

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA
TECHNOLOGIE ET SCIENCES DE LA MATIERE

N° ordre :

N° série :

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES
MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MAGISTER EN GENIE DES PROCEDES
OPTION :ENERGETIQUE ET PROCEDES

Présenté par :

Bouziane khadidja

Thème

**ETUDE D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE
DE PRODUCTION D'HYDROGENE PAR
ELECTROLYSE DE L'EAU**

Soutenu le : 12 / 05/2011 devant le jury suivant

Mr.F. Khelfaoui	Professeur	Président	Université de Ouargla
Mr.H.Benmoussa	Professeur	Examineur	Université de Batna
Mr.R. Dizene	Professeur	Examineur	USTHB
Mr. N. Settou	Professeur	Encadreur	Université de Ouargla
Mr.B.Mahmah	C.R	invité	CDER
Mr.N.Chennouf	M.A	invité	Université de Ouargla

2010/2011

Dédicace

*A mes parents pour tout leur amour qui sera
éternel*

A ma grand-mère pour son infinie bonté

A ma famille

A mes amis

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Settou Noureddine Professeur à l'université KASDI MERBAH Ouargla, qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire malgré ses charges académiques, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur F. Khelifaoui Professeur à l'université KASDI MERBAH Ouargla, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de mémoire.

Je remercie vivement Monsieur R. Dizene Professeur à U.S.T.H.B et Monsieur H. Benmoussa Professeur à l'université de Batna, d'avoir accepté de juger ce document.

J'adresse toute ma gratitude à Monsieur B. Mahmah chargé de recherche au CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables) d'avoir répondu à notre invitation afin d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Chennouf Nasreddine Maître Assistant à l'université KASDI MERBAH Ouargla, pour sa générosité et la grande patience.

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur M. Louazene Maître Assistant à l'université KASDI MERBAH Ouargla, et Monsieur B. Azoui Professeur à l'université de Batna qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire VPRS, chercheurs et travailleurs. Plus particulièrement, mes collègues de travail, N. Aloui, M. Tekha, B. Mustapha, S. Meffah et le directeur Pr. M. Saïdi qui m'ont aidée et supportée au cours de ce travail.

Je remercie tous les post graduants avec qui j'ai pu échanger des points de vue sur ce travail.

Mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui auront contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Sommaire

	page
Nomenclature.....	I
Listes des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Situation énergétique

1.1. Introduction.....	4
1.2. L'Énergie.....	4
1.2.1. Types d'énergie.....	4
1.2.1.A. Les combustibles fossiles.....	4
1.2.1.B. L'énergie nucléaire.....	5
1.2.1.C. Les énergies renouvelables.....	6
1.3. Les conséquences de haute consommation d'énergie fossile.....	7
1.3.1. La réduction des réserves fossiles	7
1.3.2. Effet de serre et changements climatiques.....	8
1.3.3. Les pollutions au niveau local.....	9
1.4. Les modifications fondamentales des schémas énergétiques mondiaux.....	9

2. La production d'hydrogène et ses applications

2.1. Introduction.....	11
2.2. Généralités sur l'hydrogène	11
2.2.1. Caractéristiques de L'hydrogène.....	11
2.2.1.1. Propriétés et origine naturel.....	12

2.2.2. Les avantages et les inconvénients	12
2.2.3. Les applications d'hydrogène comme vecteur d'énergie.....	14
2.2.3.a. Utilisations chimiques.....	14
2.2.3.b. Utilisation énergétique.....	15
2.3. Production d'hydrogène.....	17
2.3.1. Production par les combustibles fossiles.....	20
2.3.1.a. Production à partir du gaz naturel.....	20
2.3.1.b. Production à partir du charbon.....	22
2.3.2. Production par l'énergie nucléaire.....	23
2.3.3. Production par les renouvelables	23
2.3.3.A. La biomasse (agriculture, forêts, algues, déchets organiques)	23
2.3.3.B. Le solaire.....	26
2.3.3.C. L'éolien.....	26
2.3.3.D. L'hydraulique.....	27
2.3.3.E. D'autres sources renouvelables	27
2.3.4. Autres procédés chimiques	27
2.3.4.1. Produit secondaire du procédé Chlore-Soude.....	27
2.3.4.2. Décomposition par cycle thermochimique.....	29

Chapitre II : Production d'hydrogène photovoltaïque

1. Système solaire photovoltaïque

1.1. Introduction	30
1.2. Rayonnement solaire.....	30
1.2.1. Mouvements de la Terre.....	31
1.2.2. Spectre du rayonnement.....	32
1.2.3. Durée d'insolation.....	32
1.2.4. Modèles de coordonnées soleil.....	33
1.2.4.1. Angles solaires.....	33
1.2.4.2. Modèle du rayonnement solaire.....	36
1.3. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque.....	40

1.3.1. L'effet photovoltaïque.....	40
1.3.2. Types des systèmes photovoltaïques.....	40
1.3.2.1. Système autonome sans batterie.....	40
1.3.2.2. Système autonome avec batterie.....	40
1.3.2.3. Système hybride PV/génératrice.....	41
1.3.2.4. Système PV sur réseau diesel.....	41
1.3.2.5. Système PV sur réseau décentralisé.....	41
1.3.2.6. Système PV centralisé.....	41
1.3.3. Les éléments d'un système de captage photovoltaïque.....	42
1.3.3.a. Générateur Photovoltaïques.....	42
1.3.3.b. Les batteries.....	49
1.3.3.c. La régulation.....	50
1.3.3.d. Système de conversion.....	50
1.3.3.e. La Charge.....	50

2. Electrolyse de l'eau

2.1. Introduction.....	51
2.2. Principe général de l'électrolyse de l'eau.....	51
2.3. Qualité de l'eau d'alimentation.....	51
2.4. Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau.....	51
2.4.1. Thermodynamique.....	51
2.4.2. Cinétique.....	53
2.4.3. Effet de la température sur la tension d'électrolyse.....	54
2.4.4. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse.....	55
2.4.5. Effet de la pression sur la pureté des gaz produits.....	56
2.5. Les différentes technologies d'électrolyseurs.....	57
2.5.a. Electrolyseurs alcalins.....	57
2.5.a.1. Principe.....	57
2.5.a.2. Matières premières.....	58
2.5.a.3. Qualité de l'hydroxyde de potassium.....	59

2.5.a.4. Les matériaux.....	59
2.5.a.5. Caractéristiques de fonctionnement.....	59
2.5.b. Electrolyseurs PEM.....	60
2.5.b.1. Principe.....	60
2.5.b.2. Les matériaux.....	61
2.5.b.3. Caractéristiques de fonctionnement.....	62
2.5.c. Electrolyseurs à haute température.....	63
2.5.c.1. Principe.....	63
2.5.c.2. Les matériaux.....	64
2.5.c.3. Caractéristiques de fonctionnement.....	64
2.6. Comparaison des différentes technologies d'électrolyse de l'eau.....	65

Chapitre III : Installation du système

1. Introduction.....	66
2. But du travail.....	66
3. Présentation du site.....	66
4. Éléments du système.....	68
4.1. Générateur photovoltaïque.....	69
4.2. Système de conditionnement.....	71
4.3. Electrolyseur.....	72
4.4. Les appareils de mesures.....	73
4.4.1. Pyranomètre.....	73
4.4.2. Voltmètre et Ampèremètre.....	73
4.4.2.1. Voltmètre.....	73
4.4.2.2. Ampèremètre.....	74
4.4.3. Multimètre.....	74
4.4.4. Thermocouple.....	75
5. Etudes des caractéristiques du système.....	76
5.1. Les caractéristiques I-V des panneaux solaire.....	76

5.1.1. Méthode expérimentale	76
5.1.2. Simulation numérique.....	77
5.1.2.1. Résolution par le logiciel PVSYST4	77
5.1.2.2. Modélisation mathématique utilisant Matlab.....	78
5.2. Les caractéristiques I-V d'électrolyseur.....	79
6. Optimisation des paramètres d'électrolyseur	79
6.2. L'effet de la concentration d'électrolyte.....	79
6.3. L'effet de la température initiale.....	80
7. Couplage PV-Electrolyseur : production d'hydrogène solaire.....	80
8. Paramètres de calcul.....	81

Chapitre IV : Résultats et interprétations

1. Introduction.....	83
2. Etude du rayonnement solaire	83
3. Etude des caractéristiques I-V des panneaux solaires	85
4. Etude des caractéristiques de l'électrolyseur.....	89
4.1. Effet de la tension et la température initiale	90
4.1.1. Effet de la tension.....	90
4.1.1.1. Réalisation discontinue	90
4.1.1.2. Réalisation continue.....	91
4.1.2. Effet de la température initiale d'électrolyte	93
4.1.3. Variation de la température initiale avec la tension	94
4.2. Effet de la concentration d'électrolyte.....	95
4.3. Choix d'électrolyte.....	97
5. Etude de couplage PV-électrolyseur.....	99
5.1. Les caractéristiques I-V du couplage PV-électrolyseur.....	100
5.2. Fonctionnement du système sur un jour type.....	101
5.3. Evolution du rendement.....	103

Conclusion générale.....	105
Bibliographie	109
Annexes	113
Annexe 1.....	113
Annexe 2.....	117
Annexe 3.....	118

