

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

MEMOIR

Pour l'obtention du diplôme de

Master

En Systèmes Energétique et Thermique

Thème :

**Etude d'une installation de production
d'Hydrogène par voie photovoltaïque**

Présenté par :

SIBOUKEUR Mohammed Houcine

Promoteur :

Mr. Abdi Hamid

Année Universitaire 2012/2013

Résumé

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier et dimensionner une installation solaire de production d'hydrogène. Nous avons fixé la durée de fonctionnement de la pile à combustible de type PEMFC de 500 Watts de puissance afin de déterminer le besoin en hydrogène.

Un modèle mathématique a été établie et nous a permis de dimensionner les éléments principaux de l'installation en introduisant les caractéristiques techniques nécessaire ainsi que les paramètres météorologique du site.

Nous avons effectué une étude comparative de trois sites à savoir le site d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset.

On a constaté qu'on obtient les meilleures performances pour le site de Tamanrasset.

Introduction générale

Il est clair que l'énergie est de partout ce qu'elle permet un véritable confort, et une des causes du développement d'un pays. Ainsi, alors que les énergies prédominantes sont le pétrole et le nucléaire, la recherche, tant publique que privée, se tourne vers des énergies plus renouvelables, surtout avec l'augmentation brutale du prix du pétrole, survenue en

1973.

De nos jours, la production mondiale d'énergie est réalisée à 74 % [1,6] à partir de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz). Alors que nous mesurons les conséquences de cette surexploitation, elles sont à la hauteur de cette démesure : risque d'épuisement des ressources fossiles, pollution atmosphérique menaçant la santé publique et effet de serre additionnel qui réchauffe la planète. Cette évolution du monde occidental, dévoreuse d'énergie est continue et nourrit une croissance permanente, elle-même d'autant plus sollicitée qu'il est légitime que ses bienfaits s'étendent à l'ensemble de la planète dont une grande partie bénéficie peu, voire ne bénéficie pas du tout.

Comment à la fois résoudre le problème de l'épuisement des carburants fossiles, combattre l'effet de serre et diminuer la pollution? En agissant simultanément dans plusieurs domaines: réduire les consommations d'énergie par des actions « d'utilisation rationnelle »; améliorer les efficacités énergétiques de toutes les installations consommatrices (chauffage, équipements industriels, véhicules automobiles etc.); poursuivre l'utilisation de l'énergie nucléaire en souhaitant un jour pouvoir disposer de la fusion, dont on doit reconnaître qu'à l'heure actuelle elle tient encore du pari scientifique; faire appel à des énergies renouvelables ; et avoir recours à l'hydrogène.

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. Elles se présentent sous de nombreuses formes, certaines étant naturellement stockables (comme la biomasse ou les barrages hydroélectriques), d'autres non, en particulier celles qui transforment les énergies renouvelables, intermittentes, aléatoires et non contrôlables : c'est particulièrement les cas des sources éoliennes et photovoltaïques.

Or, ce sont précisément celles qui sont les plus prometteuses en termes de potentialité pour le futur.

Face au souci de réduire les teneurs en composés polluants et les émissions de gaz à effet de serre, l'hydrogène énergie semble une solution particulièrement attrayante aux yeux du grand public.

Il peut même produire directement de l'électricité dans les piles à combustible avec, là encore, comme seul résidu, de l'eau. L'hydrogène est en effet un gaz non toxique et très énergétique capable de produire de la chaleur et de faire fonctionner des moteurs. Mais l'hydrogène ne se trouve pas dans la nature qu'à l'état combiné, surtout dans l'eau et les hydrocarbures, il est donc nécessaire de le produire.

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

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire, on se propose dans ce travail d'étudier la production d'hydrogène par voie solaire.

Cette énergie solaire servira spécifiquement pour utilisation d'un électrolyseur d'eau.

Cette étude a pour but d'étudier une installation solaire de production d'hydrogène. Le système est constitué des panneaux photovoltaïques, d'un électrolyseur et de pile à combustible.

Le but de cette étude est de voir l'apport du système solaire dans la chaîne de production d'hydrogène.

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

Le premier chapitre est consacré à la présentation de différentes techniques de production d'hydrogène et ses applications dans l'industrie et le domaine énergétique.

Le deuxième chapitre est constitué de deux parties, la première partie est consacrée à l'énergie solaire. La deuxième partie est consacrée à la conversion photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre nous nous avons présenté une synthèse concernant l'électrolyse de l'eau.

Le quatrième chapitre est consacré à une connaissance générales sur les pile a combustible.

Enfin, le dernier chapitre s'intéresse a présenté l'installation qu'on a étudiée et les différents calculs.

Et on termine avec une conclusion générale regroupant les différents aspects étudiés.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
--------------------	---

Chapitre 1 : LA PRODUCTION D'HYDROGENE ET SES APPLICATIONS

1.1. Introduction	4
1.2. Propriétés de l'hydrogène	4
1.3. Production d'hydrogène	6
1.3.1. Production par les combustibles fossiles	8
1.3.1.a. Production a partir du gaz naturel	8
1.3.1.b. Production a partir du charbon	10
1.3.2. Production a partir du nucléaire	10
1.3.3. Production a partir des énergies renouvelables	10
1.3.3.a. La biomasse (agriculture, forets, algues, déchets organiques)	10
1.3.3.b. Le solaire	11
1.4. Les applications d'hydrogène	12
1.4.1. Utilisations chimiques	12
1.4.2. Utilisation énergétique	13
1.5. Les avantages et les inconvénients	14

Chapitre 2 : GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE ET LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. Introduction	16
2.2. Rayonnement solaire	17
2.3. Mouvements de la terre	17
2.4. Modèles de coordonnées soleil	18
2.4.1. Angles solaires	18
2.5. Modèle du rayonnement solaire	21
A. Rayonnement solaire sur un plan horizontal	21
A.1. Rayonnement direct	21
A.2. Rayonnement diffus	22
A.3. Rayonnement global gh	22
B. Rayonnement solaire reçu par un plan incline	22
B.1. Rayonnement direct	22
B.2. Rayonnement diffus	23
B.3. Rayonnement réfléchi	23
B.4. Rayonnement global incline	23
2.6. Durée d'insolation	23
2.7. Durée du jour	24
2.8. Les jours type des mois	24

2.9. Système solaire photovoltaïque	24
2.9.1. L'effet photovoltaïque	24
2.9.2 Principe de fonctionnement.....	25
2.9.3. Caractéristiques d'une cellule solaire	26
2.9.4 Les modules solaires photovoltaïques	27
2.9.5 Eléments d'un système solaire photovoltaïque	27
A- le champ photovoltaïque	28
B. Système de stockage	28
Types d'accumulateurs	30
C. Système de régulation	30
D. Système de conversion	31
E. La charge	31

Chapitre 3 : ELECTROLYSE DE L'EAU

3.1. Introduction	32
3.2. Principe général de l'électrolyse de l'eau	32
3.3. Qualité de l'eau d'alimentation	32
3.4. Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau	33
3.4.2. Cinétique	35
3.5. Les différentes technologies d'électrolyseurs	36
3.5. A. Electrolyseurs alcalins	36
3.5. A.1. Principe	36
3.5.b. Electrolyseurs pem	37
3.5.b.1. Principe	37
3.5.c. Electrolyseurs à haute température	38
3.5.c.1. Principe	38

Chapitre 4 : GENERALITES SUR LES PILES A COMBUSTIBLES

4.1. Introduction.....	40
4.2. Classification des piles a combustibles	40
4.3. La pile a combustible a électrolyte polymère solide.....	42
4.3.1. Technologie de pemfc	42
4.3.2 . Description générale d'une pac pem	42
4.3.3. Applications	44
4.4. Etude technique de la pile a combustible	44
4.4.1. La cellule et le stack	44
4.4.1.1. Les technologies liées à la cellule	47
4. 4.1.2. Le stack	48

Chapitre 5 : ETUDE DE L'INSTALLATION SOLAIRE DE PRODUCTION

D'HYDROGENE.

5.1. Présentation de l'installation	50
5.2. Spécifications des composants de l'installation	51
5.2.1. Le système photovoltaïque	51
A). Générateur photovoltaïque	51
B). Régulateur de charge	52
C). Batteries de stockage	52
5.2.2. L'électrolyseur	52
5.2.3. Pile à combustible	53
5.3. Calcul et résultats	53
5.3.1. Consommation d'hydrogène par la pile pemfc	54
5.3.2. Durée de fonctionnement de l'électrolyseur	54
5.3.3. Estimation du besoin d'électricité (ecj)	55
5.3.4. Dimensionnement du système photovoltaïque	55
A). Energie solaire incidente (es)	55
B). Puissance des modules requise (p_g)	57
C). Puissance unitaire du module (p_u)	57
D). Estimation du nombre des modules photovoltaïques	57
E). Dimensionnement du système de stockage	58
5.4. Estimation des émissions de CO_2 pour une consommation électrique donnée, assurée par différentes sources d'énergie	62

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale.....	65
--------------------------	----

Liste des figures

	Titre	Page
Figure 1.1	Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde	7
Figure 1.2	Les matières de base et les processus utilisés dans la production d'H ₂	8
Figure 1.3	Principe de production photo-biologique d'hydrogène	11
Figure 1.4	Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC	13
Figure 2.1	Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale et normal au mois de juillet	16
Figure 2.2	Schématisation des mouvements de la terre autour du Soleil	18
Figure 2.3	Coordonnées angulaires du soleil	20
Figure 2.4	orientation et inclinaison d'un capteur solaire	20
Figure 2.5	Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	25
Figure 2.6	Caractéristique électrique d'une cellule	26
Figure 2.7	Composantes d'un champ de modules photovoltaïques	28
Figure 2.8	Configurations des associations série parallèle des modules PV	28
Figure 2.9	Construction d'une batterie monobloc	30
Figure 3.1	Influence de la pression sur les caractéristiques de fonctionnement de l'électrolyseur	35
Figure 3.2	Exemple de décomposition d'une courbe caractéristique tension-densité de courant pour une cellule d'électrolyse de l'eau	36
Figure 3.3	Principe de l'électrolyseur alcalin	37
Figure 3.4	Principe schématique de l'électrolyse PEM	38
Figure 3.5	Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte	39
Figure 4.1	Description générale du fonctionnement d'une PAC de type PEM	43
Figure 4.2	Schémas représentant une cellule élémentaire et un empilement (stack)	44
Figure 4.3	Schéma de base d'une cellule de pile à combustible PEMFC	45
Figure 4.4	vue schématique d'une cellule de pile à combustible PEM (échelle respectée dans la direction perpendiculaire au plan de la membrane)	47
Figure 4.5	schéma des éléments fonctionnels d'une pile PEMFC	47
Figure 4.6	Schéma d'un stack (l'échelle n'est pas respectée)	48
Figure 5.1	Installation solaire de production d'hydrogène	50
Figure 5.2	Module solaire photovoltaïque	51
Figure 5.3	L'électrolyseur PME	52
Figure 5.4	Irradiation mensuelle incidente sur les différents sites étudiés	56

Liste des tableaux

	Titre	Page
Tableau 1.1	Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène	5
Tableau 2.1	les jours types	24
Tableau 4.1	Les différents types de piles à combustible	41
Tableau 5.1	Caractéristiques du module solaire utilisé	51
Tableau 5.2	Fiche technique du régulateur	52
Tableau 5.3	Fiche technique de la batterie	52
Tableau 5.4	Caractéristiques techniques de l'électrolyseur PEM	53
Tableau 5.5	Caractéristiques de la pile à combustible	53
Tableau 5.6	Irradiation mensuelle incidente sur les différents sites étudiés en kWh/m ²	56
Tableau 5.7	performances de l'installation	60
Tableau 5.8	performances de l'installation	61
Tableau 5.9	Estimation des Emissions de CO ₂ correspondant a une consommation de 6.33KWh	62

Liste des symboles

a_{H_2O}	Activité de la solution	
C	Correction de distance terre-soleil	[m]
C_p	Chaleur spécifique	[J/K.g.k]
C_s	Capacité du système de stockage	[Ah]
C_v	Chaleur spécifique	[J/Kg.k]
D	Facteur de décharge maximal.	
DB	Rayonnement diffus reçu par une surface incliné	[w/m ²]
DH	Rayonnement diffus pour une surface horizontale	[w/m ²]
d_j	DUREE DU JOUR	[heure]
E_{cj}	Energie consommée par l'électrolyseur	[Wh/jour]
E_{rev}	tension de décomposition réversible	[V]
E_{th}	La tension thermoneutre correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur	[V]
E_s	Energie solaire incidente	[KWH/m ²]
E_0	tension de décomposition réversible dans les conditions normales	[V]
F	constante de Faraday	[F=96485 C.mole ⁻¹]
F_{gaz}	Flux molaire d'hydrogène	[mole/s]
$F_{H_2}^{elec}$	le débit molaire d'hydrogène qui réagit dans le stack.	[mole/s]
GB	Rayonnement global incliné	[W/m ²]
GH	Rayonnement global pour une surface horizontale	[W/m ²]
h	Hauteur du soleil.	[m]
H_d	Durée d'insolation	[h/jour]
I_c	Courant crête	[A]
I_{cc}	Courant de court circuit	[A]
I_{cell}	L'intensité générée par la cellule	[A]
I_{stack}	l'intensité de stack.	[A]
I	Courant	[A]

Liste des symboles

J	densité de courant	[A/cm ²]
K	Facteur de régulation	[K=0.85]
M_{H_2}	masse molaire d'hydrogène	[2.0158g/mole]
m_{H_2}	La quantité d'hydrogène consommée	[g]
N	Nombre de jours d'autonomie.	[Heure]
n	nombre d'électrons échangés lors de la réaction.	
N_b	Nombre total de batteries	
N_{bp}	Nombre de ranches de batteries	
N_{bp}	nombre de branche associés en parallèle	
N_{bs}	Nombre de batteries en série	
N_{cell}	le nombre de cellules	
N_d	durée du jour (du lever au coucher de soleil)	
N_m	nombre du module	
N_{ms}	nombre de modules en série	
P_{cell}	La puissance électrique du cellule	[W]
PCI	Pouvoir calorifique inférieure	[KJ/Nm ³]
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	[KJ/Nm ³]
P_u	Puissance unitaire du module	[W]
P_{elec}	Puissance nominale de l'électrolyseur	[W]
P_g	Puissance des modules requise	[W]
P_r	Puissance solaire reçue	[W/m ²]
P_c	Puissance crête	[W]
Q	chaleur	[J]
Q_m	débit massique	[m ³ /s]
R	constante molaire des gaz	[= 8,314 4 J mol ⁻¹ K ⁻¹]
R_b	facteur qui permet de passer du rayonnement direct sur une surface horizontale à une surface inclinée.	
R_c	résistance globale	[Ω · cm ²]
r_{cel}^t	Le rendement électrique d'une cellule	[%]
RRB	Rayonnement réfléchi reçu par une surface inclinée	w/m ²

S	Surface du module	[m ²]
SH	Flux direct reçu par une surface horizontale.	[w/m ²]
SB	Rayonnement direct reçu par une surface incliné.	[w/m ²]
SH	Rayonnement direct reçu par une surface horizontale.	[w/m ²]
Tsv	temps solaire vrai	[Heure]
μJ	Energie minimale d'inflammation	[J]
V _{cell}	la tension de cellule	[V]
V _m	tension des modules au point de la puissance maximale.	[V]
V _t	tension de travail du système photovoltaïque.	[V]
V _c	Tension crête	[V]
V ₀	Tension de cours circuit	[V]
V	Tension	[V]
V	Tension de la batterie	[V]
η	Rendement du module photovoltaïque	[%]
Φ	<i>La latitude</i>	[Deg]
λ	<i>La longitude</i>	[Deg]
Δ	<i>La déclinaison</i>	[Deg]
ω	<i>L'angle horaire du soleil</i>	[Deg]
ψ	L'azimut	[Deg]
γ	<i>La hauteur angulaire</i>	[Deg]
α	<i>L'orientation</i>	[Deg]
β	<i>L'inclinaison</i>	[Deg]
θ	<i>L'angle d'incidence</i>	[Deg]
η _a	surtension anodique	[V]
η _c	surtension cathodique	[V]

Chapitre 1 :

LA PRODUCTION D'HYDROGENE ET SES APPLICATIONS

1.1. INTRODUCTION :

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

On trouve l'hydrogène libre uniquement à l'état de traces infimes dans l'atmosphère. Cependant, les spectres solaire et stellaire montrent que le gaz est abondant dans le soleil et dans les autres étoiles. C'est en fait l'élément le plus répandu dans l'Univers. L'hydrogène combiné avec d'autres éléments est largement répandu sur Terre, où le composé de l'hydrogène le plus important et le plus abondant est l'eau H_2O . 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 [1].

1.2 PROPRIETES DE L'HYDROGENE :

Hydrogène est un élément de symbole H, incolore, inodore et insipide, de numéro atomique 1. Ses propriétés générales figurent dans le tableau (1.1).

Tableau 1.1 : Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel) [3]

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieure)	10 800 KJ/Nm ³ 119 930 KJ/Kg(gaz naturel 50 020 KJ/Kg) 3.00 KWh/ Nm ³ 33.33 KWh/ Kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770 KJ/Nm ³ 141 860 KJ/Kg 3.55 KWh/ Nm ³ 39.41 KWh/ Kg
Densité gazeuse à 20.3K	1.34 Kg/ m ³
Densité gazeuse à 273K	0.08988 Kg/ m ³ (gaz naturel 0.6512 Kg/Nm ³)
Densité liquide à 20.3K	70.79 Kg/Nm ³
Chaleur spécifique (C _p)	14 266 J/Kg.k
Chaleur spécifique (C _v)	10 300 J/Kg.k
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/ (mK)
Chaleur d'évaporation	445.4KJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92KWh/Kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse volumique	1.0079
Constante du gaz	4124.5 J/Kg.k
Température de solidification	14.01 K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs)	20.268K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K (gaz naturel 812 K)
Température de flamme dans l'air à 300k	2318 K (gaz naturel 2148 K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol%)	4-75(gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol%)	13-65(gaz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (μJ)	20(gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (Kg de TNT/m ³ de gaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)

Suppression de détonation (mélange stœchiométrie)	14.7 bar (gaz naturel 16.8 bar)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260cm/s (7fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8Km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

1.3. PRODUCTION D'HYDROGENE :

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation [4].

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir [5]:

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

De nos jours, l'hydrogène est produit pour près de 96 % (voir figure 1.1) à partir d'énergie fossile et le gaz naturel est, de loin, la matière première la plus utilisée. Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau constitue le procédé le plus économique [6].

