

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**Faculté des sciences et de la technologie et des sciences**  
**de la matière**  
**Département de génie des procédés**



**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et techniques**

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie chimique**

**Présenté par : Sekiou Yasmine**

**Thème**

***Dimensionnement d'une installation de production  
d'hydrogène photovoltaïque dans la région  
de Ouargla***

**Soutenu Publiquement**

**Le : 15 /06/2013**

**Devant le jury :**

Mr.	S.Saouli	Pr.	Président	UKM Ouargla
Mr.	D.Zerrouki	M.C.A	Examineur	UKM Ouargla
Mr.	N.Chennouf	M.A.A	Encadreur	UKM Ouargla

**Année Universitaire : 2012 /2013**

## *Remerciements*

*En premier lieu, je tiens à remercier notre Dieu, pour le courage et la force qu'il nous a donné pour effectuer ce travail.*

*Au moment d'achever ce travail modeste, je me tourne vers les nombreuses personnes qui, par intérêt pour notre sujet ou par conscience professionnelle, ont permis de le mener à bien, je remercie profondément l'encadreur de mémoire*

***MR. CHENNOUF NASREDDINE***

*Maître Assistant à l'université de Ouargla, Qui a consacré un temps précieux pour ce travail. Et m'encouragée à le poursuivre et a facilité son accomplissement.*

*Et les membres de jury d'avoir accepté mon travail*

***Pr. Saouli,***

***Dr. Djamal Zerrouki.***

*Et tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin durant toute la période de travail et en particulier :*

***Mlle. SOUMIA RAHMOUNI.***



## *Dédicace*

*Pour chaque début il y a une fin, et ce qui est beau dans toute fin c'est la réussite et l'atteinte des objectifs.*

*Je dédie ce modeste travail, fruit de très longues années de labeur:*

*A la seule femme de ma vie qui à énormément souffert pour faire de moi ce que je suis et qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi ; Ma très chère Mère.*

*A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.*

*A mes deux adorables sœurs Feriel et Rym*

*Et mon frère Abd Al Aziz.*

*A mes meilleurs amis chacun à son nom, Et tous ceux que j'aime.*

***YASMINE SEKIOU.***



# *SOMMAIRE*

# SOMMAIRE

	<b>Page</b>
Nomenclature	I
Listes des figures	IV
Liste des tableaux	V
Introduction Générale .....	1

## **CHAPITRE I : L'hydrogène vecteur énergétique de future.**

I.1. Introduction .....	3
I.2. Généralités sur l'hydrogène .....	3
I.3. Caractéristique d'hydrogène .....	4
I.4. La production d'hydrogène .....	4
I.5. La production d'hydrogène par l'électrolyse d'eau .....	6
I.5.1. Définition d'électrolyseur .....	6
I.5.2. Principe de fonctionnement .....	6
I.5. 3. Les types d'électrolyseurs.....	7
I.5. 3. A. Electrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane).....	7
I.5.3. B. Electrolyseur alcalin .....	8
I.5.3. C. Electrolyseur à haute température par SOEC (Solid Oxid Electrolyser Cell).....	8
I.6 Conclusion .....	9

## **CHAPITRE II : L'énergie photovoltaïque.**

II.1. Introduction .....	10
II.2. L'énergie solaire .....	10
II.2.1. Rayonnement solaire .....	11
II.2.1.1.Types de rayonnement solaire .....	11

A. Le rayonnement direct .....	11
B. Le rayonnement diffus .....	11
C. Le rayonnement réfléchi .....	11
II.3 Les éléments d'un système de captage photovoltaïque.....	12
II.3.1. Générateur Photovoltaïques.....	12
A. La cellule solaire.....	12
B. Le module solaire.....	16
C. Le champ photovoltaïque .....	16
II.3.2.Système de Régulateur .....	17
II.3.3.Système de conversion .....	17
II.3.4. Système de stockage .....	17
II.3.5. La charge .....	18
II.4.Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques .....	18
II.4.1. Les avantage .....	18
II.4.2. Les inconvénients .....	18
II.6.Conclusion .....	19
 <b>CHAPITRE III : Étude et Dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour la production d'hydrogène.</b>	
III.1. Introduction .....	20
III.2. Présentation du site .....	20
III.3.Rayonnement solaire .....	21
III.3.1. La déclinaison du soleil.....	22
III.3.2. L'angle horaire du soleil .....	22
III.3.3. Latitude .....	22
III.3.4. Longitude .....	22

III.3.5. Position du soleil .....	22
A. L'azimut .....	23
B. La hauteur angulaire .....	23
III.3.6. Position du capteur .....	23
III.3.7. Le jour type du mois .....	24
III.3.8. La durée d'ensoleillement .....	24
III.3.9.L'irradiation solaire .....	25
III.3.9.1.L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale .....	25
III.3.9.2.L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface incliné .....	26
III.4. Les composants d'un système de production d'hydrogène Photovoltaïque .....	28
III.4.1. Le champ photovoltaïque .....	28
A. Rendement des panneaux photovoltaïques .....	29
III.4.2. Le générateur de l'hydrogène .....	31
III.4.2.1. La quantité d'hydrogène désiré à produire .....	33
III.4.2.2. Le besoin énergétique photovoltaïque.....	34
III.4.3. Réservoir d'eau .....	36
III.5. Taille du générateur photovoltaïque .....	36
III.5.1. La puissance crêtes.....	37
III.5.2. Le besoin énergétique journalier .....	37
A. Nombre de module .....	38
B. Nombre de module corrigé .....	39
C. La surface totale de champ .....	39
III.6. Conclusion .....	40

**CHAPITRE IV: Etude technico-économique de système.**

IV.1. Introduction .....	41
IV.2. Etude comparative des surfaces (Max, Moy et Min) .....	41
IV.2.1. Surface maximale .....	41
IV.2.2. Surface moyenne.....	42
IV.2.3. Surface minimal .....	43
IV.3. Etude économique de système PV pour la production d'hydrogène .....	47
IV.3.1. Coût moyen actualisé de l'électricité photovoltaïque .....	47
IV.3.2. Coût d'investissement total .....	48
IV.3.3. Coût de maintenance et d'exploitation .....	49
IV.3.4. Coût d'investissement initial .....	49
IV.3.5. Coût d'investissement des panneaux solaire .....	49
IV.3.6. Coût d'investissement balance of système .....	50
IV.3.7. Prix de revient de l'hydrogène .....	50
IV.4. Conclusion .....	50



# Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
$A_s$	La surface totale de champ PV	$m^2$
$A$	le facteur d'idéalité de la jonction	
$C_e$	Consommation électrique totale d'électrolyseur (Alcalin)	KWh
$C$	Correction de distance terre soleil	
$C_{O\&M}$	Coût de maintenance et d'exploitation	\$
$C_{PV}$	Coût des panneaux solaire	\$
$C_{BOS}$	Coût de balance of system	\$
$D_h$	Flux diffus sur plan horizontal	$W/m^2$
$D_i$	Flux diffus pour un plan d'inclinaison	$W/m^2$
$d$	Durée d'ensoleillement	h/j
$deg$	Taux de dégradation	%
$E_{ch}$	L'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur	KWh /j
$E_e$	Le besoin énergétique photovoltaïque	KWh/j
$E_{el,an}$	Production annuelle d'énergie électrique	kWh/an
$F_m$	Facteur de couplage	
$F$	Taux d'inflation	%
$G_0$	Eclairement solaire	$W/m^2$
$G_m$	Éclairement mensuelle sur un plan incliné ( $31^\circ$ )	$kWm^2$
$H_i$	Irradiation journalière moyenne mensuelle sur un plan incliné	$KWh/m^2.j$
$H_h$	Irradiation journalière moyenne mensuelle sur un plan horizontal	$KWh/m^2.j$
$I_0$	Coût d'investissement initial	\$
$I_{ph}$	photo courant créer par la cellule (proportionnelle au rayonnement incident)	A
$I_0$	courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p – n de la cellule.	A
$I_e$	Courant d'électrolyseur	A
$I_c$	courant maximal sous conditions standards	A
$K_T$	Coefficient de sérénité II	
$M$	Nombre d'aire masse	
$N_p$	Durée de vie des panneaux solaire	ans

$N$	nombre de jours de l'année	°
$N_{mod}$	Nombre total de module	
$N_s$	Durée de vie de système.	ans
$P_{mod}$	Puissance crête du module	W
$P_{H_2}$	la quantité d'hydrogène désiré à produire	Nm <sup>3</sup>
$P_{X_{H_2}}$	Prix de revient de l'hydrogène	\$/GJ
$P_{X_{électricité}}$	Prix d'électricité	\$/GJ
$R_b$	Rapport de flux direct	
$R_B$	flux réfléchi pour un plan d'inclinaison	W/m <sup>2</sup>
$r$	Taux d'actualisation	%
$S_h$	Flux direct sur plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$S_i$	Flux direct pour un plan d'inclinaison	W/m <sup>2</sup>
$T_L$	Facteur de trouble	
$T_a$	La température ambiante moyenne journalière	°C
$T_c$	La température moyenne journalière des cellules	°C
$T_0$	Température dans les conditions standards de mesure	°C
$V_c$	tension maximale du module sous conditions standards	V
$\omega$	déclinaison	°
$\delta$	angle horaire du soleil	°
$\psi$	azimut	°
$\gamma$	hauteur angulaire	°
$\xi$	Albédo	
$\alpha$	orientation	°
$\beta$	Inclinaison du capteur	°
$\theta$	L'angle d'incidence	°
$\phi_{Gh}$	Flux global sur plan horizontal	W/m <sup>2</sup>
$\phi_{Gi}$	Flux global pour un plan d'inclinaison	W/m <sup>2</sup>
$\rho$	Masse volumique d'hydrogène	Kg/m <sup>3</sup>
$\alpha_0$	coefficient de courant en fonction de température	A/°C
$\beta_0$	coefficient de la tension en fonction de température	V/°C
$\eta_r$	Rendement de référence de module	%
$\gamma$	Coefficient de température	

$\eta_{pv}$	Rendement moyen journalier du générateur	%
$\eta_e$	Rendement électrique	%

### **Abréviations**

LCOE	Levelized Cost Of Electricity	
<i>O&amp;M</i>	Maintenance et exploitation	
BOS	Balance of system	
NOCT	température nominale de fonctionnement de cellule solaire	°C
PV	Photovoltaïque	

## Liste des tableaux

Tableau III.1	Spécifications du site d'Ouargla.	21
Tableau III.2	Liste des jours types par mois proposés par Klein.	24
Tableau III.3	Valeur moyenne mensuelle d'ensoleillement.	25
Tableau III.4	Irradiation journalière moyenne mensuelle sur un plan horizontal ( $H_h$ ).	26
Tableau III.5	Irradiation journalière moyenne mensuelle sur un plan incliné avec $31^\circ H_i$ .	27
Tableau III.6	Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques.	28
Tableau III.7	Domaine de variation du rendement PV.	29
Tableau III.8	Variation mensuelle de la température ( $T_c, T_a$ ) ( $^\circ\text{C}$ ) et l'éclairement $G_m(\text{W/m}^2)$ .	30
Tableau III.9	Rendement des panneaux photovoltaïques $\eta_{pv}$ .	31
Tableau III.10	Les caractéristiques d'électrolyse Alcalin de type 8.00.	32
Tableau III.11	La quantité d'hydrogène désiré à produire.	33
Tableau III.12	le besoin énergétique d'électrolyseur et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyse journalière.	35
Tableau III.13	La puissance crête $P_c$ .	38
Tableau III.14	Nombres de modules corrigés.	39
Tableau III.15	La surface totale de champ photovoltaïque.	40
Tableau IV.1	Le besoin énergétique et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur et la quantité d'hydrogène produite.	42
Tableau IV.2	Le besoin énergétique et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur et la quantité d'hydrogène produite.	43
Tableau IV.3	Le besoin énergétique et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur et la quantité d'hydrogène produite.	44
Tableau IV.4	La somme annuelle du besoin énergétique et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur et la quantité d'hydrogène produite (max, moy, min).	45
Tableau IV.5	Les résultats de calcul des coûts d'investissement.	50
Tableau IV.6	Les résultats des prix d'électricité et d'hydrogène dans les trois types.	50

## Liste des figures

Figure I.1	Les différentes technologies de production d'hydrogène.	5
Figure I.2	Electrolyseur PEM.	7
Figure I.3	Electrolyse Alcalin.	8
Figure I.4	Electrolyseur à haute température.	8
Figure II.1	Les formes du rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi.	11
Figure II.2	Cellule solaire.	13
Figure II.3	Cellule photovoltaïque.	13
Figure II.4	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	13
Figure II.5	L'allure de la caractéristique Courant tension d'une cellule PV au silicium.	14
Figure II.6	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	14
Figure II.7	Cellules, module et panneau photovoltaïques.	16
Figure III.1	Situation de la Wilaya d'Ouargla.	21
Figure III.2	L'irradiation sur un plan incliné et l'irradiation sur un plan horizontale.	27
Figure III.3	Variation mensuelle de température des cellules et de température ambiante.	30
Figure III.4	Rendement des panneaux photovoltaïques $\eta_{PV}$ .	31
Figure III.5	Électrolyseur Alcalin de type 8.00	32
Figure III.6	Fonctionnement d'électrolyseur.	33
Figure III.7	La production d'hydrogène à chaque mois.	34
Figure III.8	Le besoin énergie mensuelle consommer par l'électrolyseur et délivré par les panneaux.	35
Figure III.9	Les étapes du calcul de la taille de générateur photovoltaïque.	36
Figure III.10	La puissance crête à chaque mois.	38
Figure III.11	Nombre de module mensuel nécessaire pour l'alimentation d'électrolyseur.	39
Figure IV.1	Les étapes de calcule d'étude comparative.	41
Figure IV.2	L'énergie photovoltaïque mensuelle (max, moy, min).	44
Figure IV.3	La quantité d'hydrogène produite mensuellement (max, moy, min).	45
Figure IV.6	La somme annuelle de la quantité d'hydrogène produite (max, moy, min).	46
Figure IV.7	La somme annuelle de besoin énergétique (max, moy, min).	46
Figure IV.8	Les étapes de calcule d'étude économique.	49

*INTRODUCTION*

*GENERALE*

## **Introduction Générale**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter, ce qui confirme que les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources fossiles, mais la production et la consommation de ces sources exercent une pression considérable sur l'environnement à savoir : émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques, production de déchets et rejets pétroliers.

Le CO<sub>2</sub> est le principal gaz responsable de l'effet de serre (53% des GES), il est issu d'activités diverses comme le transport, l'habitat, la déforestation, la production d'électricité ou encore la combustion d'énergie fossile. Il est donc important de s'intéresser à l'émission du CO<sub>2</sub> pour pouvoir la diminuer ou même la compenser.

Les sources d'énergie sont classées en trois catégories différentes : Les énergies fossiles qui proviennent de la combustion de réserves naturelles, qui se sont formées en plusieurs millions d'années à partir de dépôts organiques (plantes ou minuscules animaux).

L'énergie nucléaire (Atomique) qui provient de l'énergie et qui lie les particules des noyaux d'atomes entre eux elle est tirée d'un minerai radioactif: l'uranium.

Les énergies renouvelables sont produites à partir des sources naturelles renouvelable

Dans ce contexte, l'hydrogène répond à ces objectifs, il se présente comme une alternative énergétique dans un cadre de développement durable, ce gaz s'adapte parfaitement en tant que carburant pour des applications multiples.