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
φ	latitude	°
λ	longitude	°
ω	déclinaison	°
N	nombre de jours de l'année	°
δ	angle horaire du soleil	°
ψ	azimut	°
γ	hauteur angulaire	°
α	orientation	°
β	Inclinaison du capteur	°
θ	L'angle d'incidence	°
C	Correction de distance terre soleil	
S_H	Flux direct sur plan horizontal	W/m ²
T_L	Facteur de trouble	
M	Nombre d'aire masse	
D_H	Flux diffus sur plan horizontal	W/m ²
ξ	Albédo	
ϕ_G	Flux global sur plan horizontal	W/m ²
R_b	Rapport de flux direct	
S_B	Flux direct pour un plan d'inclinaison	W/m ²
D_b	Flux diffus pour un plan d'inclinaison	W/m ²
K_T	Coefficient de sérénité	

R_B	flux réfléchi pour un plan d'inclinaison	W/m^2
ϕ_{GB}	Flux global pour un plan d'inclinaison	W/m^2
A	le facteur d'idéalité de la jonction	
I_{ph}	photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)	A
I_0	courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.	A
R_p	résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.	Ω
R_s	résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmique et de contact au niveau des connections des cellules.	Ω
q	la charge de l'électron	C
K	constant de Boltzmann	J/K
T_c	température de jonction	K
P_m	puissance optimale de panneau solaire	W
P_C	puissance-crête	Wc
V_{co}	Tension à vide	V
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
V_m	Tension optimale	V
I_m	Courant optimale	A
E_{rev}	Tension de décomposition réversible	V
R	Constante molaire des gaz	$8,314\ 4\ J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
F	Constante de Faraday	$96\ 487\ C \cdot mol^{-1}$
E_0	Tension de décomposition réversible dans les conditions normales	V

P_{H_2}, P_{O_2}, P	Pression de service de l'électrolyseur,	Pa
a_{H_2O}	activité de la solution ;	
ΔH	enthalpie de dissociation de l'eau	kJ/mol
η_a	surtension anodique	V
η_c	surtension cathodique	V
R_c	résistance globale (chute ohmique du diaphragme, épaisseur des compartiments, effet d'écran des bulles),	$\Omega.cm^2$
J	densité de courant.	A/cm ²
Q_{vH_2}	Débit volumique d'hydrogène	ml/min
P_u	Puissance utile par l'électrolyse	W
PCI	Pouvoir calorifique inférieur d'hydrogène	J/kg
ρ	Masse volumique d'hydrogène	Kg/m ³
R_{PV}	Rendement photovoltaïque	
S_p	Surface de panneau solaire	m ²
E	Eclairement solaire mesuré	W/m ²
I_c	Courant d'électrolyseur	A
I_c	courant maximal sous conditions standards	A
V_c	tension maximale du module sous conditions standards	V
NOCT	température nominale de fonctionnement de cellule solaire	°C
α_0	coefficient de courant en fonction de température	A/°C
β_0	coefficient de la tension en fonction de température	V/°C
T_{ref}	Température standard des cellules solaire	°C

Liste des figures

Figure	Titre de la figure	Page
(I.1)	Liaisons hydrogène dans l'eau	11
(I.2)	Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC	17
(I.3)	Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde	19
(I.4)	Les matières de base et les processus utilisés dans la production d'H ₂	20
(I.5)	Principe de production photo-biologique d'hydrogène	25
(I.6)	Représentation d'une cellule du procédé Chlore-Soude	28
(II.1)	Irradiation globale journalière reçue sur plan Horizontale et normal au mois de Juillet	30
(II.2)	Schématisation des mouvements de la Terre autour du soleil	31
(II.3)	Spectre solaire hors atmosphère	32
(II.4)	Coordonnées angulaires du soleil	35
(II.5)	Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné	35
(II.6)	Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	42
(II.7)	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	45
(II.8)	Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	44
(II.9)	Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V	45
(II.10)	Influence de la température sur la courbe I-V	45
(II.11)	Module photovoltaïque	46
(II.12)	Composantes d'un champ de modules photovoltaïques	48
(II.13)	Configurations des associations série parallèle des modules PV	49
(II.14)	Influence de la pression sur les caractéristiques de fonctionnement de l'électrolyseur	53
(II.15)	Exemple de décomposition d'une courbe caractéristique tension-densité de courant pour une cellule d'électrolyse de l'eau	54
(II.16)	Influence de la température sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin	55
(II.17)	Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin	57

	à technologie 'zero gap'	
(II.18)	Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produits par électrolyse alcaline	57
(II.19)	Principe de l'électrolyse alcaline	59
(II.20)	Principe schématique de l'électrolyse PEM	61
(II.21)	Evolution du rendement en fonction de la température d'un électrolyseur PEM	62
(II.22)	Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte	63
(II.23)	Rendements des différentes technologies électrolyseurs	65
(III.1)	Situation de la Wilaya d'Ouargla	67
(III.2)	Données climatiques de la région d'Ouargla	68
(III.3)	Montage de l'expérience	69
(III.4)	Module photovoltaïque SM50	70
(III.5)	Système de conditionnement photovoltaïque	71
(III.6)	Le régulateur utilisé	71
(III.7)	L'électrolyseur utilisé	72
(III.8)	Pyranomètre	73
(III.9)	Le voltmètre utilisé	73
(III.10)	L'ampèremètre utilisé	74
(III.11)	Le multimètre utilisé	75
(III.12)	Thermomètre	75
(III.13)	Montage électrique de l'expérience d'étude des caractéristiques I-V des panneaux solaires	76
(III.14)	Expérience d'étude des caractéristiques I-V des panneaux solaires	77
(III.15)	Organigramme de calcul	79
(II.16)	Montage d'étude pour la détermination des caractéristiques de l'électrolyseur	80
(III.17)	Système électrolyseur-panneaux PV	81
(IV.1)	Eclairement solaire pour deux plans (plan incliné à 30° et plan horizontal)	84
(IV.2)	Eclairement sur un plan horizontal par deux méthodes	85

(IV.3)	Caractéristiques du panneau obtenues par différentes méthodes	86
(IV.4)	Caractéristiques I-V pour deux configurations (panneau seul et deux panneaux en série)	87
(IV.5)	Le rendement photovoltaïque et la puissance photovoltaïque en fonction de l'éclairement solaire	88
(IV.6)	Evolution de production d'hydrogène en fonction du courant d'électrolyseur	89
(IV.7)	Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de la tension de la cellule d'électrolyse	90
(IV.8)	Evolution de température d'électrolyte à différents tensions alimentées par le générateur en fonction du temps	91
(IV.9)	Evolution du courant d'électrolyseur à différents tensions alimentées par le générateur en fonction du temps	92
(IV.10)	Evolution de production d'hydrogène à différents tensions alimentées par le générateur en fonction du temps	92
(IV.11)	Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de la température initiale de la cellule d'électrolyse	94
(IV.12)	Evolution du courant d'électrolyseur en fonction de la tension à différentes température initiale de la cellule d'électrolyse	95
(IV.13)	Evolution du courant d'électrolyseur et le débit d'hydrogène en fonction de la concentration d'électrolyte	96
(IV.14)	Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de tension	97
(IV.15)	Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de la température initiale	99
(IV.16)	Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de concentration d'électrolyte (T=25°C)	99
(IV.17)	Evolution des caractéristiques I-V du système PV-électrolyseur en fonction de tension	100
(IV.18)	Evolution de l'éclairement solaire et la production d'hydrogène en fonction du temps	101
(IV.19)	Evolution du courant d'électrolyseur, puissance PV et la tension en fonction du temps	102

(IV.20)	Evolution du rendement PV, et rendement d'électrolyseur en fonction du temps	103
(IV.21)	Evolution du rendement du système PV-électrolyseur en fonction du temps	104

Liste des tableaux

Tableau	Titre de tableau	Page
(I.1)	Réserves d'énergies primaires fossiles (bases 2004)	7
(I.2)	Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel)	13
(I.3)	Les différents types de piles à combustible	16
(I.4)	Comparaison des technologies de production d'H ₂ à partir du gaz naturel	22
(III.1)	Caractéristiques des modules solaires	70

Introduction générale

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 % [1,11] 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 par combustion directe (moteurs à combustion interne) avec de l'eau pure comme résidu. Mais l'hydrogène ne se trouve dans la nature qu'à l'état combiné, surtout dans l'eau et les hydrocarbures, il est donc nécessaire de le produire et en cela, comme l'électricité, il n'est pas à proprement parler une énergie mais aussi un vecteur énergétique.

L'hydrogène présente certaines caractéristiques physico-chimiques avantageuses d'un point de vue énergétique. C'est un gaz très léger (masse volumique = 0,09 kg/m³, à 0°C) qui possède un pouvoir calorifique très élevé (33,3 kWh/kg, contre environ 14 kWh/kg pour le méthane). Il est inodore, incolore, non polluant. Dans le contexte énergétique actuel, les propriétés physique et environnementale de l'hydrogène font de lui un vecteur énergétique de qualité en association avec l'électricité. Le XXI^{ème} siècle pourrait voir la naissance d'une économie « électricité-hydrogène ».

L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut provenir de différentes sources. Elle peut être prise de la mer dans le cas des sites côtiers que des nappes phréatiques particulièrement pour le grand sud. L'utilisation des eaux thermales peut s'avérer un choix judicieux.

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 la production d'hydrogène par voie solaire.

Cette énergie solaire servira spécifiquement par utilisation d'un électrolyseur d'eau au sud algérien.

Cette étude a pour objet l'étude d'une installation de production d'hydrogène solaire située au laboratoire de Valorisation et Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS), de l'université Kasdi Merbah Ouargla. Le système est constitué des panneaux photovoltaïques et d'un électrolyseur. Les panneaux photovoltaïques alimentent l'électrolyseur en énergie électrique. L'électrolyseur produit l'hydrogène et l'oxygène. Chaque étape du processus tels que la conversion photovoltaïque, l'électrolyse, sera réalisée à l'échelle laboratoire.

