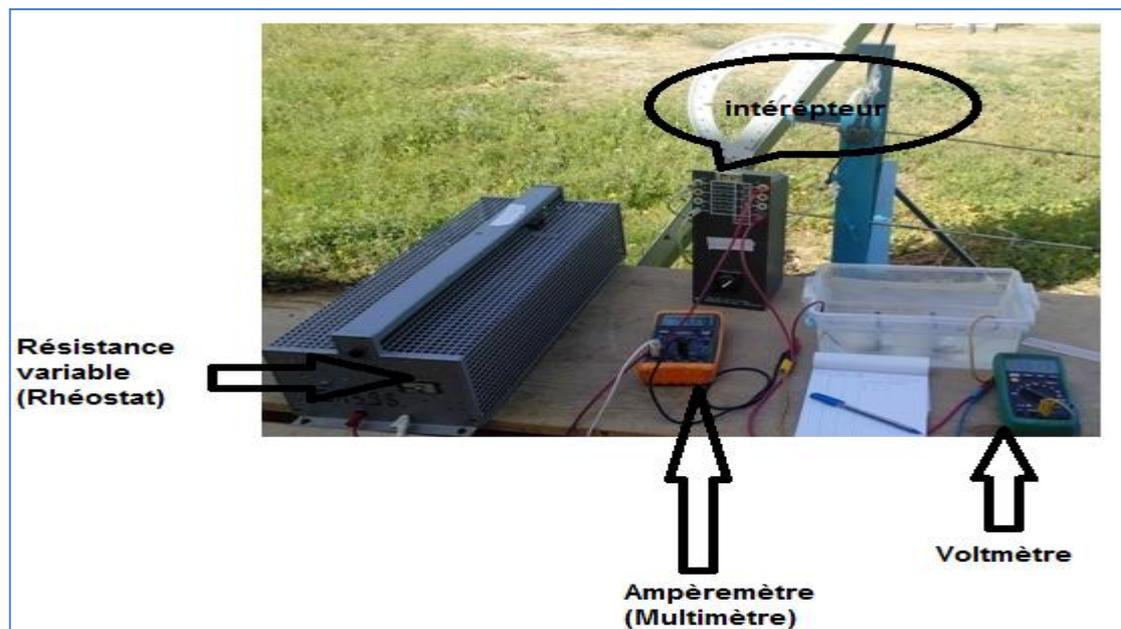
. Dans cette expérience, les panneaux solaires sont reliés à:

1. Un voltmètre : pour lire les valeurs de tension des panneaux solaires.
2. Un ampèremètre : pour lire les valeurs du courant des panneaux solaires.
3. Un rhéostat : résistance variable employée pour commander le courant avec la tension du système photovoltaïque. Selon le schéma de montage suivant [37]:



(Fig.VI.1): Montage électrique de l'expérience d'étude des caractéristiques I-V

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

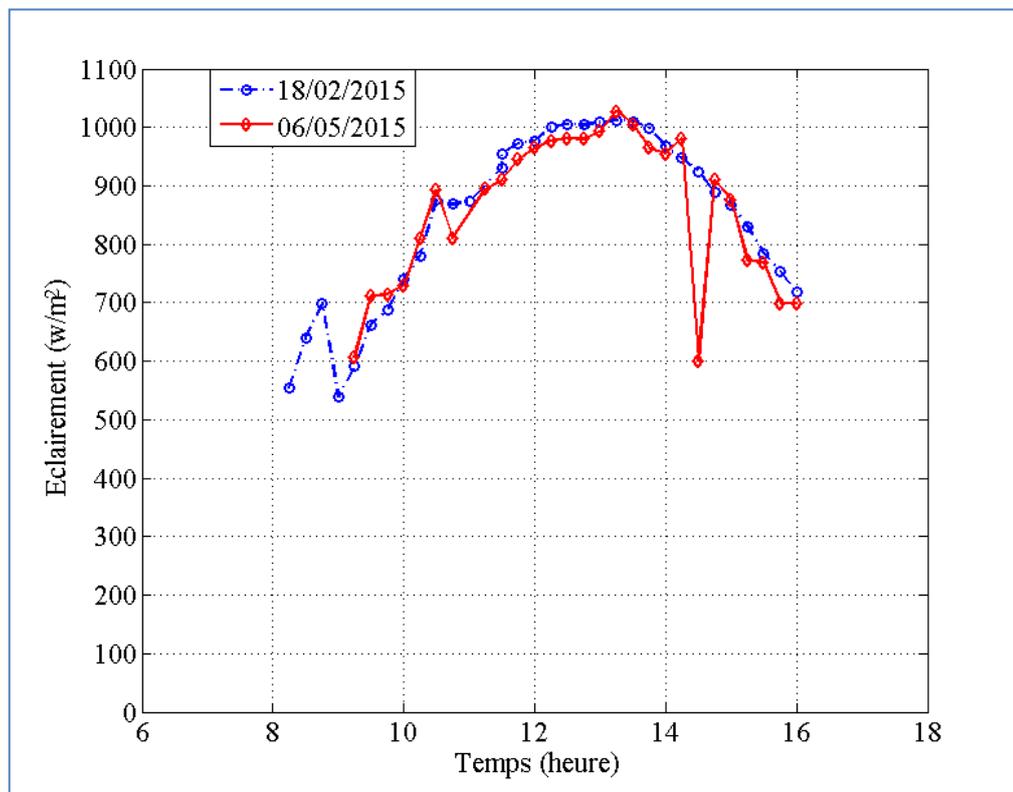


(Fig.VI.2) : Expérience d'étude des caractéristiques I-V des PV

### VI.1.3. Caractéristique de climatique

Au cours d'une journée complète de 8h : 10 min et jusqu'à 16h :00 avec des appareils modélisation personnel. (Ces instruments sont présentés dans la deuxième chapitre). Nous avons enregistré des mesures progressif de données climatiques sur le site de Biskra, (université Mohamed khider l'laboratoire pédagogique énergie renouvelable). L'analyse du rayonnement solaire permet d'exploiter la quantité d'énergie produite par le soleil

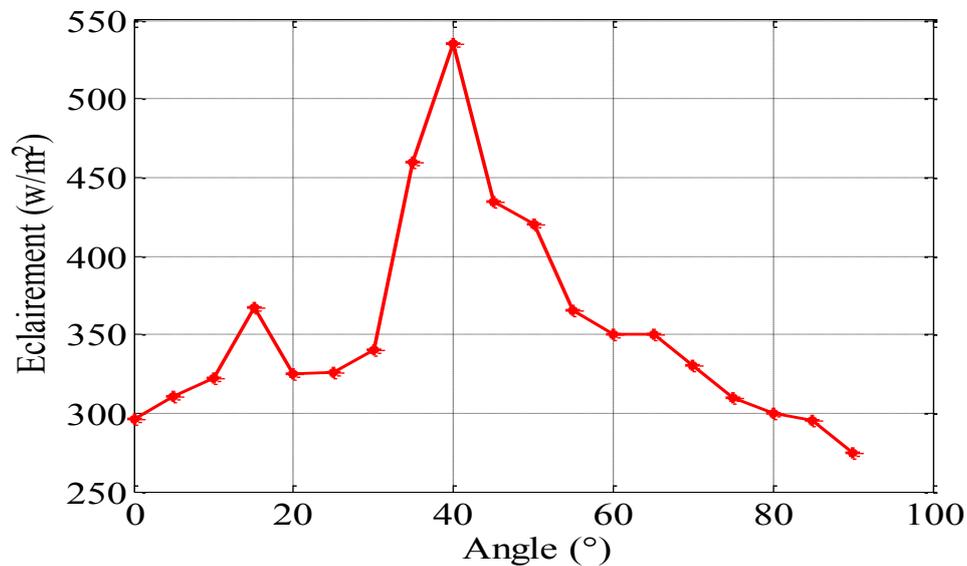
pour un jour, ou un mois, ou une année. Le rôle d'inclinaison saisonnière des capteurs photovoltaïque est très important pour l'évolution de cette quantité d'énergie. Il peut varier même à chaque seconde. L'étude de l'influence d'inclinaison sur le rayonnement solaire est une étape nécessaire dans cette étude. Rappelons aussi que l'évolution de ces rayonnements dépend des caractéristiques du site choisi tel que la latitude, l'altitude et la longitude. Tous ces paramètres nous permettent d'expliquer les résultats obtenus dans les mesures d'éclairement solaire.