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire, on se propose dans ce travail d'étudier la production d'hydrogène par voie solaire. Cette énergie solaire est spécifiquement produite pour faire fonctionner l'électrolyseur d'eau au Sud Algérien « Ouargla ». [1]

Dans cette étude nous présentons un dimensionnement d'un système photovoltaïque en vue de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, la production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques, on utilisant les données climatiques de la région de Ouargla, cette énergie électrique est pour l'alimentation d'électrolyseur industriel dans le but de produire l'hydrogène. Nous terminons par le calcul du coût de cycle de vie du système PV puis nous déduisons le coût moyen de l'hydrogène produit.

Le système est constitué de panneaux photovoltaïques et d'un électrolyseur industriel, nous nous basons sur les résultats expérimentaux qui sont fait au niveau du laboratoire de Valorisation et Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS) [1], et le Laboratoire de développement des Énergies Nouvelles et Renouvelables dans les Zones Arides et sahariennes (L.E.N.R.E.Z.A) [2,3].

Ce travail a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre définit d'une façon générale l'hydrogène, ses caractéristiques et ces modes de production, et d'une façon particulière l'électrolyse d'eau et leur principe de fonctionnement pour la production d'hydrogène et ces divers types.

Dans le deuxième chapitre, nous sommes concentrés sur la transformation d'énergie solaire photovoltaïque à une énergie électrique. Nous détaillons les éléments ayant (Descriptif du principe photovoltaïque permettent de transformer la lumière en électricité).

Le troisième chapitre est consacré au dimensionnement de l'installation à raison de calculer la surface nécessaire pour le fonctionnement du système de production de l'hydrogène.

Enfin, le quatrième chapitre représente une étude technico-économique pour le choix de la surface annuelle de fonctionnement du système.

Et on termine par une conclusion générale qui regroupe les différents aspects étudiés.



# *CHAPITRE I*

*L'HYDROGÈNE VECTEUR  
ÉNERGÉTIQUE DE FUTUR*

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

Aujourd'hui l'humanité est en recherche d'une nouvelle ressource écologique. Une énergie nouvelle, moins coûteuse et non-polluante et facilement utilisable, l'hydrogène se présente comme le candidat idéal pour cette fonction car il est l'élément le plus abondant dans l'Univers et sur notre planète.

L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique et non une énergie primaire, comme l'est par exemple l'électricité. Il est donc nécessaire de posséder des technologies capables de le produire. Il existe plusieurs en cours de recherche, comme celles basées sur les combustibles fossiles, le nucléaire ou encore les énergies renouvelables.

L'hydrogène est une matière de base de l'industrie chimique et pétrochimique, il est utilisé notamment pour la production d'ammoniac et de méthanol, pour le raffinage du pétrole, il est également employé dans les secteurs de la métallurgie, de l'électronique, de la pharmacologie ainsi que dans le traitement de produits alimentaires.

Pour couvrir ces besoins, 50 millions de tonnes d'hydrogène sont déjà produits chaque année. Mais si ces 50 millions de tonnes devaient servir à la production d'énergie, elles ne représenteraient qu'1,5 % de la demande mondiale d'énergie primaire.

Utiliser l'hydrogène comme vecteur énergétique nous oblige à augmenter sa production.

## **I.2. Généralités sur l'hydrogène :**

L'hydrogène fut reconnu comme une substance distincte en 1776 par « *Henry Cavendish* », physicien et chimiste britannique. Un chimiste, philosophe et économiste français, en 1783 « *Antoine Lavoisier* », lui donna son nom « Hydrogène » qui vient du grec « *hydro*= eau » et « *gène*=générer ». Un élément de symbole H de numéro atomique « 1 », sans couleur ni odeur, non toxique et hautement inflammable.

L'hydrogène n'existe pas à l'état natif. Il est :

- soit combiné à l'oxygène : eau  $H_2O$
- soit combiné au carbone : hydrocarbures (pétrole, gaz)
- soit combiné à C et O : biomasse végétale, carbohydrates, .....

### **I.3. Caractéristique d'hydrogène :**

De tous les éléments chimiques, l'hydrogène est le plus léger car il possède la structure atomique la plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. Il tient donc la première place dans la classification périodique de Mendeleïev. L'hydrogène a une masse volumique =  $0,09 \text{ kg/m}^3$ , à  $0^\circ\text{C}$  qui possède un pouvoir calorifique très élevé =  $33,3 \text{ kWh/kg}$ , contre environ  $14 \text{ kWh/kg}$  pour le Méthane.

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 (Les noyaux d'hydrogène ont fusionné pour donner naissance à des noyaux plus lourds et plus complexes.) 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.

- ❖ 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 (on différencie les acides par leur facilité à libérer des ions hydrogène en solution).

### **I.4. La production d'hydrogène :**

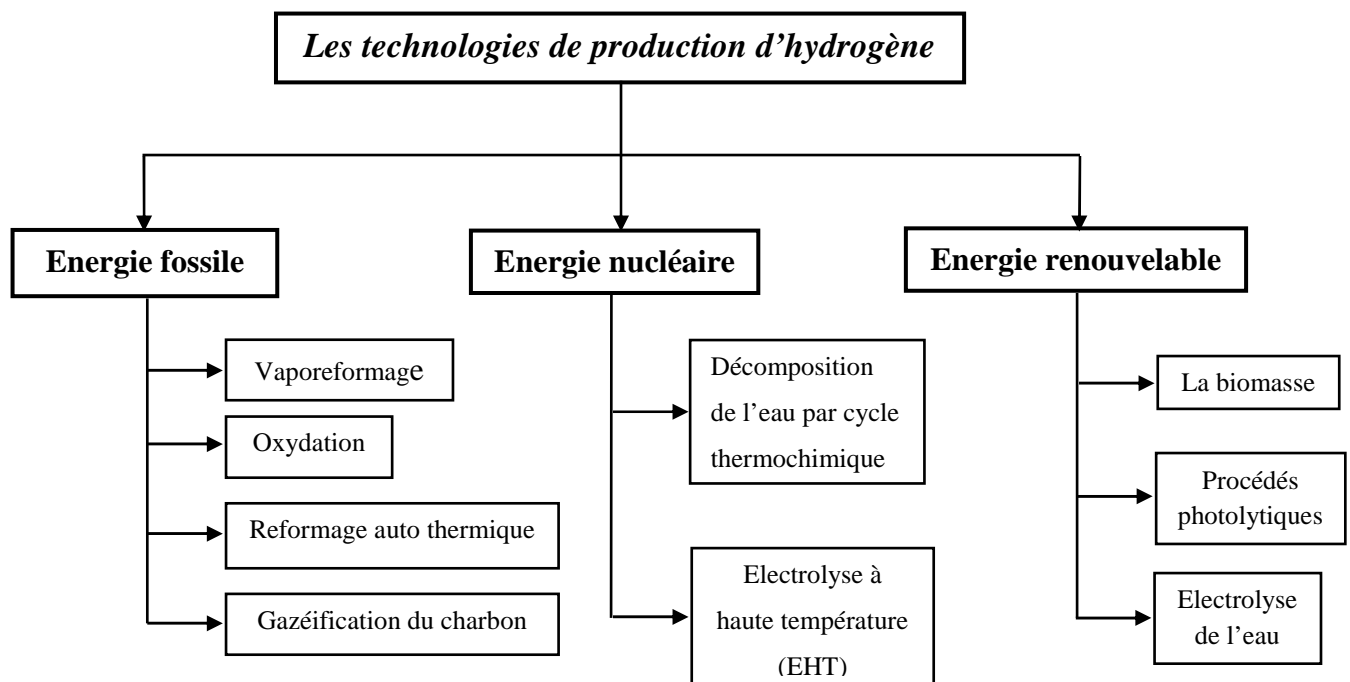
L'hydrogène est l'un des éléments les plus abondants de la planète. Mais, contrairement aux hydrocarbures, il n'existe pas de gisements permettant de l'extraire directement. Pour le produire, il est donc nécessaire d'avoir une source d'hydrogène à proprement parler (gaz naturel, eau, etc.) et une source d'énergie.

La source d'hydrogène et la source d'énergie peuvent se confondre, comme dans le cas d'une production à partir de gaz naturel, ou être complètement distinctes, comme c'est le cas dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau (la source d'énergie est l'électricité et la source d'hydrogène est l'eau).

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir [4]:

- ❖ la matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures.
- ❖ l'énergie nécessaire pour la production : cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale)
- ❖ 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.

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 économique et écologique satisfaisante. Ces processus peuvent être séparés en trois groupes de technologies :



**Figure I.1** : les différentes technologies de production d'hydrogène

Nous sommes intéressés à la production d'hydrogène par l'électrolyseur d'eau à l'aide de l'énergie renouvelable.

**I.5. La production d'hydrogène par l'électrolyse d'eau :**

C'est une méthode qui consiste à dissocier les atomes d'oxygène et d'hydrogène combinés dans les molécules d'eau à l'aide d'un électrolyseur.

**I.5.1. Définition d'électrolyseur :**

Un électrolyseur est l'appareil inverse de la pile à combustible ; consiste à faire passer un courant électrique dans l'eau pour que les molécules se séparent et forment du dihydrogène et l'oxygène.

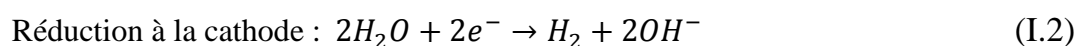
**I.5.2. Principe de fonctionnement :**

L'électrolyse de l'eau est un processus par lequel la molécule d'eau sera dissociée pour produire les éléments, hydrogène et oxygène, gazeux à l'état ambiant. La réaction globale est :

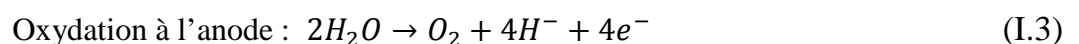


Cette réaction n'est pas spontanée ; elle sera produite en appliquant une différence de potentiel (tension électrique) entre deux électrodes.

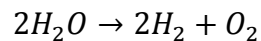
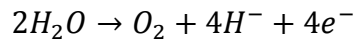
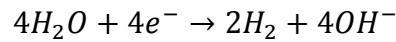
Le processus se produisant à l'électrode négative, la cathode, est la réduction. C'est le processus par lequel la molécule subit un gain en électron(s) et se divise en hydrogène ( $H_2$ ), en produisant un anion hydroxyde ( $OH^-$ ), selon la réaction suivante :



Le processus se produisant à l'électrode positive, l'anode, est l'oxydation. C'est le processus par lequel la molécule subit une perte en électron(s). Chaque molécule d'eau se divise alors en oxygène ( $O_2$ ) et produit un cation hydrogène ( $H^+$ ) en libérant des électrons qui se déplacent dans le circuit vers la cathode. La réaction est :



La somme des deux réactions (I, 2) et (I, 3) simultanées dans le circuit donne la réaction globale qui exprime l'électrolyse de l'eau ; pour balancer les électrons échangés, on doit multiplier l'équation de la réaction de réduction à la cathode par 2. Les ions  $H^+$  et  $OH^-$  se combinent pour former des molécules d'eau. Après addition et simplification, on obtient :



### I.5. 3. Les types d'électrolyseurs [5]:

Les trois types d'électrolyte sont décrits ci-dessous :

#### A. Electrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane):

La principale caractéristique de ce type d'électrolyseur est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Celui-ci assure la conduction des ions hydronium ( $H_3O^+$ ) produits à l'anode et permet la séparation de l'hydrogène et de l'oxygène produits. Les avantages de cette technologie sont la compacité, la simplicité du design de fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion, et des performances sensiblement supérieures au type alcalin. L'électrolyte n'étant pas liquide, cela leur permet de fonctionner à une densité de courant plus élevée que le type alcalin (de 1 à 2  $A.cm^{-2}$ ). Ils ont par ailleurs la capacité de faire face aux variations de courant ce qui rend les électrolyseurs PEM les plus adaptés pour transformer l'électricité en provenance de sources renouvelables telles que l'éolien et le solaire.

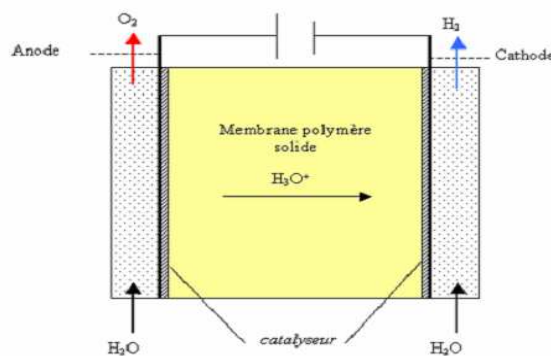
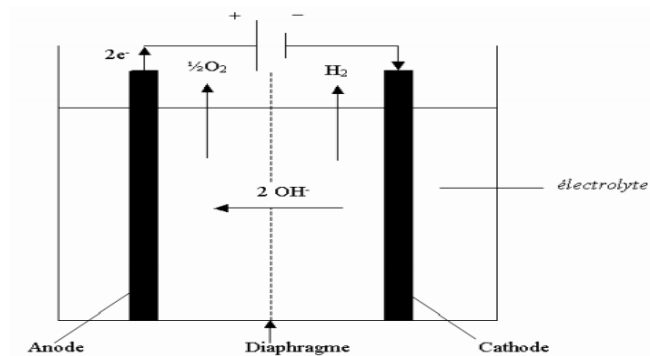


Figure I.2 : Electrolyseur PEM.

**B. Electrolyseur alcalin:**

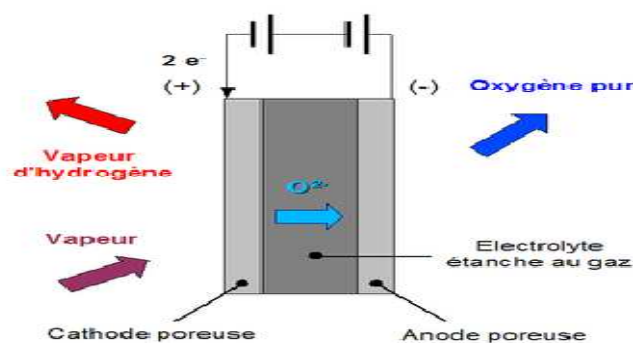
L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle. Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde ( $OH^-$ ) et potassium ( $K^+$ ). Ce type d'électrolyseur fonctionne relativement à faible densité de courant ( $<0,4 \text{ A.cm}^{-2}$ ). Ce qui favorise l'utilisation de ce type d'électrolyseurs, est le fait que leur fonctionnement ne fait pas appel aux catalyseurs chers basés sur le platine. Cela implique que leur prix est inférieur à celui à membrane.



**Figure I.3 :** Electrolyse Alcalin.

**I.5.3. C. Electrolyseur à haute température par SOEC (Solid Oxid Electrolyser Cell):**

Cet électrolyseur, dont l'électrolyte est également solide, est basé sur la conductivité anionique de céramiques telles que l'oxyde de zircon et l'oxyde de cérium. Le fait qu'il fonctionne à une température d'environ  $900^\circ\text{C}$ , permet de réduire la consommation spécifique d'électricité pour l'électrolyse par rapport aux deux autres types. Ce type d'électrolyte est actuellement en étude.



**Figure I.4:** Electrolyseur à haute température.

**I.6 Conclusion :**

L'hydrogène possède des propriétés particulières qui le rendent d'autant plus séduisant : le plus simple des éléments chimiques, le plus léger des gaz, le plus calorifique des combustibles et le plus abondant des éléments de l'univers [6]. L'hydrogène est un vecteur énergétique et non une énergie primaire (l'électricité). Il est nécessaire d'avoir des technologies capables de le produire ; Il existe plusieurs méthodes en cours de développement industriel ou à l'état de recherche, comme la production d'hydrogène à partir d'électrolyse d'eau basées sur les énergies renouvelables (PV). C'est une technique qui permet de dissocier les molécules d'eau pour produire l'hydrogène et l'oxygène. Après la production vient le stockage et le transport et enfin l'utilisation finale d'hydrogène.



# *CHAPITRE 2*

## *L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE*

## **II.1. Introduction :**

Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années.