Le but de cette étude a été d'évaluer le fonctionnement du système dans la chaîne de production d'hydrogène ou les caractéristiques sont étudiées par partie (électrolyse, et conversion photovoltaïque) avant de réaliser l'ensemble du système, ce qui déduite l'effet de quelques paramètres : la température, la concentration, l'électrolyte et l'éclairement solaire. Ce procédure permet d'adopter les meilleures conditions de fonctionnement.

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

Le premier chapitre est divisé en deux parties, l'une parle d'une façon générale sur la situation énergétique, et l'autre partie présente les caractéristiques d'hydrogènes, son production 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'exposition de système photovoltaïque. La deuxième partie est consacrée à la synthèse des travaux bibliographiques concernant l'électrolyse de l'eau.

Dans le troisième chapitre nous nous sommes intéressés à la présentation de l'installation (les composants de notre système) et les expériences réalisées dans l'étude d'effet de différents paramètres

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus, ce qui permet de déduire les conditions et les éléments nécessaires de production d'hydrogène.

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

Chapitre I :
Etude bibliographique

1. Situation énergétique

1.1. Introduction

Les prévisions de consommation d'énergie dans les décennies à venir sont en croissance significative et conduisent donc fatalement à un fort développement des énergies renouvelables, compte tenu des limitations imposées par l'épuisement inéluctable des ressources fossiles, de surcroît socialement mal acceptées dans de nombreux pays. Même si les énergies nucléaires (fission puis fusion ultérieurement) peuvent prétendre satisfaire une partie de la demande, les énergies renouvelables seront de plus en plus sollicitées dans l'avenir [1].

1.2. L'Énergie

L'énergie (du grec : ενεργεια, *energeia*, force en action) est la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur. C'est une grandeur physique qui caractérise l'état d'un système et qui est d'une manière globale conservée au cours des conversions. Dans le Système international d'unités, l'énergie s'exprime en joules. Dans la vie courante, le kilowattheure lui est préféré, et en physique des particules on utilise plutôt l'électronvolt, la conversion entre ces unités dont les ordres de grandeur diffèrent se résumant à une simple constante de proportionnalité. On utilise parfois aussi la tonne d'équivalent pétrole [2].

1.2.1. Types d'énergie

1.2.1.A. Les combustibles fossiles [2]

Un combustible fossile carboné désigne un combustible produit à partir de roches issues de la fossilisation d'éléments organiques en : pétrole, gaz naturel et houille (charbon).

Les combustibles fossiles représentaient en 2005 environ 80% des 10078 MTep (Méga Tonne équivalent pétrole), d'énergie consommés en 2005 dans le monde. Ils sont généralement classés en deux grandes catégories :

1. Conventionnels

Les combustibles fossiles conventionnels représentent la quasi-totalité de la consommation actuelle d'énergies fossiles.

- Le pétrole : environ 37% de l'énergie consommée dans le monde en 2005.
- Le charbon : environ 25 % de l'énergie consommée dans le monde en 2005.
- Le gaz naturel : environ 23 % de l'énergie consommée dans le monde en 2005.

2. Non conventionnels

Parmi les combustibles fossiles non conventionnels, on peut citer:

- les schistes bitumineux contenant du kérosène, qui doit encore être pyrolysé.
- les sables asphaltiques contiennent de l'asphalte.
- Les sables bitumineux contiennent du bitume.
- Les hydrates de méthane.
- La tourbe est un peu à part, son cycle de formation se compte en milliers d'années, ce qui la place à mi-chemin entre les carburants fossiles (dont la formation se compte en millions d'années) et les renouvelables.

1.2.1.B. L'énergie nucléaire [2]

L'énergie nucléaire est obtenue à partir des atomes, plus particulièrement de leur noyau. Elle est obtenue via deux procédés, mais seule la fission connaît une application industrielle. Comment l'énergie est-elle libérée? Un neutron vient frapper le noyau d'un atome lourd, uranium 235 ou plutonium 239 par exemple, et le choc de l'impact le brise en deux. C'est cette fission qui produit l'énergie utilisée dans les réacteurs nucléaires.

L'énergie nucléaire fournit un sixième de l'électricité mondiale, un tiers de l'électricité européenne. Il s'agit d'une matière puissante, seulement un gramme de matière fissile est capable de fournir 24 000 KWh, l'équivalent de 2 tonnes de pétrole.

Elle est productrice de déchets radioactifs qui posent problème : en effet, nous ne savons pas les recycler. De plus, comme les énergies fossiles, le nucléaire est une énergie de stock, avec des gisements limités.

1.2.1.C. Les énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une énergie exploitée par l'homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le pétrole ainsi que tous les combustibles fossiles ne sont pas des énergies renouvelables, les ressources étant consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle ces ressources sont naturellement créées [3].

Ces énergies renouvelables diffèrent par leurs origines [1]:

- Les énergies géothermiques qui permettent d'exploiter la chaleur contenue dans le sous-sol de la terre.
- Les énergies gravitationnelles dues à l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil, et qui se manifestent par les marées (sa forme d'énergie potentielle) et certains courants marins (sa forme d'énergie cinétique).
- Les énergies solaires issues du fonctionnement de la machine atmosphérique solaire: la biomasse, les vagues, l'hydraulique, le thermique, le photovoltaïque, l'éolien.

Ces diverses formes ont chacune leur spécificité et selon leur nature, le problème de leur stockage se pose ou pas et se résout, dans le premier cas, de manières différentes et adaptées. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes, les énergies solaires ayant une potentialité très supérieure à celles des deux autres formes d'énergies renouvelables.

1.3. Les conséquences de haute consommation d'énergie fossile [4]

1.3.1. La réduction des réserves fossiles

Le calcul simple qui consiste à calculer le ratio (réserves prouvées / consommation constatée) conduit à un chiffre qui caractérise l'importance des réserves.

Il ne faut pas donner à ce chiffre, exprimé en années, une signification absolue car les deux termes du ratio comportent des incertitudes :

- 1 / D'une part les progrès dans la recherche et l'exploitation des gisements ont tendance à augmenter le taux de récupération et donc, par la même, le volume des réserves prouvées et la « durée » de ces réserves.

- 2 / D'autre part, la croissance de la demande dans les prochaines décennies conduit au doublement de la consommation annuelle ce qui a évidemment l'effet inverse sur la « durée » des réserves.

Le tableau suivant résume la situation en ce qui concerne les hydrocarbures, le charbon et le gaz naturel.

Tableau I.1 : Réserves d'énergies primaires fossiles (bases 2004) [4]

	Réserves mondiales prouvées (Gtep)	Consommation annuelle (Gtep)	Durée (au rythme actuel de la consommation) (année)	Remarques
Pétrole	≈140	3,9	≈40 ans	80% des réserves dans les pays OPEP
Gaz naturel	≈160	2,4	≈ 60 ans	
Charbon	≈600	2,8	≈ 200 ans	

Ces chiffres sont préoccupants, d'autant que pour le pétrole 2/3 des réserves sont situées au moyen orient et 80% dans les Pays de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole). Nous risquons dans quelques décennies, et en particulier pour le pétrole, d'être confrontés à des tensions sur les approvisionnements et à de fortes augmentations de prix.

1.3.2. Effet de serre et changements climatiques

L'augmentation de la teneur en CO₂ constatée dans l'atmosphère est liée à l'activité humaine et en premier lieu à la production d'énergie. Voisine de 260 ppmv (partie par million de volume) avant la période industrielle, elle a augmenté de façon nettement perceptible au cours du 20^{ème} siècle. Elle a atteint 380 ppmv en 2005 et continue sa croissance au rythme de 2 ppmv chaque année.

L'accroissement de « l'effet de serre » qui en résulte provoque une élévation de la température moyenne du globe qui va en s'accéléralant.

C'est ainsi qu'au cours du 20^{ème} siècle, la température moyenne de l'air à la surface du globe a augmenté d'environ 0,75°C. Mais la vitesse de réchauffement au cours des 50 dernières années (0,13°C par décennie) est le double de celle calculée pour l'ensemble du siècle et 11 des 12 dernières années figurent au palmarès des années les plus chaudes depuis 1850. Ce réchauffement induit des changements climatiques dont les effets à long terme pourraient être dramatiques pour la planète : augmentation de la température moyenne de plusieurs degrés celsius au cours du 21^{ème} siècle, fonte des glaces polaires, élévation notable du niveau des mers, modification des courants marins, augmentation des précipitations, des tornades etc.

Sous l'égide de l'ONU (organisation des Nations Unies), le sommet de Rio en 1992 et le protocole de Kyoto en 1997 ont conduit à des accords internationaux visant à stabiliser les émissions globales à l'échéance 2008 – 2012 au niveau de celles de l'année 1990. Pour laisser une plus grande latitude aux pays en voie de développement, les pays industrialisés se sont engagés à réduire en moyenne leurs émissions de 5,2% et pour sa part, l'Union Européenne a pris l'engagement d'une réduction de 8% modulée entre les différents pays qui la composent.

Cette première phase du protocole de Kyoto n'est qu'une modeste amorce des efforts à déployer pour plafonner à 450 ppmv la concentration du CO₂ atmosphérique et limiter à moins de 2°C le réchauffement de la planète au cours du 21^{ème} siècle.

La concrétisation des accords internationaux visant à diviser par 2 les émissions de CO₂ en 2050 demandera de longues discussions mais, même si la ratification et l'application de ces accords rencontrent des difficultés, ils auront un impact déterminant sur l'industrie de l'énergie. Ils impliqueront en particulier que la répartition actuelle des sources d'énergie primaire soit largement modifiée et que soit divisée par 2 la part des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel). Pour effectuer un premier pas dans cette direction, l'Union Européenne s'est fixé un objectif de réduction de 20% (par rapport à 1990) de ses émissions de GES (Gaz Effet de Serre) en 2020.