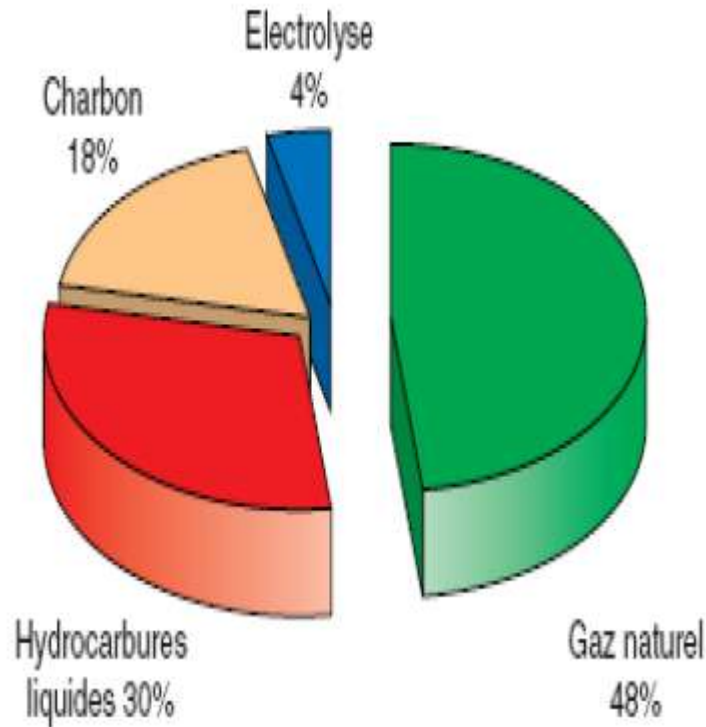


Figure 1.1 : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde [6]

Le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource (voir figure 1.2), la quantité d'hydrogène exigée et la pureté souhaitée de l'hydrogène. Les chercheurs et les industriels développent un éventail de processus pour produire l'hydrogène de manière économiquement et écologiquement satisfaisante. Ces processus peuvent être séparés en quatre groupes de technologies [7] :

- les technologies thermo-chimiques ;
- les technologies nucléaires ;
- les technologies électrolytiques ;
- les technologies photo-lytiques ;

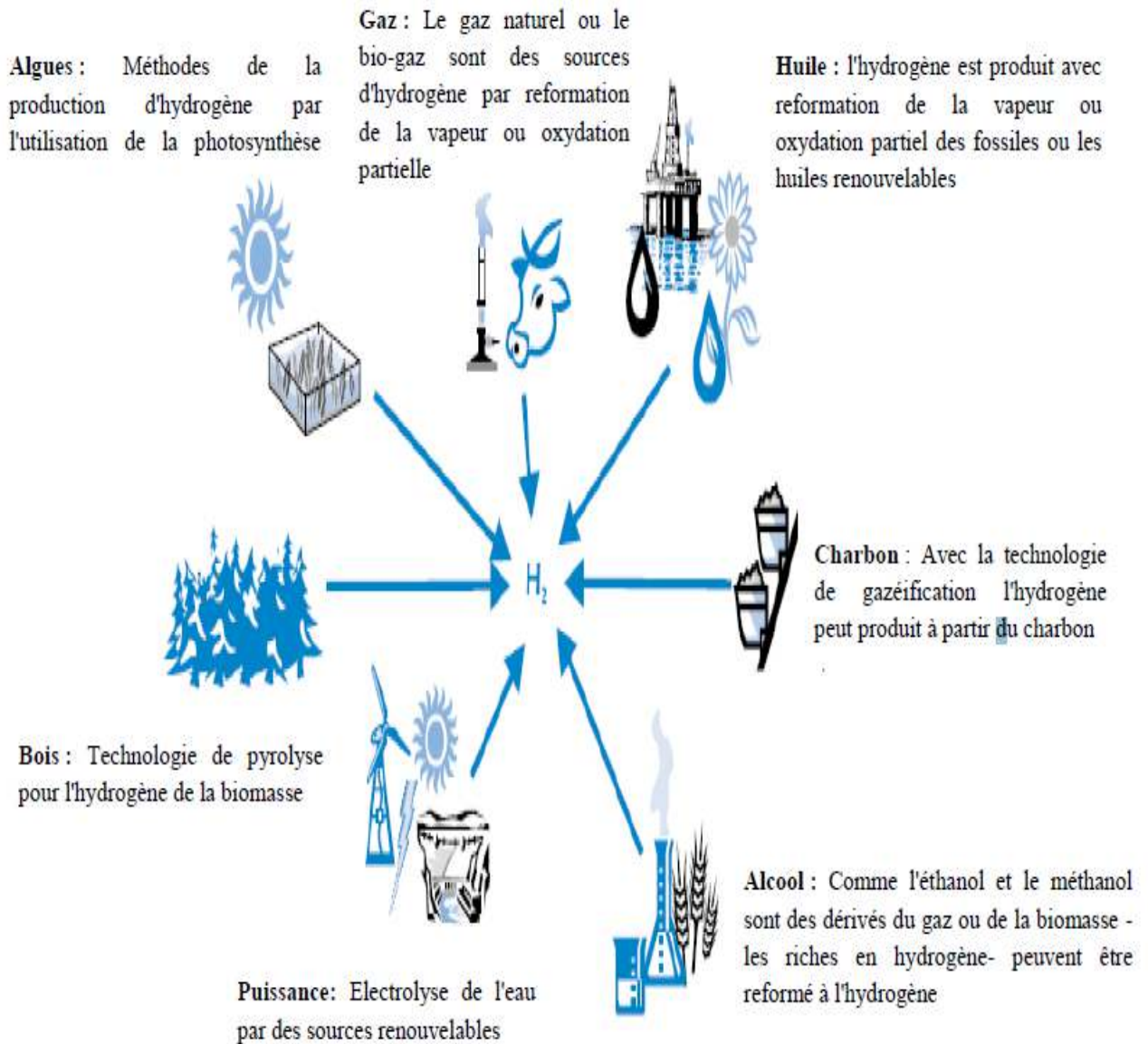


Figure 1.2 : Les matières de base et les processus utilisés dans la production d' H_2 [8]

1.3.1. Production par les combustibles fossiles :

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus est présenté dans l'apparait de CO_2 comme sous produit.

1.3.1.a. Production à partir du gaz naturel [9] :

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

- Le vaporeformage du gaz naturel

- Oxydation partielle
- Le reformage autotherme

1. Le vaporeformage du gaz naturel (SMR) [9] :

Le reformage à la vapeur consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbures en gaz de synthèse (mélange H₂, CO, CO₂, CH₄ et H₂O) par réaction avec la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel. Cette transformation a lieu à haute température (840 à 920°C) et à pression modérée (de l'ordre de 20 à 30 bars).

Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse l'équation (1. 1) et la conversion du CO l'équation (1. 2)



2. Oxydation partielle (POX) :

L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. A haute température de 900 à 1500 °C et à pression élevée 20 à 60 bars, en présence d'oxygène l'équation (1. 3) en tant qu'oxydant et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur. Le CO produite est encore convertie à H₂ comme décrit dans l'équation (1.2).



3. Le reformage autotherme (ATR) :

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

vaporeformage. Sa conception permet de compenser les réactions endothermiques du vaporeformage par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle à de la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. Ils sont ensuite dirigés vers le réacteur (catalyseur à base de nickel, pression de 20 à 60 bars et température de 900 à 1100°C) pour la production de gaz de synthèse.

1.3.1.b. Production à partir du charbon [9] :

L'hydrogène peut être produit à partir du charbon par une variété des procédés de gazéification (par exemple lit fixé, lit de fluidisation ou écoulement entraîné). Une réaction typique pour le processus est donnée dans l'équation (1.4), dans laquelle le carbone est converti en oxyde de carbone et hydrogène.



Puisque cette réaction est endothermique, la chaleur additionnelle est exigée, comme avec la reformation du méthane. Le CO est encore convertie en CO₂ et H₂ par la réaction de décalage d'eau-gaz, décrite dans l'équation (1.2).

1.3.2. Production à partir du nucléaire [2] :

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire. Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4^{ème} génération. Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire, une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 % [7].

1.3.3. Production à partir des énergies renouvelables :

Diverses sources sont exploitables:

1.3.3.a. La biomasse (agriculture, forêts, algues, déchets organiques) :

Elle pourrait être une source d'hydrogène attrayante puisque sa conversion en hydrogène donne lieu à l'émission d'une quantité de CO_2 équivalente à celle qui est nécessaire pour sa régénération; l'écobilan est donc à peu près nul.

Elle peut produire de l'hydrogène de plusieurs façons [2]:

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

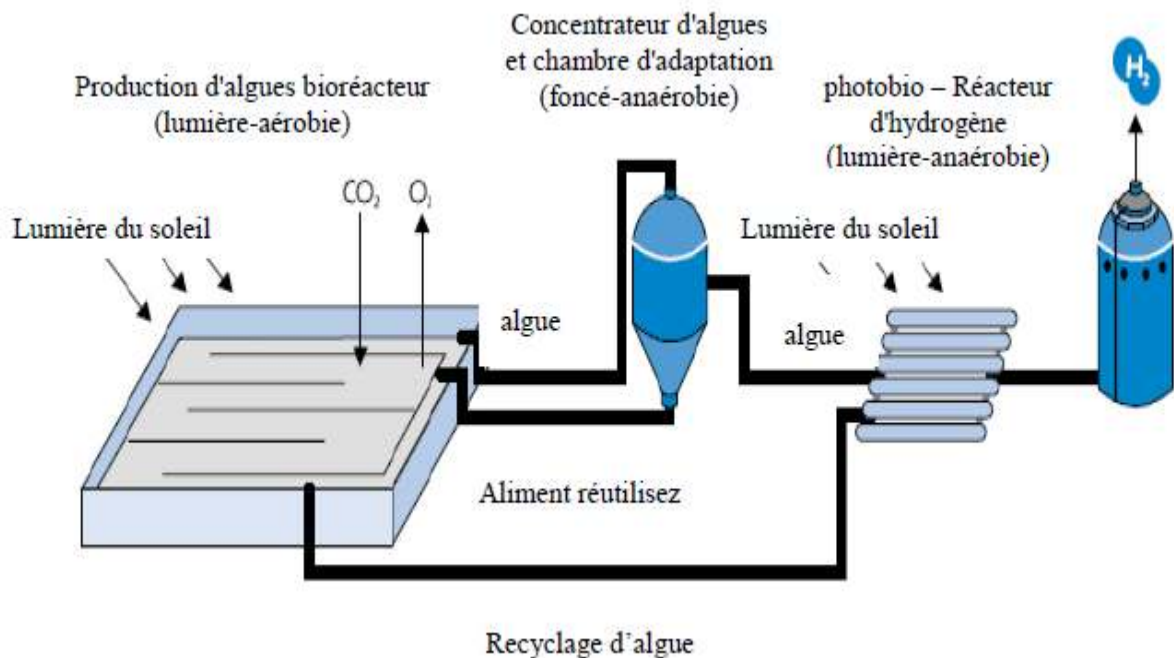


Figure 1.3 : Principe de production photo-biologique d'hydrogène [8]

1.3.3.b. Le solaire [2] :

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

- Procédés thermochimiques : Ces technologies permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C , avec un rendement supérieur à 70%, cette chaleur primaire ensuite sera convertie en vecteur

énergétique d'hydrogène. Les concentrateurs solaires pourraient être une des alternatives qui intéresse les pays qui ont des ressources importantes en énergie solaire.

- Procédés photo électrochimiques :

La cellule photolyse est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photon), décompose l'eau en oxygène et hydrogène. Une telle cellule photo électrochimique est formée d'une électrode photosensible immergée dans un électrolyte ou dans de l'eau.

Ce procédé de photolyse présente l'avantage sur la filière photovoltaïque de supprimer la nécessité de transport du courant électrique entre la centrale solaire photovoltaïque et les installations de production de l'hydrogène par hydrolyse (la conversion directe apportant en outre un rendement supérieur).

- Procédés électrolytiques :

Ce procédé consiste à dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen d'un courant électrique continu traversant un électrolyte disposé entre deux électrodes.

1.4. LES APPLICATIONS D'HYDROGENE :

1.4.1. Utilisations chimiques :

L'hydrogène réagit avec de nombreux éléments non métalliques. Il se combine avec l'azote en présence d'un catalyseur pour former de l'ammoniac, avec le soufre pour former du sulfure d'hydrogène, avec le chlore pour former du chlorure d'hydrogène et avec l'oxygène pour former de l'eau. La réaction entre l'oxygène et l'hydrogène a lieu à température ambiante et seulement en présence d'un catalyseur, tel que le platine finement divisé. Lorsque l'on enflamme un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène, il se produit une explosion. L'hydrogène se combine également avec certains métaux tels que le sodium et le lithium pour former des hydrures. L'hydrogène agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cuivre: le gaz entraîne l'oxygène et laisse le métal à l'état libre. L'hydrogène réagit avec les composés organiques insaturés pour former les composés saturés correspondants [11].

1.4.2. Utilisation énergétique :

- Piles à combustibles :

Il est extrêmement simple : il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue [13] figure (1.4):



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte ; c'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé.

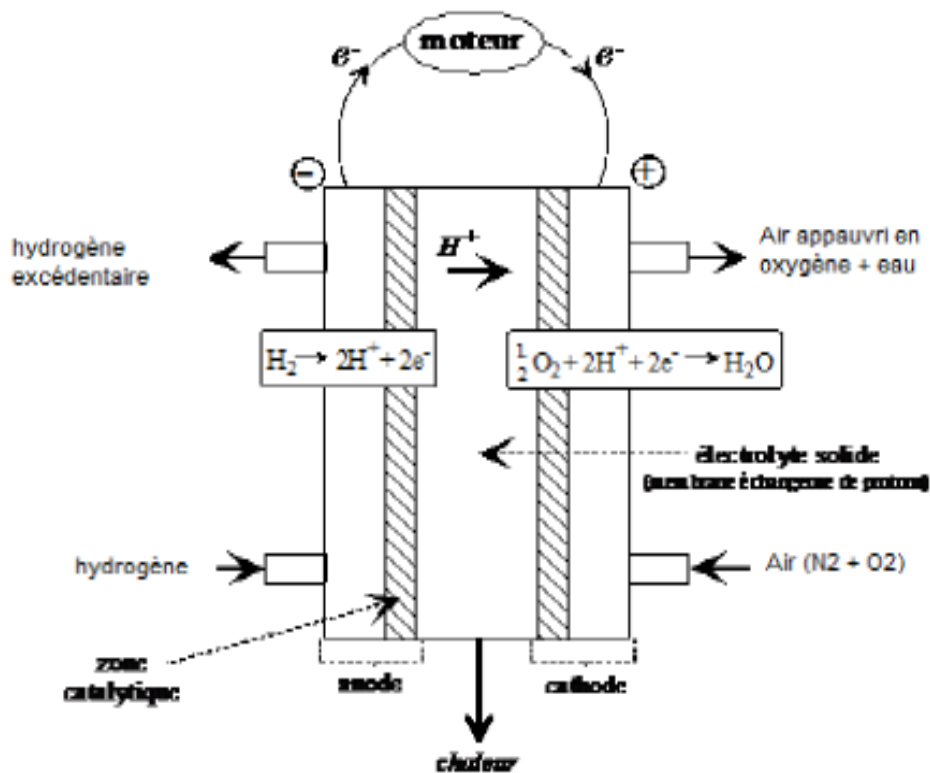


Figure 1.4 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC [13]

- Autres applications de l'hydrogène :

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

- le transport, avec des moteurs thermiques alimentés directement en hydrogène, comme le démontre le constructeur BMW depuis des années, ou avec des piles à combustible, couplées ou non à des batteries (ou super capacités) dans des montages hybrides.

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

- l'agriculture, qui, au travers des engrais, utilise déjà des sous-produits de l'hydrogène, comme des dérivés de l'ammoniac.

1.5. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS :

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

- c'est un atome très abondant sur Terre (sous forme d'eau) ;
 - c'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel (voir le tableau 1.1) ;
 - il n'est ni polluant, ni toxique ;
 - sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau ;
 - c'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air) ;
 - son transport est aisé (en particulier par pipes) ;
- ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à combustible (le moyen le plus efficace pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique) [2].

Il convient aussi de mentionner ses inconvénients:

- sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple);

- ses limites d'inflammabilité et de détonation avec de l'air sont plus larges que pour le gaz naturel (d'un facteur 5 environ), mais, de fait, seule compte la limite inférieure : 4% en

volume dans l'air au lieu de 5,3% pour la limite inférieure d'inflammabilité et 13% au lieu de 6,3% en limite inférieure de détonation. En dehors d'une situation dite « confinée » (c'est-à-dire emprisonné avec de l'air dans un volume fermé), l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. En situation confinée, l'énergie explosive théorique par m³ de gaz est 3,5 fois plus faible pour l'hydrogène et la surpression de détonation légèrement plus faible (14,7 bars contre 16,8) ;

- l'énergie minimale à fournir pour l'enflammer est 10 fois inférieure à celles d'hydrocarbures classiques (20 J pour l'hydrogène, contre 260 J pour le propane).

CHAPITRE 2 :

GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE ET LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. INTRODUCTION :

L'énergie solaire représente un gisement très important au niveau de la surface du globe terrestre. De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants (voir figure 2.1). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la grande partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [14].