La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

## **II.2. L'énergie solaire :**

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le soleil disparaîtra un jour...).

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques.

Indirectement, l'énergie solaire est aussi la source de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles. Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). Seules trois types d'énergie ne dérivent pas de l'énergie solaire :

- l'énergie marémotrice.
- l'énergie géothermique.
- l'énergie nucléaire.

L'évaluation de l'énergie solaire incidente sur un plan quelconque est effectuée par différents modèles qui font intervenir les composantes : directe, diffuse et réfléchie du rayonnement solaire. Pour calculer l'ensoleillement reçu pour une inclinaison de 0° (plan horizontal), puis pour une inclinaison égale à la latitude de la région d'Ouargla on utilise un programme de simulation « MATLAB » (voir annexe 1).

### II.2.1. Rayonnement solaire:

L'énergie solaire est l'énergie émise par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques (principalement entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ ) ou toute autre énergie obtenue par captage du rayonnement solaire.

#### II.2.1.1.Types de rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire atteint sur une surface sous trois formes :

##### II.2.1.1.A. Le rayonnement direct :

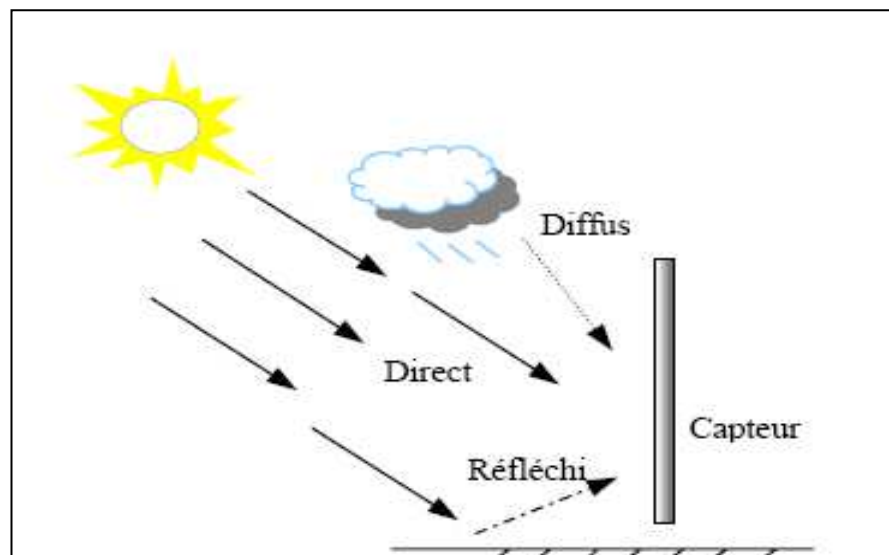
C'est la part du rayonnement provenant directement des rayons solaires ;

##### II.2.1.1.B. Le rayonnement diffus :

Multidirectionnel, il provient de la diffusion de la lumière par les nuages ou par les particules de l'atmosphère;

##### II.2.1.1.C. Le rayonnement réfléchi :

C'est le rayonnement réfléchi par les surfaces environnantes, sol, bâtiments proches, végétation.



**Figure II.1 :** Les formes du rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi.

### **II.3 Les éléments d'un système de captage photovoltaïque (PV) :**

Un système photovoltaïque (PV) est destiné à satisfaire un besoin d'énergie électrique selon des conditions spécifiques d'exploitation. Il est généralement constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage, des systèmes d'interface (convertisseurs, etc..) d'un système de control et de commande (armoires électriques, cartes électroniques..) et d'une utilisation courant un usage déterminé. Cet usage (éclairage, pompage, ...) est exploité dans divers secteurs (santé, éducation, agriculture, énergie...).

La partie principale dans ces installations est le générateur photovoltaïque. Il est composé de divers modules formés par une association série/parallèles de cellules élémentaires convertissant l'énergie solaire (sous formes de rayonnement) en une énergie électrique. La durée de vie d'un tel générateur est estimée à plus de 20 ans.

La topologie d'un système PV est déterminée selon d'une part la nature de l'utilisation (nombre de récepteurs, contrainte d'exploitation, sécurité énergétique,..) et d'autre part des considérations technico-économiques prenant en compte aussi bien le rendement énergétique que la taille de l'investissement.

#### **II.3.1. Générateur Photovoltaïques :**

##### **A. La cellule solaire :**

La cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériau semi-conducteur comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière ; La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques.

Une cellule peut produire 1.5 W pour un ensoleillement de  $100 \text{ W/m}^2$  avec une tension de 0.6 V.

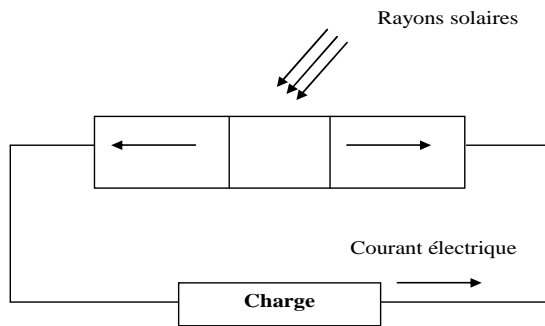


Figure II.2 : Cellule solaire.

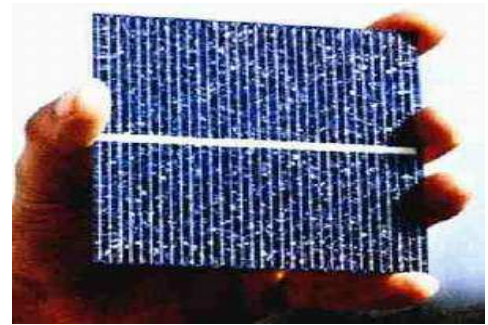


Figure II.3 : Cellule photovoltaïque.

### A.1. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs qui produisent un courant électrique sous l'effet de photons lumineux. L'absorption d'un photon par le semi-conducteur donne naissance à une paire d'électron trou lorsque son énergie est supérieure à celle de la largeur de la bande interdite du matériau. Le champ électrique interne à la jonction, entraîne alors le trou vers la région P et l'électron vers la région N.

Par tapage du semi conducteur de région de type P et de type N ; la cellule solaire est donc une jonction P-N avec des diverses parties représentées sur le schéma de la figure suivante :

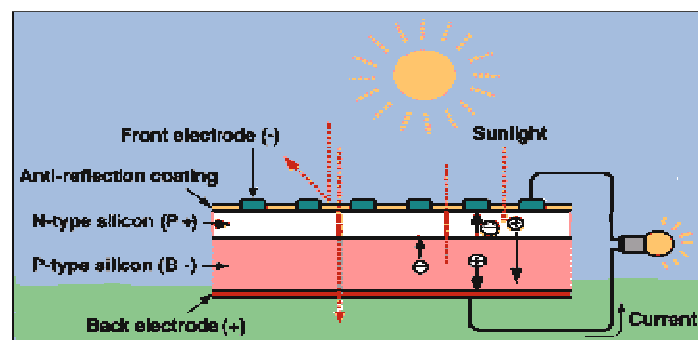
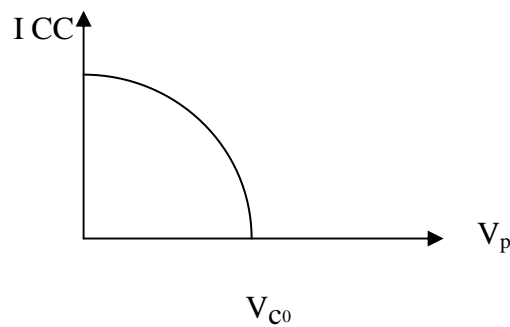


Figure II.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

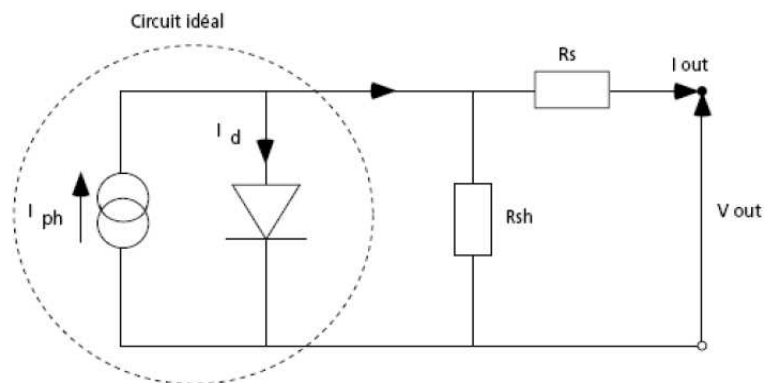
Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques s'appelle la photoconductivité : il s'explique par la propriété que présente le silicium à contenir quatre électrons relativement mobiles dotés d'une faible énergie de liaison. Dans l'obscurité,

les électrons sont peu mobiles; à la lumière, les photons absorbés par le silicium apportent une telle énergie que la mobilité des électrons du matériau s'en trouve fortement accrue, ce qui se traduit par une augmentation de la conductivité du matériau. Le principe de ce photo-courant est le suivant : les électrons tournent autour du noyau sous l'effet de la lumière ; les électrons de la couche périphérique des atomes sont « arrachés » sous l'action du choc d'un photon. Les électrons « décrochés » des atomes créent ainsi un courant continu directement utilisable aux bornes de la cellule photovoltaïque, sous une tension électrique continue.

Les caractéristiques du courant  $I = f(V)$  d'une cellule photovoltaïque peuvent être schématisées comme suit :



**Figure II.5:** L'allure de la caractéristique Courant tension d'une cellule PV au silicium.



**Figure II.6:** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Pour la cellule idéale. L'intensité  $I$  en fonction de la tension  $V$  aux bornes d'une cellule est :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp(C_1(V + R_s I) - 1)] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$C_1 = \frac{q}{A \cdot K \cdot T_c} \quad (\text{II.2})$$

A : Facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 3$ ).

$I_{ph}$ : Photo-courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

$I_0$  : Courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.

$R_p$ : Résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

$R_s$  : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmique et de contact au niveau des connexions des cellules.

q : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)

K : Constant de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K).

$T_c$  : Température de jonction (K).

Les études récentes se montrent que la résistance  $R_p \gg \gg R_s$  .

Donc le terme  $\frac{V+I R_s}{R_p}$  va être négligé. Alors l'équation pour un module devient :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp (C_1 (V + R_s I) - 1)] \quad (\text{II .3})$$

## A.2. Type des cellules Photovoltaïques :

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents. Les principales technologies industrialisées en série à ce jour sont le silicium mono-ou poly-cristallin et le silicium en couche mince.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Pour le rendre opérationnel, il doit subir au préalable une série de traitements:

- Un procédé de raffinage permettant la réduction du silicium, procédé dit métallurgique pour le rendre pur à 99 %;
- Suivi d'une seconde purification chimique pour lui donner toutes les qualités électroniques nécessaires.

### **B. Le module solaire:**

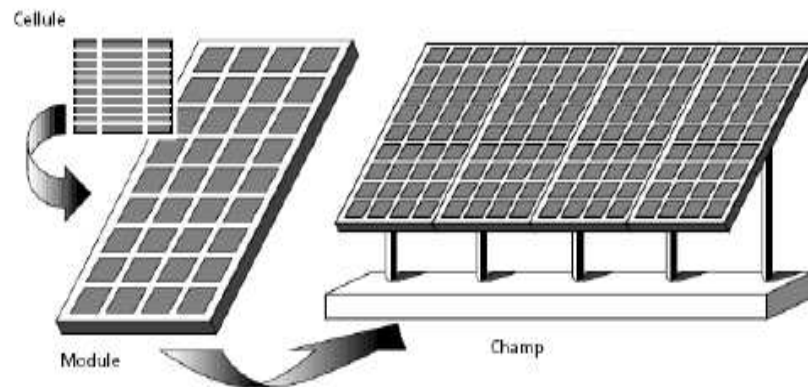
Les cellules photovoltaïques sont raccordées entre elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15 % de l'énergie solaire reçue. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à l'ombrage, et la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente. On protège les modules avec des diodes by-pass afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées.

Un module de 36 cellules produit une puissance moyenne de 40 à 50W et occupe une surface de  $0.5\text{m}^2$  environ. Le rendement énergétique moyen est de l'ordre de 12 à 15% est à atteint pour une phase de recherche 30%.

### **C. Le champ photovoltaïque :**

Un champ photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée. Un panneau de  $1\text{m}^2$  fournit une puissance de 100 W et produit de 80 à 150 kWh/an.





**Figure II.7:** Cellules, module et panneau photovoltaïques [1].

### II.3.2. Système de Régulateur :

Pour une utilisation en courant continu, un régulateur électronique assure la charge d'une batterie d'accumulateurs (généralement en 12 V pour les petites installations). Il permet d'arrêter la charge des batteries lorsque celles-ci sont complètement chargées et de couper le courant dans le circuit de consommation avant que les batteries ne soient complètement déchargées.

### II.3.3. Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur DC/DC). Soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur DC/AC), utilisé lorsque le champ photovoltaïque est raccordé au réseau électrique.

### II.3.4. Système de stockage [7]:

Dans les systèmes photovoltaïques, la présence d'un dispositif de stockage d'électricité est alors indispensable pour pallier le caractère intermittent du générateur photovoltaïque. Sa principale fonction est d'accumuler l'électricité excédentaire produite par le générateur et, lorsque la production de ce dernier est déficitaire, de fournir le complément d'énergie nécessaire à l'utilisateur.

Il existe plusieurs méthodes de stockage d'énergie produite, mais pour un système photovoltaïque, le moyen de stockage utilisé couramment est le stockage électrochimique

(batteries). Cette technologie bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le marché.

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont : les accumulateurs au plomb acide (rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%) et les accumulateurs au Nickel- cadmium (rendement énergétique est de l'ordre de 70%).

### **II.3.5. La charge :**

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique.

## **II.4. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques [8]:**

### **II.4.1. Les avantage :**

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### **II.4.2. Les inconvénients :**

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

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

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

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément, ce qui permet d'introduire au dimensionnement de ce système, chose qu'on va présenter dans le chapitre 3.

# *CHAPITRE 3*

*ETUDE ET DIMENSIONNEMENT  
D'UNE INSTALLATION  
PHOTOVOLTAÏQUE  
POUR LA PRODUCTION  
D'HYDROGÈNE*

### **III.1. Introduction :**

Le dimensionnement d'une installation a pour objectif de fixer les modalités de construction, en fonction de critères techniques (choix de la technologie, disposition détaillée du champ de capteurs, mode de montage, etc.).

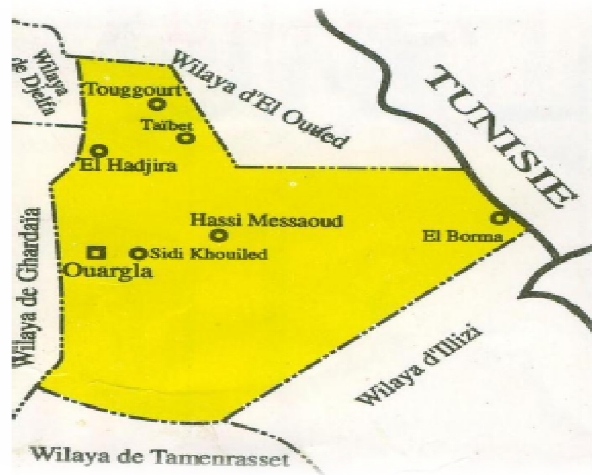
Le but de ce chapitre est d'étudier et de dimensionner une installation solaire de production d'hydrogène. Nous avons établi un modèle mathématique à l'aide d'un programme de simulation «MATLAB» qui permet de dimensionner les éléments principaux de l'installation de production d'hydrogène en introduisant les caractéristiques techniques nécessaires ainsi que les paramètres météoro-logiques du site.