1.3.3. Les pollutions au niveau local

La tendance généralisée à la concentration des populations dans de grandes agglomérations induit d'importantes pollutions de l'atmosphère.

Les centrales thermiques et les transports urbains sont les premiers contributeurs à ces pollutions. Ils y entraînent, en plus des émissions de CO₂, des émissions de gaz (SO₂, NO_x, CO, CH₄, composés organiques volatils ...) et de particules carbonées.

L'opinion publique est de plus en plus concernée par les conséquences de ces pollutions et en particulier de leurs répercussions sur la santé des populations.

1.4. Les modifications fondamentales des schémas énergétiques mondiaux

La poursuite à l'identique des schémas énergétiques actuels n'est pas possible.

Elle conduit à une triple impasse [3]:

- sur le plan du contrôle des émissions de CO₂ et des changements climatiques qu'elles induisent,
- sur le plan de la pollution dans les agglomérations urbaines,
- sur le plan de la disponibilité et donc des prix des combustibles fossiles et tout d'abord du pétrole.

Il va donc falloir

- économiser l'énergie et changer progressivement le « mix » des énergies primaires dans le bilan énergétique mondial.
- réduire la part des sources d'énergies fossiles et tout particulièrement du pétrole.
- développer la part des énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, etc...) qui sont aujourd'hui minoritaires (10%) dans le bilan global.
- industrialiser les technologies de Capture et de Séquestration des émissions de CO₂ lorsque celles-ci sont massives et concentrées.
- et se préparer à des échéances plus lointaines où l'humanité devra produire la quasi-totalité de ses besoins énergétiques à partir de l'énergie rayonnée par le soleil, où de la fusion nucléaire si sa faisabilité en est démontrée.

Compte tenu des réserves identifiées, il faut s'en préoccuper dès maintenant.

Dans ce contexte, à côté du vecteur électricité qui demeurera dominant, le vecteur hydrogène [5]:

- qui est compatible avec toutes les sources d'énergie.
- qui en permet le stockage et la distribution.
- qui supprime pollutions locales et émissions de CO₂.

- qui, grâce aux performances des piles à combustible, améliore les rendements de conversion.

Prendra progressivement sa place dans les systèmes énergétiques de demain.

Mais adopter l'hydrogène comme vecteur d'énergie demande de le produire, de le stocker (en particulier à bord des véhicules), de le distribuer et d'assurer la sécurité de son utilisation. Cela revient à envisager une importante mise en œuvre s'appuyant à la fois sur des technologies avancées et sur de gros investissements [6,7], le tout dans un contexte de volonté politique très affirmée. A ce jour, l'objectif est d'abaisser les coûts de l'hydrogène et d'en faciliter l'emploi tout en le faisant admettre par le grand public. Aussi, que ce soit en Amérique du nord, en Europe ou en Asie, il existe de nombreux programmes « hydrogène » nationaux et régionaux mais tout autant d'initiatives privées, tant de la part de petites et moyennes entreprises, que de grands groupes industriels avec dans tous les cas les financements appropriés. Ont ainsi pu être entreprises de multiples recherches fondamentales, appliquées et de développement suivies le plus souvent d'intéressantes, voire de spectaculaires opérations de démonstration [8].

2. La production d'hydrogène et ses applications

2.1. Introduction

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

2.2. Généralités sur l'hydrogène

2.2.1. Caractéristiques de L'hydrogène

Hydrogène (du grec « qui produit de l'eau »), élément de symbole H, incolore, inodore et insipide, de numéro atomique 1 [9].

1	H
hydrogène	
1,0079	
1s ¹	

On confondait l'hydrogène avec d'autres gaz, jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontra en 1766 que l'hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Le chimiste montra plus tard que l'hydrogène était une substance indépendante, qui se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau (voir Figure I.1). En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma hydrogène [9].

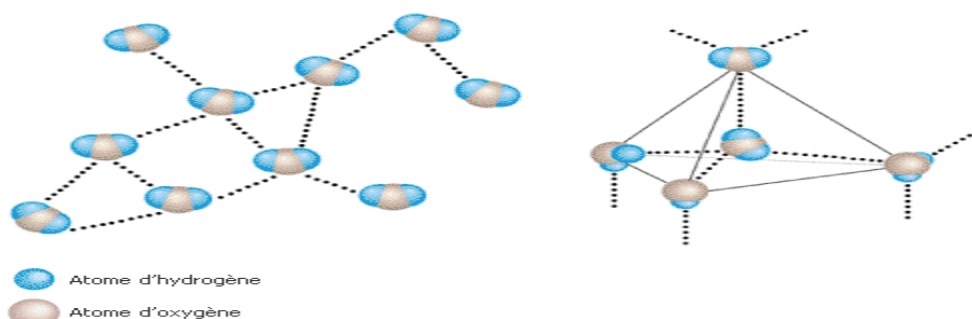


Figure I.1 : Liaisons hydrogène dans l'eau [1]

2.2.1.1. Propriétés et origine naturel [9]

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 1 atm, l'hydrogène est un gaz de densité 0,089. Sa masse atomique est de 1,007. L'hydrogène liquide fut obtenu pour la première fois, en 1898, par le chimiste britannique sir James Dewar. Il est incolore (bleu clair en couches épaisses), avec une densité de 0,070. Évaporé sous pression réduite à grande vitesse, il se transforme en un solide incolore.

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.

2.2.2. Les avantages et les inconvénients [5]

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 I.2) ;
- 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) ;

Tableau I.2 : Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel) [16]

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	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/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Densité liquide à 20.3K	70.79 kg/m ³
Chaleur spécifique (C _p)	14 266 J/kg K (293K)
Chaleur spécifique (C _v)	10 300 J/kg K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/(mK)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante du gaz	4 124.5 J/kg K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20.268K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
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)
Surpression de détonation (mélange stoechiométrie)	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	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stoechiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

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) ;

2.2.3. Les applications d'hydrogène

2.2.3.a. Utilisations chimiques

L'hydrogène réagit avec de nombreux éléments non métalliques. Il se combine avec l'azote en présence d'un catalyseur pour former de l'ammoniac, avec le soufre pour former du sulfure d'hydrogène, avec le chlore pour former du chlorure d'hydrogène et avec l'oxygène pour former de l'eau. La réaction entre l'oxygène et l'hydrogène a lieu à température ambiante et seulement en présence d'un catalyseur, tel que le platine finement divisé. Lorsque l'on enflamme un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène, il se produit une explosion. L'hydrogène se combine également avec certains métaux tels que le sodium et le lithium pour former des hydrures. L'hydrogène agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cuivre: le gaz entraîne l'oxygène et laisse le métal à l'état libre. L'hydrogène réagit avec les composés organiques insaturés pour former les composés saturés correspondants [10].

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

industriellement à partir de différents gaz combustibles. L'hydrogène est séparé du gaz à l'eau, du gaz naturel et du gaz de houille, par liquéfaction des autres constituants du gaz ou par conversion catalytique du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone, facilement éliminé [10].

Dans de nombreuses réactions d'électrolyse, l'hydrogène est un sous-produit important. Des quantités considérables d'hydrogène sont utilisées dans la synthèse de l'ammoniac et du méthanol. L'hydrogénation des huiles pour la production de graisses comestibles, du charbon pour former le pétrole de synthèse, et des huiles du pétrole pour enrichir la fraction d'essence, sont des procédés qui nécessitent de grandes quantités d'hydrogène [10].

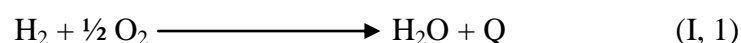
On a utilisé l'hydrogène, gaz le plus léger, pour gonfler les ballons et les dirigeables. Cependant, il s'enflamme très facilement, et plusieurs dirigeables, dont l'Hindenburg (aéronef allemand), ont été détruits par des incendies d'hydrogène. L'hélium a 92 % de la puissance de levage de l'hydrogène et est ininflammable. C'est pourquoi on l'utilise dès que possible. L'hydrogène est en général stocké dans des cylindres d'acier, sous des pressions comprises entre 120 et 150 atm. Le gaz est également utilisé dans les chalumeaux à hautes températures pour la coupe, la fonte et le soudage des métaux [10].

Les raffineries s'efforcent de produire à partir de pétroles bruts variés le maximum de produits commercialisables (essence, diesel, kérosène, naphtha, ...) qui doivent répondre à des normes précises. Dans le schéma de raffinage, un certain nombre d'unités de traitement sous-produisent de l'hydrogène (cracking thermique ou catalytique, reformeur catalytique...) alors que d'autres en sont consommatrices (hydrocracking, hydrotraitement, désulfuration...) [17].

2.2.3.b. Utilisation énergétique

- **Piles à combustibles** [18]

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



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

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé.

Le tableau (I.3) ci-après détaille les divers types de piles couramment développées et la figure (I.2) décrit le principe de fonctionnement du type dit « acide à polymère solide » (PEMFC). Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50%.