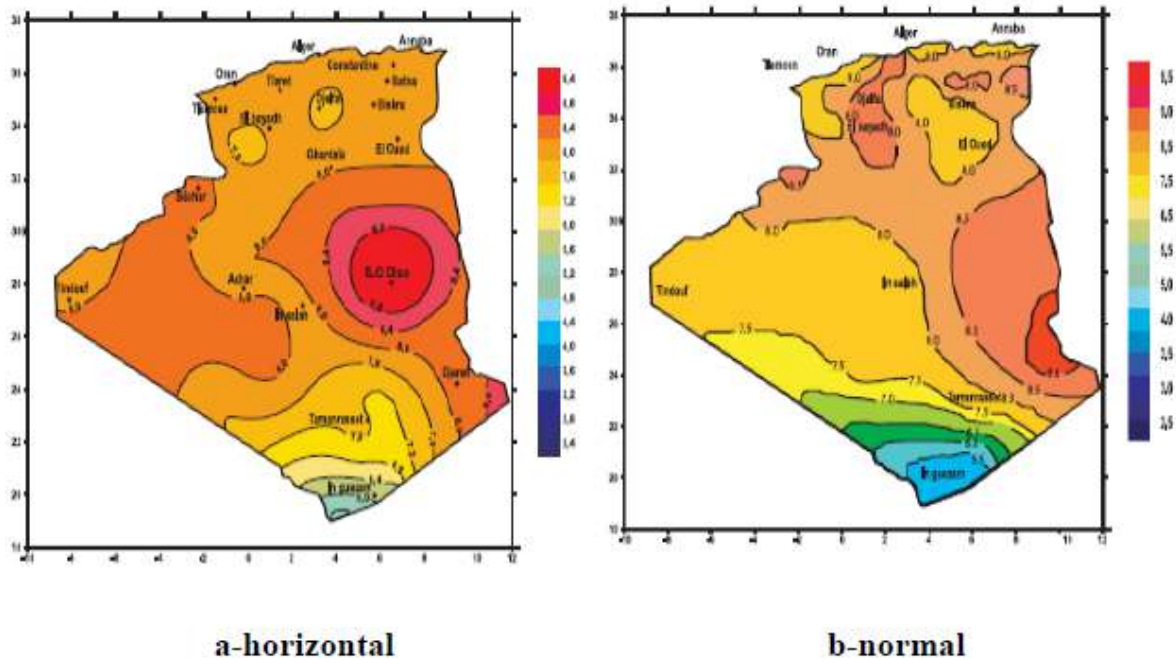


Figure 2.1 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal et normal au mois de juillet [14].

2..2. RAYONNEMENT SOLAIRE :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présenté un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0,5 μm , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780 k [15].

2.3. MOUVEMENTS DE LA TERRE :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 106 km. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont schématisés sur la figure (2.2) [16].

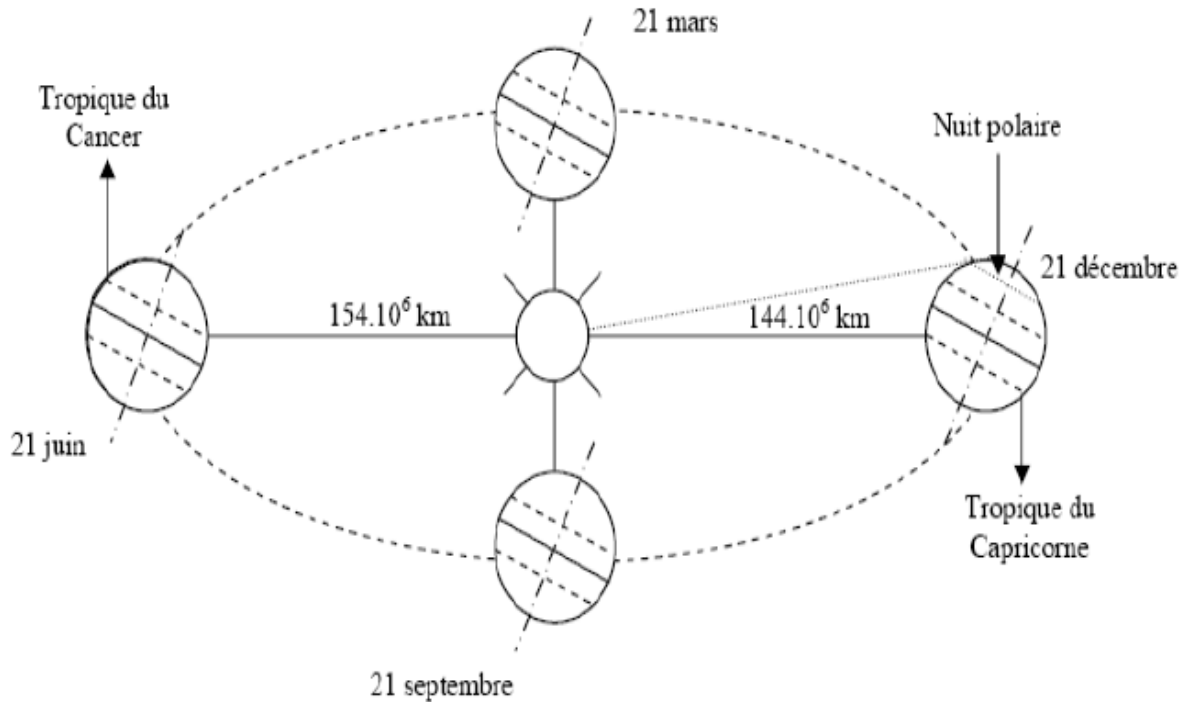


Figure 2.2 : Schématisation des mouvements de la terre autour du Soleil [16]

2.4. MODELES DE COORDONNEES SOLEIL :

2.4.1. Angles solaires :

Les angles solaires sont des grandeurs intéressantes pour le calcul de rayonnement solaire incident sur un lieu donné.

- **La latitude (φ)** : 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 [17].

- **La longitude (λ)** : représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 00. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'ouest négatives [17].

- **La déclinaison (δ)** : C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre -23.45° (Au solstice d'hiver) et $+23.45^\circ$, (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne (figure 2.2) [17].

$$\delta = +23.45^\circ \sin\left(\frac{360}{365} N - 80\right) \quad (2.1)$$

N : est le nombre de jours de l'année compté à partir du 1^{er} janvier.

- **L'angle horaire du soleil (ω)** : repère la position du soleil dans sa rotation journalière sur le cône d'ouverture δ . C'est l'angle entre le plan méridien passant par l'observateur et le plan méridien contenant le soleil [18] :

$$\omega = 15(T_{sv} - 12) \quad (2.2)$$

T_{sv} : temps solaire vrai

La position apparent du soleil est déterminée par ses coordonnées angulaires par rapport à au plan horizontal (figure 2.4), l'azimut et la hauteur angulaire.

- **L'azimut ψ** : 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 écrêtons ψ 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° (le soleil passe derrière le panneau) [18]:

$$\tan(\psi) = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varphi)\cos(\delta) - \cos(\varphi)\sin(\omega)} \quad (2.3)$$

- **La hauteur angulaire (γ)** : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 0° (au lever et au coucher) et maximum γ_m au zénith (midi en temps solaire vrai). Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrêter cette variable [18]:

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi)\sin(\omega) + \cos(\varphi)\cos(\omega)\cos(\delta) \quad (2.4)$$

Afin d'obtenir l'angle d'incidence des rayons solaires sur le capteur, une représentation schématique (figure 2.4) nous permet de visualiser clairement les différents angles pris en compte dans l'étude du rayonnement arrivant sur le plan d'un capteur.

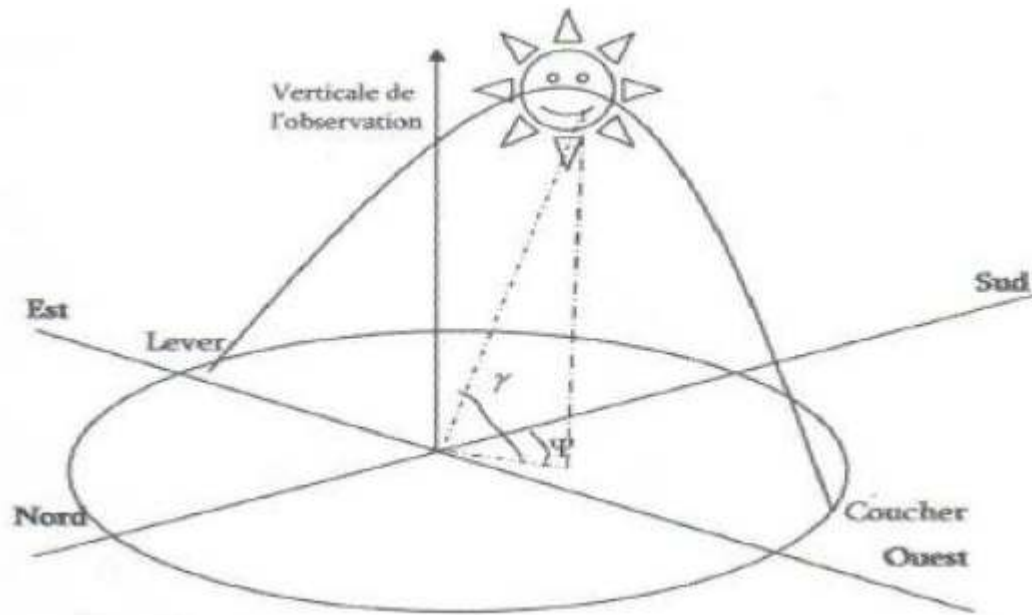


Figure 2.3 : Coordonnées angulaires du soleil [15].

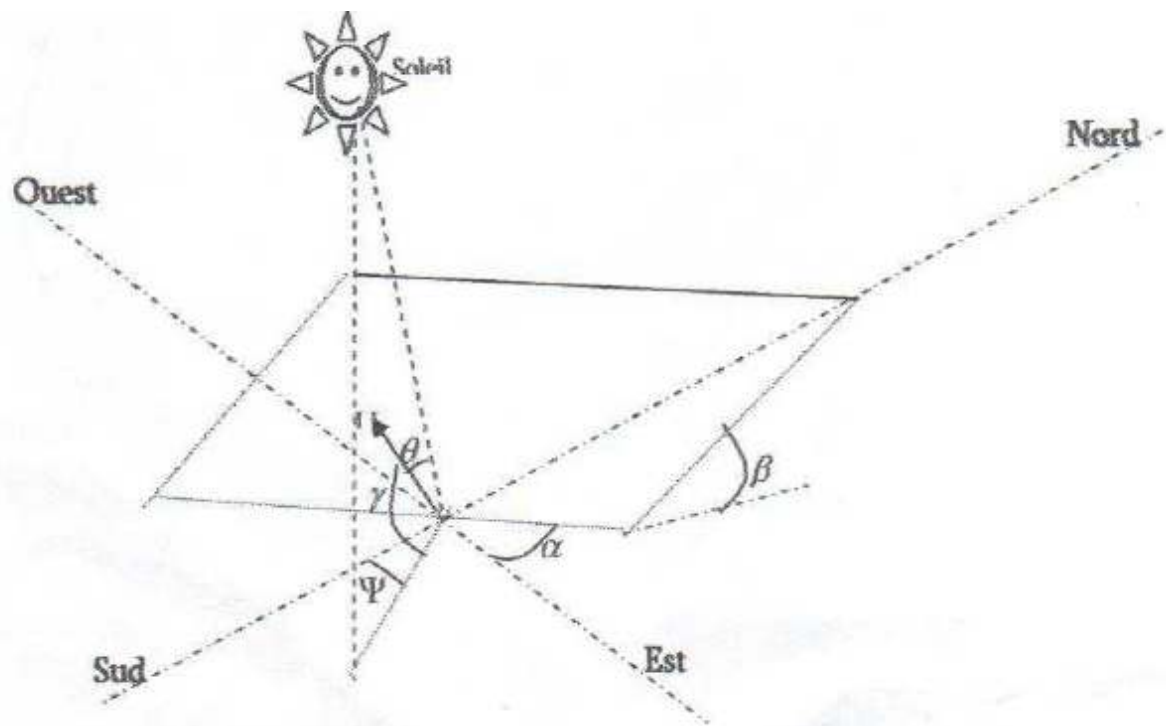


Figure 2.4 : orientation et inclinaison d'un capteur solaire [15].

- **L'orientation (α)** : du capteur par rapport au sud, (0° au sud, 180° au nord, $+90^\circ$ à l'ouest et -90° à l'est) [18]. Dans notre cas, cette variation est prise zéro.

- **L'inclinaison (β)** : du capteur par rapport au sol. Elle est nulle pour un plan horizontal.

- **L'angle d'incidence (θ)** : du rayon solaire sur la paroi. Pour une paroi face sud θ est donnée par l'expression suivante :

$$\cos(\theta) = \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta) + \cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (2.5)$$

- **Correction de distance terre-soleil (C)**: le rayonnement émis par le soleil est isotrope et de puissance constante. La puissance reçue (en dehors de l'atmosphère) sur un plan, de surface unité, perpendiculaire aux rayons solaires est donc inversement proportionnelle au carré de la distance au soleil [23] :

$$C = \frac{d}{d_0} = 1 + 0,034 \cos \left[(N - 3) \frac{360}{365} \right] \quad (2.6)$$

d : la distance terre soleil ;

d_0 : la distance moyenne terre soleil ;

2 .5. MODELE DU RAYONNEMENT SOLAIRE :

A. Rayonnement solaire sur un plan horizontal :

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface horizontale est constitué de deux composantes principales [19]:

- Rayonnement direct.
- Rayonnement diffus.

A.1. Rayonnement direct :

C'est un flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct :

$$SH = 1367 C \sin \left(h \exp \left(\frac{-T_L}{0,9 \cdot 9.41.M} \right) \right) \quad (2.7)$$

Avec :

SH : Flux direct reçu par une surface horizontale.

C : La correction de la distance terre soleil.

h : Hauteur du soleil.

T_L : Facteur de trouble.

M : Nombre d'aire masse.

A.2. Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus est donné par :

$$DH = \frac{1367}{3} C - \sin[h - 2] \exp \left[-\log^2 \left(\frac{T_L}{22.M^{-0,65}} \right) \right] \quad (2.8)$$

A.3. Rayonnement global GH :

Un plan horizontal reçoit de la part du soleil un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des deux composantes direct et diffus :

$$GH = SH + DH \quad (2.9)$$

B. Rayonnement solaire reçu par un plan incliné :

Une surface inclinée par rapport à l'horizontale avec l'angle β reçoit une puissance énergétique répartie entre le direct ; le diffus, et le réfléchi [19].

B.1. Rayonnement direct :

Soit un lieu de latitude φ , le flux direct est défini par :

$$R_b = \frac{S_B}{S_H} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)} \quad (2.10)$$

R_b : facteur qui permet de passer du rayonnement direct sur une surface horizontale à une surface inclinée.

S_B : Rayonnement direct reçu par une surface inclinée.

S_H : Rayonnement direct reçu par une surface horizontale.

Alors le flux direct pour le plan incliné.

$$SB = R_b \cdot SH \quad (2.11)$$

B.2. Rayonnement diffus :

Le flux à une inclinaison β et l'altitude φ capté par une surface orientée face sud-est donné par le modèle suivant:

$$DB = DH \left[F \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + (1 - F) \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} \right] \quad (2.12)$$

Avec:

$$F = 1 - KT \left[1 - \frac{SH}{GH} \right]$$

KT: Coefficient de sérénité.

B.3. Rayonnement réfléchi

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

$$RRB = GH \left[\xi \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \right] \quad (2.13)$$

B.4. Rayonnement global incliné

C'est la superposition des flux direct, réfléchi et diffus.

$$GB = SB + Db + RRB \quad (2.14)$$

On peut calculer le flux solaire global par la relation suivante pour un plan incliné d'angle β

$$GB = R GH \quad (2.15)$$

R : Rapport du flux global.

D'où :

$$R = \frac{GB}{GH} = \left(1 - \frac{DH}{GH} \right) Rb + \frac{DH}{GH} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \xi \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (2.16)$$

2.6. DUREE D'INSOLATION :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un

papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrées ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages [15].

2.7. DUREE DU JOUR :

Pour un jour et un lieu donnés, l'azimut ψ et la hauteur h du soleil sont parfaitement déterminés par l'angle ω .

On s'intéresse ici à deux instants particuliers de la journée : ceux pour lesquels la hauteur h est nulle, le lever et le coucher du soleil. La Durée du jour est donnée par :

$$D_j = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan(\delta) \tan(\phi)] \quad (2.17)$$

2.8. LES JOURS TYPE DES MOIS :

On appelle jour type du mois pour une grandeur donnée, le jour du mois se rapprochant le plus de la moyenne mensuelle de cette grandeur. Klein a spécifié une liste des jours types des mois qui sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 : les jours types

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Jour type	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
N° de jour	17	47	75	105	135	162	198	228	258	289	318	344

2.9. SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :

2.9.1. L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie photovoltaïque en énergie électrique. Cet effet est obtenu avec des matériaux 'semi-conducteur' tel que le silicium, qui ont des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants, dans les quels l'absorption des photons

libère des charges électriques, ce phénomène ne peut se produire que s'il existe une structure de collecte tel qu'une jonction (p-n).

2.9.2 Principe de fonctionnement:

• Photopile

La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.

Quand un photon de lumière, d'énergie suffisante, heurte un atome sur la partie négative de cette diode, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie (voir figure 2.5). Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive, avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur. Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu (CC), mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile [21].

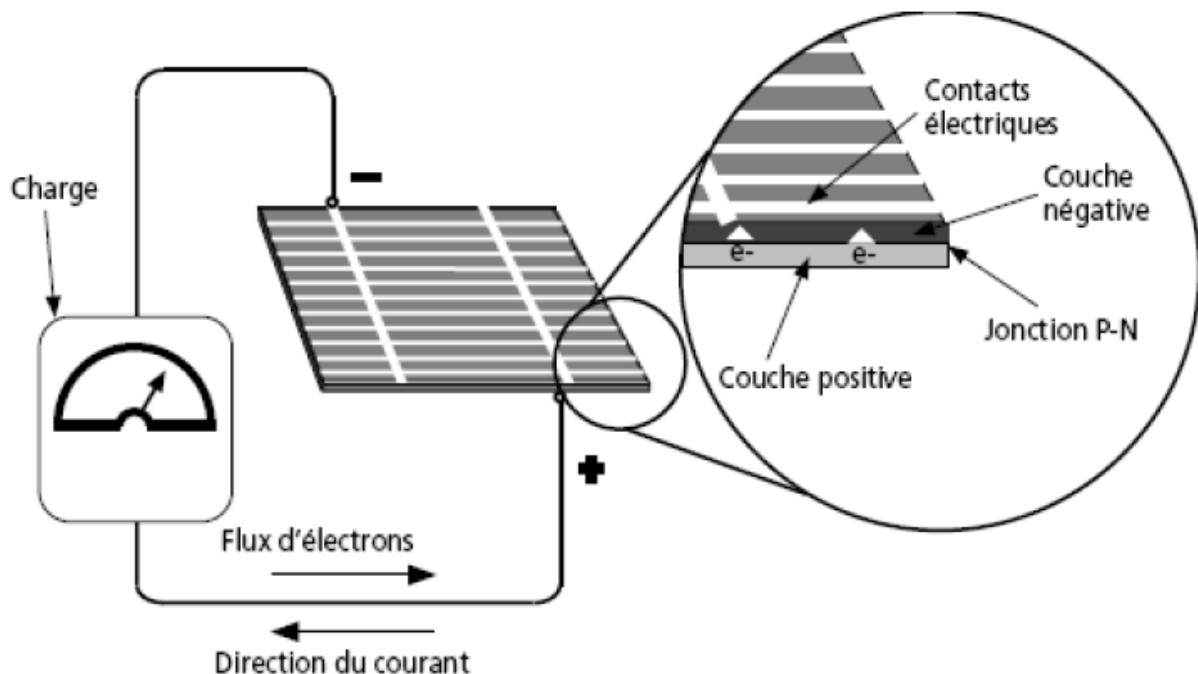


Figure 2.5 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [20]

2.9.3. Caractéristiques d'une cellule solaire :

La caractéristique courant-tension $I = f(v)$ définit la cellule comme générateur (Fig.2.6).