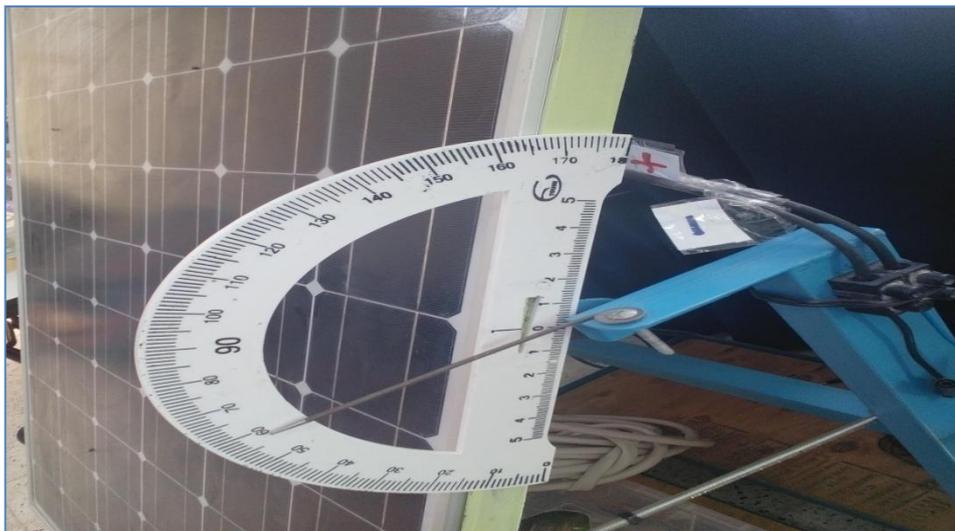
**(Fig.IV.3) : Eclairement solaire pour En deux jours différents dans le mois**

La figure (IV-1) représente l'évolution journalière de l'éclairement solaire sur deux journées différents dans le mois : Le mois Février par rapport à Mai.

On remarque dans cette figure une augmentation continue de l'éclairement solaire pour les deux journées jusqu'à une valeur maximale ( $1000\text{W/m}^2$ ).

**VI.2. Influence de la variation d'éclairement et l'angle sur les caractéristiques du PV****(Fig.VI.4): Caractéristique pratique  $E=f(C^\circ)$  d' un PV**

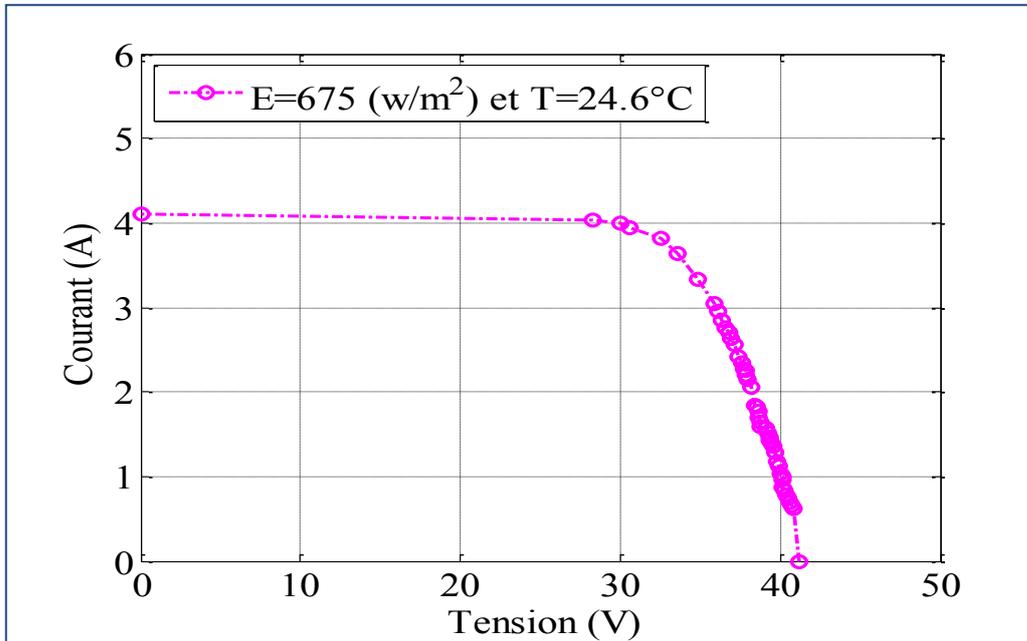
Remarque en nous donnant le changement en termes d'angle de rayonnement, lorsque le taux était de  $0^\circ$  de rayonnement de  $300 \text{ w/m}^2$  et plus on augmente le rayonnement dans le jusqu'à ce qu'ils atteignent un maximum de 30 degrés au départ et après le rapport de rayonnement vers le bas à malgré une augmentation angulaire.

**(Fig.VI.5) : Variation de l'angle**

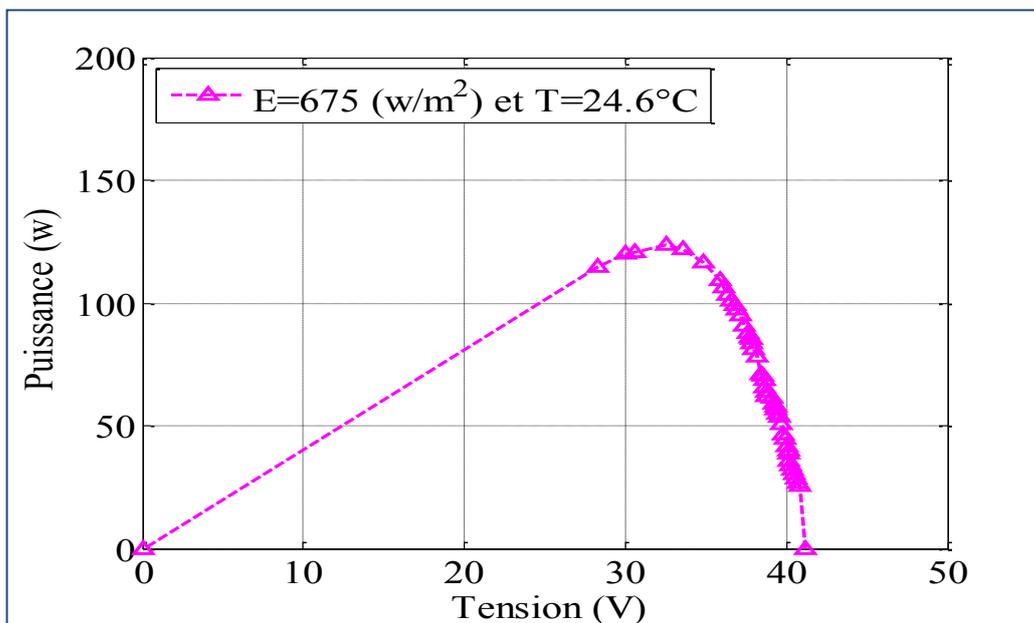
**VI.3. Influence de la variation de (E) sur les caractéristiques du PV**

Les figures (VI.5) et (VI.6) représente l'influence de la variation d'éclairement sur les courbes caractéristique du PV.

✓ Cas 1).  $E = 675(\text{W}/\text{m}^2)$



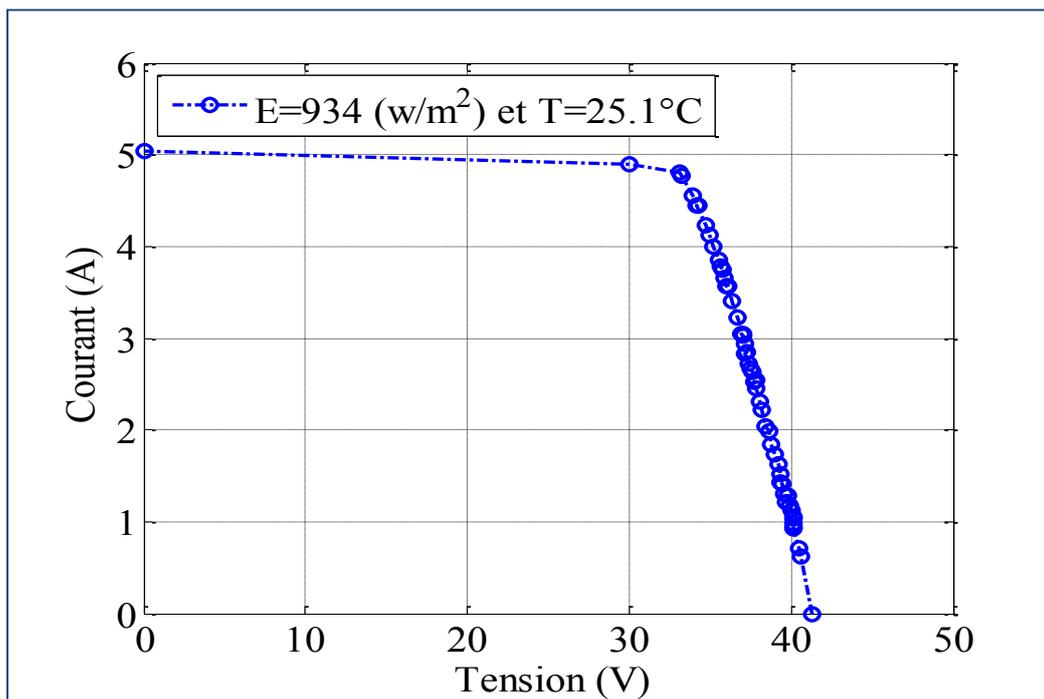
(Fig.IV.6) : Caractéristique  $I=F(v)$  du PV avec variation de l'éclairement