Tableau I.3 : Les différents types de piles à combustible [18]

Type de pile	Electrolyte	T (°C)	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transports. Gamme : 1-100 kW
Acide polymère (PEMFC et DMFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transport, stationnaire Gamme : 10mW-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 1000	Stationnaire, transports Gamme : 1kW-10 MW

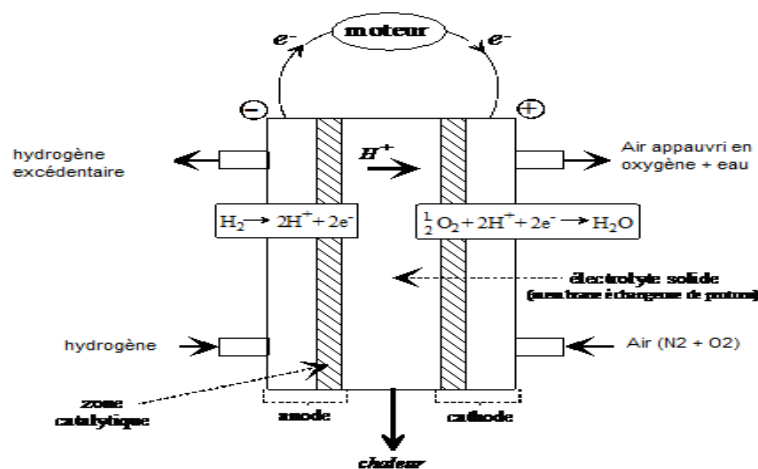


Figure I.2 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC [18]

- **Autres applications énergétiques**

Les domaines potentiels d'application de l'hydrogène-énergie sont extrêmement nombreux et variés, à commencer par tous ceux qui sont déjà couverts par le pétrole (et ses dérivés) et le 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 supercapacités) dans des montages hybrides, comme l'ont démontré une quinzaine de constructeurs automobiles dans le Monde avec plus de 150 prototypes déjà réalisés. L'hydrogène stocké à bord a fait l'objet de démonstrations par la majorité des constructeurs, d'autres n'excluant pas de le fabriquer à bord grâce un reformeur d'alcool ou d'essence adapté. On peut y ajouter une application, en cours de test chez le constructeur BMW: les APU (Auxiliary Power Unit), piles à combustible utilisées comme source auxiliaire d'énergie électrique pour alimenter les équipements de bord (poids-lourds, utilitaires, véhicules de haut de gamme, avions) comme la climatisation et tous les autres services électriques, dont il est prévu que la puissance nécessaire atteindra 5 kW vers 2005.
- l'industrie, qui consomme aujourd'hui le quasi totalité de l'hydrogène produit dans le monde et qui pourrait reconverter sans grande difficultés ses systèmes actuellement alimentés en fuel ou gaz naturel.
- l'agriculture, qui, au travers des engrais, utilise déjà des sous-produits de l'hydrogène, comme des dérivés de l'ammoniac.

2.3. Production d'hydrogène

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation [6].

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir [7]:

- 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 I.3) 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 [11].

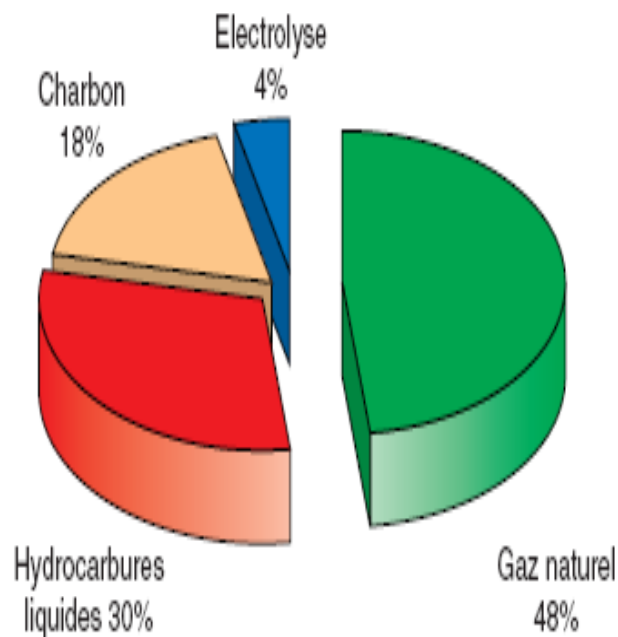


Figure I.3 : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde
[11]

Le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource (voir figure I.4), 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 [12] :

- les technologies thermochimiques ;
- les technologies nucléaires ;
- les technologies électrolytiques ;
- les technologies photolytiques ;

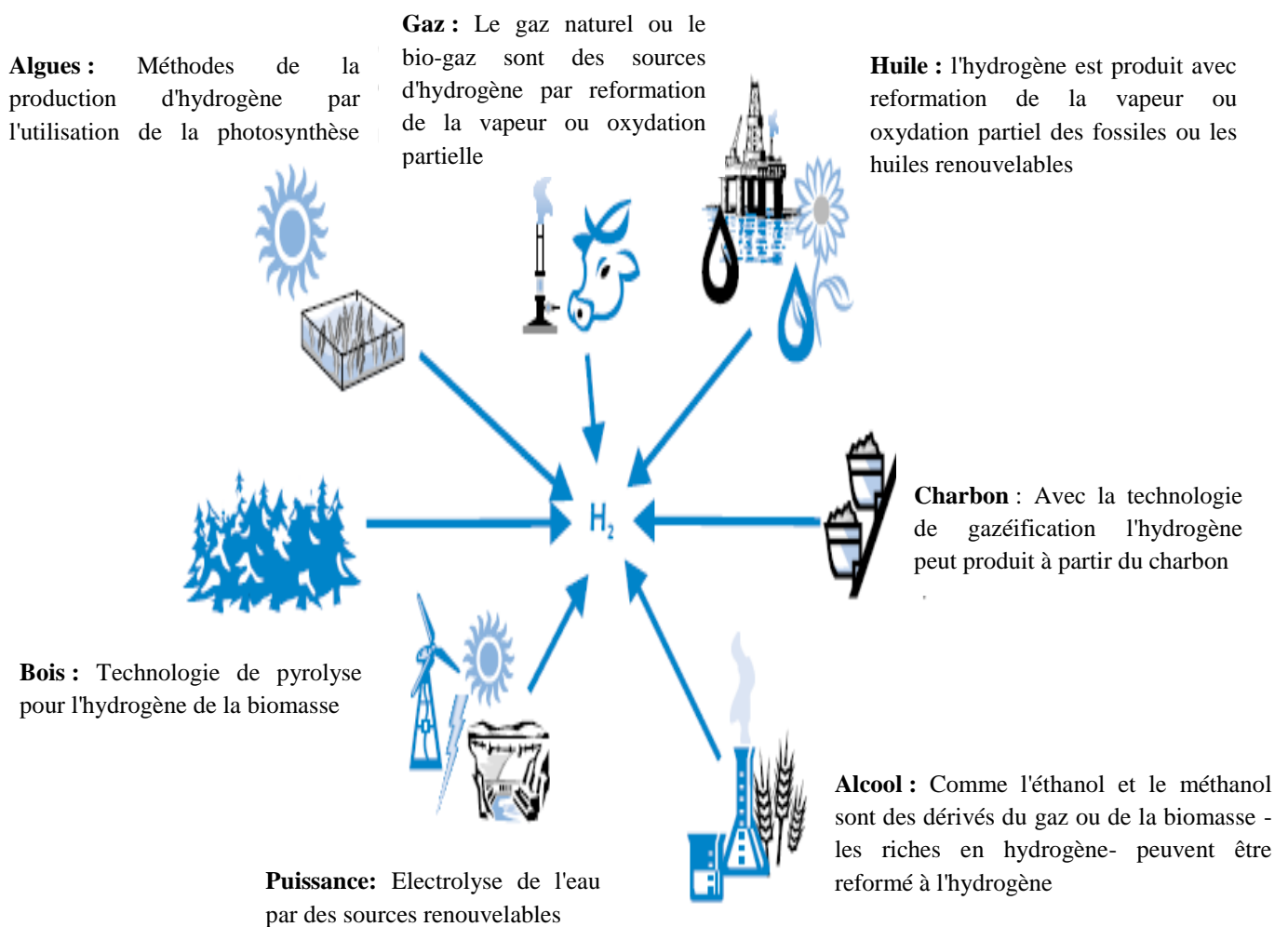


Figure I.4 : Les matières de base et les processus utilisés dans la production d'H₂ [13]

2.3.1. Production par les combustibles fossiles

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus est présentée dans l'appareil de CO₂ comme sous produit.

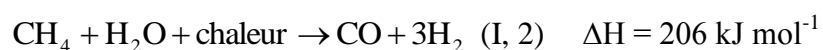
2.3.1.a. Production à partir du gaz naturel [14]

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

1. Le vaporeformage du gaz naturel (SMR) [14]

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 bar).

Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse (I, 2) et la conversion du CO (I, 3). On notera que ces réactions sont thermodynamiquement équilibrées, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire à la réaction chimique pour s'effectuer, une partie de la charge ne réagit pas et reste mélangée aux produits. Dans le cas du vaporeformage, ceci se traduit par une fraction significative de méthane (CH₄) et de monoxyde de carbone (CO) en sortie d'unité.



2. Oxydation partielle (POX)

L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. A haute température (classiquement de 900 à 1500 °C) et à pression élevée (classiquement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène (I, 4) en tant qu'oxydant et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en

général) sans catalyseur. Le CO produite est encore convertie à H₂ comme décrit dans l'équation (I, 3).

Le procédé d'oxydation partielle de gaz naturel n'est généralement pas utilisé pour la production d'hydrogène : On lui préfère le plus souvent la technologie de vaporeformage décrite plus haut. En revanche, on peut se tourner vers l'oxydation partielle de gaz naturel pour des applications en chimie, quand on recherche un ratio H₂/CO légèrement inférieur à 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. Le rapport H₂/CO « naturel » du gaz de synthèse obtenu est compris entre 2 et 2.8, mais le procédé possède la souplesse nécessaire pour ajuster ce rapport entre 1 et 3.5 selon les besoins de l'utilisateur final : Une augmentation de la quantité de vapeur d'eau injectée permet d'augmenter ce rapport, tandis que le recyclage total ou partiel du CO₂ en sortie de réacteur permet de le diminuer

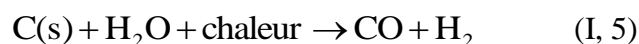
Chacun des processus a des certains avantages et inconvénients, qui sont présentés dans le tableau (I.4).