- Le courant de court circuit correspondant au point où la tension est nulle (point4).
- La tension de circuit ouvert correspondant au point où le courant est nulle.

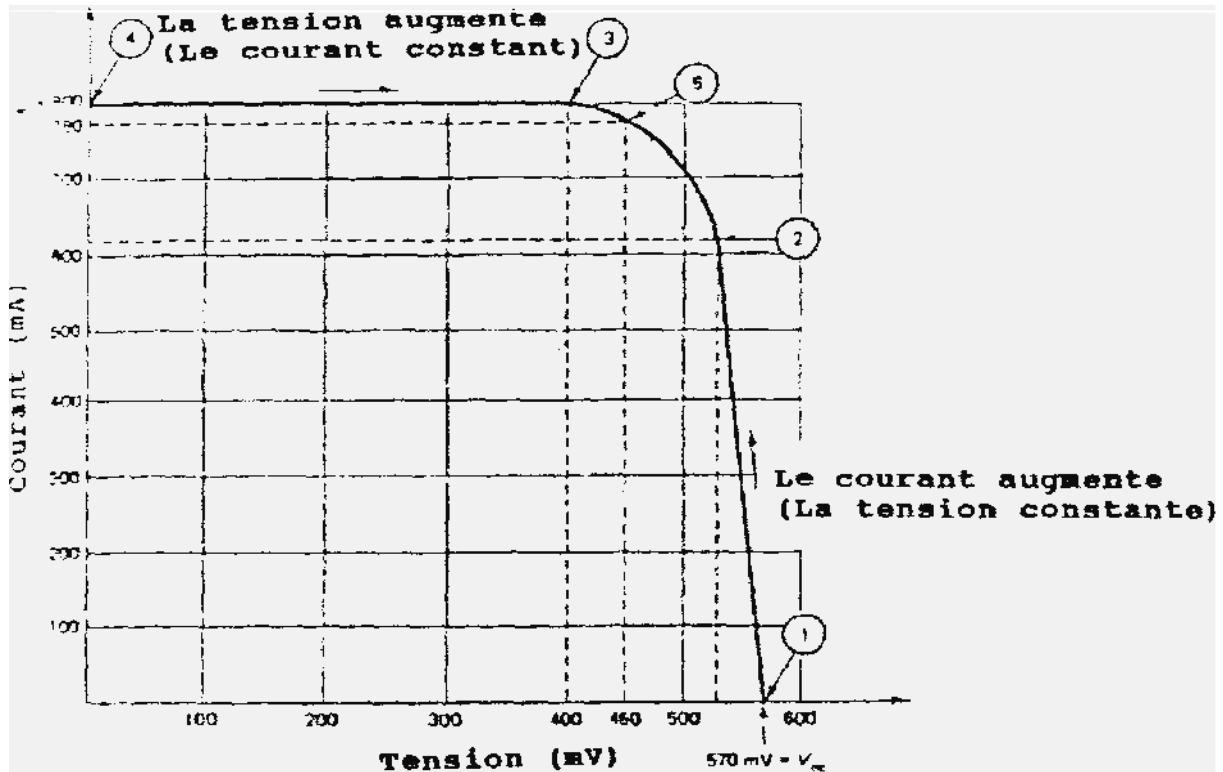


Figure (2.6) : Caractéristique électrique d'une cellule [20].

- Le point de fonctionnement optimal défini par le courant optimal et la tension optimal est celui où la cellule solaire délivre la puissance maximale (point5).

Les points 2 et 3 délimitent la zone de fonctionnement de la cellule. Donc une cellule solaire ne peut être assimilée à aucun générateur classique d'énergie électrique de type continu.

Zone (3,4) : La cellule se comporte comme un générateur de courant cela est valable lorsque la résistance de charge est faible.

Zone (1,2) : La cellule se comporte comme un générateur de tension lorsque la résistance de charge est importante.

Zone (2,3) : La cellule ne se comporte ni en générateur de courant ni en générateur de tension, la valeur de la résistance de charge est la seule qui détermine le point de fonctionnement.

2.9.4. Les modules solaires photovoltaïques

Un module est un assemblage de cellules permettant d'obtenir une énergie stable, sous tension utilisable. Pour une tension pratique à utiliser, un module contient généralement de 33 à 72 cellules (P.V).

• Caractéristiques d'un module:

1. La puissance-crête (W_c) [20] d'un module photovoltaïque est la puissance électrique maximale qu'il peut fournir, dans les conditions de mesures normalisées suivantes:

- lorsqu'il est connecté à une charge optimale;
- lorsqu'il reçoit du soleil une puissance de 1000W/m^2 . Ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair;
- lorsque la température à la jonction des cellules est de $25\text{ }^\circ\text{C}$; Il s'agit donc de conditions idéales conventionnelles qui sont très rarement remplies dans la pratique.

2. La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci [15].

3. Tension à vide V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil "[15].

4. Courant de court-circuit, I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairage " plein soleil "[15].

5. Point de fonctionnement optimum, (V_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$ [15]

6. Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente [20].

7. Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$ [15].

2.9.5 Eléments d'un système solaire photovoltaïque :

Un système photovoltaïque est composé généralement des éléments suivants :

- Un générateur ou (champ) photovoltaïque.
- Système de stockage
- Système de régulation

- Système de conversion
- La Charge.

A- Le champ photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques (voir figure 2.7) interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [20].

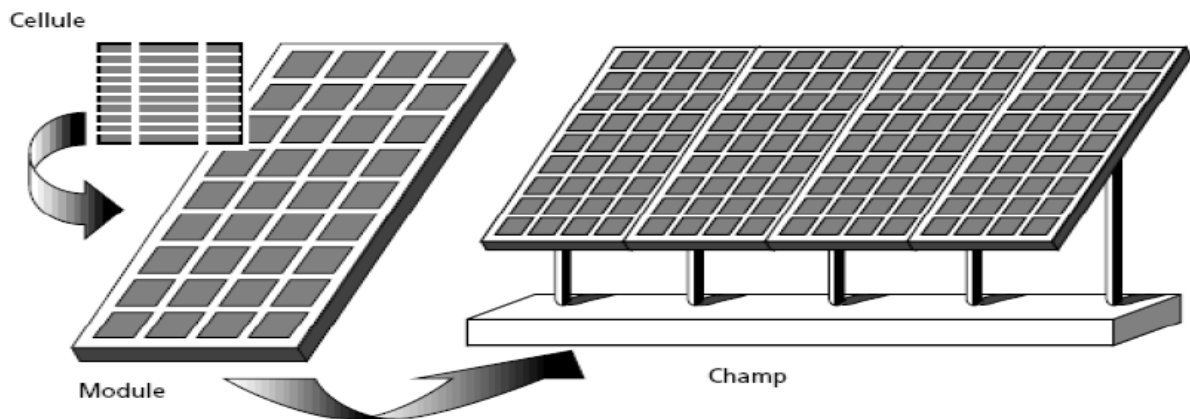


Figure (2.7) : Composantes d'un champ de modules photovoltaïques [20].

La figure (2.8) montre deux configurations des associations série parallèle des modules PV.

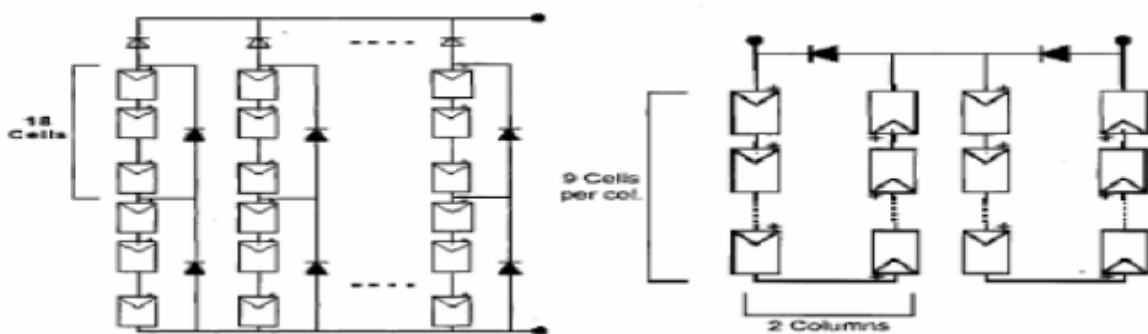


Figure (2.8) : Configurations des associations série parallèle des modules PV [15].

B. Système de stockage :

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire

nécessite s'envisager des stockages suivant les conditions météorologiques et qui vont répondre à deux fonction principales [1] :

-Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)

-Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

- **Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :**

1. Capacité en Ampère heure : Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que [1]:

2. Rapports de chargement et déchargement : Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

- **Température :** Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère

3. La durée de vie : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent .Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [11].

4. Profondeur de décharge : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

La tension d'utilisation : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

5. Le rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

6. Le taux d'autodécharge : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

Types d'accumulateurs :

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont [14] :

- Les Accumulateurs au plomb acide.
- Les Accumulateurs au Nickel- cadmium.

La figure (2.9) indique la construction d'une batterie monobloc.

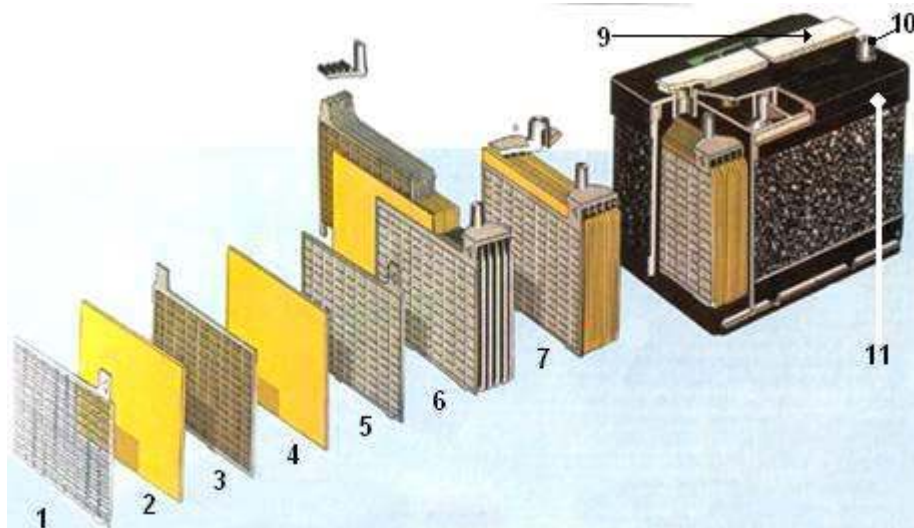


Figure 2.9 : Construction d'une batterie monobloc [14].

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille. | 7 : Élément complet |
| 2 : Séparateur. | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative. | 10 : Borne. |
| 5 : Barrette. | 11 : Bac. |
| 6 : Faisceau négatif. | |

C. Système de régulation :

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux

atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

Il existe plusieurs types de régulateurs :

- **Régulation de décharge** : on trouve.

- a) Régulations de charge série.
- b) Régulateur de charge de coupure.
- c) Régulateur de charge à découpage.
- d) Régulateur de charge série à coupure partielle.
- e) Régulateur de charge parallèle.

D. Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [25].

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil [25].

E. 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 (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur [20].

Dans notre cas où le système utilise du courant continu, l'installation photovoltaïque comporte : un générateur photovoltaïque, un régulateur de charge, et des batteries.

Chapitre 3 :

ELECTROLYSE DE L'EAU

3.1. INTRODUCTION :

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

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

3.2. PRINCIPE GENERAL DE L'ELECTROLYSE DE L'EAU :

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide [10].

3.3. QUALITE DE L'EAU D'ALIMENTATION :

L'eau introduite dans l'électrolyseur doit être la plus pure possible car les impuretés demeurent dans l'appareil et s'accumulent au fil de l'électrolyse. Elles finissent par perturber les réactions électrolytiques par [18]:

- formation de boues ;
- action des chlorures (les halogénures en général) qui détruisent la protection par nickelage ou le nickel massif des anodes ;

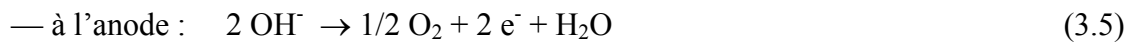
Après une première épuration, l'eau traverse un filtre à charbon actif, puis subit une déminéralisation totale par passage sur un filtre à couche mixte à échangeur d'ions. On souhaite obtenir une résistivité électrique supérieure à $2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ (soit $2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$).

3.4. ASPECTS THEORIQUES DE L'ELECTROLYSE DE L'EAU :

En solution acide, on admet généralement que la décomposition de l'eau s'effectue suivant les réactions (3.1), (3.2) :



b) En solution alcaline, par contre, les ions OH^- prédominent et le phénomène est habituellement exprimé par les équations (3.4) et (3.5) :



Dans les deux cas, la réaction globale s'écrit:



avec $\Delta H = 285 \text{ kJ/mol H}_2\text{O}$ enthalpie de dissociation de l'eau.

Par ailleurs, l'équation de Nernst exprime la tension de décomposition réversible est sous la forme suivante (3.7) :

$$E_{rev} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{0.5}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.7)$$

Avec :

R : constante molaire des gaz (= 8,314 4 J mol⁻¹ K⁻¹),

T (K) : température thermodynamique,

F : constante de Faraday (= 96 487 C mol⁻¹),

E_0 (V) : tension de décomposition réversible dans les conditions normales (0 °C, pression atmosphérique)

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

$$E_{rev} = E_0 + \frac{3RT}{4F} \ln P - \frac{RT}{2F} \ln a_{H_2O} \quad (3.8)$$

a_{H_2O} : Activité de la solution.

Cette tension de décomposition réversible s'établit à 1,229 V dans les conditions normales.

À température ambiante (20 °C) d'où :

$$E_{rev} = 1,233 + 0,043 5 \lg P \quad (3.9)$$

Un accroissement de pression augmente la tension de décomposition réversible mais, en pratique, le fonctionnement irréversible des électrolyseurs industriels a pour effet de réduire la tension de cellule effective à densité de courant et température constantes (figure 3.1) lorsque la pression augmente.

La tension thermoneutre correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur. Elle s'exprime par (3.10):

$$E_{th} = \frac{\Delta H}{2F} = 1.48V \quad (\text{à } 298 \text{ K}) \quad (3.10)$$

Cette tension ne dépend que faiblement de la température. Un accroissement de température entraîne par contre une diminution de la tension de décomposition réversible.

Cette diminution se répercute aux bornes de l'électrolyseur où l'on peut, en général, constater un gain de 2 à 5 mV/°C.

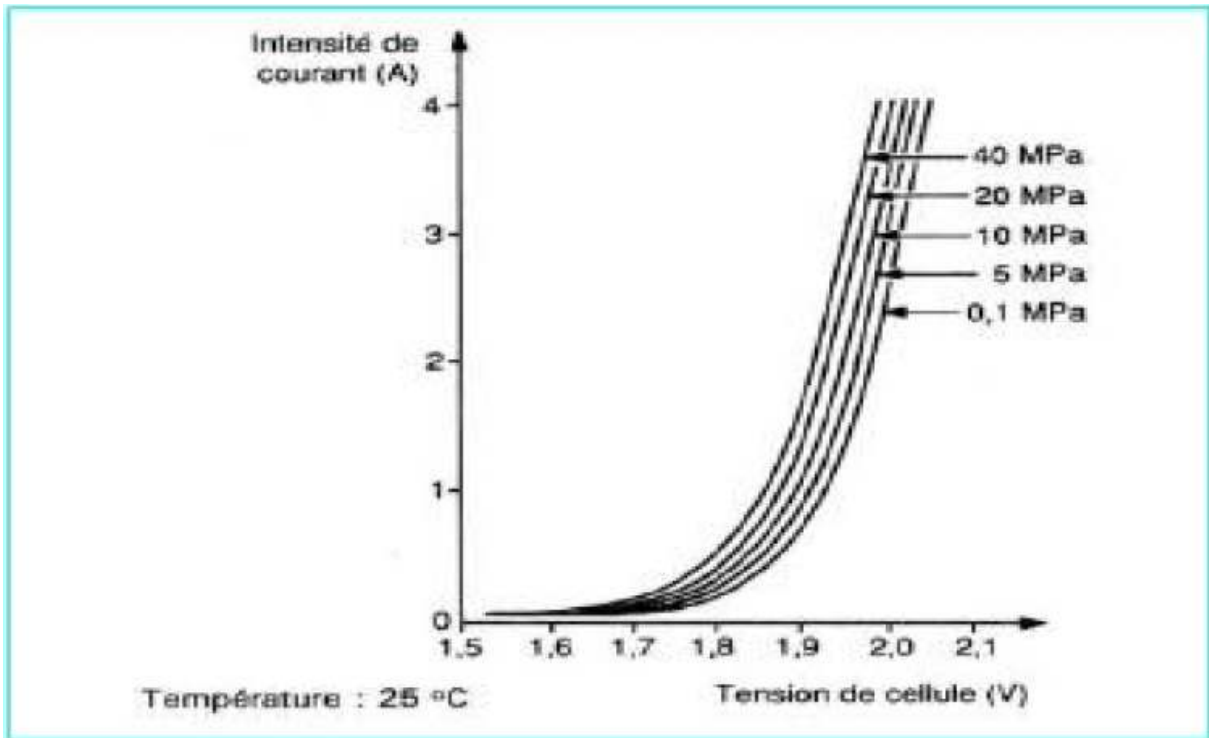


Figure 3.1 : Influence de la pression sur les caractéristiques de fonctionnement de l'électrolyseur [23]

3.4.2. Cinétique :

La tension de cellule réelle d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes donnée par l'équation (3.11) [26]:

$$E = E_{rev} + \eta_a + \eta_c + R_c j \quad (3.11)$$

Avec :

η_a (V) : surtension anodique,

η_c (V) : surtension cathodique,

R_c ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) : résistance globale (chute ohmique du diaphragme, épaisseur des compartiments, effet d'écran des bulles),

J (A/cm²) :densité de courant,

La figure 3.2 présente un exemple de répartition de la tension en fonction de la densité de courant.