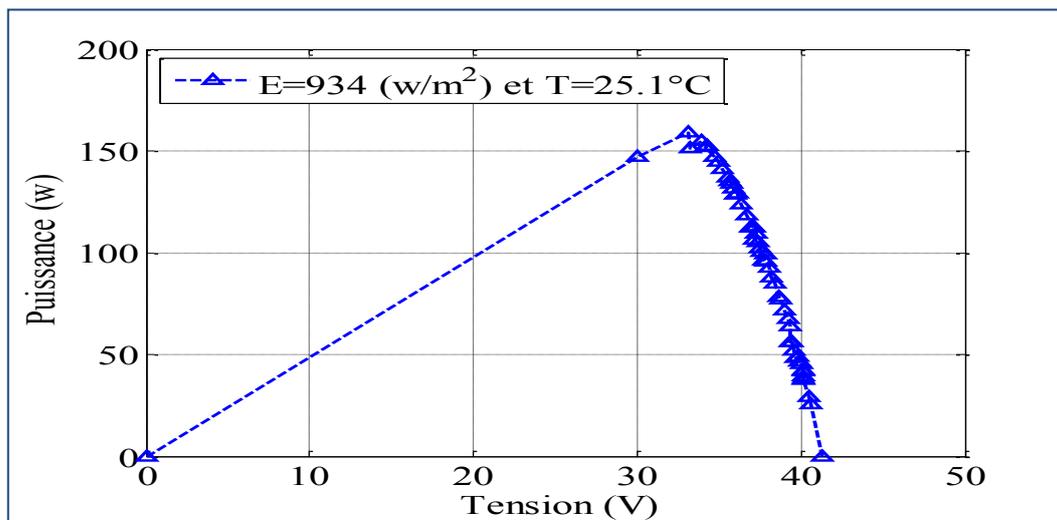
(Fig.VI.7) : Caractéristique  $P=F(v)$  du PV avec variation d'éclairement

Les résultats obtenus nous permettent de tracer l'évolution du courant et la Puissance photovoltaïque en fonction de la tension comme représentés sur la figure (IV.6) et (VI.7). Pour les faibles tensions, la courbe représentant le courant est quasi constante jusqu'à une valeur de tension de 30 V. La valeur du courant dans cette zone est désignée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$ . Pour ce qui est de la puissance, nous remarquons une évolution croissante quasi-linéaire en fonction de la tension jusqu'à la valeur de 30V atteignant une puissance de 110 W. Au de-là de cette valeur de la tension, le courant commence à diminuer, mais la puissance continue de croître jusqu'à une valeur maximale de 125 W pour une tension de 35 V. Cette zone est appelée la zone de fonctionnement. Après cette zone, la baisse de courant sera accompagnée par une chute de la puissance jusqu'à annulation, point correspondant à la tension maximale celle qui nommée par la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

✓ Cas 2.)  $E = 934(W/m^2)$



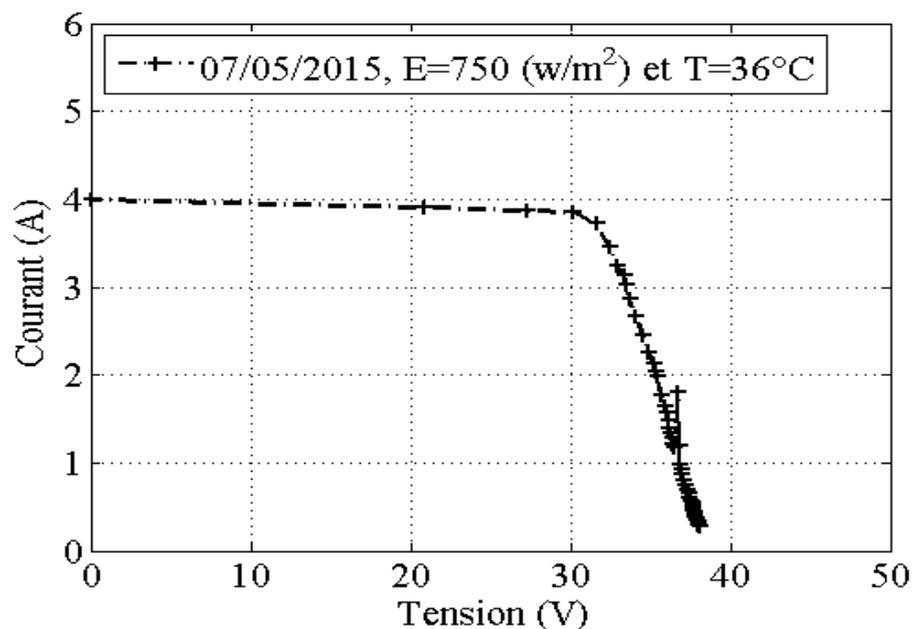
(Fig.IV.8) : Caractéristique  $I=F(v)$  du PV avec  $E=(934w/m^2)$



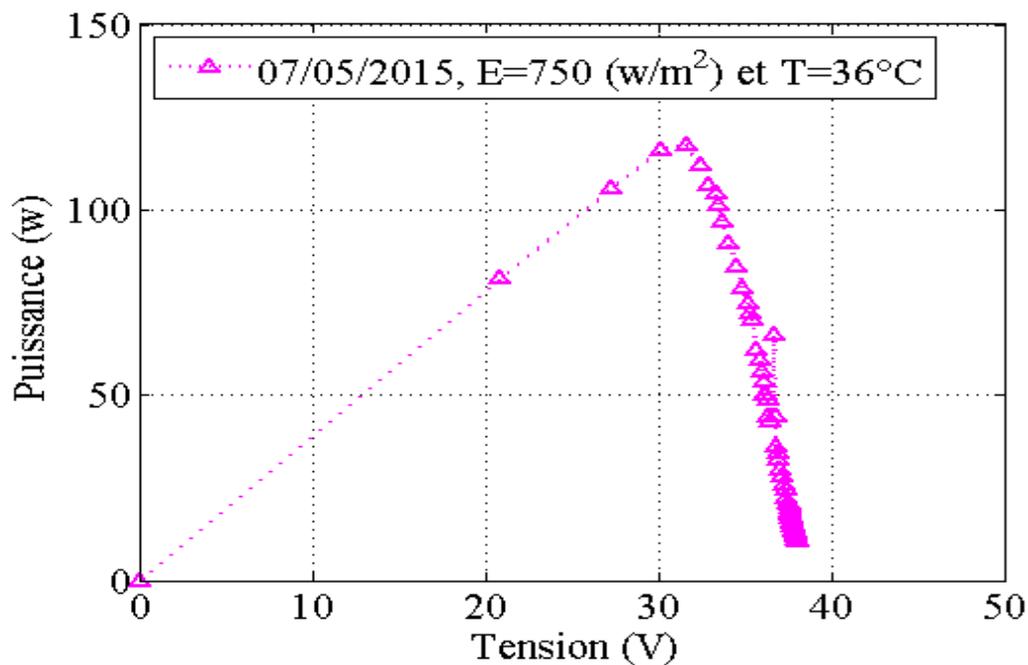
(Fig.VI.9) : Caractéristique  $P=f(v)$  du PV avec  $E=(934\text{w/m}^2)$

La figure (VI.9) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ .

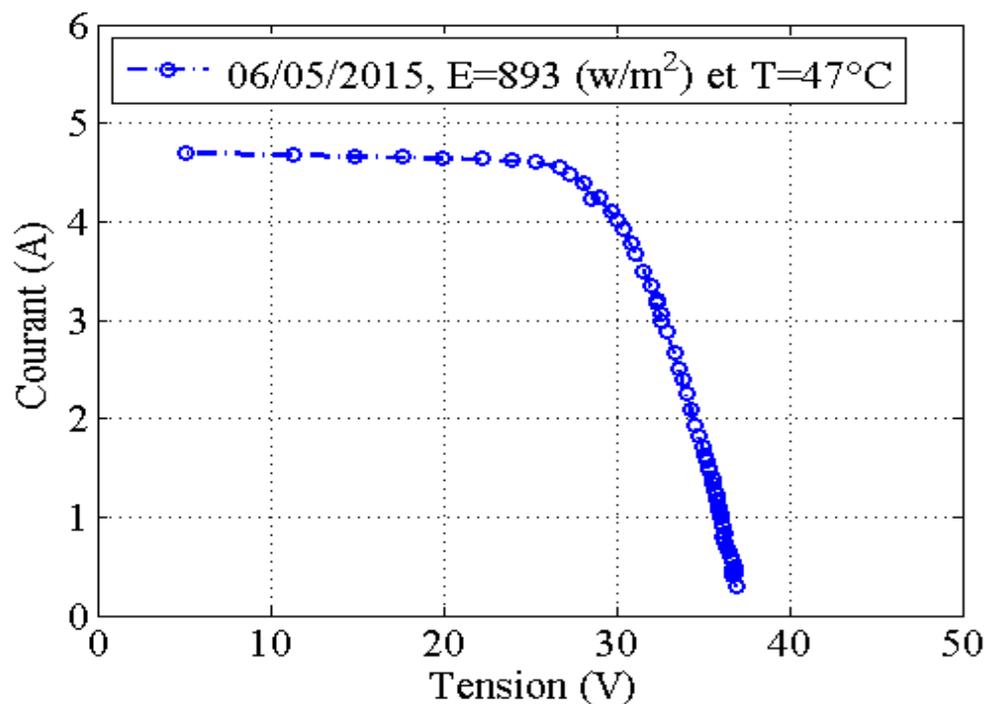
✓ Cas 3) :  $E= (750\text{w/m}^2)$  et  $T=36^\circ$



(Fig.VI.10) : L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$



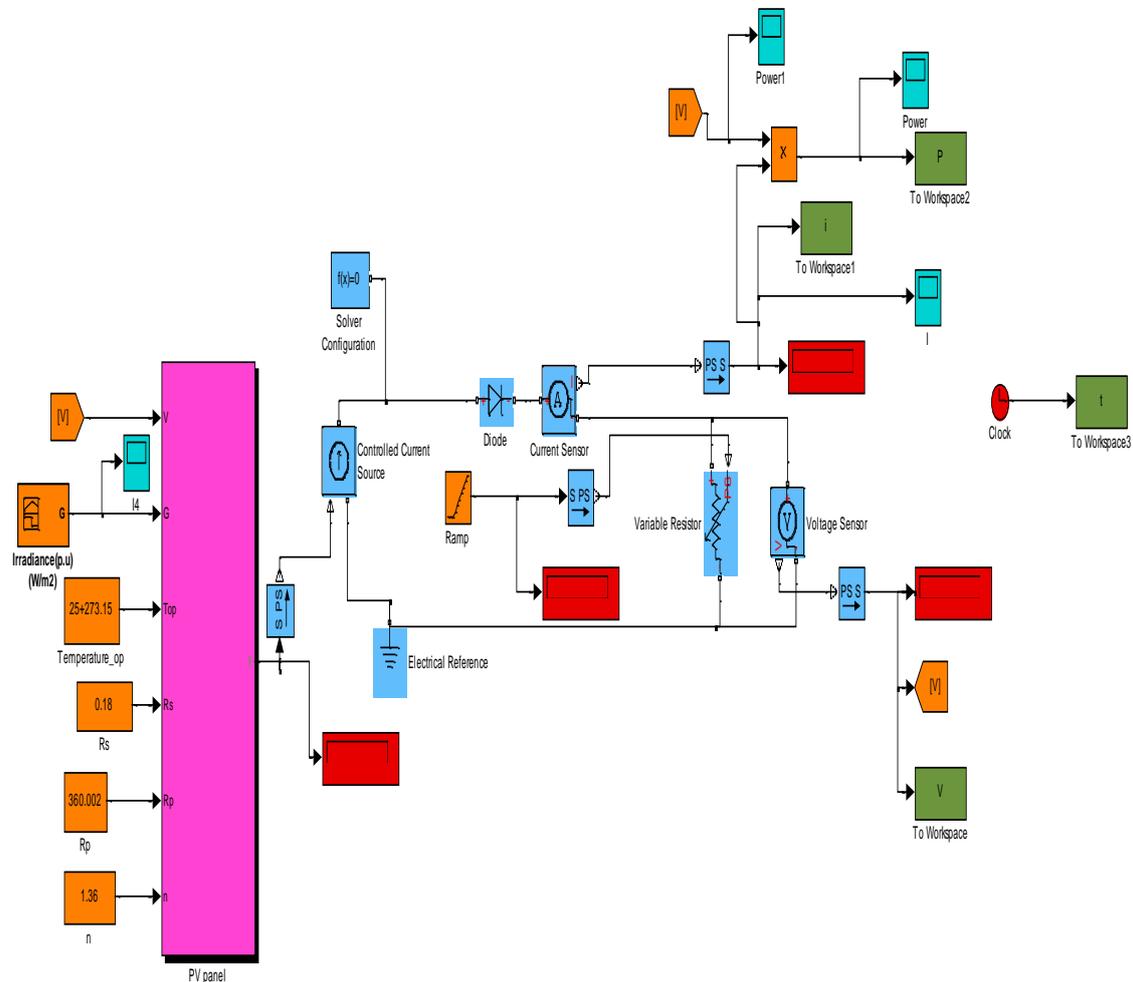
(Fig.VI.11) : L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .



(Fig.VI.12) : L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules ; la figure(VI.11) et (VI.12) montre que l'augmentation de la température entraînant une diminution nette de la tension de circuit ouvert.

## VI.4. SIMULATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE (PV)

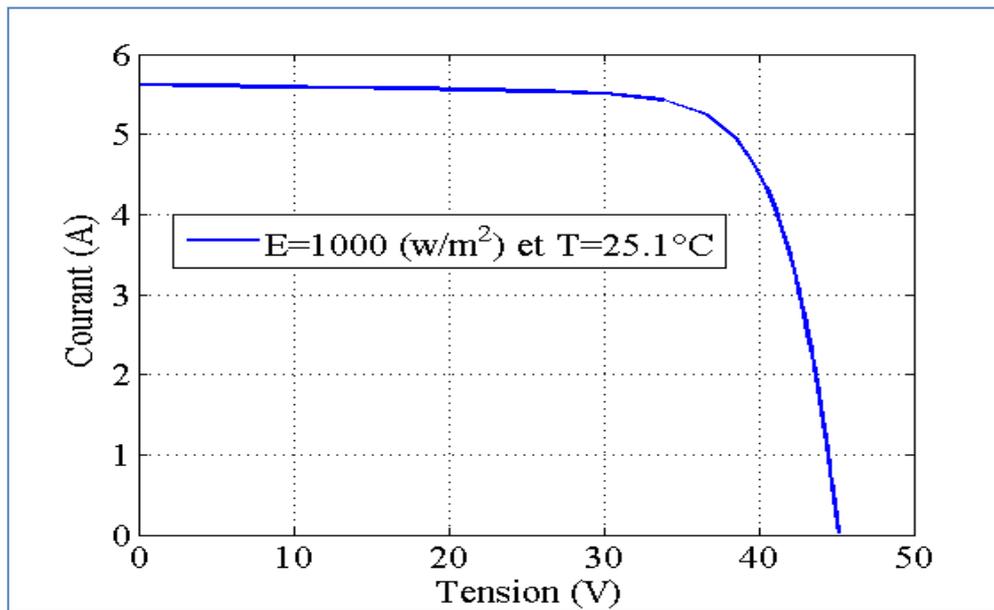


(Fig. VI.13). Schéma bloc d'un générateur photovoltaïque

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

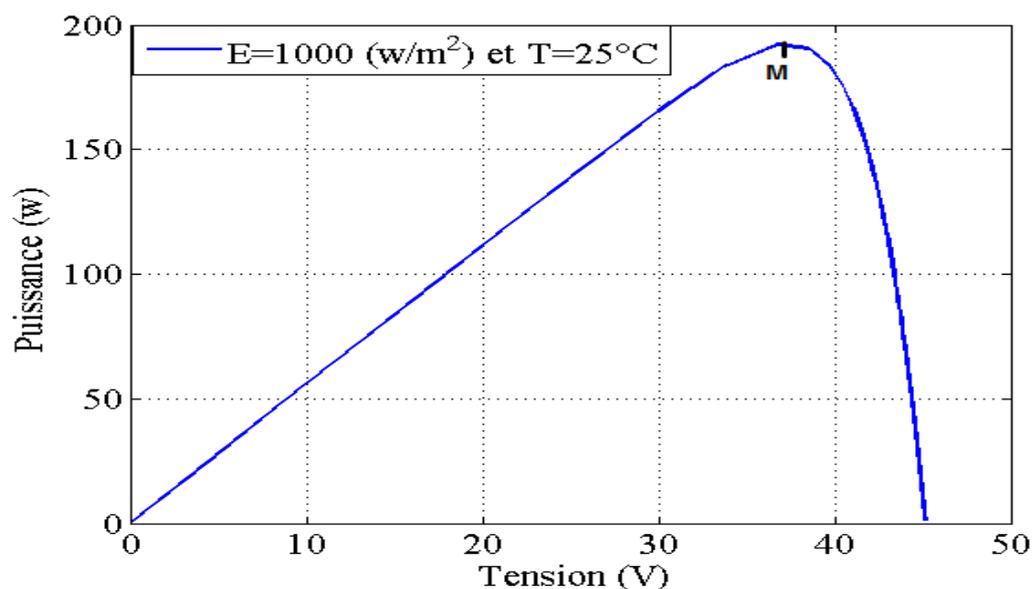
Afin d'obtenir les caractéristique (I-V et (P-V) à partir du modèle établi du PV, nous avons utilisé les composants du package de simulink.La (figure VI.13) montre un système permettant d'avoir les caractéristique PV.