Tableau I.4 : Comparaison des technologies de production d'H₂ à partir du gaz naturel [13]

la technologie	SMR	ATR ou POX
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement élevé • Coûts pour de grandes unités 	<ul style="list-style-type: none"> • Petite taille • Coût pour des petites unités • Simple système
inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité du système • Sensible aux qualités du gaz naturel 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité inférieure • Purification de l'H₂ • Emissions / torchage

2.3.1.b. Production à partir du charbon [14]

L'hydrogène peut être produit à partir du charbon par une variété des procédés de gazéification (par exemple lit fixé, lit de fluidisation ou écoulement entraîné). Dans la pratique, des procédés entraînés à hautes températures d'écoulement sont favorisés pour maximiser la conversion du charbon en gaz, de ce fait évitant la formation des quantités significatives du charbon, goudrons et phénols. Une réaction typique pour le processus est donnée dans l'équation (I, 5), 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 (I, 3).

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

2.3.2. Production à partir du nucléaire [5]

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 % [12].

Le craquage de l'eau par le procédé thermochimique IS²⁰ (Iode-Soufre), la chaleur nécessaire (vers 850°C) étant fournie par des réacteurs nucléaires dédiés, à haute température. Ce type de réacteur HTGR²¹ (High Temperature Gas Reactor) a l'avantage de consommer des combustibles fissiles beaucoup plus abondants que l'U235 actuellement brûlé dans les réacteurs PWR et dont les réserves sont limitées.

Les potentialités de production d'hydrogène, dédiée ou en co-génération d'électricité, par l'énergie nucléaire font l'objet d'études, tant sur le plan faisabilité que coût.

Toutefois, le développement futur de la technologie nucléaire doit intégrer les considérations politiques et sociétales (l'acceptabilité par le public) en plus des considérations technologiques.

2.3.3. Production à partir des renouvelables

Diverses sources sont exploitables:

2.3.3.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 CO₂ 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 [5]:

- Par gazéification pour donner du gaz de synthèse (CO + H₂) qui lui-même –après purification– donne de l'hydrogène. Aujourd'hui, dans le monde, plus de 50 usines de

gazéification de la biomasse fonctionnent même si elles ne sont pas dédiées à la fabrication d'hydrogène ;

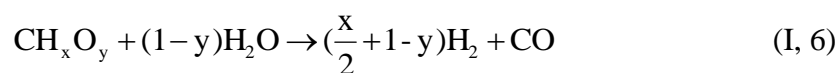
- Par bio-photolyse de l'eau en utilisant certaines micro-algues ou certaines cyanobactéries ;
- Par photo-décomposition de composés organiques par des bactéries ;

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

- **Gazéification de la biomasse** [15]

Les procédés de gazéification de la biomasse représentent actuellement une capacité mondiale de production de plus de 430 millions de Nm³ d'hydrogène par jour. La production d'énergie équivalente s'élève à une vingtaine de GW. Environ 42 % des unités de gazéification installées dans le monde utilisent du charbon comme matière première.

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



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

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

- **Production Photo-biologique (biophotolyse)** [13]

La production de l'hydrogène par bio photolyse repose sur le principe de la photosynthèse (I, 7) connue chez toutes les plantes. Le métabolisme des organismes utilisés est réorienté vers la production d'hydrogène (I, 8) au lieu de la synthèse des

hydrates de carbone et la formation de la biomasse. La photosynthèse implique l'absorption de la lumière par deux photosystèmes distincts opérant en série pour la dissociation de deux molécules d'eau et libérant de l'oxygène. Ainsi des électrons sont libérés et seront utilisés soit pour réduire le CO₂ (Cycle de Calvin) soit sont eux même réduit en hydrogène gazeux par une enzyme appelée hydrogénase. Cette dernière absente chez les plantes supérieures et spécifiques aux microalgues, quelques macroalgues vertes et les cyanobactéries, peut réduire les protons en hydrogène gazeux sous certaines conditions. Ce phénomène a été rapporté pour la première fois par Gaffron et Rubin puis repris par plusieurs chercheurs.

- Photosynthèse: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$ (I, 7)
- Production d'hydrogène: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$ (I, 8)

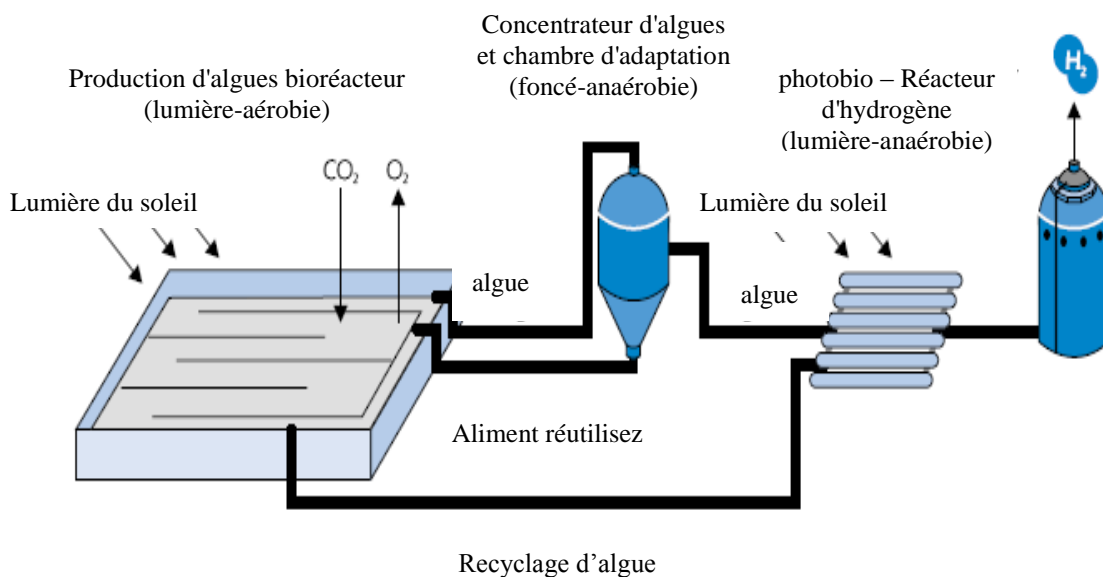
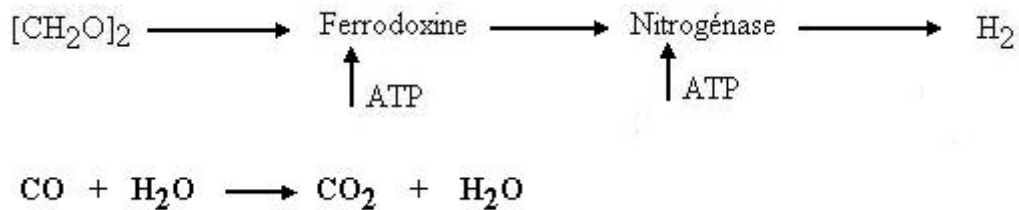


Figure I.5 : Principe de production photo-biologique d'hydrogène [13]

- **Photo décomposition des composés organiques par les bactéries photosynthétiques**

Les bactéries photo trophiques peuvent dégrader les composés organiques issus de nombreux substrats dérivés de déchets, en utilisant un large spectre visible en garantissant un haut rendement de production de l'hydrogène. Cette méthode de production est intéressante, puisque l'oxygène n'est pas un facteur limitant. Le monoxyde de carbone est aussi utilisé comme substrat pour produire de l'hydrogène.



2.3.3.B. Le solaire [5]

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.

2.3.3.C. L'éolien [5]

C'est une source qui est aussi en plein développement dans de nombreux pays. Les générateurs éoliens ont une puissance unitaire de plus en plus élevée, jusqu'à 2,5 MW (on étudie actuellement des prototypes 25 dans la gamme 4-6 MW), et le coût du kWh fourni est en baisse régulière ; il n'a cependant pas encore atteint les objectifs attendus autour de 3

à 4 centimes d'euros. L'électricité produite peut être partiellement ou totalement transformée en hydrogène par électrolyse de l'eau.

2.3.3.D. L'hydraulique [5]

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

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

2.3.3.E. D'autres sources renouvelables [5]

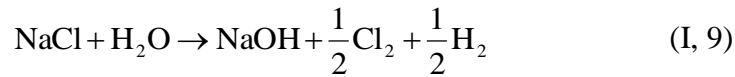
Elles sont de moindre potentiel mais néanmoins intéressantes, sont déjà mises en œuvre ou envisagées quand les conditions locales s'y prêtent comme :

- l'énergie des marées ;
- l'énergie des vagues 27 ;
- la géothermie « chaude », comme en Islande et en Italie, en utilisant des calories à une température assez élevée ($> 250^{\circ}\text{C}$) pour faire fonctionner un cycle thermodynamique (pour produire de l'électricité qui alimente un électrolyseur) avec un rendement suffisant pour amortir le système de production

2.3.4. Autres procédés chimiques

2.3.4.1. Produit secondaire du procédé Chlore-Soude [15]

L'hydrolyse d'une saumure (eau salée) conduit à la production de soude NaOH, de chlore Cl_2 et d'hydrogène H_2 . L'équation bilan de la réaction est la suivante:



Le procédé industriel initial utilisant du mercure a été abandonné pour des raisons environnementales. Il a été remplacé par le procédé à membrane (voir figure I.6). Les compartiments anodiques et cathodiques sont ici séparés par une membrane sélective conductrice de cations de 50 à 200 μm d'épaisseur. L'anode est alimentée par une saumure (concentration usuelle de NaCl: 180 à 200 g/L; $1 < \text{pH} < 4,5$). Celle-ci oxyde les ions Cl^- en chlore gazeux Cl_2 . La cathode réduit l'eau en hydrogène gazeux H_2 . Les ions hydroxydes issus de la réaction se recombinaient avec les ions Na^+ qui ont migré du compartiment anodique vers la cathode, à travers la membrane (d'une surface usuelle de 1 à 3 m^2), pour former de la soude dont la concentration avoisine 25 % en masse.