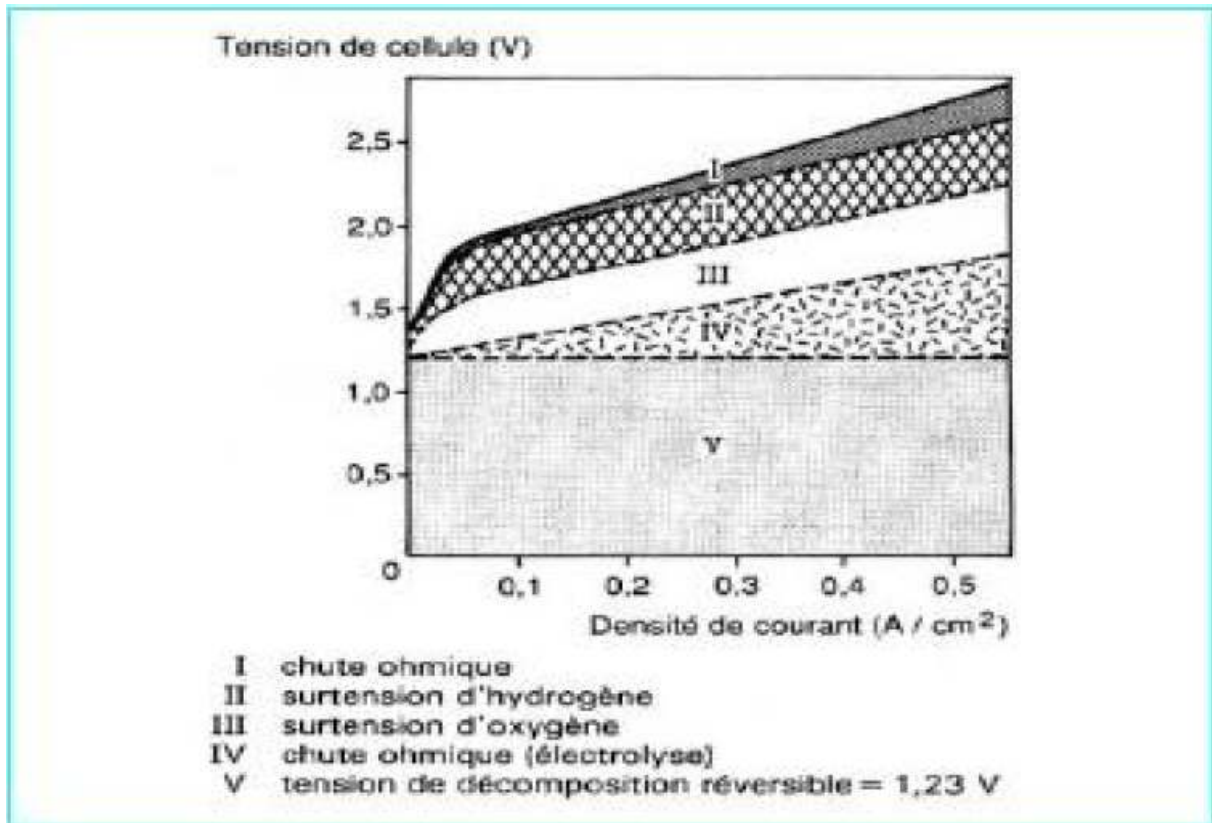


Figure 3.2 : Exemple de décomposition d'une courbe caractéristique tension-densité de courant pour une cellule d'électrolyse de l'eau [23]

3.5. LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'ELECTROLYSEURS :

3.5. a. Electrolyseurs alcalins :

3.5. a.1. Principe :

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. 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⁺) [27]. Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous.





La figure ci-après illustre le principe de fonctionnement d'un électrolyseur alcaline.

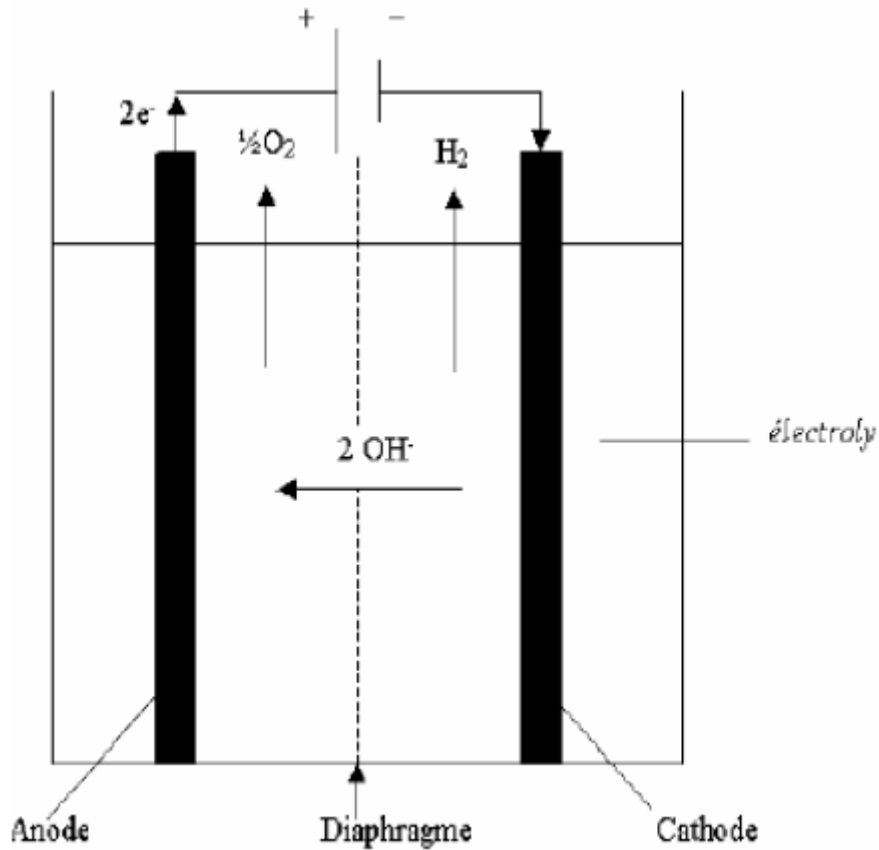
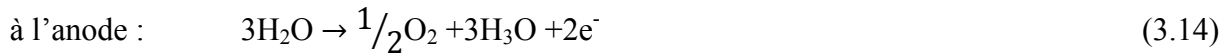


Figure 3.3 : Principe de l'électrolyseur alcaline [10].

3.5.b. Electrolyseurs PEM :

3.5.b.1. Principe :

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les réactions ci-dessous [27] :



Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure (3.4). Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM.

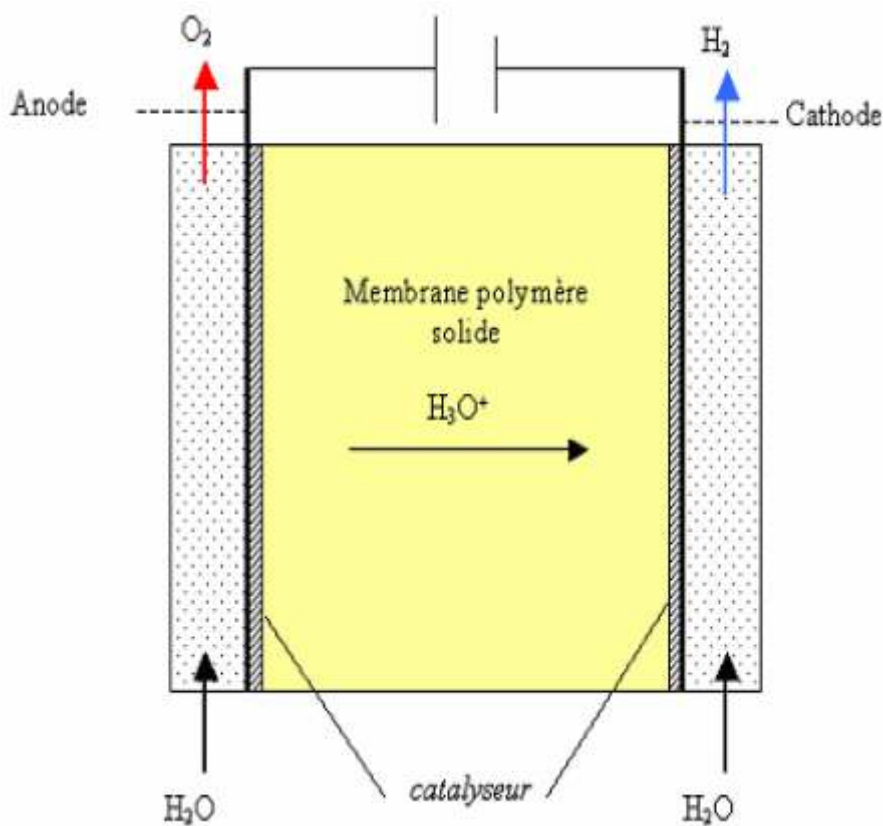


Figure 3.4 : Principe schématique de l'électrolyse PEM [10].

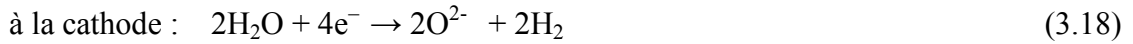
3.5.c. Electrolyseurs à haute température :

3.5.c.1. Principe :

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

conduction d'ions superoxydes O^{2-} (voir figure 3.5) [26]. Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte:

- **Electrolyte à conduction d'ions superoxydes:**



- **Electrolyte à conduction protonique:**

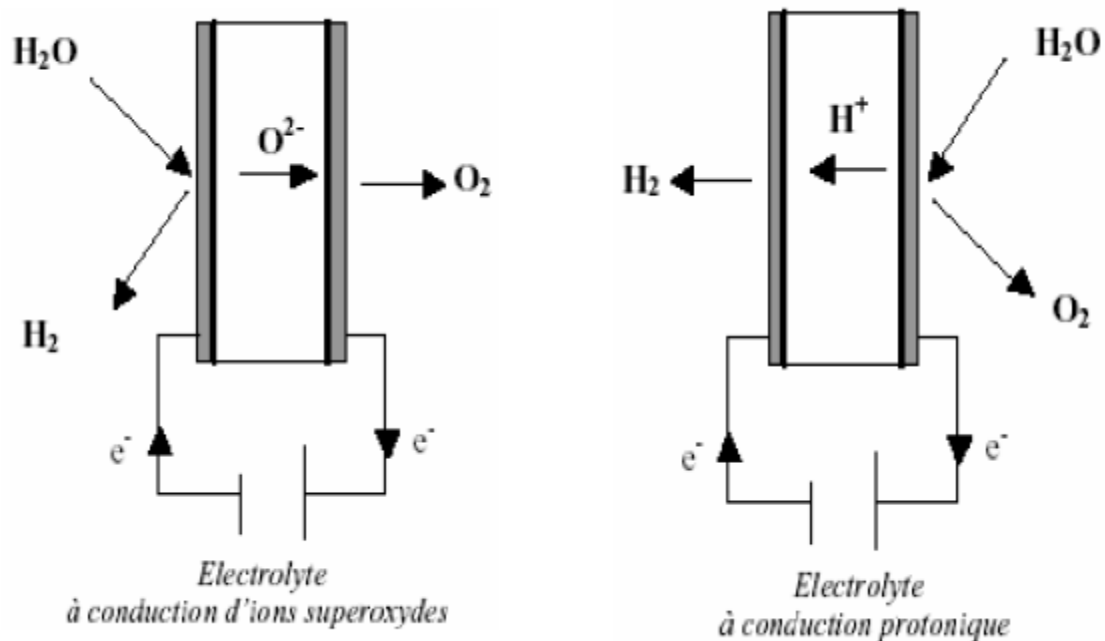


Figure 3.5 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte [10].

D'un point de vue thermodynamique, l'électrolyse de l'eau à haute température est plus intéressante car l'énergie d'électrolyse est apportée à la fois par la chaleur et l'électricité. Le principal avantage de ce type d'électrolyse est que la majeure partie de l'énergie d'électrolyse est apportée par la chaleur qui est beaucoup moins chère que l'électricité. D'un point de vue cinétique, l'augmentation de température permet de diminuer l'ensemble des surtensions d'électrodes et donc de diminuer la consommation d'énergie électrique.

CHAPITRE 4 :

GENERALITES SUR LES PILES A COMBUSTIBLES

4.1. INTRODUCTION:

La pile à combustible convertit l'énergie chimique en énergie électrique. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. Cette expérience donne naissance à la batterie à gaz, renommée plus tard pile à combustible.

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Tandis que l'électrolyse décompose l'eau en hydrogène et en oxygène sous l'action d'un courant électrique, la pile à combustible recombine l'oxygène et l'hydrogène en créant un courant électrique.

Les piles à combustibles se différencient selon la nature de leur électrolyte, par le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'applications dans lesquels chaque type peut être utilisé. Par ailleurs, chaque pile a des exigences différentes en termes de combustibles, c'est ce que nous permet de les classer de la façon suivante [30-33] :

4.2. CLASSIFICATION DES PILES A COMBUSTIBLES :

Les piles à combustibles sont classifiées comme suit :

- Les piles à électrolyte alcalin :

Dans cette catégorie il n'existe qu'une seule pile, considérée comme une pile à basse température du fait qu'elle fonctionne à une température inférieure à 100°C qui est :

- La pile à combustible à électrolyte alcalin (AFC : Alkaline Fuel cell).
- Les piles à électrolyte acide :

Elle présente une gamme beaucoup plus variée, elles se distinguent par rapport à leur température optimale :

- Les piles à haute température (>500°C) :
 - La pile à combustible oxyde solide (SOFC : Solide Oxyde Fuel Cell).
 - La pile à combustible carbonate fondu (MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell).
- Les piles à base température (<300°C) :
 - La pile à combustible à méthanol directe (DMFC : Direct Méthanol fuel cell).
 - La pile à combustible à acide phosphorique (PAFC : Phosphoric acid fuel cell).
 - La pile à combustible à électrolyte polymère solide (PEMFC : Proton Exchange Membrane fuel cell).

Tableau 4.1 : Les différents types de piles à combustible [18]

Type de pile	Electrolyte	Température de fonctionnement en °C	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transports. Gamme : 1-100 kW
Acide polymère (PEMFC et DMFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transport, stationnaire Gamme : 10mW-100kW
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (liquide)	200	Stationnaire, transports Gamme : 200kW-10 MW
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondus (liquide)	650	Stationnaire Gamme : 500kW-10 MW
Oxyde solide (PCFC)	Céramique (solide)	400 à 600	Stationnaire, transports Gamme : 1kW-10 MW
Oxyde solide (SOFC)	Céramique (solide)	600 à 10000	Stationnaire, transports Gamme : 1kW-10 MW

4.3. LA PILE A COMBUSTIBLE A ELECTROLYTE POLYMERE SOLIDE:

4.3.1 Technologie de PEMFC :

La technologie dite « acide a polymère solide», appelé PEMFC, concentre actuellement le plus gros effort de recherche et développement dans le monde. Les recherches visent essentiellement [34] :

- A augmenter les performances, a éliminé les problèmes techniques (perte de charge ou d'évacuation d'eau,...).
- A diminuer le coût des composantes critiques.
- Et d'assurer la sûreté de l'utilisation en minimisant l'impact sur l'environnement.

Cette technologie retient l'attention pour :

- ✓ Sa température de fonctionnement, relativement basse (de l'ambiante à 100°C), laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite a température ambiante [35].
- ✓ Elle est insensible à la présence de CO₂ dans l'air contrairement à la filière alcaline [36].
- ✓ Elle est de technologie toute solide et peut donc prétendre à la fois à des durées de vie sensiblement supérieure aux filières a électrolyte liquide avec : une forte densité de puissance, moins de corrosion, sans aucun problème d'aménagement d'électrolyte, ainsi une industrialisation plus simple de la filière [37].
- ✓ Du point de vue environnement, la PEMFC alimentée en hydrogène (écologique) émet zéro polluant et donc, elle peut prétendre à être la plus écologique des PAC [38.39].

4.3.2 Description générale d'une PàC PEM :

Une PAC PEM est un générateur qui convertit directement l'énergie d'un combustible (hydrogène pur ou hydrocarbure) en énergie électrique, par un procédé électrochimique. Le bilan de la réaction finale est la production d'électricité, d'eau et de chaleur.



À l'instar de tout générateur électrochimique ou batterie, la PAC est composée de deux électrodes et d'un électrolyte. Toutefois, bien que la PAC ait un certain nombre de comportements et caractéristiques semblables à ceux d'une batterie, les deux systèmes diffèrent sur plusieurs points. Tout d'abord, une batterie peut être vue comme un dispositif de stockage d'énergie. L'énergie maximale utilisable est déterminée par la quantité de réactants chimiques stockés dans la batterie elle-même. A contrario, les produits réactifs ne sont pas stockés à l'intérieur de la PAC et ses électrodes ne sont pas consommées avec le temps. Le combustible et le comburant proviennent d'une source externe (réservoir pour l'hydrogène, air ambiant pour l'oxygène) et, aussi longtemps qu'ils sont fournis à la PAC, de l'électricité peut être produite.

Une cellule de PAC PEM est constituée d'un empilement élémentaire anode – électrolyte - cathode alimenté en réactifs par l'intermédiaire de plaques distributrices. La Figure (4.1) représente un schéma de principe pour le fonctionnement d'une cellule élémentaire de pile PEM.