## VI.4.1.A. Caractéristique Courant-Tension

(Fig.VI.14) : Caractéristique I(V) ,  $T=25^\circ\text{C}$  d'un PV

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire cellule définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (fig.VI.14).

## VI.4.1.B. Caractéristique puissance-tension P(V) :

(Fig.VI .15) : Caractéristiques P (V),  $T=25^\circ\text{C}$  d'un PV

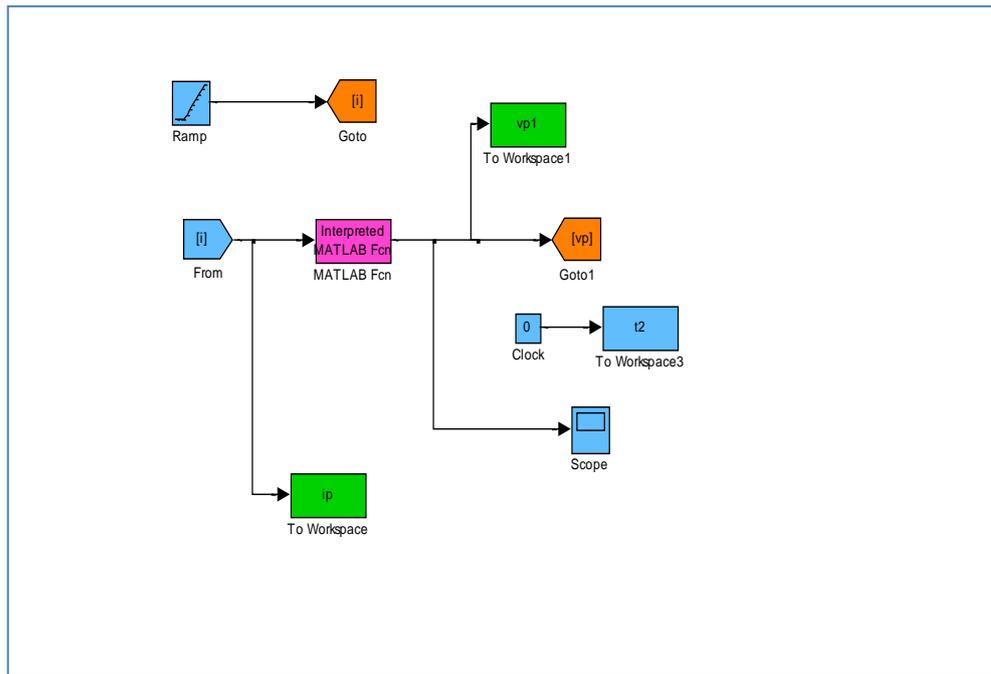
La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes figure (VI.15). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module. Représente l'évolution du rendement photovoltaïque solaire (PV) et de la puissance photovoltaïque en fonction de l'éclairement solaire. Nous remarquons dans cette figure une augmentation continue de puissance PV en fonction de l'éclairement, ceci est du essentiellement à l'augmentation du courant et de la tension de fonctionnement Avec l'éclairement solaire.

La tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la Température de la cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule , Donc l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

Grâce aux résultats obtenus à partir des travaux pratiques et les comparer avec les résultats de simulation Nous concluons que donne haute rodomonte

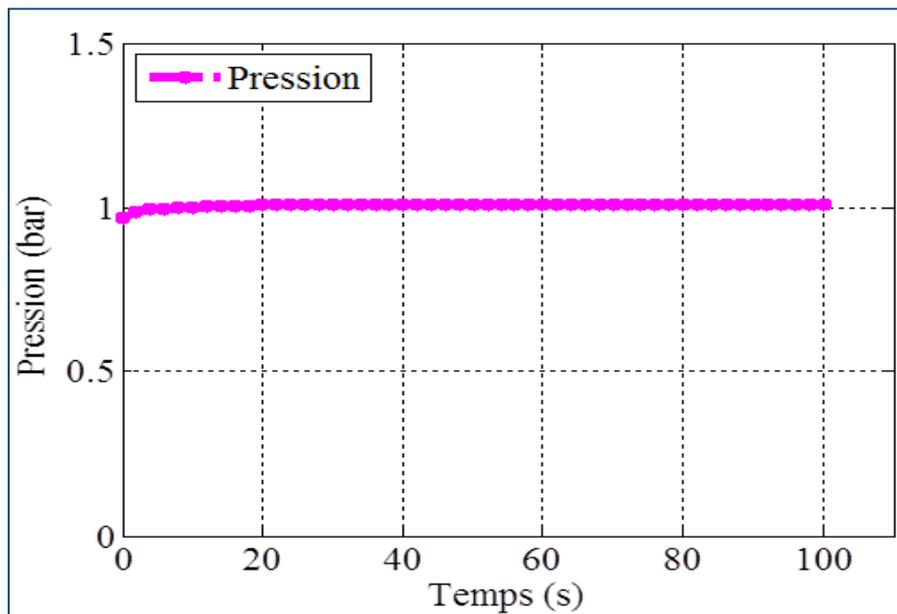
#### **VI.4.2. SIMULATION DE L'ÉLECTROLYSE DE PEM.**

L'électrolyseur que nous proposons à l'utilisons de type PEM (Proton Exchange Membrane). De Manière générale, l'opération d'électrolyse consiste à diviser une molécule en ses éléments simples sous l'action d'un courant électrique. Dans le cas présent, l'eau est divisée en hydrogène et oxygène gazeux. Dans un électrolyseur PEM, c'est la membrane qui transporte les électrolytes (proton) et non le milieu aqueux. Avec ce procédé l'électrolyse de l'eau distillée ou de la vapeur d'eau est possible. La figure suivante représente le schéma bloc de l'électrolyse de PEM.



(Fig.VI.16).Schéma bloc d'une électrolyse de PEM

#### VI.4.2.Caractéristique Pression-Temps



(Fig.VI.17) .La Caractéristique  $P=F(T)$  du PEM

#### VI.5. Exemple de fonctionnement d'électrolyse avec un panneau PV

D'après la courbe présente sur la figure (VI.3), la valeur de l'éclairement est enverrions ( $900 \text{ W/m}^2$ ), duré un temps de 5 heures.(de 10er jusqu'a 15er) ,qui peut assurer un courant optimale de 4.9A et une tension optimal de 33V.

- ✓ **Calcule du débit mouler d'hydrogène produit par un courant d (4.9A).c'courant fournit PV**

$$N_{H_2} (I) = \frac{I}{2F} \quad (\text{Equ.VI.1})$$

$$N_{H_2} = 254 \cdot 10^{-4} \text{ (A.mols/s)}$$

Ou:

I: courant optimale un furent de panne(A).