Une fois le modèle est établi, nous avons effectué une étude comparative de deux installations, dans la première la position des panneaux solaire est horizontale, alors que dans la deuxième les panneaux solaire a une position incliné avec un angle de 31°. Une comparaison d'irradiation moyenne annuelle de chaque installation nous permettons de choisir la meilleur position des panneaux qui donne la meilleur production d'hydrogène.

Pour effectuer cette étude, nous basons sur les anciennes expériences qui sont faite au niveau de laboratoire de Valorisation et Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS), à l'université Kasdi Merbah Ouargla.

### **III.2. Présentation du site :**

La wilaya d'Ouargla située au Sud-est de L'Algérie, couvrant une superficie totale de 211 80 Km<sup>2</sup> et une population de 541 045 habitants (Estimation 2007). Est limitée : Au Nord : par les wilayas de Djelfa et D'El oued ; a l'Est : Par la Tunisie ; Au Sud : par les wilayas de Tamanrasset et d'Illizi ; A l'Ouest : Par la wilaya de Ghardaïa, La wilaya d'Ouargla est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduite Et des températures élevées, notamment en été. Le pétrole et l'énergie Les principales ressources énergétiques du pays se trouvent dans le sous-sol de la Wilaya de Ouargla dans la région de Hassi Messaoud où l'exploitation a commencé en 1956. Depuis de nouvelles découvertes ont été faites dans les bassins de Gassi Touil, Berkaoui et Ghourd El Baguel.



**Figure III.1:** Situation de la Wilaya d’Ouargla [1].

Pour le site d’Ouargla, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes [9] :

**Tableau III.1:** Spécifications du site d’Ouargla.

Spécifications	Valeur
Altitude	141m
Albédo	0,35
Latitude	31°
Longitude	5°24'E

### III.3.Rayonnement solaire :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l’évolution du rayonnement solaire disponible dans un site donné et au cours d’une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l’irradiation solaire. Le principal facteur climatique à étudier est l’énergie incidente, très dépendante des caractéristiques géographiques du site (latitude, longitude, altitude). Le dimensionnement énergétique du système photovoltaïque sera établi par un code de calcul « MATLAB » préparé à cet effet, voir annexe 1.

Certains principes de base et définitions méritent d’être rappelés. Nous commençons par la présentation de quelques notions fondamentales d’astronomie utilisées pour calculer les trois composantes des radiations solaire :

### III.3.1. La déclinaison du soleil ( $\delta$ ):

La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial. La déclinaison varie entre  $-23.45^\circ$  (le 21 décembre) et  $+23.45^\circ$  (le 21 juin).

$$\delta = 23.45 \cdot \sin 2\pi(284 + n)/365 \quad (\text{III.1})$$

Où :

$n$  : est le numéro de jour dans l'année (c.-à-d.  $n = 1$  pour le 1er janvier,  $n = 32$  pour le 1<sup>er</sup> février... etc.).

### III.3.2. L'angle horaire du soleil ( $\omega$ ) :

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local.

La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (donc un tour de  $360^\circ$  en 24 heures).

### III.3.3. Latitude ( $\varphi$ ) :

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère sud d'un signe négatif. Nous prenons celle d'Ouargla  $\varphi = 31^\circ 57' Nord$ .

### III.3.4. Longitude ( $\lambda$ ):

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'ouest négatives. Nous prenons celle d'Ouargla:  $\lambda = 5^\circ 19'$  est.

### III.3.5. Position du soleil :

Pour déterminer la position du soleil par rapport au plan horizontale on utilise ces coordonnées :

### III.3.5.A. L'azimut ( $\psi$ ) :

C'est l'angle formé par projection de la direction du soleil et la direction du sud. Il est signé positif à l'ouest (le matin) et négatif à l'est (le soir). Sa valeur est obtenue lorsque le soleil se couche (suivant la hauteur angulaire du solaire, et l'inclinaison du panneau). Dans notre cas, nous écrivons ( $\psi$ ) lorsque la hauteur angulaire  $\sin \gamma$  passe en négatif si le panneau est horizontal (le soleil se couche), ou lorsque  $|\psi| > 45^\circ$  dans le cas où le panneau est incliné à  $45^\circ$  (le soleil passe derrière le panneau).

$$\tan(\psi) = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varphi) - \cos(\varphi) \sin(\omega)} \quad (\text{III.2})$$

### III.3.5.B. La hauteur angulaire ( $h$ ) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. Cette angle s'annule au lever et au coucher du soleil et prend sa valeur maximale au midi solaire. ( $h$ ) Peut être déduite par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin \psi \cdot \sin \delta + \cos \psi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (\text{III.3})$$

L'angle horaire  $\omega_s$  au lever de soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$

$$\cos \omega_s = -\tan \psi \tan \delta \quad (\text{III.4})$$

### III.3.6. Position du capteur :

III.3.6.1. L'orientation ( $\alpha$ ) du capteur par rapport au sud, ( $0^\circ$  au sud,  $180^\circ$  au nord,  $+90^\circ$  à l'ouest et  $-90^\circ$  à l'est). Dans notre cas, cette variation est mise à zéro.

III.3.6.2. L'inclinaison ( $\beta$ ) du capteur par rapport au sol ( $0^\circ < \beta < 90^\circ$ ). Elle est nulle pour ce qui est du plan horizontal dans le calcul du premier angle d'incidence puis de  $45^\circ$  pour le second.

III.3.6.3. L'angle d'incidence ( $\theta$ ) des rayons solaires par rapport à la normal au capteur. Une relation trigonométrique permet de déterminer sa valeur en fonction des autres angles:

$$\cos(\theta) = \cos(\gamma) \cdot \sin \beta \cdot \cos(\psi - \alpha) + \sin(\gamma) \cos(\beta) \quad (\text{III.5})$$



### III.3.7. Le jour type du mois :

Pour une grandeur donnée, le jour type du mois est le jour du mois qui se rapprochant de la moyenne mensuelle de cette grandeur [9].

La liste des jours types proposés par Klein est représentée sur le tableau suivant :

**Tableau III.2** : Liste des jours types par mois proposés par Klein.

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Jour type</b>	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
<b>N°de jour</b>	17	45	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
<b>Jour du mois</b>	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

### III.3.8. Taux d'insolation [9]:

Pendant la durée de jour d'enseillement  $d_0$  (de lever au coucher du soleil) et par ciel claire, le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'enseillement  $d$  d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale. Le taux d'insolation est donné par l'expression :

$$\sigma = d/d_0 \tag{III.6}$$

$\sigma$  Taux d'insolation

$d$  Durée d'insolation journalière (mesurée) (h)

$d_0$  Durée astronomique du jour (h)

La durée maximale  $d_0$  est calculée par l'expression suivante :

$$d_0 = \left(2/15\right) \cos^{-1} (-\tan \psi \tan \delta) \tag{III.7}$$

$\psi$  La latitude du lieu (°)

**Tableau III.3:** Valeur moyenne mensuelle d'ensoleillement [9].

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>d (h/j)</b>	8.6	9.2	9.4	10.1	9.6	10.8	11.8	11.2	9.5	9.1	8.9	7.08

**III.3.9.L'irradiation solaire :**

La méthode de dimensionnement est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible à l'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques par rapport au plan horizontal. Ce dernier doit se faire de manière à optimiser la conversion de l'énergie solaire en électrique.

**III.3.9.1.L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale  $H_h$  :**

A partir de la mesure de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière globale, on estime l'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface horizontale  $H_h$ . Pour calculer ce dernier, on utilise l'équation suivante :

$$H_h = K \cdot H_0 \tag{III.8}$$

K : Indice de clarté

$$K = 0.3 + 0.43 \cdot \sigma \tag{III.9}$$

$\sigma$  : Taux d'insolation

$$\sigma = d / d_0 \tag{III.10}$$

Durée maximum de jour d'ensoleillement ( $d_0$ ) :

$$d_0 = (2/15) \cos^{-1}(-\tan \psi \cdot \tan \delta) \tag{III.11}$$

$H_0$  :L'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère

$$H_0 = \frac{24 \cdot G}{\pi} \cdot (\cos(\beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \omega_s \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\beta)) \tag{III.12}$$

$\beta$ : Inclinaison

$$\beta = 31 \cdot \pi / 180 \tag{III.13}$$

G: constante solaire,  $1367w/m^2$

**Moyenne annuelle sur plan horizontal ( $H_{h(Annuelle)}$ ):**

$$H_{h(Annuelle)} = (360/12) \cdot \sum H_h \quad (III.14)$$

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau III.4:** Irradiation journalière moyenne mensuelle sur un plan Horizontal ( $H_h$ ) .

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin
$H_h(KW h/jm^2)$	3803.4	4684.7	5575.9	6522.6	7175.3	7518.7
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$H_h(KW h/jm^2)$	7577.7	7212	5832.9	4875.5	4033.6	3237.4
$H_h(\frac{KWh}{m^2an})$	2069.84504					

**III.3.9.2.L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée  $H_i$  :**

Les panneaux solaires peuvent être installés au sol ou sur la toiture orientés vers le sud et à l'écart des zones ombragées. Ils devraient présenter un angle de telle sorte que la surface de captation soit perpendiculaire au rayonnement solaire. Pour calculer l'irradiation journalière mensuelle sur une surface inclinée on doit utiliser l'équation suivante:

$$H_i = (H_h - H_d) \cdot R + H_d \cdot (1 + \cos(\beta))/2 + H_h \cdot \rho \cdot (1 - \cos(\beta))/2 \quad (III.15)$$

$\rho$  : L'albédo du sol ; 0,35

$H_d$  : La composante diffuse

$$H_d = K_d \cdot H_h \quad (III.16)$$

$$K_d = 0.91 - 0.98 \cdot K \quad (III.17)$$

R : Facture de conversion donnée

$$R = \frac{\cos(\psi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_s + \omega'_s \cdot \sin(\psi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \psi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \omega_s \cdot \sin \psi \cdot \sin \delta} \quad (III.18)$$

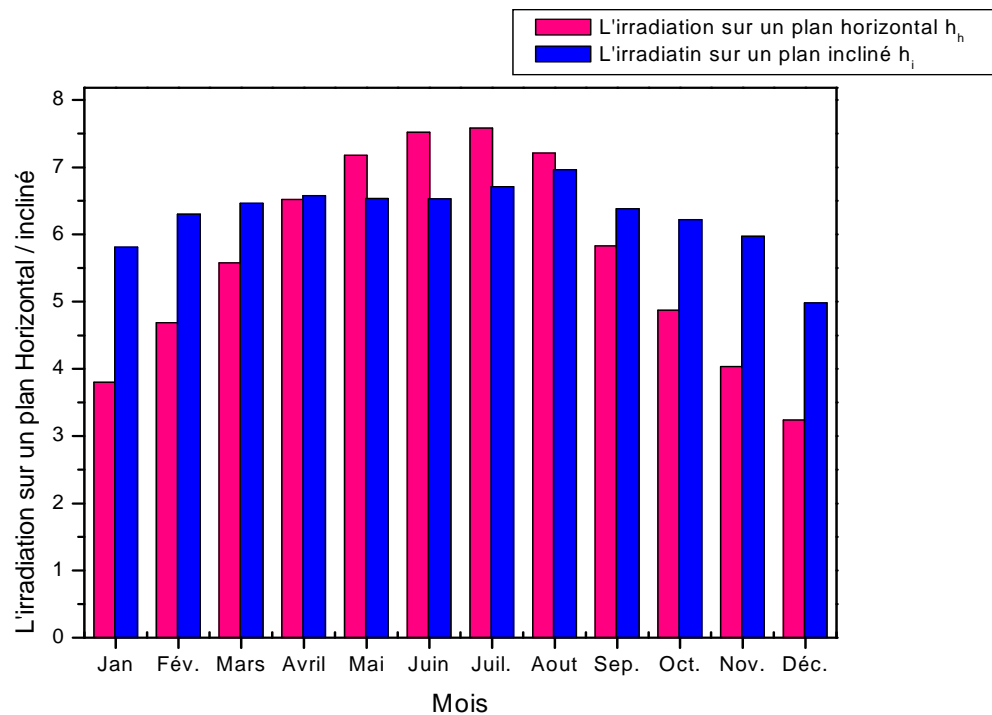
Moyenne annuelle sur plan incliné ( $H_{i(Annuelle)}$ ):

$$H_{i(Annuelle)} = \left(\frac{365}{12}\right) \cdot \sum H_i \tag{III.19}$$

Les valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation globale incidente sur un plan incliné sont présentées sur le tableau ci-dessous pour  $\rho = 0,35$ ,  $\beta = \psi$  (la latitude géographique de lieu).

**Tableau III.5 :** Irradiation journalière moyenne mensuelle sur un plan incliné avec  $31^\circ H_i$ .

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin.
$H_i$ (KW h / $jm^2$ )	5808.4	6298.7	6463.1	6574.8	6534.6	6531.1
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$H_i$ (KWh / $jm^2$ )	6707.8	6960.8	6379.6	6220.2	5969	4980.6
$H_i$ ( $\frac{KWh}{m^2an}$ )	2294.289					



**Figure III.2:** l'irradiation sur un plan incliné et l'irradiation sur un plan horizontale.

L'étude comparative des courbes et des résultats de calcul de la moyenne annuelle d'irradiation sur un plan incliné  $H_i$  et l'irradiation sur un plan horizontal  $H_h$  nous permettons

de choisir la meilleur position des panneaux .Nous nous remarquons que l'irradiation sur un plan incliné et mieux que l'irradiation sur un plan horizontal . Ces pour cela on a choisit Le ( $H_i$ )avec un degré d'inclinaison  $31^\circ$ .

### III.4. Les composants d'un système de production d'hydrogène Photovoltaïque :

Le système que nous avons étudié est composé d'un champ photovoltaïque et un générateur de l'hydrogène et un réservoir d'eau.

#### III.4.1. Le champ photovoltaïque :

Le champ photovoltaïque est constitué de l'ensemble des panneaux photovoltaïques, des liaisons électriques qui les régissent ainsi que des supports sur lesquels ils sont installés. Lorsque l'on parle de champ photovoltaïque on parle de l'installation complète des panneaux sur le toit ou au sol.

Il existe de nombreux types de champs photovoltaïques. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de chez BP Solaire. La série SX de BP Solaire [10] fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 36 cellules solaires poly cristallin en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 50 W. Les caractéristiques de ce type des panneaux PV sont représentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.6:** Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques.

Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques	
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	50 W
Tension à $P_{max}$ ( $V_{pm}$ )	17,39 V
Courant à $P_{max}$ ( $I_{pm}$ )	2,87 A
Courant de court circuit ( $I_{sc}$ )	3,15 A
Tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	21,35 V
Coefficient de température de $I_{sc}$ , $\alpha$	1.48 A/ $^\circ$ C
Coefficient de température de $V_{oc}$ , $\beta$	-2.3 V/ $^\circ$ C
NOCT	45,3

On trouve plusieurs manières de mettre en relation les panneaux, autrement dit les moyens de créer ces fameuses liaisons entre eux. Ces liaisons sont électriques elles sont donc classiquement comme dans toute installation en électricité, en parallèle, en série ou encore

sous une configuration utilisant les deux. Les interactions entre les panneaux dépendent souvent du lieu et des contraintes du terrain où l'on souhaite installer le champ.

### III.4.1.A. Rendement des panneaux photovoltaïques :

Il est à noter que le rendement d'un panneau photovoltaïque est plus faible que celui d'une cellule photovoltaïque cause aux différentes pertes. Pour un rendement de référence  $\eta_r$  égal à 11.11%. On présente dans le tableau suivant le domaine de variation du rendement PV pour quelque type des panneaux.