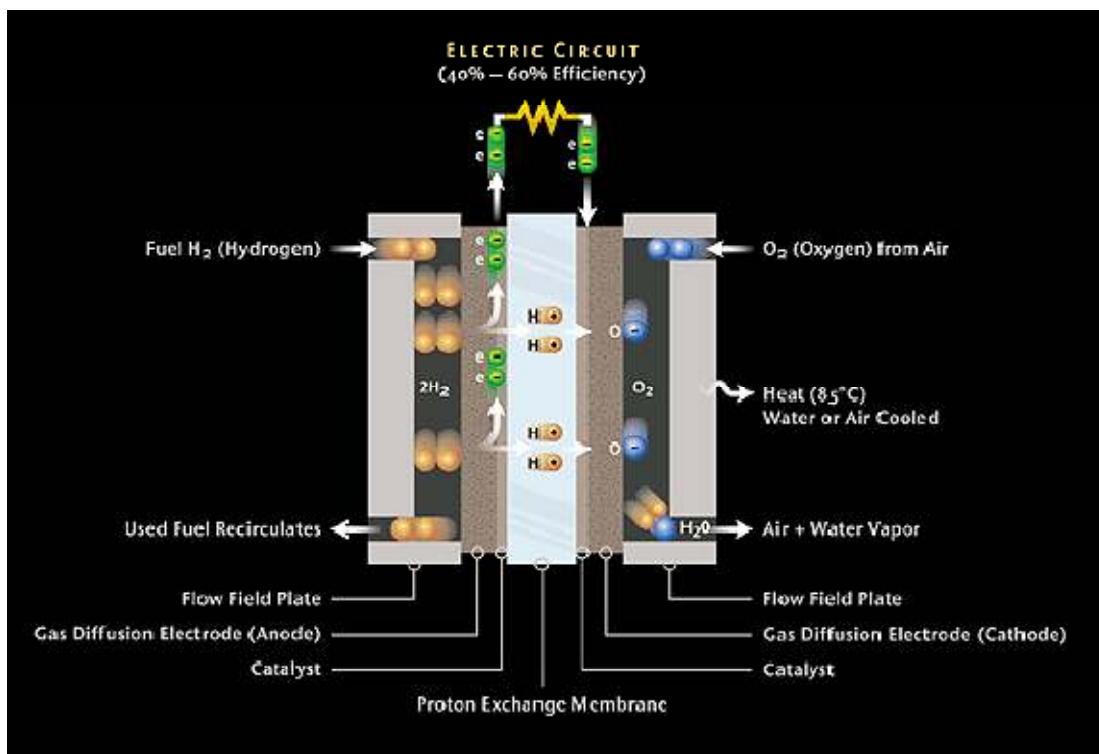


Figure 4.1 : Description générale du fonctionnement d'une PAC de type PEM [47].

La différence de potentiel aux bornes de chaque cellule de pile est faible ; en fonctionnement, elle est inférieure au Volt. Dans la pratique, la PAC est souvent constituée d'un certain nombre de cellules élémentaires raccordées en série électriquement et en

parallèle sur le plan fluide. L'empilement de cellules, communément appelé stack, permet alors de disposer d'un niveau de tension suffisant.

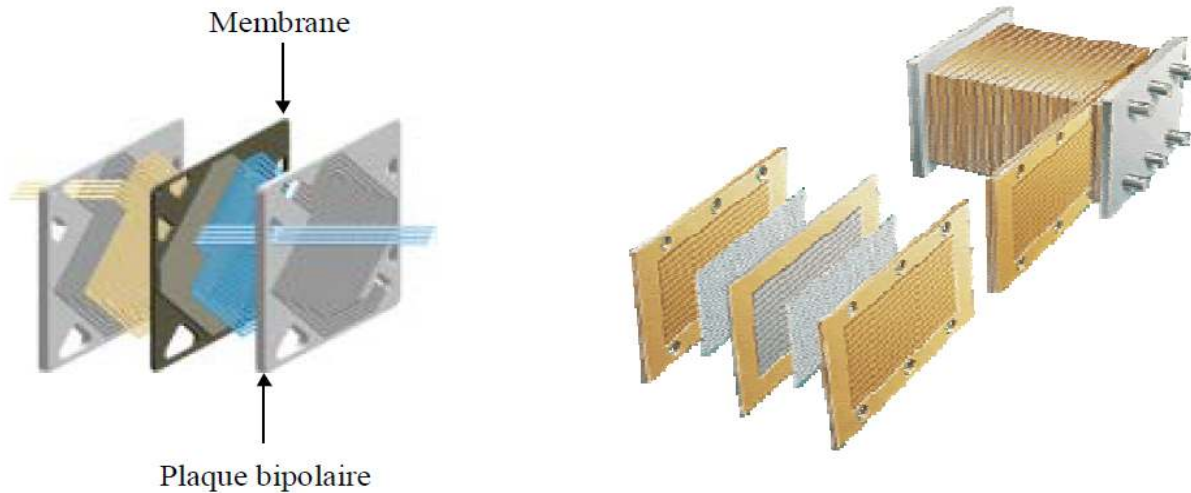


Figure 4.2 : Schémas représentant une cellule élémentaire et un empilement (stack) [47].

4.3.3 Applications :

Cette filière, utilisée jadis, que dans les applications spatiales et militaires a été retenue par presque tous les acteurs des programmes automobiles dans le monde [40.24].

Cette filière intéresse les industriels pour des applications stationnaires (centaines de KW) dont plusieurs phototypes sont actuellement en fonctionnement dans plusieurs pays du monde [29].

L'industrie du portable (jusqu'à 100W) et transportable (de l'ordre 100KW) est aussi intéresser par cette technologie : il existe déjà un micro-ordinateur portable d'une autonomie de 80heures, mais aussi des portables téléphoniques et caméscopes [28.22].

4.4. ETUDE TECHNIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE :

4.4.1 La cellule et le stack :

Le générateur électrique est un empilement (stack) de cellules électrochimiques. Chaque cellule reçoit un mélange de gaz riche en hydrogène d'une part et de l'air d'autre part, et génère un courant continu.

La réaction principale dans la PEMFC est celle de l'oxygène avec l'hydrogène produisant avec l'électricité de la chaleur et de l'eau. Nous utilisons l'hydrogène comme combustible et

de l'oxygène comme oxydant. Les molécules d'hydrogènes sont introduites à l'anode, ses protons travers la membrane (électrolyte) jusqu'à la cathode : l'oxygène, les protons et les électrons se combinent pour former de l'eau. Sa schématique de base est donnée dans la figure (4.3)

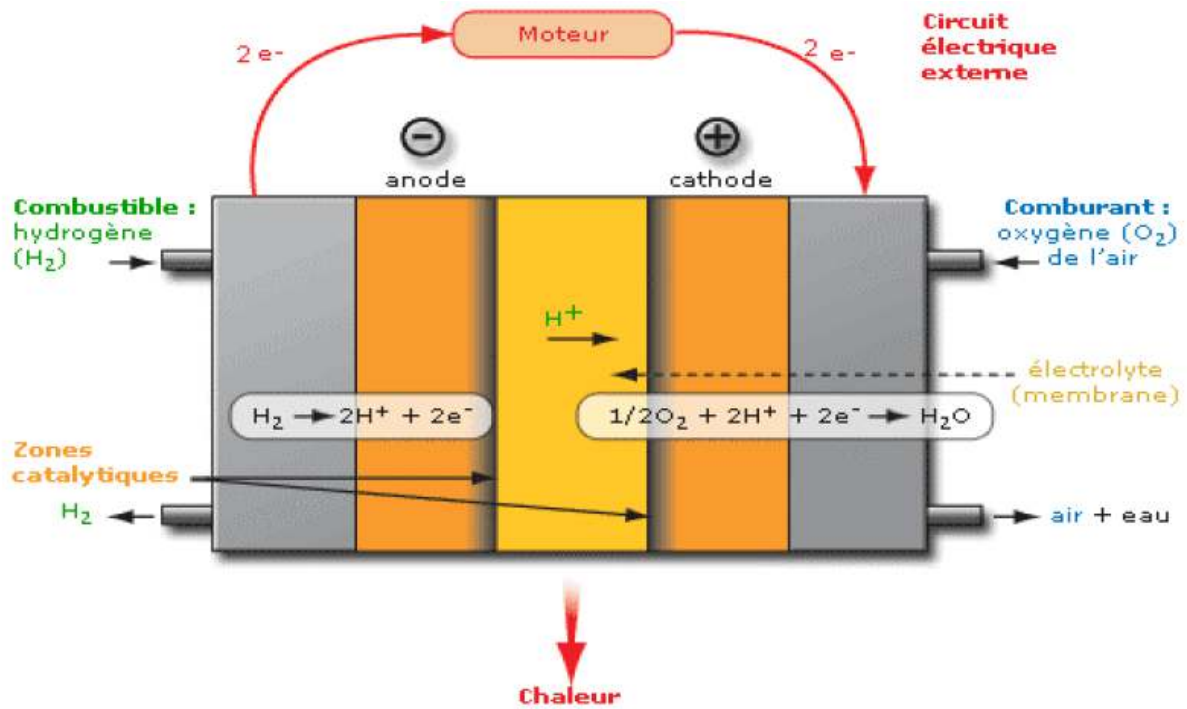


Figure 4.3 : Schéma de base d'une cellule de pile à combustible PEMFC [43].

Comme toute cellule électrochimique, une cellule de pile PEM est composée d'une anode et d'une cathode, séparée par un électrolyte. Les demi-réactions aux électrodes sont :



L'enthalpie standard (25 °C, 1 atm) de la réaction est $\Delta_rH^\circ = -285,8 \text{ kJ/mol}$, où l'eau est produite sous forme liquide.

L'intensité générée par la cellule (4.5), I_{cell} , est proportionnelle à l'avancement de la réaction, c'est à dire au débit d'hydrogène qui réagit électro-chimiquement avec l'oxygène, $F_{H_2}^{elec}$:

$$I_{cell} = 2 \cdot F \cdot F_{H_2}^{elec} \quad (4.5)$$

Où F : est la constante de faraday.

Une petite partie du dihydrogène peut traverser la membrane et réagir à la cathode avec le dioxygène sans produire d'électricité. On parle de perméation. Par la suite, ce phénomène est négligé, ce qui revient à considérer que tout l'hydrogène consommé réagit effectivement électro-chimiquement.

La puissance électrique, P_{cell} , qui est la puissance utile est le produit de la tension de cellule, V_{cell} , par l'intensité générée. Le reste de la puissance entrant est dégradé en chaleur (4.6).

$$P_{cell} = V_{cell} * I_{cell} \quad (4.6)$$

Le rendement électrique d'une cellule est le rapport entre la puissance électrique fournie et le flux d'énergie chimique consommée ou plus simplement le rapport entre la tension de cellule et le potentiel $E_{\Delta H}^{\circ}$ ce qui est définie dans la relation (4.7) :

$$r_{cell}^t = P_{cell} / (F_{H_2}^{elec} \cdot \Delta rH_{(8)}^{\circ}) = V_{cell} / E_{\Delta H}^{\circ} \quad (4.7)$$

Le potentiel correspondant est : $E_{\Delta H}^{\circ} = \Delta_r H^{\circ} / (2 \cdot F) = 1,481 \text{ V}$.

S'il est considéré que l'eau est formée par (4.4) à l'état de vapeur, l'enthalpie de réaction devient $\Delta_r H_{vap}^{\circ} = -241.8 \text{ kJ/mol}$, la tension de référence vaut **1,253 V** et le rendement de cellule est modifié :

$$r_{cell}^t = V_{cell} / 1.253$$

4.4.1.1 Les technologies liées à la cellule :

La cellule élémentaire est un empilement de plusieurs parties : plaques bipolaires, couches de diffusion, couches catalytiques et membrane. Le "cœur" de la cellule comprend l'électrolyte, ici une membrane polymère, et les électrodes. On parle d'assemblage membrane-électrodes (AME).

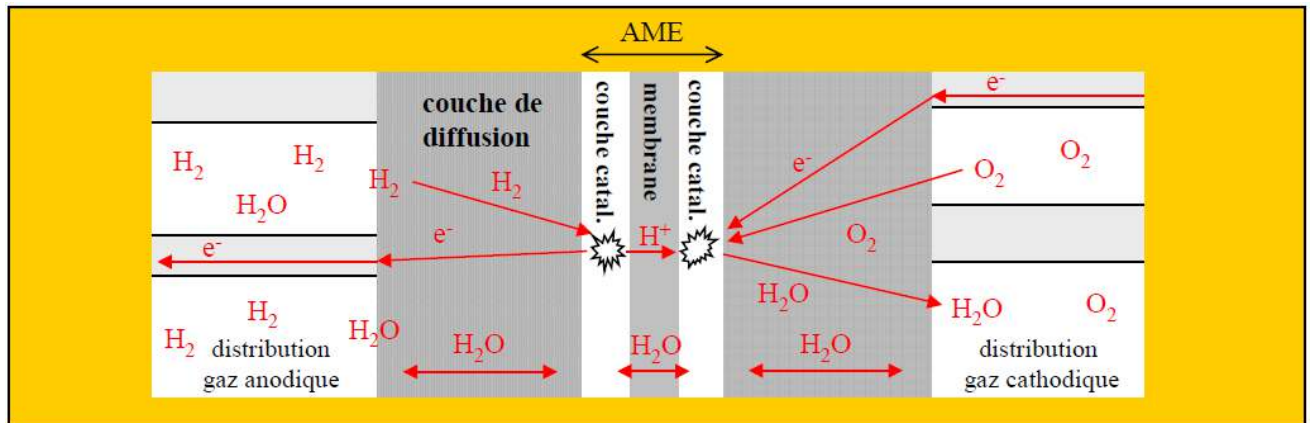


Figure 4.4 : vue schématique d'une cellule de pile à combustible PEM (échelle respectée dans la direction perpendiculaire au plan de la membrane)

La figure (4.4) présente la coupe d'une cellule. On y voit l'oxydation d'H₂ et la réduction d'O₂ dans chaque couche catalytique (en blanc), la membrane et les couches de diffusion (en gris). Aux extrémités de la cellule se trouvent les plaques bipolaires (en gris clair), conductrices d'électrons, dans lesquelles sont creusés les canaux de distribution du gaz cathodique et du gaz anodique (en blanc).

Les principaux éléments fonctionnels d'une cellule de pile à combustible PEMFC unitaire sont illustrés dans la figure (4.5).

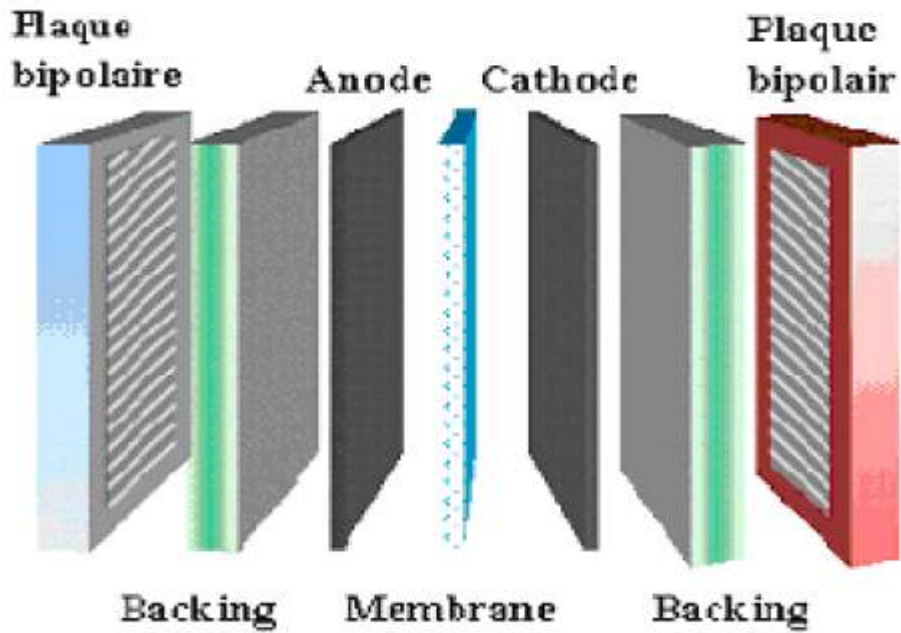


Figure 4.5 : schéma des éléments fonctionnels d'une pile PEMFC [44].

4. 4.1.2. Le stack :

Le stack est un empilement de cellules élémentaires, dont le nombre, N_{cell} , typiquement 50 à 120, détermine la tension totale. Le montage est assuré par l'utilisation de plaques bipolaires qui ont un double rôle :

- Elles assurent la distribution ainsi que l'évacuation des gaz et de l'eau grâce aux canaux de distribution qui y sont gravés (figure 4.4).
- Elles conduisent les électrons d'une cellule à l'autre si bien qu'elles représentent en même temps l'anode d'une cellule et la cathode de la cellule suivante.

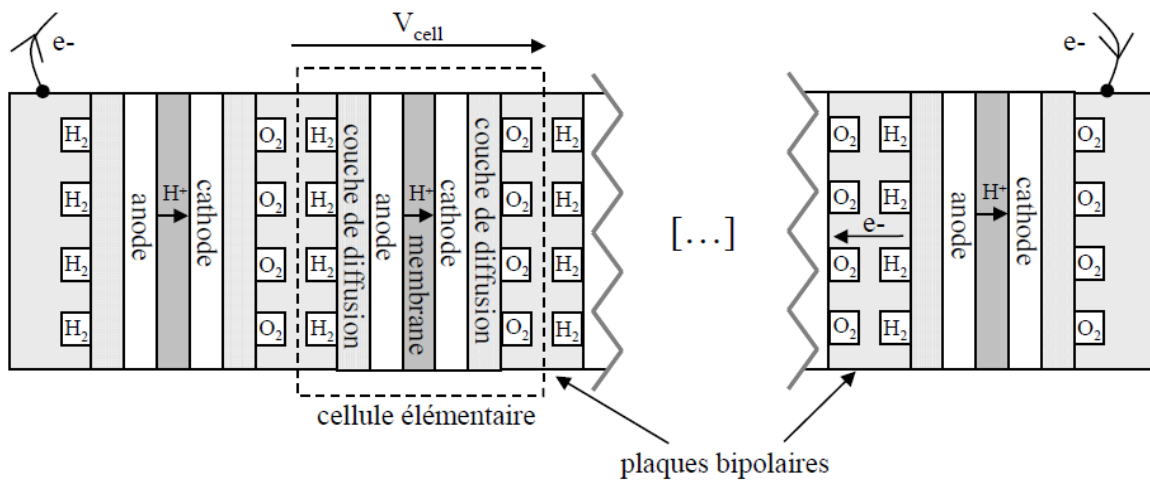


Figure 4. 6 : Schéma d'un stack (l'échelle n'est pas respectée).

D'un point de vue électrique, le stack est un générateur constitué de N_{cell} générateurs en série. Sa tension est la somme des tensions des N_{cell} cellules. Son intensité est la même pour chaque cellule qui consomme donc le même débit de gaz et doit donc être alimentée correctement.

D'un point de vue fluide, la distribution des gaz se fait en parallèle, si bien que chaque cellule reçoit le même débit de gaz, aux pertes de charge près. Cela mène à des empilements d'une centaine de cellules au maximum.

La relation qui lie l'intensité de stack au débit molaire d'hydrogène est modifiée par rapport à la relation (4.5), pour une seule cellule ca devient (4.8) :

$$I_{\text{stack}} = 2.F . F_{H_2}^{\text{elec}} / N_{\text{cell}} \quad (4.8)$$

Où $F_{H_2}^{\text{elec}}$ est le débit molaire d'hydrogène qui réagit dans le stack.