F : constante de Stefan Boltzmann (96485.3415)

- ✓ **Le débit Masques**

$$QH_2 = \frac{I}{F} \text{ (g /s)} \quad (\text{Equ.VI.2})$$

$$QH_2 = 508 \cdot 10^{-4} \text{ (g/s)}$$

$$QH_2 = 914.4 \text{ (g)}$$

Mace masques pour 5 heures 914 .4(g)

- ✓ **Calcule le volume de réservoir**

$$P \cdot V = N \cdot R \cdot T \quad (\text{Equ.VI.3})$$

$$N_{H_2} = \frac{m(g)}{M(H_2)} = 457.2 \text{ mole} \quad (\text{Equ.VI.4})$$

$$V = \frac{N \cdot R \cdot T}{P} = 13.42379.9 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3\text{)} \quad (\text{Equ.VI.5})$$

Ou :

P : la prissions (bar)

N : nombre de moles (mole)

T : la température (k)

V : volume de réservoir (m<sup>3</sup>)

R : constante des gaz parfaits (8.314 j k<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>)

### VI.6.L'électrolyse de l'eau

L'électrolyse consiste à alimenter 2 électrodes par un générateur extérieur, ces 2 électrodes Plongeant dans un l'eau. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique.la réaction globale est donné pour l'équation suivante [38] :



### VI.6.1. Réalisation d'une électrolyse de l'eau

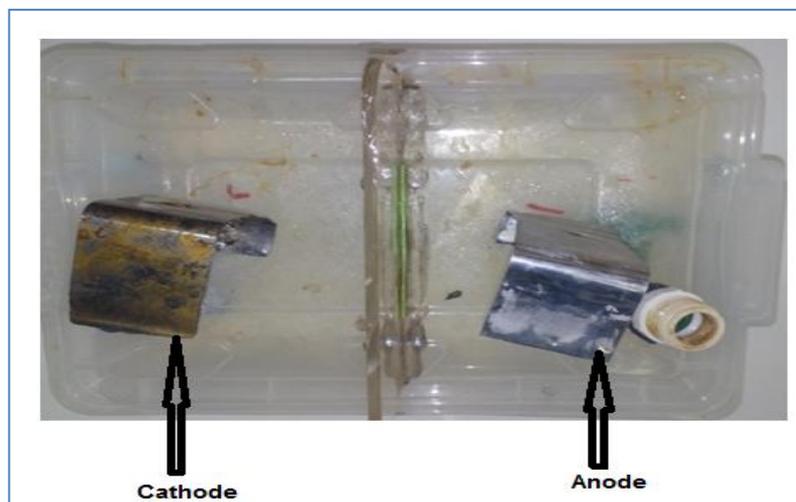
Dans notre travail, nous avons appliqué deux électrodes de type aciers de nuance (UNOX) et graphite ce dernier nous avons en ce électrolyse du laboratoire de chimie de l'université. Trois types de l'eau ont été testés et chaque fois les électrodes sont plongées de l'eau :

Cas 1 : l'eau de robinet

Cas 2 : l'eau de distillée

Cas 3 : l'eau de minérale

#### A) Electrode de type aciers de nuance



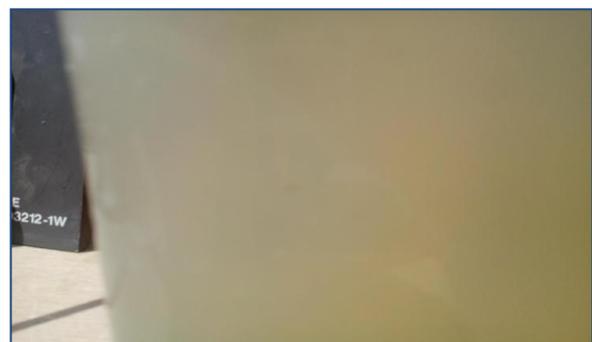
(Fig.VI.18) : Electrode de type aciers de nuance utilisé

#### ✓ Cas A.1. L'eau de robinet :

On a utilisé la même électrode immergée dans l'eau de robinet.



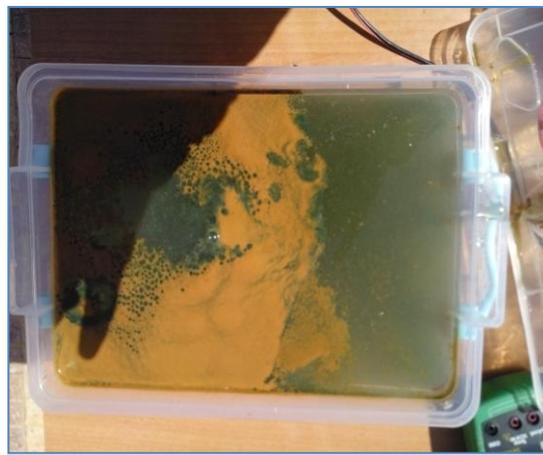
Début d'expérience



Parés un quart d'heure

(Fig.VI .19): Test de l'eau robinet

Après un quart d'heure au début de l'expérience nous avons observé la transformation de la couleur de l'eau à partir d'une couleur transparente au vert clair.



Après une demi- heure

fin de l'expérience

**(Fig.VI.20): Test de l'eau robinet**

Changement de couleur de l'eau du vert clair au vert foncé au milieu de l'expérience. A la fin de l'expérience, une apparition de la couleur Rouge brique sur la surface.

On montre les résultats obtenus par les équations suivantes :[39]

Equation de dissociation :  $\text{FeCl} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{Cl}^-$  (Equ.VI.7)

Equation de précipitation :  $\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$  (Equ.VI.8)

Les solutions contenant des ions ferriques  $\text{Fe}^{3+}$  sont couleur rouille. Le test à la soude concentrée fait apparaître un précipité rouille.

Concentrée : précipité d'hydroxyde de Fer

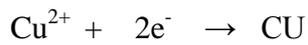
Equation de dissociation :  $\text{FeSO}_4 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$  (Equ.VI.9)

Equation de précipitation :  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$  (Equ.VI.10)

Les solutions contenant des ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  sont jaune-verdâtres. Le test à la soude concentrée fait apparaître un précipité verdâtre.

$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  (Equ.VI.11)

Le métal fer a été oxydé à l'état d'ions  $\text{Fe}^{2+}$  (Une oxydation est une perte d'électrons)



(Equ.VI.12)

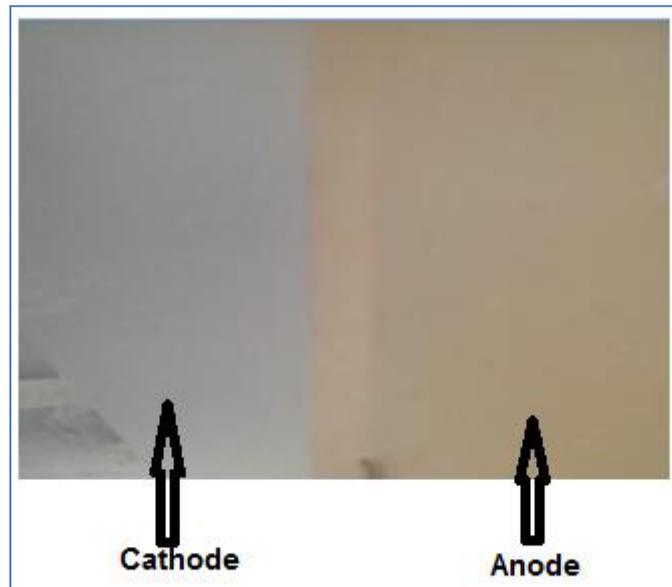
Les ions  $\text{Cu}^{2+}$  ont été réduits à l'état de cuivre métallique (Une réduction est un gain d'électrons)

Les ions cuivre  $\text{Cu}^{2+}$  ont oxydé le fer : l'ion  $\text{Cu}^{2+}$  est un oxydant

Le fer a réduit les ions  $\text{Cu}^{2+}$  : le fer est un réducteur.

✓ **Cas 2.A: l'eau de minérale.**

La première expérience



(Fig.VI.21) : Test de l'eau minérale de début l'expérience



Après une demi-heure



Fin de l'expérience

(Fig.VI.22): Test de l'eau minérale pendant l'expérience

La deuxième étape :

L'utilisation de la même électrode et le plonger dans l'eau minérale, on a observé une réaction lente et le changement de la couleur de l'eau du couleur rouge au rouge foncé.