**Tableau III.7** : Domaine de variation du rendement PV.

Paramètre	Limite inférieure	Limite supérieure
Silicium mono-cristalline $\eta_{PV}$	12	18
Silicium poly-cristalline $\eta_{PV}$ (%)	11	15
Amorphe $\eta_{PV}$ (%)	7	10

Le rendement de générateur photovoltaïque est calculé à partir l'équation suivante :

$$\eta_{PV} = F_m [1 - \gamma \cdot (T_c - T_0)] \cdot \eta_r \tag{III.20}$$

Avec :

$\eta_r$  : Rendement de référence du module sous CSM, %

$$\eta_r = P_{mod} / A \cdot G_o \tag{III.21}$$

$F_m$  : Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximale. Généralement on utilise un MPPT (Maximum Power Point Tracking) dont le facteur de couplage égal à 0,9.

$\gamma$ : Coefficient de température des cellules.  $\gamma$  prend des valeurs entre 0,004 et 0,005 /°C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

$T_c$  : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement, °C

On peut les calculé a partir de l'équation suivante :

$$T_c = T_a + (G_m/800) \cdot (NOCT - 20) \tag{III.22}$$

Avec :

$T_a$ : La température ambiante (°C).

NOCT: 45,3.

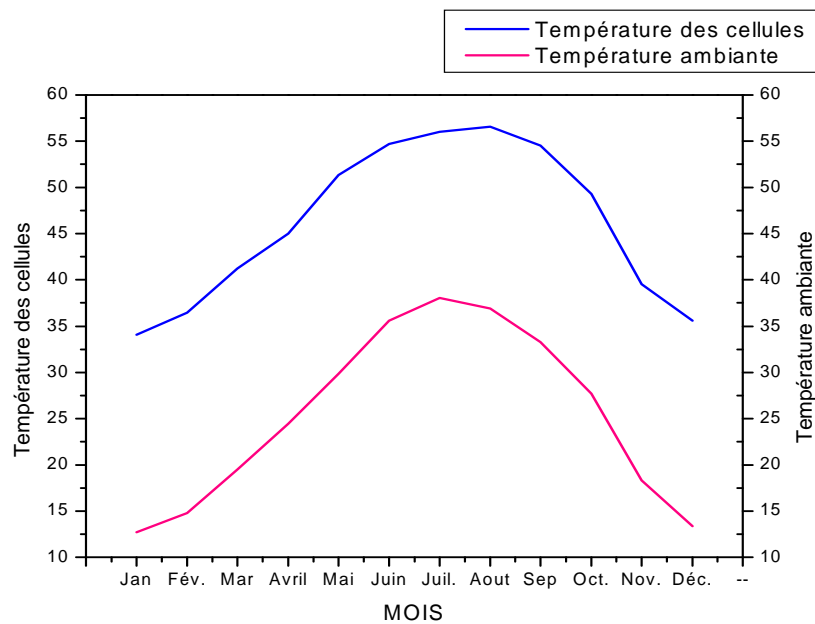
$T_0$  : Température dans les conditions standards de mesure, 25 °C.

$G_m$ : Éclairement mensuelle sur un plan incliné (31°) ( $kW / m^2$ ) .

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.8:** Variation mensuelle de la température ( $T_c$  ,  $T_a$  ) (°C) et l'éclairement  $G_m(W/m^2)$ .

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin
$G_m(W/m^2)$	675.39	684.64	687.56	650.97	680.68	604.73
$T_a$ (°C)	12.7	14.79	19.49	24.44	29.85	35.58
$T_c$ (°C)	34.05	36.44	41.23	45.02	51.37	54.70
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$G_m(W/m^2)$	568.45	621.5	671.53	683.53	670.67	703.47
$T_a$ (°C)	38.05	36.91	33.28	27.7	18.33	13.35
$T_c$ (°C)	56.02	56.56	54.51	49.31	39.54	35.59



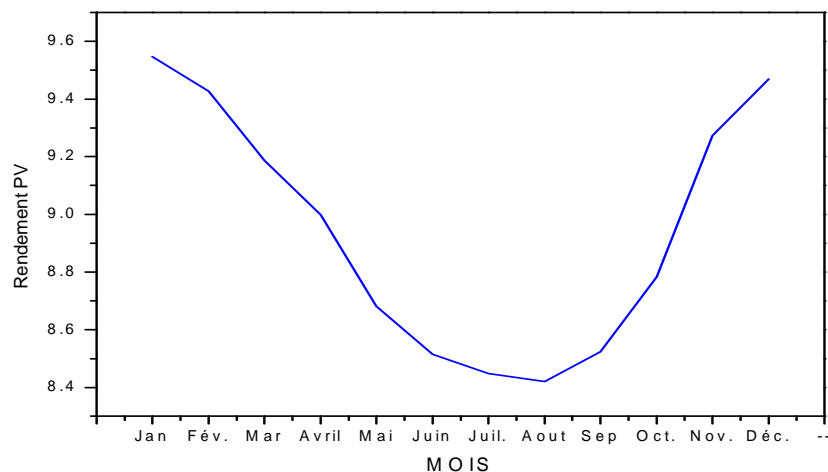
**Figure III.3 :** Variation mensuelle de température des cellules et de température ambiante.

Les températures sont de type saharien. Nous remarquons que les températures mensuelles enregistrées au mois le plus chaud (juillet, aout) sont de 35,58° C à 38,05° C. Alors que celles du mois le plus froid (janvier, décembre) sont de 12,7 °C à 13,35° C (tableau III.8).

Après le calcul de toute les inconnues précédents on peut maintenant calculer les valeurs du rendement photovoltaïque qui apparaissent dans le tableau suivant :

**Tableau III.9:** Rendement des panneaux photovoltaïques  $\eta_{pv}$ .

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$\eta_{pv}\%$	9.54	9.426	9.18	8.99	8.68	8.44	8.42	8.52	8.78	9.27	9.46



**Figure III.4:** Rendement des panneaux photovoltaïques  $\eta_{PV}$ .

La figure (III.4) représente le rendement des panneaux solaire, on peut remarquer d'après les calculs et la courbe précédente que à chaque fois la température augmente le rendement des panneaux solaire sera diminuer. C'est pour sa on doit choisir et travailler avec des panneaux qui ont un rendement considérable (très élevé).

### III.4.2. Le générateur de l'hydrogène :

L'énergie obtenue à partir les panneaux solaire sera envoyée à l'électrolyseur pour la production d'hydrogène. Différents types d'électrolyseur existent, avec différents niveaux d'avancement. Dans cette étude on a utilisé un électrolyseur alcalin modèle 8.00 qui a une capacité de production de 5,3 Nm<sup>3</sup>/h d'hydrogène et une consommation électrique totale de 30,5 kWh. Il est bénéficié d'un rendement élevé, cycle de vie plus élevé et une bonne aptitude



aux systèmes d'énergie renouvelable. Les caractéristiques d'électrolyseur utilisé sont présentées sur le tableau suivant :

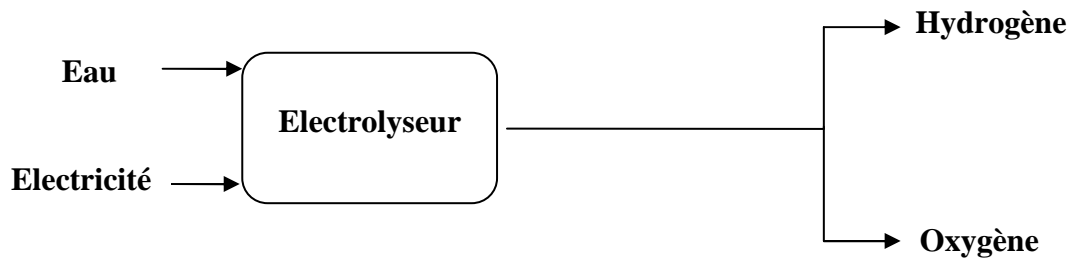
**Tableaux III.10:** Les caractéristiques d'électrolyseur Alcalin de type 8.00.

<b>Les Caractéristiques d'électrolyseur Alcalin 8.0</b>	
<b>Production d'hydrogène</b>	5.3Nm <sup>3</sup> /h
<b>Consommation électrique totale</b>	30.5 KW/h
<b>La consommation d'eau déminéralisée</b>	4.6 l/h
<b>Pureté de l'hydrogène</b>	Standard 99.3-99.5% Option jusqu'à 99.9995%
<b>Température d'environnement</b>	5-35°C
<b>Longueur</b>	850 mm
<b>Profondeur</b>	1300mm
<b>Hauteur</b>	1800 mm
<b>poids</b>	580Kg
<b>Rendement électrique</b>	61%



**Figure III.5 :** Électrolyseur Alcalin de type 8.00.

Un schéma simple représenter ci-dessous nous aide à comprendre le fonctionnement d'électrolyseur :



**Figure III.6 :** Fonctionnement d'électrolyseur.

### III.4.2.1. La quantité d'hydrogène désiré à produire ( $P_{H_2}$ ) :

Pour déterminer la quantité mensuelle d'hydrogène désiré à produire pendant des durées d'ensoleillement on utilise l'expression suivante :

La quantité d'hydrogène journalière désiré à produire :

$$P_{H_2} = 5,3. d \left( \frac{Nm^3}{j} \right) \quad (III.23)$$

La quantité d'hydrogène mensuelle désiré à produire :

$$P_{H_2} = 5,3. d. \text{ Jour du mois } ( Nm^3) \quad (III.24)$$

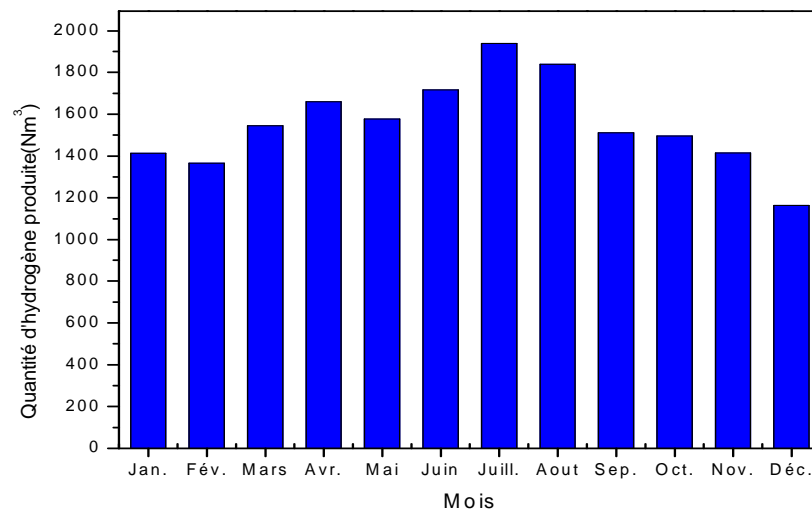
Avec :

$d$  : durée d'ensoleillement( $h/j$ ).

Si on exploite toute l'irradiation solaire moyenne mensuelle journalière on obtient les résultats représenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.11:** La quantité d'hydrogène désiré à produire.

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin
$P_{H_2} (Nm^3)$	1412.98	1365.28	1544.42	1659.43	1577.28	1717.2
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$P_{H_2} (Nm^3)$	1938.74	1840.16	1510.5	1495.13	1415.1	1163.244



**Figure III.7:** la production d'hydrogène désiré pour chaque mois.

La figure (III.7) représente la quantité d'hydrogène désirée à produire mensuellement, on constate que pour les deux mois juillet et août elle été très élevé parce que la durée de fonctionnement dans ces deux mois est très longue par rapport au autres mois.

Une fois la quantité d'hydrogène mensuelle désirée à produire est connue, nous pouvons déduire l'énergie électrique nécessaire pour l'électrolyseur (la consommation d'eau est proportionnelle à la production d'hydrogène et donc à la puissance absorbé par l'électrolyseur).

#### III.4.2.2. Le besoin énergétique photovoltaïque:

C'est l'énergie nécessaire pour le fonctionnement de l'électrolyseur. Pour avoir cette quantité d'énergie on prend en considération le rendement électrique d'électrolyseur on doit fournir une énergie plus élevé dont il a besoin. Le besoin énergétique d'électrolyseur au cours des durées de fonctionnement est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{ch} = d \cdot C \quad (III.25)$$

Pour connaitre le besoin énégetique on utilise l'équation suivante:

$$E_e = E_{ch} / \eta_e \quad (III.26)$$

Avec :

$E_{ch}$  : L'énergie nécessaire pour le fonctionnement de l'électrolyseur (KWh/j).

$E_e$  : Le besoin énergétique photovoltaïque (KWh/j).

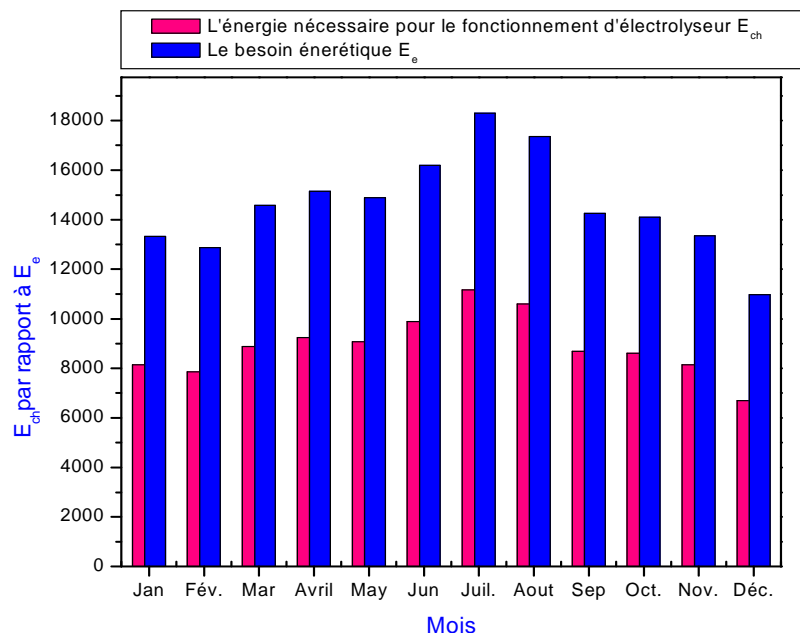
C : Consommation électrique totale d'électrolyseur (Alcalin) ,30,5 KWh.

$\eta_e$ : Le rendement électrique, 61%.

Afin de faciliter le processus de calcul ont été utilisés le programme de simulation « Matlab » voir annexe -2-. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous:

**Tableau III.12:** le besoin énergétique de l'électrolyseur et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyse journalière.

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai.	Juin
$E_{ch}(KWh/j)$	262.3	280.6	286.7	308.05	292.8	329.4
$E_e(KWh/j)$	430	460	470	505	480	540
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$E_{ch}(KWh/j)$	359.9	341.6	289.75	277.55	271.45	215.94
$E_e(KWh/j)$	590	560	475	455	445	354



**Figure III.8:** Le besoin énergétique mensuelle consommé par l'électrolyseur et délivré par les panneaux.

La figure (III.8) présente l'énergie nécessaire pour le fonctionnement et le besoin énergétique d'électrolyseur mensuellement. On prend en considération le rendement électrique d'électrolyseur, nous remarquons que le besoin énergétique est très grand par rapport à l'énergie de fonctionnement.

### III.4.3. Réservoir d'eau :

D'après les caractéristiques précédentes d'électrolyseur alcalin on enregistre une consommation d'eau déminéralisée estimée à 4,6 l/h. Un réservoir de 60 l/j est suffisant pour couvrir le besoin d'eau déminéralisé.