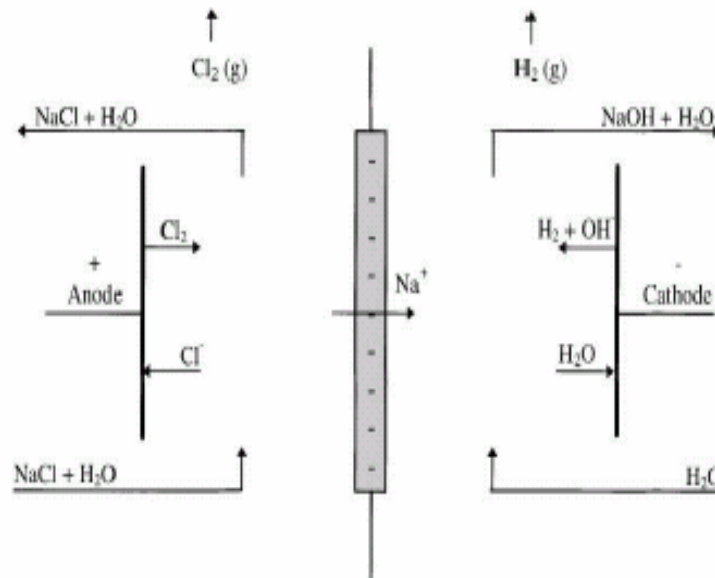


Figure I.6 : Représentation d'une cellule du procédé Chlore-Soude [15]

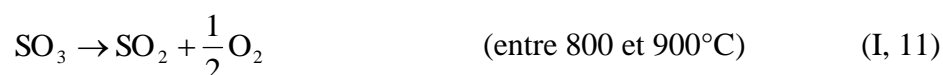
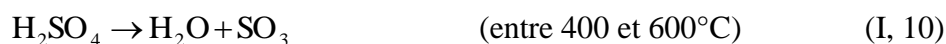
Une différence de potentiel de 2 à 4 V est appliquée entre les deux électrodes afin d'ajuster le courant d'électrolyse (valeurs typiques : entre 2000 et 5000 A/m^2). Une centaine de cellules sont habituellement assemblées en série pour former le stack. La température de fonctionnement varie entre 80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

2.3.4.2. Décomposition par cycle thermochimique [15]

On peut dissocier une molécule d'eau en apportant de l'énergie au procédé uniquement sous forme de chaleur. Une température de 4500°C serait alors nécessaire. Pour abaisser cette température, on peut faire intervenir dans le procédé des composés chimiques dont les produits de réaction donneront lieu in fine à la production d'hydrogène. Il existe plusieurs cycles thermochimiques dont les deux principaux sont le cycle Iode-Soufre et le cycle UT3.

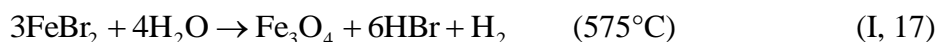
- **Le cycle Iode-Soufre**

Il met en jeu la décomposition à haute température de deux acides.



- **Le cycle UT-3**

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



Le bilan global théorique de ces réactions est toujours $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$. Mais en pratique, la difficulté de totalement régénérer les intermédiaires réactionnels associée à la complexité du procédé chimique (mise en jeu de grandes quantités de matières, nombreuses étapes telles que séparation des produits et des réactifs, lavage des produits, etc.) dégradent le rendement de ce procédé. Des recherches sont toujours en cours pour élaborer un procédé industriel à haut rendement.

Chapitre II :
Production d'hydrogène
photovoltaïque

1. Système solaire photovoltaïque

1.1. Introduction :

L'énergie solaire représente un gisement très important au niveau de la surface du globe terrestre. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants (voir figure II.1) du monde. 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 m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au sud du pays [19].

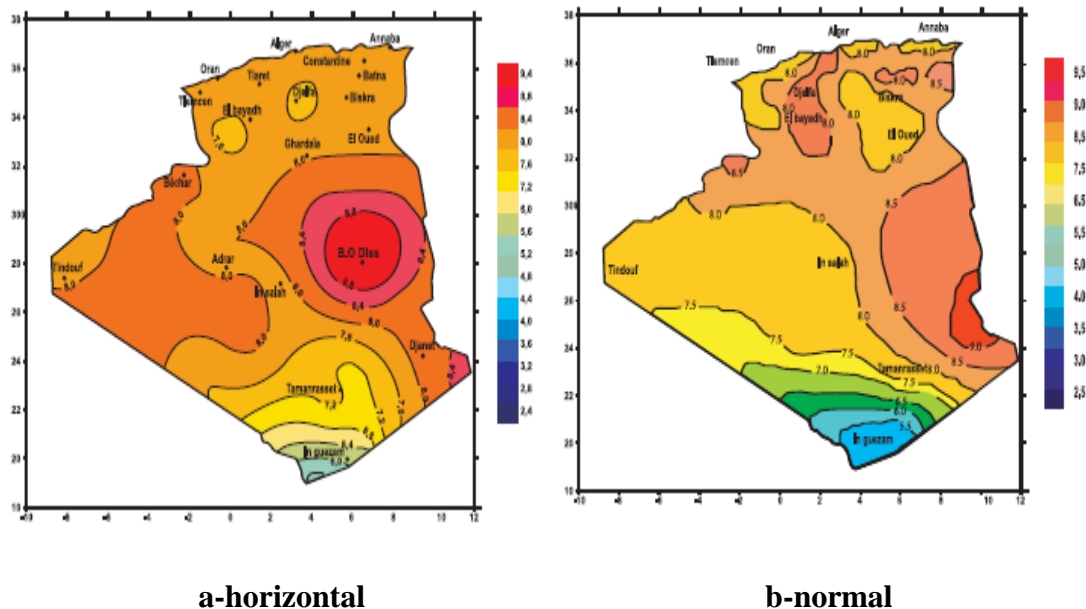


Figure II.1 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal et normal au mois de juillet [19].

1.2. Rayonnement solaire [20]

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

1.2.1. Mouvements de la terre [21]

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 $149\,675\,106 \text{ km}$.

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 II.2.

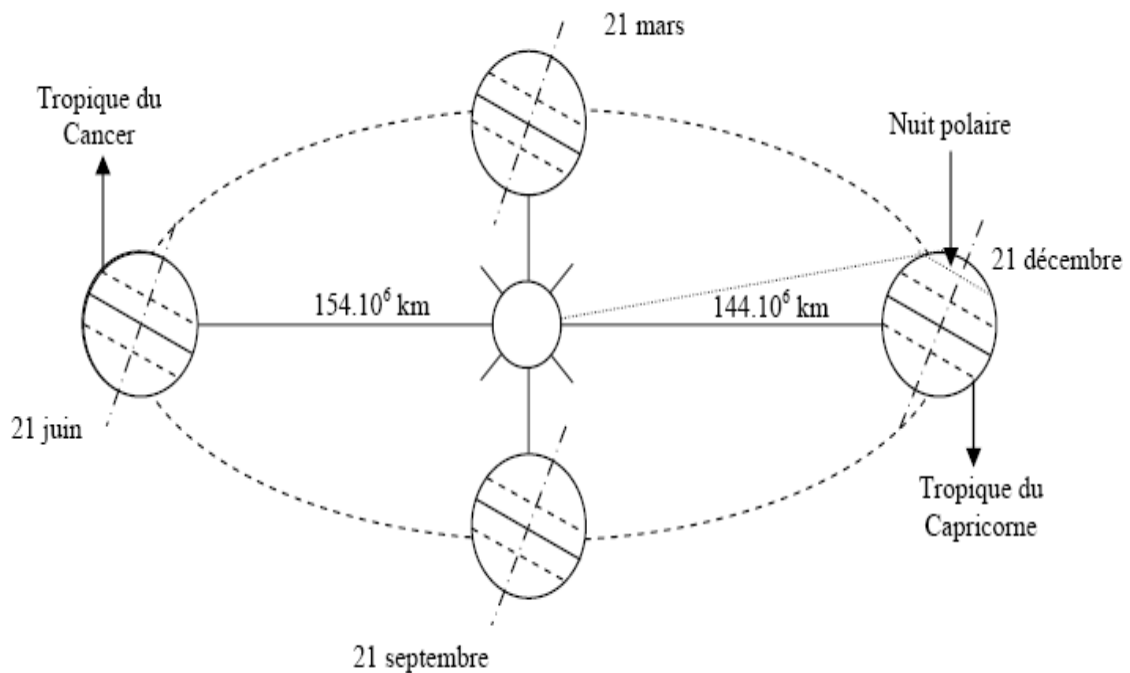


Figure II.2 : Schématisation des mouvements de la terre autour du Soleil [21]

1.2.2. Spectre du rayonnement [20]

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ . Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800 K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en:

- Ultraviolet UV : $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4% ;
- Visible : $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0% ;
- Infrarouge IR : $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6% ;