✓ **Cas 3.A): l'eau distillée**



Début d'expérience



Fin de l'expérience

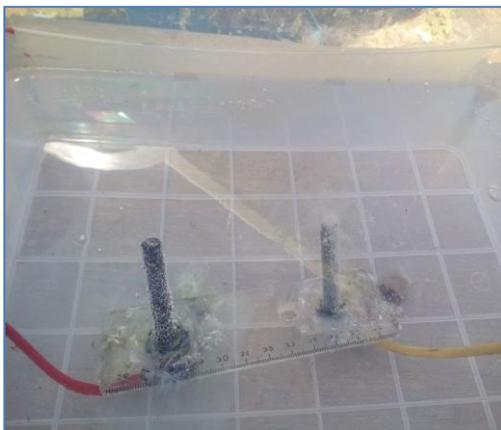
(Fig.VI.23): Test de l'eau distillée

La troisième étape :

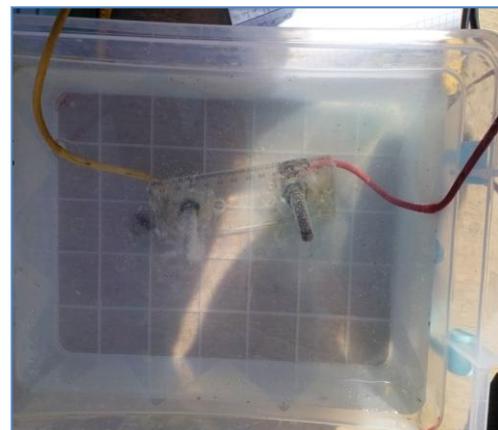
L'utilisation de l'eau distillée avec la même électrode, on n'a pas obtenu des réactions électrochimiques car l'interaction entre l'eau distillée et la livraison d'électrons

**B). Electrode de type graphite.**

✓ **Cas .B.1) l'eau de robinet :**



Début d'expérience



Fin d'expérience

**(Fig.VI.24): Test l'eau de robinet**

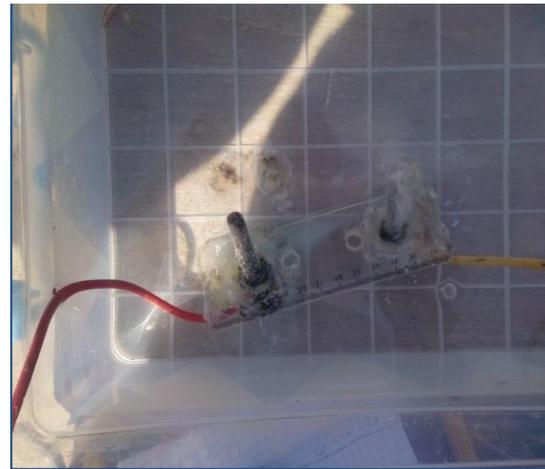
La première étape :

On a utilisé l'eau du robinet et l'électrode de type graphite pour une interaction rapide sans changement de la couleur

✓ **Cas .B.2) .l'eau de minérale :**



La première expérience



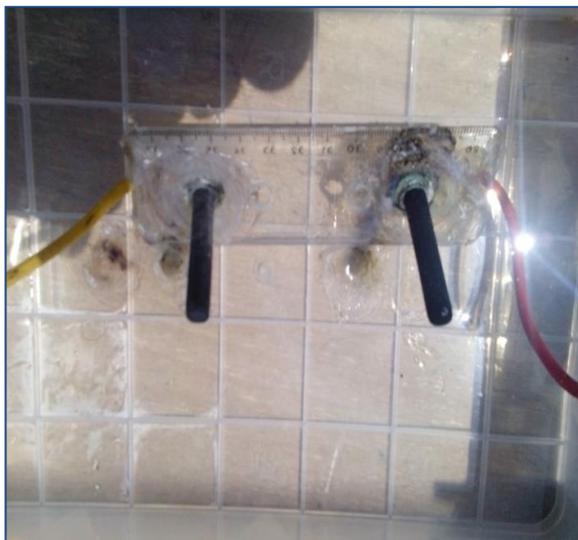
Fin d'expérience

**(Fig.VI.25): Test avec l'eau minérale**

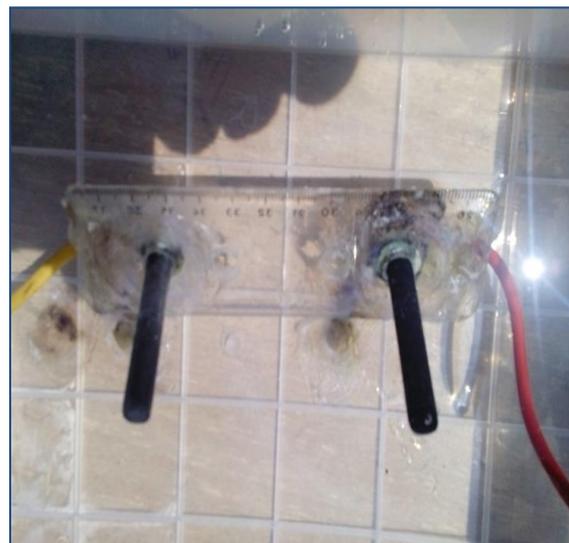
Dans la deuxième étape :

On a changé la qualité de l'eau, mais nous avons utilisé la même électrode. Dans ce cas, la réaction électrochimique est lente et la couleur de l'eau ne change pas.

✓ Cas .B.3) .l'eau de distillée :



Début expérience



Fin d'expérience

(Fig.VI.26): Test avec l'eau distillée

Dans la 3<sup>ème</sup> étape :

On a changé la qualité de l'eau (distillés) et utiliser la même électrode. Dans ce cas, il n'y a pas une réaction électrochimique et pas de changement de la couleur.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons réussi de produire l'hydrogène par un électrolyse de l'eau fabriquée avec un matériau le plus disponible dans le marché, mais la pureté de l'eau a limité la quantité, et l'apparition de molécule de fer sur la surface a nous aidé d'analyser l'eau potable de la région.

# CONCLUSION GENERALE

# Conclusion general

---

## CONCLUSION GINRALE

L'hydrogène n'est pas une source d'énergie, mais bien un vecteur énergétique, ce qui nécessite le développement d'autres énergies renouvelables dont il favoriserait l'exploitation. L'hydrogène permet une parfaite adaptation de l'offre à la demande (ce qui est difficile à réaliser avec les énergies renouvelables qui sont souvent intermittentes). C'est en quoi l'hydrogène possède des vertus écologiques.

De nombreux axes de développement sont étudiés par les scientifiques pour trouver de nouveaux moyens d'associer l'hydrogène à des sources d'énergie propres et renouvelables, et pour faciliter son utilisation dans l'industrie et dans la vie courante.

Le travail présenté dans ce mémoire s'intègre dans ce cadre avec une production d'hydrogène par électrolyse de l'eau par voie solaire dont l'électricité est produite par une PV, avec un prix moins cher tout en éliminant l'handicap de la nuit qui représentait un grand problème pour la production par des panneaux PV.

- Pour ce qui concerne l'électrolyseur, le plus simple serait le mieux : un électrolyseur type alcalin, avec une nappe d'eau supposée phréatique sous des conditions pour la bonne démarche vont assurer la production d' $H_2$ .

- La production de l' $H_2$  dépend de plusieurs paramètres ; le débit et la nature d'eau, le courant, la tension et la température. Autrement dit, le débit de  $H_2$  à produire dépend linéairement de la puissance fournie à l'électrolyseur qui est dans ce cas un PV, donc la durée d'éclairage pendant une journée influe sur le volume de stockage. Toutefois, le taux de production et le rendement doivent être définis par des mesures sur terrains.

- ✓ Les résultats expérimentaux obtenus montrent clairement que le potentiel de production d'hydrogène dans les régions du sud est très important.

Nous avons aminé à envisagé quelque perspective :

- Utilisation d'autres types d'électrodes caractérisés par leurs faibles solubilités ou l'ajout d'une membrane permettant seulement le passage des ions  $OH$  et des électrons.
- Favoriser une solution d'électrolyte avec une température et une concentration élevées.
- utiliser un ensemble de l'électrode d'un genre plus grave attaché sur la séquence et augmente la valeur du courant

# Annexes

# Annexes

## Annexe A

Les paramètres dans cette mémoire

Paramètre pour da les panneaux	Valeur (S.I)
La tension de circuit ouvert $V_{oc}$	45.2 V
La tension optimale $V_{sc}$	36.6 V
Le courante de court-circuit $I_{sc}$	5.62 A
Le courante optimale $I_{opt}$	5.20 A
Poussine	190 W

Conductions des panneaux photovoltaïques :



Figure.A.1 : paramètre de module



Figure.A.2 : Module e des panneaux

## Annexes

- Le type de l'eau :



Figure.A.3 : L'eau de minérale

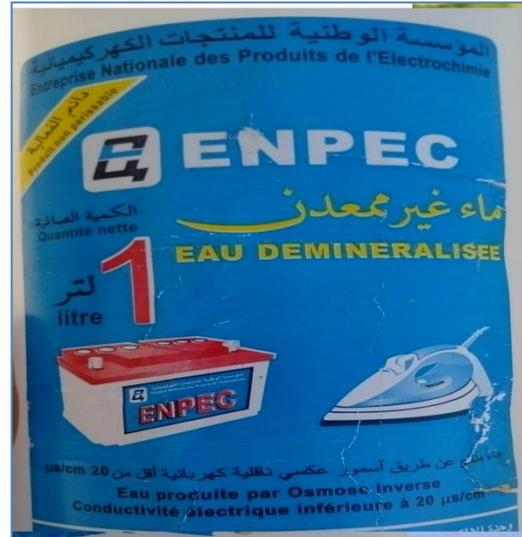


Figure.A.4 : L'eau de distillée

- Electrode de type aciers de nuance :