### III.5. Taille du générateur photovoltaïque :

Dans notre étude le dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque à pour but de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque et le nombre de module nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur (surface), à partir des données d'ensoleillement du lieu. On peut résumer la démarche dans le schéma suivant :

Données d'entrée	
<b>Caractéristiques du module photovoltaïque</b>	
$P_{mod}$	Puissance crête du module
NOCT	Température nominale de fonctionnement de la cellule PV
$A_{mod}$	Surface de module
$\gamma$	Coefficient de température
<b>Condition climatiques de site</b>	
$H_i(\beta)$	L'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan incliné
$T_a$	La température ambiante moyenne journalière
<b>Caractéristiques de la charge utilisée</b>	
$F_m$	Facteur de couplage
$E_{ch}$	Consommation de la charge
$P_{H_2}$	Calcul de la quantité d'hydrogène désiré à produire
↓	
Calcul de rendement de référence de module, $\eta_r$	
↓	
Calcul de la température moyenne journalière des cellules, $T_c$	
↓	
Calcul de rendement moyen journalier du générateur, $\eta_{pv}$	
Calcul de la puissance crête, qui doit avoir le générateur, $P_c$	
Calcul du nombre total de module, $N_{mod}$	

**Figure III.9 :** Les étapes du calcul de la taille de générateur photovoltaïque.

### III.5.1. La puissance crêtes ( $P_c$ ):

Une fois connus le besoin d'énergie électrique nécessaire, la puissance nominale correspondante du générateur photovoltaïque  $P_c$  est calculée par l'expression suivante:

$$P_c = \eta_r \cdot A \cdot G_0 \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$G_0$ : Éclairement solaire dans les conditions standard de mesure,  $1000 \text{ W} / \text{m}^2$

$P_c$  : Puissance de sortie de générateur sous CSM (puissance crête), W

$A$  : Surface totale du générateur,  $\text{m}^2$

### III.5.2. Le besoin énergétique journalier :

Le besoin énergétique journalier est calculé selon la formule suivante :

$$E_e = \eta_{PV} \cdot A \cdot H_i(\beta) \quad (\text{III.28})$$

Où :

$E_e$ : L'énergie électrique journalière délivrée par le générateur photovoltaïque.

$H_i(\beta)$  : L'irradiation solaire moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison  $\beta$ ,  $\text{Wh}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$ .

$\eta_{PV}$  : Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation.

❖ Détermination d'équation de la puissance crête ( $P_c$ ):

➤ D'après l'équation (III.22) on a :  $A = \frac{P_c}{\eta_r \cdot G_0}$  (III. 29)

➤ On remplace (III. 24) et (III.15) dans (III.23) on obtien:

$$E_e = F_m [1 - \gamma(T_c - T_0)] \cdot \eta_{\text{FF}} \cdot \frac{P_c}{\eta_r \cdot G_0} \cdot H_i(\beta) \quad (\text{III. 30})$$

$$\Rightarrow E_e = \frac{F_m [1 - \gamma(T_c - T_0)] \cdot P_c \cdot H_i(\beta)}{G_0} \quad (\text{III. 31})$$

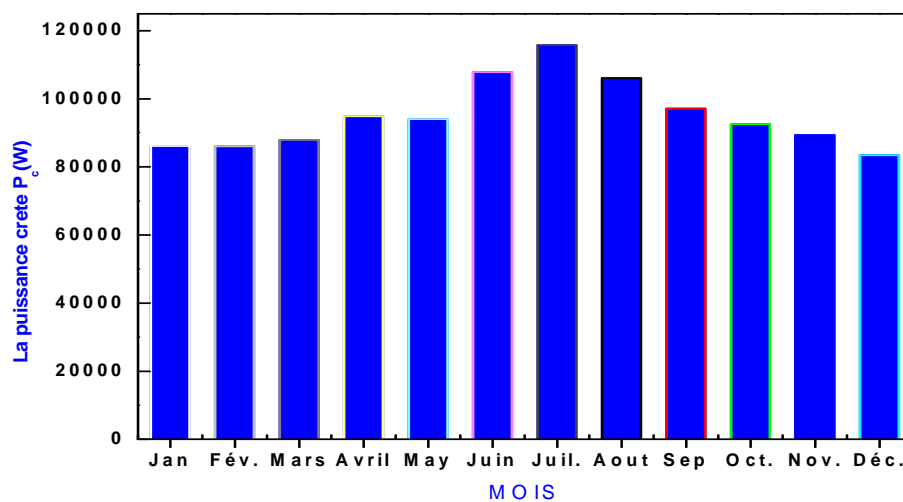
La puissance que doit fournir le générateur PV est calculée à partir de l'équation (III.32).

$$\Rightarrow P_c = \frac{G_o}{F_m [1 - \gamma(T_c - T_0)] H_i(\beta)} \cdot E_e \quad (III.32)$$

Le tableau ci-dessous donne les puissances crête pour chaque mois :

**Tableau III.13** : La puissance crête  $P_c$ .

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	May	Juin
<b>P<sub>c</sub> (W)</b>	86169.08	86079.43	87948.64	94849.40	99406.009	111302.70
Mois	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
<b>P<sub>c</sub> (W)</b>	116576.008	108941.16	97052.66	92530.16	89330.69	83391.75



**Figure III.10**: La puissance crête pour chaque mois.

Après le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, on détermine le nombre de modules constituant le champ suivant la puissance du module choisie.

**A. Nombre de module ( $N_{mod0}$ ) :**

$$N_{mod0} = \frac{P_c}{P_{mod}} \quad (III.33)$$

Avec :

$P_c$ : La puissance crête en W

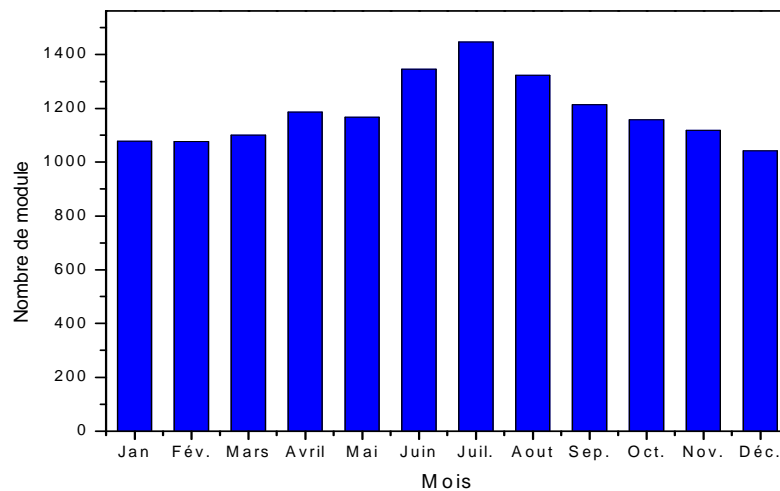
$P_{mod}$ : La puissance de module PV, 50W

**B. Nombre de module corrigé( $N_{mod}$ ) :**

$$N_{mod} = N_{mod0}(1 + 0,025) \tag{III.34}$$

**Tableau III.14:** Nombres de modules corrigés.

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin
$N_{mod0}$	1723.18	1721.38	1758.77	1896.78	1880.32	2157.85
$N_{mod}$	1766.26	1764.42	1802.74	1944.20	1927.32	2211.80
$N_{réelle}$	1767	1765	1803	1945	1928	2212
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$N_{mod0}$	2313.52	2122.82	1941.053	1850.52	1786.59	1667.83
$N_{mod}$	2371.35	2175.89	1989.57	1896.78	1831.25	1709.53
$N_{réelle}$	2372	2176	1990	1897	1832	1710



**Figure III.11:** Nombre de module mensuel nécessaire pour l'alimentation d'électrolyseur.

La figure (III.11) représente le nombre de module nécessaire pour l'alimentation d'électrolyseur .On remarque qu'il existe une corrélation directe entre la puissance crête et le nombre de panneaux solaire.

**C. La surface totale de champ PV:**

Après la détermination de nombre des panneaux solaire utilisé à chaque mois pour le fonctionnement d'électrolyseur à fin de produire l'hydrogène il est nécessaire de déterminer la surface totale du champ photovoltaïque. On peut déterminer cette dernière par l'expression suivante :



$$A = A_{pv} \cdot N_{mod} \tag{III.35}$$

$A_{pv}$  : La surface du panneau solaire, 0,45 m<sup>2</sup>

Les résultats de calcul indiqués dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.15** : La surface totale de champ photovoltaïque.

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.
$N_{mod}$	1767	1765	1803	1945	1928	2212
$A(m^2)$	795.15	794.25	811.35	875.25	867.6	995.4
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$N_{mod}$	2372	2176	1990	1897	1832	1710
$A(m^2)$	1067.4	979.2	895.5	853.65	824.4	769.5

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude de dimensionnement d'une installation de production d'hydrogène, Le système est constitué des panneaux photovoltaïques et d'un électrolyseur industriel. Les résultats obtenus montrent l'effet de l'inclinaison du champ PV pour la production de l'énergie électrique, et nous avons déterminé le nombre de module nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur (surface). Nous avons constaté que le nombre des panneaux est variable en fonction du mois, travailler avec un nombre fixe durant toute l'année nécessite une étude technico-économique.

### IV.1. Introduction :

Selon les résultats précédents nous remarquons que le nombre des panneaux solaire est variable durant les 12 mois. Pour cette raison nous avons besoin d'une étude comparative pour choisir une surface de travail durant toute l'année, pour cela on prend en considération les surfaces (max, moyenne, min), cette étude est suivie par une étude technico-économique qui sera établi par un code de calcul « MATLAB » préparé à cet effet.

### IV.2. Etude comparative des surfaces (Max, Moy et Min) :

Cette étude est consacrée à une comparaison des trois surface (Max, Moy et Min) au but de fixé le nombre des modules pour un an de production. Cette étude peut être effectuée par les étapes représentées dans le schéma ci-dessous (voir annexe -3-):

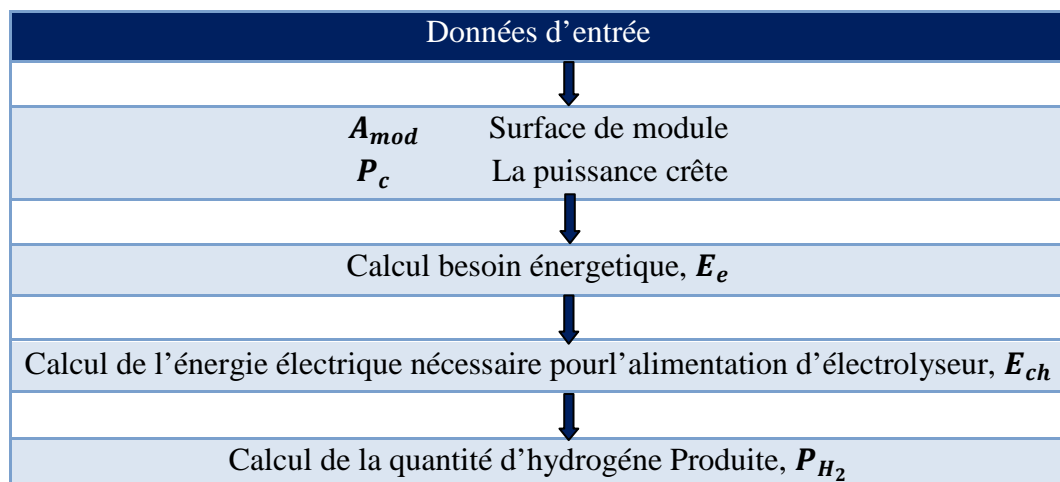


Figure IV.1 : Les étapes de calcul de l'étude comparative.

#### IV.2.1. Surface maximale :

D'après les résultats de calcul obtenus de la surface des panneaux solaire pour chaque mois, nous remarquons qu'il y a une surface maximale de  $1067.4 \text{ m}^2$  qui correspond à une puissance crête maximale de  $116576.008 \text{ W}$ . Pour déterminer la quantité d'hydrogène produite on utilise une analyse de fonctionnement selon la démarche suivante :

$$E_{e_{max}} = \frac{P_{c(max)}}{\alpha} \left( \frac{\text{kwh}}{j} \right) \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{G_o}{F_m [1 - \gamma(T_c - T_o)] H_i(\beta)} \quad (IV.2)$$

$$E_{e(max)} = \frac{E_{ch(max)}}{\eta_e} \Rightarrow E_{ch(max)} = \eta_e \times E_{e(max)}, \left(\frac{kwh}{j}\right) \quad (IV.3)$$

$$P_{H_2(max)} = \frac{E_{ch(max)} \times 5,3}{30.5}, (Nm^3/j) \quad (IV.4)$$

Les résultats de cette analyse sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1:** Le besoin énergétique et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur et la quantité d'hydrogène produite.

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai.	Juin
$E_{e(max)} \left(\frac{KWh}{j}\right)$	581.80	623.04	623.05	620.74	562.91	565.57
$E_{ch(max)} \left(\frac{KWh}{j}\right)$	354.90	380.05	380.06	378.65	343.37	345.003
$P_{H_2(max)} (Nm^3/j)$	61.67	66.04	66.04	65.79	59.66	59.95
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$E_{e(max)} \left(\frac{KWh}{j}\right)$	590.007	599.2	570.55	573.26	580.72	494.86
$E_{ch(max)} \left(\frac{KWh}{j}\right)$	359.90	365.55	348.03	349.69	354.24	301.86
$P_{H_2(max)} (Nm^3/j)$	62.54	63.52	60.47	60.76	61.55	52.45

**IV.2.2. Surface moyenne:**

Dans le cas d'une surface moyenne de 877.3875 m<sup>2</sup> on trouve une puissance crête moyenne de 96131.47 W. D'après ces données on peut maintenant calculer la quantité d'hydrogène produite.

$$E_{e(moy)} = \frac{P_{c(moy)}}{\alpha}, (kwh/j) \quad (IV.5)$$

$$E_{ch(moy)} = \eta_e \times E_{e(moy)}, (kwh/j) \quad (IV.6)$$

$$P_{H_2(moy)} = \frac{E_{ch(moy)} \times 5,3}{30.5}, (Nm^3/j) \quad (IV.7)$$

Le tableau ci-dessous représente les résultats de calcul :

**Tableau IV.2 :** Le besoin énergétique et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur et la quantité d'hydrogène produite.

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai.	Juin
$E_{e(moy)} \left( \frac{KWh}{j} \right)$	479.76	513.77	513.78	511.88	464.19	466.39
$E_{ch(moy)} \left( \frac{KWh}{j} \right)$	292.65	313.40	313.41	312.24	283.15	284.49
$P_{H_2(moy)} (Nm^3/j)$	50.85	54.46	54.4615	54.25	49.20	49.43
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$E_{e(moy)} \left( \frac{KWh}{j} \right)$	486.53	494.17	470.49	472.72	478.88	408.08
$E_{ch(moy)} \left( \frac{KWh}{j} \right)$	296.78	301.44	286.99	288.36	292.11	248.92
$P_{H_2(moy)} (Nm^3/j)$	51.57	52.38	49.87	50.10	50.76	43.25

#### IV.2.3. Surface minimal :

Pour déterminer la quantité d'hydrogène produite on a besoin d'une analyse de fonctionnement, une surface minimale de 769.5 m<sup>2</sup> correspond a une puissance minimale de 833.9175 MW. On utilise les équations suivantes :

$$E_{e_{min}} = \frac{P_{c(min)}}{\alpha}, \left( \frac{kwh}{j} \right) \quad (IV.8)$$

$$E_{ch(min)} = \eta_e \times E_{e(min)}, \left( \frac{kwh}{j} \right) \quad (IV.9)$$

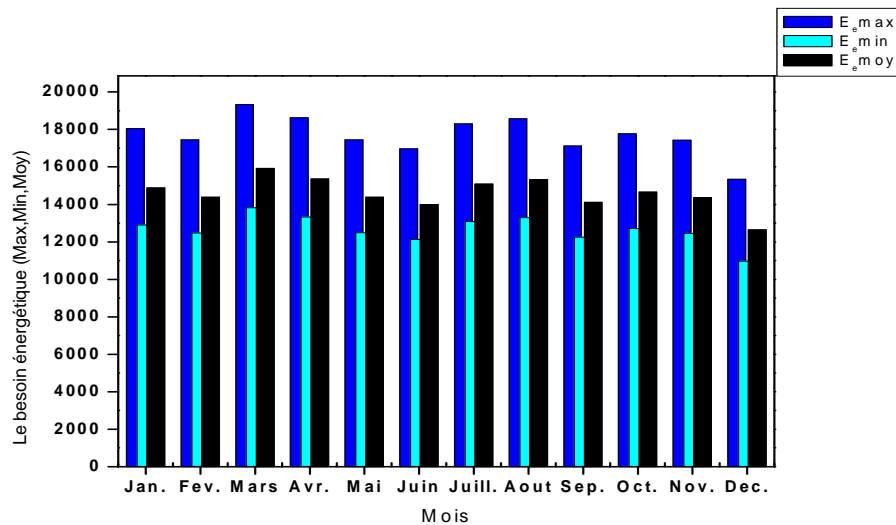
$$P_{H_2(min)} = \frac{E_{ch(min)} \times 5,3}{30,5}, (Nm^3/j) \quad (IV.10)$$

Le tableau suivant présente les résultats de calcul :

**Tableau IV.3 :** Le besoin énergétique et l'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'électrolyseur et la quantité d'hydrogène produite.