Chapitre 5 :

ETUDE DE L'INSTALLATION SOLAIRE DE PRODUCTION D'HYDROGENE.

5.1 PRESENTATION DE L'INSTALLATION :

L'installation solaire de production d'hydrogène est composée d'un générateur solaire (champ photovoltaïque), des batteries de stockage, un électrolyseur pour la production d'hydrogène, une unité de stockage des gaz, une pile à combustible de type PEMFC de 500W de puissance choisie pour un fonctionnement en essais de 4 heures par jour et un élément de conditionnement qui est composé en général d'un régulateur de charge (voir figure (5.1)). Dans cette installation le champ photovoltaïque alimente en charge électrique l'électrolyseur, ce dernier produit de l'hydrogène et l'oxygène qui seront stockés et par la suite consommés par la pile à combustible.

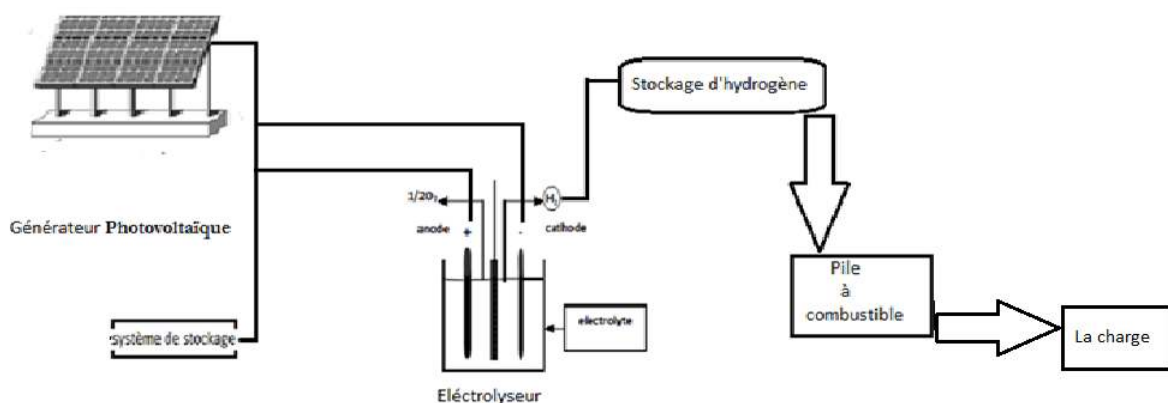


Figure 5.1 : Installation solaire de production d'hydrogène.

5.2. SPECIFICATION DES COMPOSANTS DE L'INSTALLATION :

5.2.1. Le système photovoltaïque :

a) Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques (figure 5.2) qui peuvent être reliés en série et/ou en parallèle selon la puissance requise.



Figure 5.2 : Module solaire photovoltaïque [175W PV Module NT-175U1].

Les modules solaires utilisés dans notre système sont de type SPM050P-BP, à technologie poly-cristalline et qui possèdent les caractéristiques présentées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Caractéristiques du module solaire utilisé [45]

• Puissance crête P_c	175 [W]
• Tension maximale	35.4 [V]
• Courant crête	4.95 [A]
• Courant de court circuit I_{cc}	5.55 [A]
• Tension de court circuit V_0	44.4 [V]
• NOTC	48 [°C]
• Rendement du module	13.45 %
• Coefficient de température à I_{cc}	1.48 [A/°C]
• Coefficient de température à V_{0c}	-2.3 [V/°C]
• Longueur	1575 [mm]
• Largeur	826 [mm]
• Nombres de cellules	72

b). Régulateur de charge :

La fiche technique du régulateur utilisé est la suivante :

Tableau 5.2 : Fiche technique du régulateur.

• Courant max du générateur	45A
• Puissance max du générateur	2160 W.
• Courant max d'utilisation	60A
• Puissance max d'utilisation	2880 W
• Rendement	85%

c) Batteries de stockage:

Les batteries utilisées ont les caractéristiques suivantes :

Tableau 5.3 : Fiche technique de la batterie.

• Tension nominale	24 V
• Capacité utile	492h
• Décharge maxi tolérée	70%
• Autonomie réelle	93h
• Décharge d'autonomie	65.3%

5.2.2. L'électrolyseur

La charge utilisée dans le système photovoltaïque est un électrolyseur de type PME (voir figure 5.3).

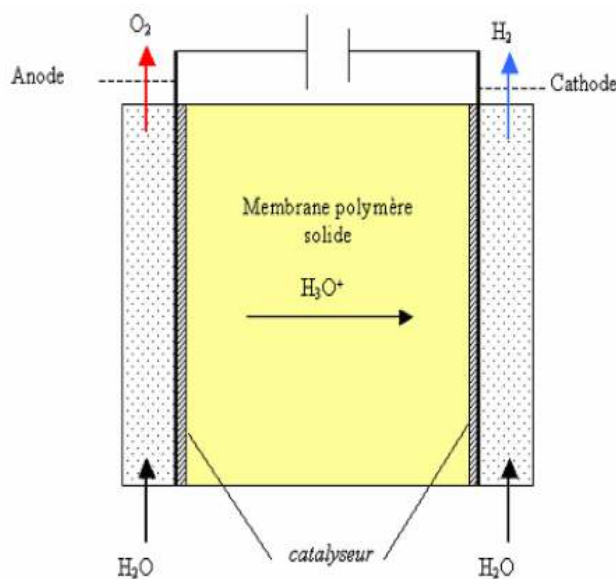


Figure 5.3 : L'électrolyseur PME.

Les caractéristiques techniques de l'électrolyseur utilisé sont données dans le tableau (5.4), [42].

Tableau 5.4 : Caractéristiques techniques de l'électrolyseur PEM.

• Composée de 26 cellules chacune	une zone active de 57cm ² .
• Courant de fonctionnement nominal	30A.
• Tension nominale	48v.
• Température de fonctionnement	70 à 75 ° C.
• Pression de travail	16bars
• La production d'hydrogène nominale	0,03 kg / h (0.36Nm ³ h ⁻¹).
• Puissance	1.5 KW.

5.2.3. Pile à combustible :

La pile à combustible utilisée est de type PEMFC. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau (5.5).

Tableau 5.5 : Caractéristiques de la pile à combustible [41].

Puissance de la pile	500W
Nombre de cellule	36
Tension nominale	19V
Courant nominal	26.3A
Température de fonctionnement	25-65°C
Carburant	Hydrogène
Oxydant	Air /Oxygène
Débit massique d'hydrogène	8 L/min

5.3. CALCUL ET RESULTATS :

Dans cette partie on s'intéresse au dimensionnement du système PV qui alimente l'électrolyseur pour une durée de fonctionnement suffisante afin de produire le volume d'hydrogène nécessaire pour faire fonctionner une pile à combustible de type PEMFC de 500W de puissance pour une durée de 4 heures.

Sachant que la localisation géographique joue un rôle très important pour le dimensionnement d'un système PV, cette influence est due aux différentes caractéristiques climatiques et

météorologiques (durée du jour, durée d'insolation, etc.), pour cela on propose de faire le calcul de dimensionnement en trois sites différents, à savoir, le site d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset. Cela nous permet de déterminer les conditions les plus favorables pour une installation photovoltaïque de production d'hydrogène.

5.3.1. Consommation d'hydrogène par la pile PEMFC:

Le but est de déterminer la consommation d'hydrogène par la pile à combustible pendant une durée de fonctionnement de 4 heures. La quantité d'hydrogène consommée se calcule par l'équation suivante :

$$m_{H2} = Q_m \Delta t \quad (5.1)$$

Avec :

Q_m : débit massique (m^3/s).

Δt : durée de fonctionnement de la pile (4h).

Le débit massique Q_m est déterminé par l'équation (5.2) :

$$Q_m = M_{H2} F_{gaz} \quad (5.2)$$

M_{H2} : masse molaire d'hydrogène (2.0158g/mole).

F_{gaz} : Flux molaire d'hydrogène (mole/s).

Le Flux molaire d'hydrogène est donné par la relation (5.3) :

$$F_{gaz} = \frac{I n_c}{n F} \frac{1}{\eta_F} \quad (5.3)$$

n_c : Nombre de cellule dans une pile.

I : Intensité de courant (A).

η_F : Rendement faradique.

F : constante de Faraday ($F=96485 \text{ C.mole}^{-1}$).

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

5.3.2. Durée de fonctionnement de l'électrolyseur :

La quantité d'hydrogène consommée par la pile doit être assurée par l'électrolyseur. On s'intéresse ici à déterminer la durée de fonctionnement de l'électrolyseur PEM qui est donnée par :

$$\Delta t_{élec} = \frac{m_{H2}}{\xi} \quad (5.4)$$

ξ : Taux de production d'électrolyseur (m^3/h).

$\xi=0.03\text{Kg/h}$. (tableau 5.4)

5.3.3. Estimation du besoin d'électricité (E_{cj}) :

Cette étape est importante, il est nécessaire de connaître le besoin en énergie, afin d'obtenir un système bien adapté. L'énergie nécessaire pour faire fonctionner l'électrolyseur pour une durée $\Delta t_{\text{élec}}$ est donné par l'équation (5.5).

$$E_{cj} = \Delta t_{\text{élec}} P_{\text{élec}} \quad (5.5)$$

E_{cj} : Energie consommée par l'électrolyseur (Wh/jour).

$P_{\text{élec}}$: Puissance nominale de l'électrolyseur (W).

Nous avons déjà mentionner que l'énergie consommé par l'électrolyseur (E_{cj}) est assurée par un système photovoltaïque, pour cela on calcul les différents grandeurs de ce système PV :

5.3.4. Dimensionnement du système photovoltaïque :

Le dimensionnement du système solaire photovoltaïque a pour but de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque et la capacité de batterie associée à installer, à partir des données d'ensoleillement du lieu, et des besoins en énergie électrique.

a) Energie solaire incidente (E_s):

L'irradiation mensuelle incidente sur une surface de 1 m^2 orientée en plein sud est inclinée à la latitude du lieu pour les sites d'Alger, Ghardaïa et Tamanrasset en utilisons [METEONORM version 5.1] est donnée dans la figure (5.4).

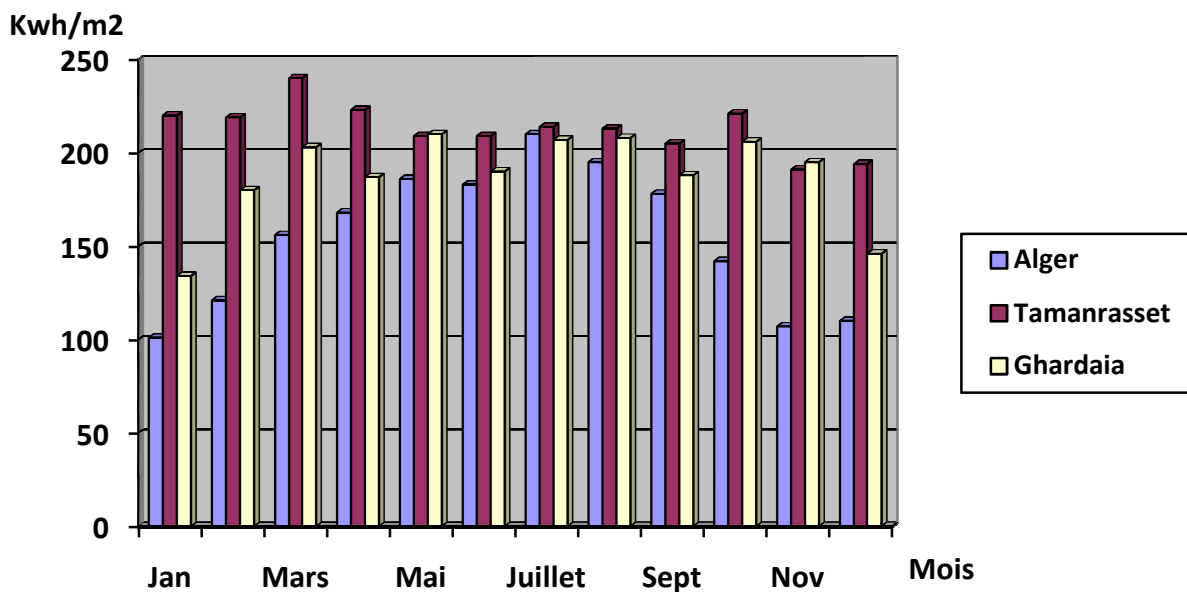


Figure 5.4 : Irradiation mensuelle incidente sur les différents sites étudiés

[46].

Tableau 5.6 : irradiation mensuelle incidente sur les différents sites étudiés en kWh/m²

	Alger	Ghardaïa	Tamanrasset
Janvier	101	134	220
Février	121	180	219
Mars	156	203	240
Avril	168	187	223
Mai	186	210	209
Juin	183	190	209
Juillet	210	207	214
Août	195	208	213
Septembre	178	188	205
Octobre	142	206	221
Novembre	107	195	191
décembre	110	146	194
Annuelle	1858	2254	2561

b) Puissance des modules requise (P_g) :

La puissance requise par les modules photovoltaïques est donnée par la relation (5.6)

$$P_g = \frac{E_{cj}}{K H_d} \quad (5.6)$$

K : Facteur de régulation (K=0.85).

H_d : Durée d'insolation (h/jour) (annexe n° 1).

c) Puissance unitaire du module (P_u) :

La puissance unitaire d'un module est la puissance qui peut fournir ce module, cette puissance dépend d'une part de l'énergie solaire récupérée et d'autre part de la durée du jour. Cette puissance unitaire ne doit jamais dépasser la puissance crête de ce module (P_{max}).

La puissance unitaire est donnée par :

$$P_u = P_r \cdot S \cdot \eta \quad (5.7)$$

P_r : Puissance solaire reçue (W/m^2).

S : Surface du module (m^2).

η : Rendement du module photovoltaïque.

Avec :

$$P_r = \frac{E_s}{D_j} \quad (5.8)$$

D_j : durée du jour (du lever au coucher de soleil).

E_s : irradiation journalière (Wh/m^2).

d) Estimation du nombre des modules photovoltaïques :

Le nombre des modules nécessaire pour le générateur photovoltaïque est le rapport entre la puissance du champ requis et la puissance unitaire du module.

$$Nm = \frac{P_g}{P_u} \quad (5.9)$$

- **Association des modules :**

Une fois le nombre de modules est connu, nous déterminons la configuration nécessaire équivalente à l'association série-parallèle des ces modules.

- **Association en série :**

Elle consiste à évaluer le nombre de modules dans chaque branche. Cette configuration est déterminée en fonction direct de la tension de travaille du système et la puissance optimale.

Soient,

V_m : tension des modules au point de la puissance maximale.

V_t : tension de travail du système photovoltaïque.

N_{ms} : nombre de modules en série de chaque branche, alors, la relation (5.10) doit être satisfaite :

$$V_m \quad N_{ms} = V_t \quad (5.10)$$

$$V_t = 48 \text{ V.}$$

Ce qui donne : $N_{ms} \geq 1.35$

Alors on prend $N_{ms} = 2$.

- **Association parallèle :**

C'est le nombre de branche N_{bp} de N_{ms} modules en série, nécessaire à mettre en parallèle dans le générateur. La connaissance de N_m et N_{ms} permet de déduire N_{bp} par la relation suivante (5.11) :

$$N_{bp} = \frac{N_m}{N_{ms}} \quad (5.11)$$

e) Dimensionnement du système de stockage :

La capacité des accumulateurs dont nous aurons besoin dépendra de nos exigences. Dans la plupart des cas, il est judicieux de prévoir une capacité de stockage suffisante pour s'assurer d'avoir de l'électricité pendant un nombre de jour donné sans soleil.

Notons qu'il ne faut pas décharger les accumulateurs complètement, puisque cela réduit leur vie utile.

La capacité du système de stockage est donnée par :

$$C_s = \frac{E_{cj} \quad N}{D \quad V} \quad (5.12)$$

C_s : Capacité du système de stockage.

N : Nombre de jours d'autonomie.

D : Facteur de décharge maximal.

V : Tension de la batterie.

Le nombre de jours d'autonomie N est fixé à 93 heures (tableau 5.3).

Après calcul on trouve :

$$C_s = 1460 \text{ Ah.}$$

On dispose des batteries de 24V, 492Ah alors si Nb est le nombre de branches, il faut que :

$$C_s < Nb * 492$$

$$Nb = 2.96$$

On prend : Nb=3.

D'autre part, pour fixer la tension du système de stockage à la tension de travail, on doit mettre dans chaque branche deux batteries de 24V en série (2*24=48V).

En résumé, il nous faut un nombre total de batteries de 6 batteries associées en 3 branches parallèles et de 2 batteries en séries chacune.

- **Caractéristiques des sites d'implantation de l'installation solaire de production d'hydrogène :**

Site	Longitude	Latitude	Altitude
Alger (dar el baida)	3.15° Est	36.43°	25 m
Ghardaïa	3.48° Est	32.24°	468 m
Tamanrasset	5.31° Est	22.47°	1377 m

Pour être certain de disposer d'énergie en toute saison, les calculs sont faits dans les conditions d'ensoleillement les moins favorables de la période d'utilisation. Dans le cas du site d'Alger le mois de janvier est le moins favorable de même pour le site de Ghardaïa alors que pour le site de Tamanrasset c'est le mois de novembre (voire Tableau 5.6) d'où :

Es : représente l'irradiation mensuelle moyenne du mois considéré c.à.d. le rapport entre l'irradiation mensuelle est le nombre de jours du mois.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (5.7).

Tableau 5.7 : performances de l'installation.