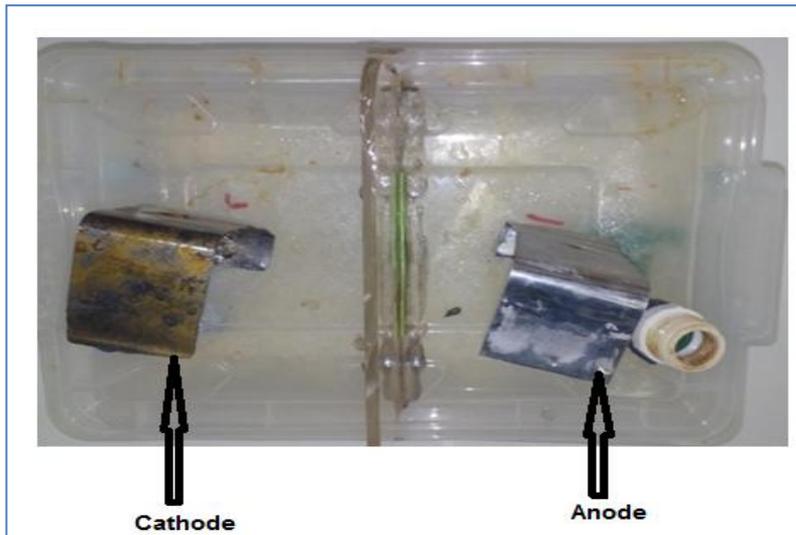


Figure.A.5 : Electrode de type aciers de nuance

## Annexes

- Composition chimique des éléments de fixation en aciers inoxydables :

Groupe de composition	Nuance	Composition chimique % (m/m) <sup>1</sup>									Notes
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	
Austénique	A1	0,12	1	6,5	0,2	0,15 à 0,35	16 à 19	0,7	5 à 10	1,7 à 2,25	2) 3) 4)
	A2	0,1	1	2	0,05	0,03	15 à 20	- <sup>9)</sup>	8 à 19	4	7) 8)
	A3	0,08	1	2	0,045	0,03	17 à 19	- <sup>9)</sup>	9 à 12	1	9)
	A4	0,08	1	2	0,045	0,03	16 à 18,5	2 à 3	10 à 15	1	8) 10)
	A5	0,08	1	2	0,045	0,03	16 à 18,5	2 à 3	10,5 à 14	1	9) 10)
Martensitique	C1	0,09 à 0,15	1	1	0,05	0,03	11,5 à 14	-	1	-	10)
	C3	0,17 à 0,25	1	1	0,04	0,03	16 à 18	-	1,5 à 2,5	-	
	C4	0,06 à 0,15	1	1,5	0,06	0,15 à 0,35	12 à 14	0,6	1	-	2) 10)
Ferritique	F1	0,12	1	1	0,04	0,03	15 à 18	- <sup>9)</sup>	1		11) 12)

**Tableaux.A.1 : Composition chimique des éléments de fixation en aciers inoxydables**

# BIBLIOGRAPHIE

# Bibliographie

---

## Bibliographie

- [1] : ALLEAU. T, "Le stockage des renouvelables", FICHE 0.1, Mémento de l'Hydrogène, AFH<sub>2</sub>, 2008.
- [2] : Association Française de l'Hydrogène, "Pourquoi l'hydrogène? ", Version 4.2 Février 2004.
- [3] : AFH<sub>2</sub>, "Les données de bases physico-chimiques sur l'hydrogène", Mémento de l'Hydrogène, FICHE 1.2, mars 2001.
- [4] : S. Hais, "L'hydrogène : vecteur énergétique du futur", Institut français de pétrole, IFP - Diffusion des Connaissances, Décembre 2003.
- [5] : The International Energy Agency (IEA), "Hydrogen production and storage, Hydrogen implementing agreement", 2005.
- [6] : ALLEAU. T, "Production d'Hydrogène par Electrolyse de l'Eau", Avril 2011.
- [7] : MARION. P, Vienot. S, "production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles", fiche 3.1.1, Mémento de l'Hydrogène, AFH<sub>2</sub>, 2009
- [8] : LABBE. J, "L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés", Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité "Énergétique", 2006.
- [9] : La filière d'hydrogène, "Pourquoi l'hydrogène?", CLEFS CEA N°50/51, hiver 2004/2005.
- [10] : DEBIAIS. L, "Production et consommation d'hydrogène aujourd'hui", Mémento de l'Hydrogène, FICHE 1.3, AFH<sub>2</sub>, 2008
- [11]: JMAHMAH. B, BELHAMEL. M, CHADER. s, M'RAOUI. A, HAROUADI. F, ETIEVANT. C, LECHEVALIER. s et CHERIGUI. A, "Projet Maghreb - Europe : Production d'Hydrogène Solaire. Phase 1 : Etude d'Opportunité et de Faisabilité du Projet", 7.007
- [12] : BOUDRIES-KHELLAF.R, "ETUDE de d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire en Algérie",2002
- [13] : [http://www.ciele.org/filieres/solaire photovoltaïque.htm](http://www.ciele.org/filieres/solaire%20photovoltaïque.htm)
- [14] : Ghali. O, «Etude et réalisation d'un onduleur multi niveaux monophasé alimenté par une source photovoltaïque" Mémoire d'ingénieur, université de Biskra, 1998
- [15] : Chétifs et Bouali, «Effet de la température sur les modules photovoltaïque " Université de BATNA, 1995.

## Bibliographie

---

- [16]: Shimizu.S, M. Hirakata, and T. Kamezawa. "Generation control circuit for photovoltaic modules". IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 16(3) :293 300, May 2001.
- [17] : Yann Pankow," Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque" mémoire de doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille,2004
- [18] : Tkouti Nacira,"Optimisation des systèmes photovoltaïque connectes au réseau par logique floue" mémoire de magister, université de Biskra, 2004
- [19] : A.Ricaud," Photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque".
- [20] : Mohamed Massoud, «les system photovoltaïque connecte ou réseau "mémoire de magister université Batna 2005
- [21] : Terki Amel," Etude Des Performances Et Maximisation Du Couple D'un Moteur A Courant Continu A Aimant Permanent Sans Balais PMBLDC Alimenté Par Un Générateur Solaire" mémoire de magister, université de Biskra, 2000/2001
- [22] : Benlarbi Keltoum,"Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque ,magister, université de Batna,2001.
- [23] : Boudjemaà S, Achour A," Fonctionnement Optimal d'un système photovoltaïque hybride par des technique développés" mémoire d'ingénieur, université de Biskra, 2004.
- [24] : L.Aigess et A.Hicher, "Etude et simulation d'un système de maximisation de puissance (MPPT) d'un système photovoltaïque ", mémoire de l'ingénieur, Université de BISKRA, 2001.
- [25] : Shimizu.S, M. Hirakata, and T. Kamezawa. "Generation control circuit for photovoltaic modules". IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 16(3) :293 300, May 2001.
- [26] : Yann Pankow," Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque" mémoire de doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille,2004
- [27] : Anne.L-Michel.V, "Energie solaire photovoltaïque", Dunod, Paris, 2003.
- [28] : A.Ricaud," Photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque".
- [29] : Mouhamdi Messoud,"les system photovoltaïque connecte ou reseau "mémoire de magister université Batna 2005

## Bibliographie

---

- [30] : <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php>. (Avril 2011).
- [31] : BOUZIANE.K, “Etude d'Une Installation Photovoltaïque de Production d'Hydrogène par Electrolyse de l'Eau”, mémoire magister, université d'Ouargla, 12/05/2011.
- [34] : A. Damien, “Hydrogène par électrolyse de l'eau”, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, 2002.
- [35] : NEGROU. B, SETTOU. N, CHENNOUF. N et DOKKAR. B, Etude d'une Installation de Production d'Hydrogène Solaire par l'Electrolyse de l'Eau”, Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes, Université K. MERBAH Ouargla, 2010.
- [36] : Mathieu BOILLOT, « Validation expérimentale d'outils de modélisation d'une pile à combustible de type PEM», thèse doctorat, institut national polytechnique de Lorraine, soutenue le 26 octobre 2005.
- [37] : Amel LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse doctorat, université de franche- comte, soutenue le 24/11/2005.
- [38] : R. BEN SLAMA, “Essais sur la production de l'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau”, 13èmes Journées Internationales de Thermique, France du 28 au 30 Août 2007.
- [39] : Chapitre 7.Sciences Physiques – BTS. Oxydoréduction et corrosion.