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai.	Juin
$E_{e(min)} (\frac{KWh}{j})$	416.18	445.68	445.69	444.04	402.67	404.58
$E_{ch(min)} (\frac{KWh}{j})$	253.87	271.87	271.87	270.86	245.63	246.79
$P_{H_2(min)} (Nm^3/j)$	44.11	47.24	47.24	47.06	42.68	42.88
Mois	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$E_{e(min)} (\frac{KWh}{j})$	416.18	445.68	445.69	444.04	402.67	404.58
$E_{ch(min)} (\frac{KWh}{j})$	257.45	261.49	248.96	250.14	253.40	215.94
$P_{H_2(min)} (Nm^3/j)$	44.73	45.44	43.26	43.46	44.03	37.52

Les résultats de calculs précédentes sont représentés dans les figures suivantes :



**Figure IV.2 :** L'énergie photovoltaïque mensuelle (max, moy, min).

La figure IV.2 représente l'énergie produite par les panneaux solaires (Minimal et moyen, maximal) pour chaque mois. Nous remarquons que le besoin énergétique est élevé dans le mois de mars par rapport aux autres mois. Ceci s'explique par la durée de fonctionnement élevée ainsi que le rendement photovoltaïque important dans le mois de mars.

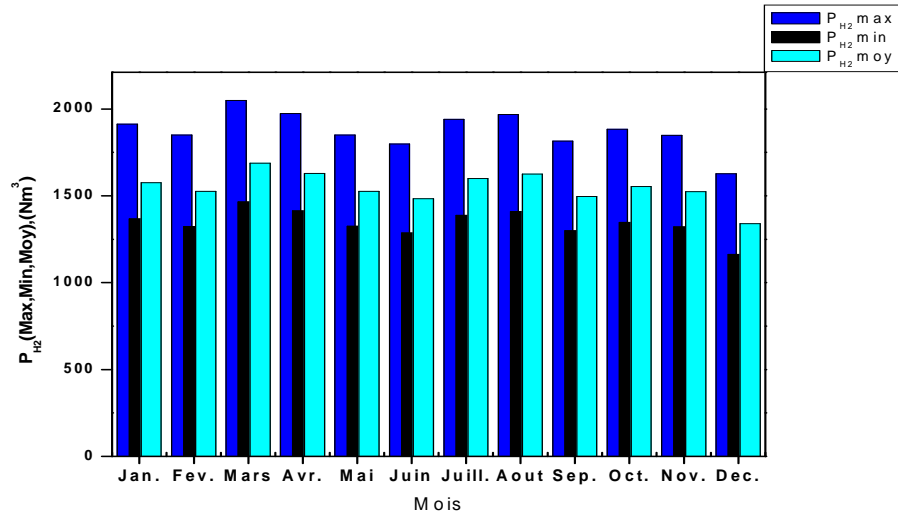


Figure IV.3 : La quantité d’hydrogène produite mensuellement (max, moy, min).

Figure IV.3 représente les trois types (minimale et moyenne, maximale) de la quantité d’hydrogène produite mensuelle. Nous remarquons que la production est homogène dans tout les mois pour chaque type par contre au mois de mars elle est importante ce la c’est explique par la quantité d’énergie produite élevée.

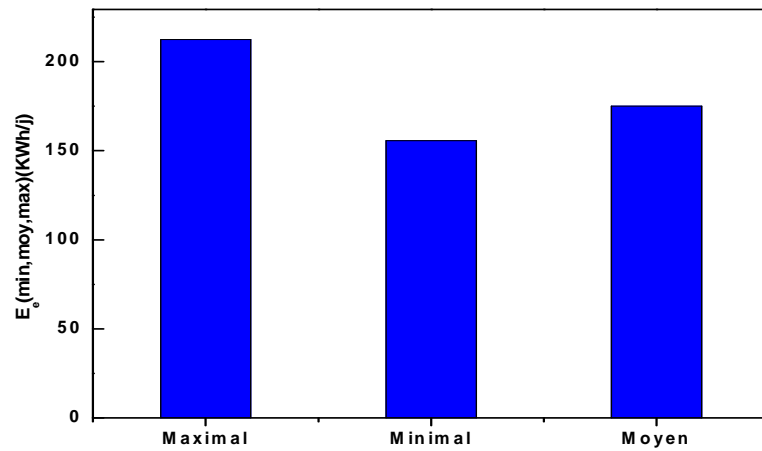
D’après les deux courbes et les calculs précédentes nous remarquons que l’augmentation de l’énergie électrique d’alimentation conduise à l’augmentation de la quantité d’hydrogène produite

L’étape suivante correspond aux calcule de la somme annuelle de l’énergie nécessaire pour le fonctionnement d’électrolyseur et le besoin énergétique, la quantité d’hydrogène produite maximal, moyenne et minimal. Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

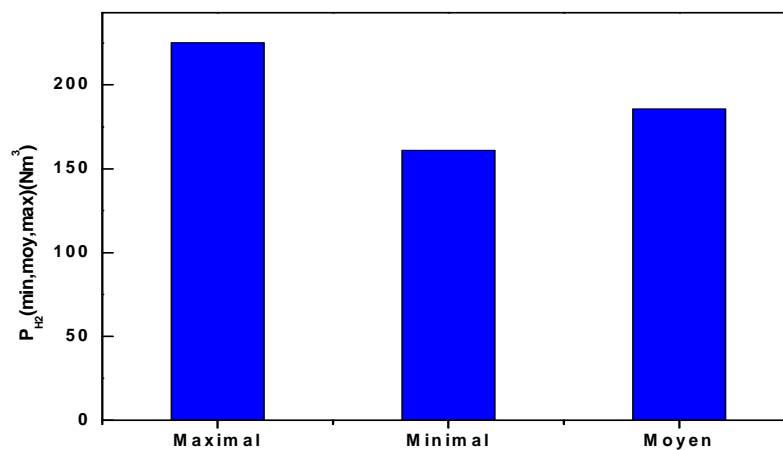
Tableau IV.4 : La somme annuelle du besoin énergétique et l’énergie nécessaire pour le fonctionnement d’électrolyseur et la quantité d’hydrogène produite (max, moy, min).

La somme annuelle	$E_e \left( \frac{KWh}{an} \right)$	$E_{ch} \left( \frac{KWh}{an} \right)$	$P_{H_2} \left( \frac{Nm^3}{an} \right)$
<b>Maximal</b>	212353.98	129535.93	22509.52
<b>Moyen</b>	175110.89	106816.11	18560.33
<b>Minimal</b>	155616.47	92662.52	16102.007

On représenté les résultats de calculé dans la figure suivante :



**Figure IV.6 :** La somme annuelle de besoin énergétique (max, moy, min).



**Figure IV.7:** La somme annuelle de la quantité d'hydrogène produite (max, moy, min)

La figure IV.6 et IV.7 représentent la somme annuelle de besoin énergétique et la somme annuelle de la quantité d'hydrogène produite pour les trois cas. Nous remarquons que l'augmentation de la surface conduit à l'augmentation de la quantité d'énergie électrique ainsi que la quantité d'hydrogène produite. Pour choisir la meilleure surface du travail, on prend en considération le coût d'hydrogène produit par l'électrolyse d'eau et le coût total de l'installation. Pour cela nous avons besoin d'une étude économique de système photovoltaïque.

### IV.3. Etude économique du système PV pour la production d'hydrogène :

Les coûts de production de l'hydrogène sont donnés en fonction du prix de l'énergie consommé par le procédé étudié. Ces coûts prennent en compte les coûts liés à l'investissement (investissement en limite d'unités, off sites, engineering, ...) et les coûts de production en tant que tels (coûts variables dont la consommation de matières premières, coûts du travail, coûts fixe).

Le prix de revient  $Px_{H_2}$  de l'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau est donné par la relation suivante [12]:

$$Px_{H_2} = 1,25 Px_{\text{électrités}} + 7,10 (\$/GJ) \quad (IV.11)$$

Pour cela il nous suffi de calculer le prix d'électricité actualisé.

#### IV.3.1. Coût moyen actualisé de l'électricité photovoltaïque :

Le coût moyen actualisé d'électricité est le rapport des valeurs actualisées nettes des coûts de cycle de vie (life cycle cost) de système de production d'électricité (coût d'investissement initial, dépenses de maintenance et de remplacement), sur la quantité d'énergie électrique produite durant la durée de vie de système [13].

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{n=1}^N C_{O\&M} / (1+r)^n}{\sum_{n=1}^N E_{el,an} (1-deg)^n / (1+r)^n} \quad (IV.12)$$

$I_0$	Coût d'investissement initial (\$).
$N$	Durée de vie de système (ans).
$C_{O\&M}$	Coût de maintenance et d'exploitation (\$).
$r$	Taux d'actualisation (%).
$E_{el,an}$	Production annuelle d'énergie électrique (kWh/an).
$deg$	Taux de dégradation (%).



**IV.3.2. Coût d'investissement total :**

L'investissement initial ( $I_0$ ) comprend le coût de l'installation du système photovoltaïque de production d'énergie, ce dernier pourrait être divisé en [14] :

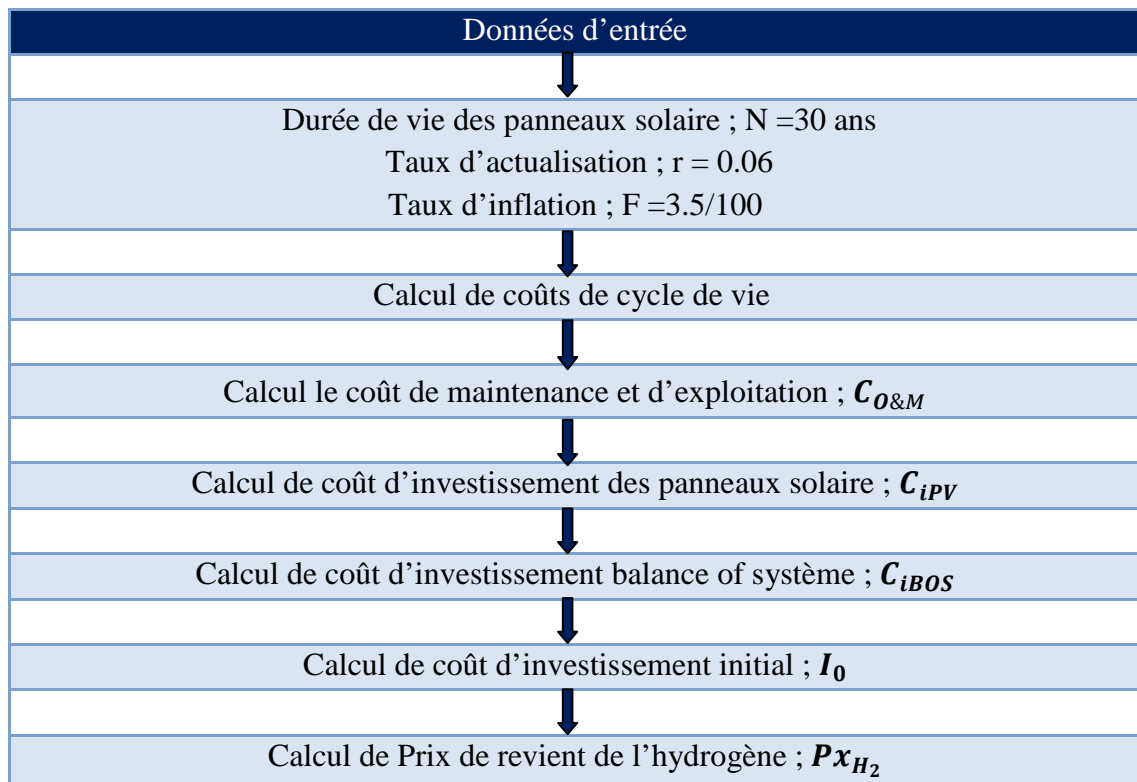
- Coût capital des modules photovoltaïques ;
- Coût du BOS (balance of system) qui inclut toutes les parties du système PV excepté le module photovoltaïque lui même (Par exemple, le câblage, le soutirage, ainsi que d'autres coûts d'installation du système).

$$I_0 = C_{PV} + C_{BOS} \quad (IV.13)$$

Le marché mondial des modules PV est dominé par les cellules en silicium cristallin, où la part de marché totale des modules c-Si est de 85% en 2010. Les cellules poly-cristallines représentent 48%, suivie par les monocristallins 37%. Les envois de la technologie couche mince ont augmenté (13% en 2010).

- Le coût moyen par Watt est pris variant entre 1.64 \$/W<sub>c</sub> et 2.87 \$/W<sub>c</sub>.
- Le coût de BOS du système photovoltaïque, représente 50% de coût de générateur PV.
- Le Coût de maintenance et d'exploitation O&M a été évalué à 0.004\$/kWh en courant alternatif (inclinaison fixe), et 0.07\$/kWh pour le système raccordé au réseau [15].
- La durée de vie des modules photovoltaïques est actuellement d'une trentaine d'années.
- Le taux de dégradation est de l'ordre de 0.4%/an
- Le taux d'actualisation est de 6%,

Cette étude sera effectuée selon les étapes représentées dans le schéma ci-dessous :



**Figure IV.8 :** Les étapes de calcul de l'étude économique.

Nous utilisons les équations ci-dessous pour effectuer l'étude économique :

$$LCOE = \frac{A}{E_{an}} \left( \frac{\$}{KWh} \right)$$

Avec :

$$A = (I_0 + P) \cdot (r \cdot (1 + r)^N) / ((1 + r)^N - 1) \quad (IV.14)$$

$$P = \left( \frac{C_{O\&M}}{F - r} \right) \cdot \left( \left( \frac{1 + F}{1 + r} \right)^N - 1 \right) \quad (IV.15)$$

**Coût de maintenance et d'exploitation :**

$$C_{O\&M} = 0,005 \cdot C_{iPV} \quad (IV.16)$$

**Coût d'investissement initial :**

$$I_0 = C_{iPV} + C_{iBOS} \quad (IV.17)$$

**Coût d'investissement des panneaux solaire :**

$$C_{iPV} = C_{mod} \cdot A_{pv} \quad (IV.18)$$

Avec :  $C_{mod}=550$

#### IV.3.6. Coût d'investissement balance of système :

$$C_{iBOS} = 0,5 \cdot C_{iPV} \quad (IV.19)$$

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.5 :** Les résultats de calcul des coûts d'investissement.