Paramètre	Symbole	valeur
Durée de fonctionnement de la pile	Δt	4 h
Flux molaire d'hydrogène	F_{gaz}	0.00463 mole/s
Débit massique d'hydrogène	Q_m	0.0093 kg/s
Masse d'hydrogène consommée	m_{H_2}	0.1265 kg
Durée de fonctionnement de l'électrolyseur	$\Delta t_{\text{élect}}$	4.22 h
Energie nécessaire pour fonctionner l'électrolyseur.	E_{ej}	6330 Wh/jour
Irradiation mensuelle moyenne reçue par le plan incliné	E_s	Alger : 3.26 kWh/ m ²
		Ghardaïa : 4.32kwh/m ²
		Tamanrasset : 6.36 kWh/m ²
Durée d'insolation moyenne mensuelle	H_d	Alger : 4.7 h/jour
		Ghardaïa : 7.6 h/jour
		Tamanrasset : 8.9 h/jour
Puissance des modules requis	P_g	Alger : 1584.48 W
		Ghardaïa : 979.87 W
		Tamanrasset : 836.74 W
Durée du jour moyenne mensuelle	D_j	Alger : 9.98 h
		Ghardaïa : 10.3 h
		Tamanrasset : 11.006 h
Puissance solaire reçue	P_r	Alger : 326,65 W/m ²
		Ghardaïa : 419.41 W/m ²
		Tamanrasset : 577.86 W/m ²
Puissance unitaire	P_u	Alger : 57,15 W
		Ghardaïa : 73.38 W
		Tamanrasset : 101.11 W
Nombre de modules photovoltaïques	N_m	Alger : 27.72 on prend : 28 modules
		Ghardaïa : 13.35 on prend : 14 modules
		Tamanrasset : 8.20 on prend : 8 modules
Nombre de modules associés en série	N_{ms}	Alger : 2
		Ghardaïa : 2
		Tamanrasset : 2
Nombre de modules en parallèle	N_{mp}	Alger : 13
		Ghardaïa : 7
		Tamanrasset : 4
Capacité des batteries de stockage	C_s	1460 Ah.
Nombre total de batteries	N_b	6
Nombre de batteries en série	N_{bs}	2
Nombre de ranches de batteries	N_{bp}	3

D'après les résultats obtenus, on constate que le nombre de modules photovoltaïques pour le site d'Alger est très important par rapport au deux autres sites car les calculs sont faits dans les conditions d'ensoleillement les moins favorables de la période d'utilisation.

Donc on déduit que les systèmes photovoltaïques deviennent de plus en plus efficaces dans les sites qui on un ensoleillement important.

Si le système solaire est dimensionné pour une irradiation annuelle moyenne. c.à.d. (E_s) se calcul comme étant le rapport entre l'irradiation annuelle est le nombre de jours de l'année on obtient les résultats présentés dans le tableau (5.8) :

Tableau 5.8 : performances de l'installation.

Paramètre	Symbole	valeur
Irradiation annuelle moyenne reçue par le plan incliné	E_s	Alger : 5.09 kWh/ m ²
		Ghardaïa : 6.17 kwh/m ²
		Tamanrasset : 7.01 kWh/m ²
Durée d'insolation moyenne annuelle	H_d	Alger : 7.81 h/jour
		Ghardaïa : 9.40 h/jour
		Tamanrasset : 9.26 h/jour
Puissance des modules requis	P_g	Alger : 953.52 W
		Ghardaïa : 792.24 W
		Tamanrasset : 804.21 W
Durée du jour moyenne annuelle	D_j	Alger : 12.19 h
		Ghardaïa : 12.09 h
		Tamanrasset : 12.15 h
Puissance solaire reçue	P_r	Alger : 415.09W/m ²
		Ghardaïa : 576.95W/m ²
		Tamanrasset : 576.95 W/m ²
Puissance unitaire	P_u	Alger : 73.06 W
		Ghardaïa : 89.29 W
		Tamanrasset : 100.95 W
Nombre de modules photovoltaïques	N_m	Alger : 13.12 on prend : 14 modules
		Ghardaïa : 8.87 on prend : 10 modules
		Tamanrasset : 7.96 on prend : 8 modules
Nombre de modules associes en série	N_{ms}	Alger : 2
		Ghardaïa : 2
		Tamanrasset : 2
Nombre de modules en parallèle	N_{mp}	Alger : 7
		Ghardaïa : 5
		Tamanrasset : 4

Capacité des batteries de stockage	Cs	1460 Ah.
Nombre total de batteries	Nb	6
Nombre de batteries en série	Nbs	2
Nombre de ranches de batteries	Nbp	3

D'après les résultats obtenus, on constate que le nombre de modules photovoltaïques pour le site d'Alger représente une diminution de 50% si le système solaire est dimensionné pour une irradiation annuelle moyenne. D'où on peut déduire que l'installation solaire de production d'hydrogène est performante pour les trois sites. Sauf que le site de Tamanrasset est le plus avantageux car l'irradiation solaire incidente sur ce site est la plus importante.

5.4 Estimation des émissions de CO₂ pour une consommation électrique donnée, assurée par différentes sources d'énergie :

L'intérêt actuel est de minimiser les émissions de CO₂ rejetées lors de la production d'énergie par des sources conventionnelles et non conventionnelles, le tableau ci-dessous indique les émissions de CO₂ par KWh d'énergie électrique produite pour des différentes sources d'énergie [12] (annexe n° 2).

Dans notre installation de production d'hydrogène, l'électrolyseur consomme une énergie électrique de 6.33 kWh d'où on détermine les émissions de CO₂ correspondante à cette consommation Tableau (5.9) :

Tableau 5.9 : Estimation des Emissions de CO₂ correspondant a une consommation de 6.33KWh [12]

Technologie	Capacité/configuration/ carburant	Estimation d'émission (gCO ₂ e /kWh)	Emission de CO ₂ (gr) correspondant a une consommation de 6.33KWh
Eolien	2.5MW (En mer)	9	56.97
Hydroélectrique	3.1MW Réservoir	10	63.3
Eolien	1.5MW (terrestre)	10	63.3
Biogaz	Méthanisation (digestion anaérobique)	11	69.63

Hydroélectrique	300 kW, courant du fleuve	13	82.29
solaire thermique	80 MW, cylindro-paraboliques	13	82.29
biomasse	Co-combustion en bois Forestière avec le charbon	14	88.62
biomasse	turbine vapeur à bois forestier	22	139.26
Biomasse	Court de taillis à rotation co-combustion /charbon	23	145.59
Biomasse	moteur réciproque /BOIS FOREST	27	170.91
Biomasse	turbine à vapeur / Déchets de bois	31	196.23
solaire PV	Le silicium poly cristallin	32	202.56
Biomasse	turbine à vapeur Courte rotation forestière	35	221.55
géothermie	80 MW	38	240.54
Biomasse	Court moteur alternatif à la foresterie de rotation	41	259.53
Nucléaire	divers Types de réacteur	66	417.78
gaz naturel	Diverses turbines à cycle combiné	433	2740.89
Pile à combustible	L'hydrogène à partir de gaz de reformage	664	4203.12
Diesel	Divers types de générateur et turbine	778	4924.74

Le pétrole lourd	Divers types de générateur et turbine	778	4924.74
Charbon	Différents types de générateurs à récurer (avec frottement)	960	6076.8
Charbon	Différents types de générateur sans frotter	1050	6646.5

On constate qui est plus intéressant d'utiliser des sources d'énergie d'origine renouvelables pour la production d'énergie électrique afin de minimiser les émissions de CO₂.

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'étude d'une installation solaire de production d'hydrogène, on se basant sur les caractéristiques techniques des éléments principaux ainsi que les données météorologiques des sites étudiés.

Nous avons établis un modèle mathématique qui permet de déterminer les performances de l'installation ainsi que le dimensionnement du système photovoltaïque.

Deux procédures de dimensionnement, on été considérés. La première consiste à dimensionner le système pour des conditions d'ensoleillements mensuelles pour le mois le moins favorable, de la période de l'année a fin d'être certains de disposé d'énergie nécessaire à l'alimentation de l'électrolyseur en toutes saisons.

Dans la deuxième procédure, le système solaire est dimensionné pour une irradiation annuelle moyenne.

D'après les résultats obtenus, on a constaté que le nombre de modules pour le site d'Alger est très important par rapport aux deux autres sites, est dû aux caractéristiques météorologiques qui on une très grand influence sur le dimensionnement du système photovoltaïque.

Enfin, pour les sites étudiés et d'après les résultats de comparaisons obtenus le meilleur site à choisir pour se type d'installation est le site de Tamanrasset, car il est le site où on peut avoir les performances assurant les besoins de notre charge (l'électrolyseur) avec une installation moins couteuse.

Les résultats obtenus pour les émissions de CO₂ nous encouragent de faire des réalisations pour cette filière d'énergie.

On peut compléter cette étude dans le future par, l'étude des différents paramètres influents sur l'installation du production d'hydrogène à savoir, l'inclinaison des panneaux photovoltaïques, l'utilisation d'une autre source d'énergie renouvelable pour l'alimentation d'électrolyseur ainsi que le type d'électrolyseur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Microsoft® Encarta® 2009, Hydrogène, Microsoft Corporation, 2008.
- [2] Association Française de l'Hydrogène, Pourquoi l'hydrogène?, Version 4.2 - Février 2004
- [3] AFH2, Les données de bases physico-chimiques sur l'hydrogène, Mémento de l'Hydrogène, FICHE 1.2, mars 2001
- [4] H. Derbal , R. Miri et A. M'Raoui, Etude d'un système de production d'hydrogène par voie solaire Application sur l'électrolyse de la vapeur d'eau à très hautes températures, Rev. Energ. Ren. Vol. 8, p137 – 156, 2005.
- [5] R. Kothari, D. Buddhi, R.L. Sawhney, Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 p 553–563, 2008
- [6] S. His, L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?, Institut français de pétrole, IFP - Diffusion des Connaissances, décembre 2003
- [7] D. Mathieu, MASTRANGELO Jean-François, VALMAGE François, Quelle place pour L'hydrogène dans les systèmes énergétiques?, École des Ponts Paris Tech, Mars 2004
- [8] The International Energy Agency (IEA), Hydrogen production and storage, Hydrogen implementing agreement, 2005
- [9] P. Marion, S. Vinot, production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles, fiche 3.1.1, Mémento de l'Hydrogène, AFH2, 2009.
- [10] J. Labbé, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'École des Mines de Paris Spécialité "Énergétique", 2006
- [11] La filière d'hydrogène, Pourquoi l'hydrogène, CLEFS CEA N°50/51, hiver 2004/2005.
- [12] Benjamin K. Sovaccol, valuing the green house gas emissions from nuclear power : a critical survey. EnergyPolicy 2008 ;36 :2935-2940
- [13] Th. Alleau, Les piles à combustible, Mémento de l'Hydrogène, FICHE 5.2.1, AFH2, 2008
- [14] Ministère de l'Énergie et des Mines, Guide des énergies renouvelables, Direction

des Énergies Nouvelles et Renouvelables, Édition 2007

- [15] M. Belhadj, Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque Autonome, Mémoire de Magister option : Microélectronique -Photovoltaïque, Centre Universitaire deBéchar, 2007-2008
- [16] Y.Jannot, Thermique solaire, Université de Lubumbashi, octobre 2003.
- [17] Lulin, Investigation on Characteristics and application of hybrid solar/wind power generation systems, Ph.D. The Hong Kong Polytechnic University, 2004.
- [18] M. Chegaar, A Lamir, A Chibani, Estimation global solar radiation using sunshine hours, 4^{ème} séminaire international Physique Énergétique, Bechar 2000.
- [19] M. Gapderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, 2, OPU 1983.
- [20] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Syn, Le pompage photovoltaïque, IEPF /Université d'Ottawa /EIER/CREPA, 1998.
- [21] T. Markvard, Solar Electricity, second ed. Willey, USA, 2000
- [22] <http://www.influences.com>. mise à jour septembre 2003
- [23] A. Damien, Hydrogène par électrolyse de l'eau, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, 2002
- [24] Le supplément d'ENERGIE PLUS N° 280 du 15 février 2002. ©Energie Plus 1998-2003 éditée par l'ATEE. www.atee.fr ENERGIE PLUS.
- [25] V.N. Morozov et V.B. AleskovskiiI, Soviet electrochem, 7, 9, p. 1220-1222 (1971).
- [26] Kauranen P.S, Lund P.D, Vanhanen J.P, Development of a self-sufficient solarhydrogen energy system, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, n°1, pp. 99- 106, 1994.
- [27] Hashimoto A and al., Development of PEM water electrolysis type hydrogen production system for WE-NET, proceedings of 14th WHEC, Montreal, 2002.
- [28] S.Gesell : La pile rêvée des nomades Dossier, « L'hydrogène, une énergie (presque) propre ». NEC Japon: <http://www.nec.co.jpGadgets> 30/08/2001.
- [29] G.J.K. Acres, J. Power Sources, 100 (2001) 60-66.
- [30] D. Hart, Journal of Power Sources 2000, 86, 23.
- [31] S. G.Chalk, J. F. Miller and F. W. Wagner, Journal of Power Sources 2000, 86, 40.
- [32] A. U. Dufour, Journal of Power Sources 1998, 71, 19.

- [33] L.Carrette, J. Collins, A. Dickinson, U.Stimming, « Bunsenmagazin der Deutschen Bunsengesellschaft f ». Physikalische Chemie 2000, 27.
- [34] J.Larminie and A.Dicks. « Fuel Cell Systems Explained ». John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2000.
- [35] Techniques de l'Ingénieur, « Pile à combustible ». Traité Génie électrique. D3340 /08/2000.
- [36] S.Srinivasan, D.Manko, H. Koch, M.Enayetullah, A.Appleby , « Recent Advances in Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell Technology with Low Pt Loading Electrodes ». Journal Power Sources 29 (1990), ISSN 0378- 7753.
- [37] EG&G Services, « Fuel Cell Handbook ». Parsons, Inc., Morgantown, West Virginiak,,2000.
- [38] A.R.Balkin, « modelling a 500w polymer electrolyte membrane fuel cell ». University of Technology, Sydney Faculty of Engineering Degree of Bachelor of Engineering A02-080 -28 June 2002.
- [39] M.Mikkola, « Experimental Studies on Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell stacks ». Helsinki University of Technology, Masters, 10/12/2001.
<http://www.hut.fi/Units/AES/studies/dis/mikkola.pdf>).
- [40] US DOE office of transportation (last updated march 2001).
- [41] *500W PEM Fuel Cell Operation Manual*. BCS Technology, Inc., Bryan, Texas, 2001.
- [42] Miland H. Operational Corporation, Novembre 2002. For a stand-alone power système based on renewable energy and hydrogene. Thesis Submitted for the Degree of Doctor Engineer, Norwegian University of science and Technology, Faculty of Natural Sciences and Technology, Departement of Materials Technology, February 2005.
- [43] «<http://club.pac.free.fr/>», mise à jour septembre 2004.
- [44] A.S.Corbeau (research associate engineering, département : Européan gaz) Cambridge.
- [45] Solar23 RENEWABLE-INDEPENDENT-DECENTRALIZED, Solar module SM-50, Germany, 2007.
- [46] METEONORM version 5.1.
- [47] Ballard Fuel Cell
www.ballard.com

ANNEXE N° 01

Heures D'enseillement (moyenne mensuelle)

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	déc
Skikda	143	165	227	237	298	316	375	341	285	218	152	137
Annaba	119	150	194	202	268	281	344	312	233	187	131	107
Blida	146	165	223	241	303	310	352	337	274	215	156	146
Bejaia	143	129	165	187	263	251	317	316	233	180	186	149
Alger	146	168	219	237	306	307	343	333	274	215	155	146
Miliana	156	130	161	210	288	289	360	336	266	191	192	165
Constantine	138	121	212	218	288	297	351	324	262	205	140	129
Sétif	162	187	223	245	310	297	360	320	266	212	162	153
Chlef	178	175	194	217	288	306	347	315	270	212	174	153
Oran	163	160	234	244	296	296	350	327	266	229	163	160
Batna	173	160	198	213	287	317	359	327	259	226	212	178
Tébessa	160	154	190	202	287	300	332	319	244	215	200	148
Sidi Bel Abbes	154	145	223	236	287	278	323	298	218	195	178	148
Tlemcen	198	158	176	213	278	291	335	318	255	233	188	197
Biskra	226	230	278	290	320	337	383	355	314	254	210	219
Djelfa	164	200	231	232	312	324	352	334	295	233	188	137
Laghouat	212	228	279	297	331	339	359	333	299	265	220	205
El-Bayad	184	198	231	251	319	335	346	329	291	255	189	184
El-Oued	244	238	279	281	344	334	311	308	295	276	224	234
Touggourt	235	259	293	300	352	334	388	373	317	269	221	231
Ain-Sefra	224	241	279	277	330	350	357	340	306	252	194	201
Ghardaïa	237	254	297	296	329	336	374	364	250	266	197	232
Ouargla	244	254	304	311	329	315	381	351	298	277	232	236
Hassi-Massoud	244	258	308	322	349	348	381	359	313	288	245	237
Bechar	248	246	308	322	345	348	359	339	302	281	242	237
El-Goléa	262	262	323	333	360	358	387	366	324	299	256	252
Beni-Abbes	279	259	308	317	347	345	348	329	298	268	228	240
Timimoun	277	266	316	324	354	347	372	352	298	289	252	257
In Amenas	249	261	301	293	332	329	371	351	308	279	253	239
Bordj Omar Driss	270	267	309	316	344	337	386	367	316	301	266	237
Adrar	286	271	342	354	368	377	394	367	323	304	276	276
Tindouf	257	268	316	338	351	356	348	330	301	290	257	267
In Salah	278	262	327	334	346	347	376	358	323	308	274	255
Aoulef	285	268	327	330	350	339	359	341	319	298	252	239
Illizi	269	269	324	319	333	350	375	357	319	298	265	249
Aoullen	299	283	346	336	343	343	355	339	315	317	284	246
Djanet	289	271	324	329	351	363	388	371	329	317	284	276
Tamanrasset	262	256	310	290	308	276	307	305	267	275	267	262

ANNEXE N° 02

Table : Life cycle studies excluded by date

Technology	Capacity/configuration/fuel	fuel Estimate (gCO ₂ e/ kWh)
Wind	2.5MW, offshore	9
Hydroelectric	3.1MW, reservoir	10
Wind	1.5MW, onshore	10
Biogas	Anaerobic digestion	11
Hydroelectric	300 kW, run-of-river	13
Solar thermal	80MW, parabolic trough	13
Biomass	Forest wood Co-combustion with hard coal	14
Biomass	Forest wood steam turbine	22
Biomass	Short rotation forestry Co-combustion with hard coal	23
Biomass Biomass	FOREST WOOD reciprocating engine	27
Solar PV Biomass	Waste wood steam turbine	31
Geothermal	Polycrystalline silicone	32
Biomass Nuclear	Short rotation forestry steam turbine	35
Natural gas	80MW, hot dry rock	38
Fuel cell	Short rotation forestry reciprocating engine	41
Diesel	Various reactor types	66
Heavy oil	Various combined cycle turbines	443
Coal	Hydrogen from gas reforming	664
Coal	Various generator and turbine types	778
	Various generator and turbine types	778
	Various generator types with scrubbing	960
	Various generator types without scrubbing	1050

Source : Benjamin K. Sovaccol, valuing the green house gas emissions from nuclear power : a critical survey. EnergyPolicy 2008 ;36 :2935-2940