Types	Max	Moy	Min
$C_{O\&M}$	2935.35	2412.81563	2116.125
$P (KWh)$	60034,809	49347,752	43279,731
$C_{iBOS}$	293535	241281.563	211612.5
$C_{iPV}$	587070	482563.125	423225
$I_0$	880605	723844.688	634837.5
$A(\$)$	68336,458	56171,589	49264,478
$E_{an} (KWh/an)$	212353,98	175110,89	155616,47
$LCOE(\frac{\$}{KWh})$	0,33	0,32	0,29

#### IV.3.7. Prix de revient de l'hydrogène:

On à :

$$LCOE = \left( \frac{\$}{KWh} \right) \Rightarrow \left( \frac{\$}{GJ * 0.0036} \right) = P_x \text{ électricités}$$

$$Px_{H_2} = 1,25 Px_{\text{électricités}} + 7,10 (\$/GJ)$$

**Tableau IV.6 :** Les résultats des prix d'électricité et d'hydrogène dans les trois type.

Types	Max	Moy	Min
$Px_{\text{éle}} (\$/GJ)$	91,666	88,888	80,555
$Px_{H_2} (\$/GJ)$	121,682	118,21	107,793

La comparaison entre les trois surfaces en termes de coût de production d'hydrogène, montre que la surface minimale de générateur PV donne un meilleur cout d'hydrogène en comparant avec les deux autres surfaces.

#### **IV.4. Conclusion :**

La première partie de ce chapitre représente une étude comparative des trois surfaces max, moy et min nous avons remarqué que l'effet de la surface est proportionnel à la production d'électricité et que dans le cas d'une surface minimale le coût de production sera faible.

# *CHAPITRE 4*

*ETUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE*

*DE SYSTÈME*

**CONCLUSION**

**GENERALE**

## **Conclusion générale**

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Il faut trouver des solutions énergétiques alternatives et durables répondant à la diminution de la consommation des énergies fossiles, ne participant pas à l'effet de serre et permettant de généraliser l'accès à l'électricité, notamment dans les pays en voie de développement.

Ce sujet aborde un secteur clé dans le développement socio-économique qui est le domaine de la production d'un vecteur énergétique qui jouera un rôle important dans le développement de notre pays.

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. Le travail présenté dans ce mémoire s'intègre dans le cadre d'une production d'hydrogène par électrolyse de l'eau par voie solaire.

L'objectif global est une étude de dimensionnement d'un système photovoltaïque en vue de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, la production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques, on utilise les données climatiques de la région de Ouargla.

Les résultats obtenus permettent d'étudier le fonctionnement du système PV pour un électrolyseur alcalin comme une charge et la ville de Ouargla comme site de travail.

- Une variation optimale d'inclinaison ( $31^\circ$ ) des panneaux solaires au but d'augmenter la puissance PV.

- la variation de l'irradiation solaire mensuelle (énergie) nous a donné des différences de surfaces pour obtenir la quantité d'hydrogène désiré.

-l'étude techno-économique nous affirme que le coût d'hydrogène est meilleur pour la surface minimale, mais si nous sommes intéressés à des grandes quantités de production d'hydrogène le coût ne reste pas le seul critère.

Pour rendre plus performant ce système au cours de ce travail nous recommandons :

- Une variation saisonnière d'inclinaison des panneaux solaires au but d'augmenter la puissance PV.
- Une étude comparative avec des autres sites de travail.

*REFERENCES*

*BIBLIOGRAPHIQUES*



## Références bibliographiques

- [1] K. Bouziane, Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, Mémoire de Magister Energétique et Procédés, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2011.
- [2] S. Khazen, F. Guitoubi, Production d'hydrogène par un système photovoltaïque, Mémoire Ingénieur d'Etat Génie Chimique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2006.
- [3] S. Youmbai, F. Dehane, Effets du soluté et de sa concentration sur la production d'hydrogène par un système photovoltaïque, Mémoire Ingénieur d'Etat Génie Chimique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2007.
- [4] R. Boudries-Khellaf, Etude d'un système de production d'hydrogène solaire, Algérie, 2002.
- [5] C. Darras, Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H), Mémoire de Docteur de l'université de Corse Energétique et Génie des Procédés, Université Corse-Pascal Paoli, France, 2011.
- [6] N. Hajjaji. Analyse de cycle de vie exégétique de systèmes de production d'hydrogène. Thèse de Doctorat : Génie chimique procédés. Université de Nancy, France, 2011.
- [7] S. Rahmouni, Optimisation technico-économique de la production d'hydrogène à partir des différentes sources d'énergie renouvelables dans le sud Algérien. Mémoire de Magister Option : Procédés et environnement. Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2013.
- [8] M. Belhadj, Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, Mémoire de Magister : Microélectronique –Photovoltaïque, Institut des Sciences Exactes, Centre Universitaire De Bechar, Algérie, 2008.
- [9] M.L. Louazene, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla, Mémoire de Magister Maitrise d'Energie, Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.
- [10] Solar 23 Renewable-Independent-Decentralized. Solar Module SM50. Germany, 2007.
- [11] AFH2, étude technico-économique prospective sur le coût de l'hydrogène, Mémento de l'hydrogène, Avril 2006.
- [12] S. Busquet. Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : Réalisation d'un banc d'essai et modélisation. Thèse de Doctorat : Energétique, Paris, 2006.
- [13] M. Cambell. The drivers of the levelized cost of electricity for utility-scale photovoltaics. SunPower Corporation, Canada, 2011.
- [14] R. Boudries. Etude technico-économique de la production d'hydrogène solaire en Algérie. Thèse de Doctorat : Thermo-énergétique. Université des Sciences et de la Technologies Houari Boumediene, Algérie, 2009.
- [15] K. Ardani, R. Margolis. Solar Technologies Market Report. Department of Energy, U.S.A., 2011.

# *ANNEXES*

## Annexe -1-

### Programme de la simulation-Chapitre 3

Calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle et l'inclinaison optimale d'un panneau solaire sur une surface inclinée.

```
clear all;close all;clc;
mois= [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12];
%-----
%Calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle sur un plan
horizontal
%-----
S1=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12];
S=[8.6 9.2 9.4 10.1 10.9 11.6 12 11.8 9.5 9.1 8.9 7.08];% (h/j) durée
d'insolation moyenne journalière (mesurée)
G=1367;% constante solaire
q=0.35;%l'albédo au sol
L=31*pi/180; %latitude=inclinaison
n=[17 47 75 105 135 162 198 228 258 288 318 344]; %les jours types
B=L;
c=1+0.034*cos(2*pi*(n-2)/365);
g=23.45*sin(2*pi*(284+n)/365); % déclinaison
g1=g*pi/180;
%w1=360*(TSV-12)/24
w1=acos(-tan(L)*tan(g1));%angle horaire
H0=(24*c*G/pi).*(cos(L).*cos(g1).*sin(w1)+w1.*sin(g1).*sin(L)); %
l'irradiation journalière moyenne mensuelle hors atmosphère
S0=(2/15)*w1*180/pi; %durée maximum de jour d'ensoleillement
%I=G*(1+0.033*cos(2*pi*n/365))*(cos(L)*cos(g)*cos(w1)+sin(L)*sin(g))
Q=S./S0; %taux d'insolation
K=0.3+0.43*Q; %indice de clarté journalière
H=K.*H0 % (Wh/m²/j) l'irradiation globale journalière mensuelle sur une
surface horizontale
Hannuelle=(365/12)*sum(H) %moyenne annuelle sur plan horizontal
%-----
%Calcul de l'irradiation globale journalière mensuelle sur un plan incliné
%-----
B1=B*180/pi;%latitude du lieu
w2=acos(-tan(L-B).*tan(g1));%L'angle horaire du coucher de soleil sur le
plan horizontal
x=[w1; w2];
w3=min(x);%L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné
R=(cos(L-B).*cos(g1).*sin(w3)+w3.*sin(L-
B).*sin(g1))./(cos(L).*cos(g1).*sin(w1)+w1.*sin(L).*sin(g1));%Facture de
conversion donné
Kd=0.91-0.98*K;
Hd=Kd.*H;%La composante diffuse
HiL=(H-Hd).*R+Hd.*(1+cos(B))/2+H*q.*(1-cos(B))/2 %la moyenne(kWh/j)
journalière mensuelle de l'irradiation incidente sur un plan incliné
HiLannuelle=(365/12)*sum(HiL) %moyenne annuelle sur plan incliné
```

## Annexe -2-

### Programme de la simulation-Chapitre 2

Modélisation du module photovoltaïque BP SX 150.

```
clear all;close all;clc;
mois=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12];
%-----
%                               de la taille de générateur                               %
%-----
Gi=[5.8084 6.2987 6.4631 6.5748 6.1337 6.3066 6.650 6.7593 6.3796 6.2202
5.969 4.9806]; %kWh/m2/jour
Gm=[5808.4/8.6 6298.7/9.2 6463.1/9.4 6574.8/10.1 6133.7/9.6 6306.6/10.8
6650/11.8 6759.3/11.2 6379.6/9.5 6220.2/9.1 5969/8.9 4980.6/7.08];%W/m2
Ta=[12.7 14.79 19.49 24.44 29.85 35.58 38.05 36.91 33.28 27.7 18.33
13.35];%la température ambiante
G0=1000;%W/m2
je=[31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
PPV=50;%la puissance nominale d'un panneau
NOCT=45.3; %nominal température de fonctionnement de cellule
APV=0.45; %la surface d'un panneau
mu=0.005;
Fm=0.9;
rendr=PPV/(APV*G0) %rendement de référence du panneau
B=[8.6 9.2 9.4 10.1 9.6 10.8 11.8 11.2 9.5 9.1 8.9 7.08]; %(h) heurs de
fonctionnement
%B=9; %(h) heurs de fonctionnement
Ech=(30.5*B) % (kWh/jour)capacité d'électrolyseur
Ech1=(30.5*B)/0.61 % (kWh/jour) capacité PV
T=Ta+((Gm./800).*(NOCT-20)); %Ture de fonctionnement
gama=Fm*(1-(mu.*(T-25)))
rendPV=rendr*gama; %rendement corrigé
DD=(Gi.*gama)/G0
Pc=(G0*Ech1)./(Gi.*gama) %(W)
Echh=( 96131.47*DD)
Echh1=(Echh*0.61)
P=(Echh*5.3*0.61)/30.5
%ccc=Echh.*je
%abc=sum(ccc)
NPV=(Pc./PPV).*(1+0.025) %le nombre des modules
%Nm=890;
NNm=sum(NPV)/12; %nombre des modules moyen
A=APV.*NPV %la surface totale de champ PV
%AA=sum(A)/12 %la surface totale moyenne du générateur PV
% AA=469.2662
H=[268 260 291 304 298 324 368 349 286 283 269 219]; %(h) les heurs
d'esolleiement mensuelles
E = rendPV.*A.*(Gm.*H) %(Wh)production mensuelle
%E=NPV.*(Gm./G0).*(PPV+mu.*(T-25))
Etot=sum(E) %(Wh) la production annuelle
%bar(mois,E)
```

## Annexe -3-

### Programme de la simulation-Chapitre 4

#### Etude technico-économique du système de production d'hydrogène

```
%          cout d'électricité photovoltaïque          %
%-----%
Ean=155616.47 %(kWh/an)production annuelle
Apv=769.5 %(m²) surface de générateur
N=30;%(ans)durée de vie de système PV
r=0.06;%taux d'actualisation
d=0.004;%(0.4%/an)taux de dégradation
Cmod=550;%($/m²)cout de module PV
Cipv=Cmod*Apv %cout de générateur PV
Cibos=0.5*Cipv%(50%)cout de Balance Of System
Citot=Cipv+Cibos %cout total d'investissement
Cmopv=0.005*Cipv
som=0;
for n=1:1:N
    A=(Cmopv)/((1+r)^n);
    som= som+A;
end
SS=som;
G=Citot+SS
tom=0;
for n=1:1:N
    B=(Ean*((1-d)^n))/((1+r)^n);
    tom=tom+B;
end
F=tom
fprintf(' cout d''électricité photovoltaïque,$/kWh\n')
LCOE=G/F %($/kWh)
```

# Dimensionnement d'une Installation de Production D'hydrogène Photovoltaïque dans la Région de Ouargla.

## Résumé:

L'hydrogène est le combustible et le porteur potentiel d'énergie du futur. On entend par l'hydrogène solaire, l'hydrogène produit en utilisant les énergies solaire.

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire, elle dispose d'une durée d'ensoleillement et d'une quantité d'énergie incidente très importante font de l'Algérie une place de choix pour la production d'hydrogène solaire.

L'objectif du présent travail est de développer une installation industrielle de production de l'hydrogène solaire, dans la région de Ouargla. Le système est constitué des panneaux photovoltaïques et d'un électrolyseur industriel.

Les résultats obtenus montrent l'influence de quelques paramètres tels que l'inclinaison des panneaux photovoltaïques, l'éclairement solaire, l'étude techno-économique nous affirme que le coût d'hydrogène est un critère pour le choix de la taille de générateur photovoltaïque.

**Mots clés :** énergie solaire photovoltaïque, électrolyse de l'eau, production d'hydrogène, étude technico-économique.

## Dimensioning of an installation for producing hydrogen photovoltaic in Region Ouargla.

## Abstract:

Hydrogen is the fuel and energy potential carrier of the future. Solar hydrogen means hydrogen produced by using renewable energy, particularly solar energy.

Algeria is blessed with a very favorable location for using solar energy; it has very important sunshine duration and incident energy which give Algeria a place for the production of solar hydrogen.

The objective of the present work is to develop an industrial installation of production of the solar hydrogen, in the region of Ouargla. The system is constituted by the photovoltaic panels and by the industrial electrolyser.

The results showed that was obtained from the effect of some ingredients, such as the tendency of photovoltaic panels, solar radiation, an economic study tell us that the cost of hydrogen is the criterion for choosing the size of the PV generator.

**Key words:** solar energy, energy conversion, hydrogen, water electrolysis, photovoltaic.

## تحجيم منشأة لإنتاج الهيدروجين الكهروضوئي في منطقة ورقلة

مختصر :

الهيدروجين هو الوقود وحامل الطاقة للمستقبل. نعتني بهيدروجين الكهروضوئي، هو إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية)، ولا سيما الطاقة الشمسية.

أنعم الله على الجزائر بموقع مناسب جدا لاستخدام الطاقة الشمسية، حيث أن مدة الإشعاع وكمية الطاقة المحترقة مهمة جدا مما يجعلها مكان مناسب لإنتاج الهيدروجين بالطاقة الشمسية. وهذا الإنتاج ليس فقط باستخدام طاقة نظيفة ولكن الأهم هو زيادة وتنوع مصادر الطاقة.

والهدف من هذا العمل هو تحجيم منشأة لإنتاج الهيدروجين الكهروضوئي في منطقة ورقلة حيث يتألف النظام من ألواح الخلايا الشمسية ومحلل كهربائي للماء. ألواح الخلايا الشمسية تمول المحلل الكهربائي للماء بالطاقة الكهربائية. المحلل الكهربائي ينتج الهيدروجين والأوكسجين. كل خطوة من خطوات العملية مثل التحليل الكهربائي، والكهروضوئية، تم تنفيذها بالمخبر حيث قمنا بتحليل عمل النظام بأكمله.

وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من تأثير بعض المقادير مثل الميل للألواح الخلايا الشمسية، الإشعاع الشمسي، دراسة اقتصادية تخبرنا أن تكلفة الهيدروجين هو المعيار لاختيار حجم المولد PV

**كلمات دلالية:** الطاقة الشمسية، تحول الطاقة، هيدروجين، شمسي، المحلل الكهربائي للماء، نظام الضوئية.