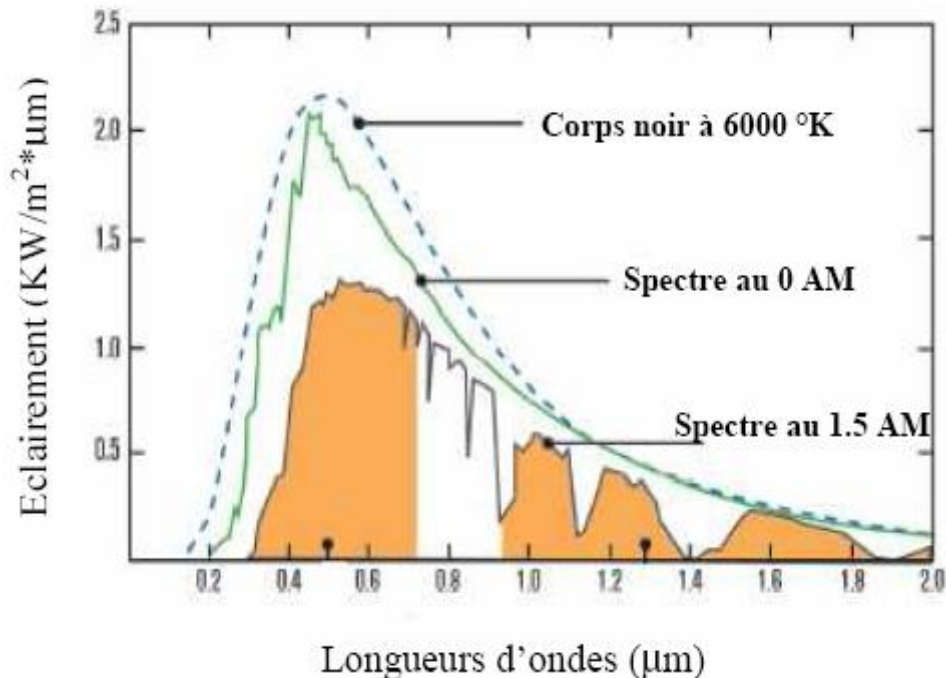


Figure II.3 : Spectre solaire hors atmosphère [20]

1.2.3. Durée d'insolation [20]

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 enregistrés ; 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.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle même dépend de la période de l'année considérée.

1.2.4. Modèles de coordonnées soleil

1.2.4.1. Angles solaires

Les angles solaires sont des facteurs intéressants pour le calcul de rayonnement solaire

- **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 [22]. Nous prenons celle de Ouargla: $\varphi=31^{\circ}57'$ nord.

- **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 [22]. Nous prenons celle d'Ouargla: $\lambda=5^{\circ}19'$ est.

- **La déclinaison** (ω) : 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 $-23^{\circ}7'$ (Au solstice d'hiver) et $+23^{\circ}7'$, (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne (figure II.4). Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur, de demi angle au sommet $\omega = 90^{\circ} - \omega$. L'angle ω sera donc fonction du jour de l'année [22].

$$\omega = +23,45^{\circ} \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot N - 80\right) \quad (\text{II, 1})$$

N est le nombre de jours de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, il varie de 1 à 365 ou 366. Selon l'année:

-Année civile : 365 jours ;

-Année bissextile : 366 jours ;

- **L'angle horaire du soleil** (δ) : repère de 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. En principe, un jour solaire (δ variant de -180° à $+180^\circ$) correspond à 24 heures [23] :

$$\delta = 15 \left(\text{heuresUTC} - 12 + \frac{\lambda}{15} \right) \quad (\text{II, 2})$$

La position apparent du soleil est déterminée par ses coordonnées angulaires par rapport à au plan horizontal (figure II.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) [23]:

$$\text{Tan}(\psi) = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varphi) \cos(\delta) - \cos(\varphi) \sin(\omega)} \quad (\text{II, 3})$$

- **La hauteur angulaire** (γ) [23]: 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 :

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi) \sin(\omega) + \cos(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) \quad (\text{II, 4})$$

Afin d'obtenir l'angle d'incidence des rayons sur le capteur, une représentation schématique (figure II.4) nous permet de visualiser clairement les différents angles pris en compte dans l'étude du rayonnement arrivant dans le plan d'un capteur. L'angle (γ , hauteur dans l'étude) et (ψ , azimut) que nous venons de définir dans le positionnement horaire et spatial de soleil, son liés directement relative du soleil par rapport à l'emplacement géographique du capteur.

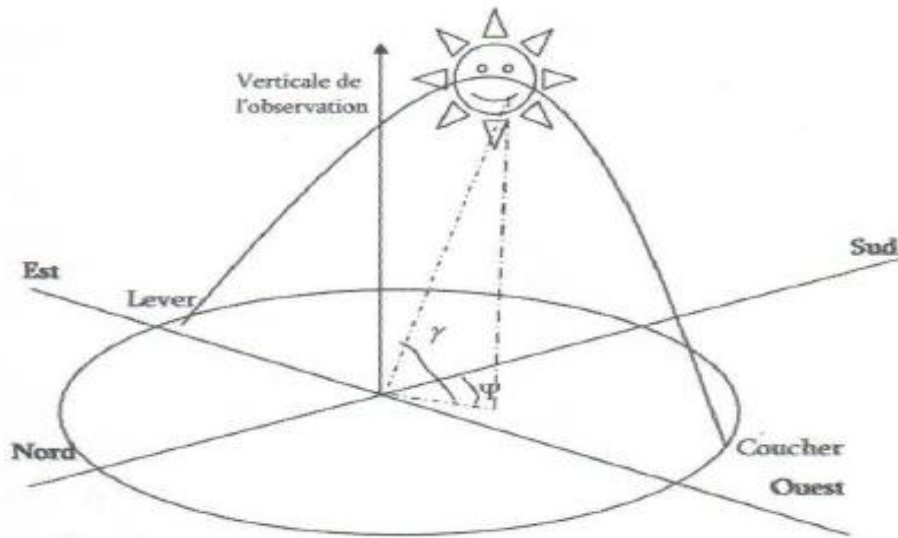


Figure II.4 : Coordonnées angulaires du soleil [20]

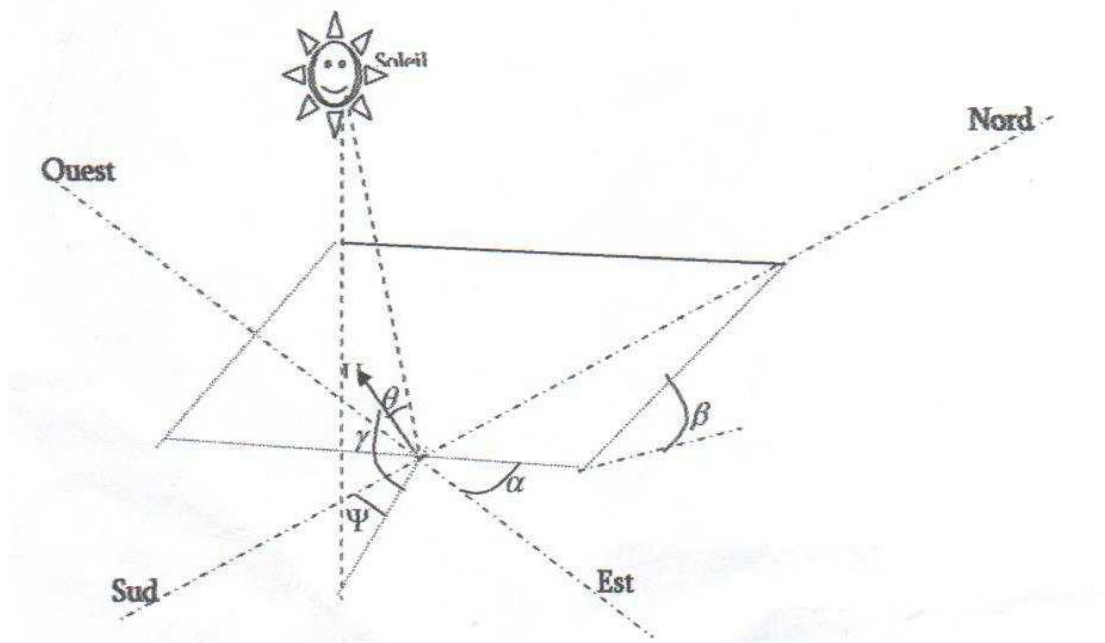


Figure II.5 : Représentation de l'éclairage d'un capteur plan incliné [20]

Les autres angles sont liés directement au positionnement du capteur, et permettent de corriger les pertes liées au trajet optique des rayons lors de la traversée de l'atmosphère, ils correspondent à :

- **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) [23]. Dans notre cas, cette variation est mise à zéro.

- **L'inclinaison** (β) du capteur par rapport au sol ($0^\circ < \beta < 90^\circ$). Elle est nulle pour ce qui est du plan horizontal dans le calcul du premier angle d'incidence puis de 45° pour le second [23].

- **L'angle d'incidence** (θ) des rayons solaires par rapport à la normal au capteur. Une relation trigonométrique permet de déterminer sa valeur en fonction des autres angles [23]:

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

- **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 carrée de la distance au soleil [23] :

$$C = \frac{d}{d_0} = 1 + 0,034 \cos \left[(N - 3) \frac{360}{365} \right] \quad (\text{II, 6})$$

d : la distance terre soleil ;

d_0 : la distance moyenne terre soleil ;

1.2.4.2. Modèle du rayonnement solaire

A. Rayonnement solaire sur un plan horizontal [24]

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

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. Après des mesures pour des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct :

$$S_H(i) = 1367 \cdot C(j) \cdot \sin \left(h(i) \cdot \exp \left(\frac{-T_L}{0,9,9,41 \cdot M(i)} \right) \right) \quad (\text{II, 7})$$

Avec :

S_H : Flux direct horizontal.

$C(j)$: La correction de la distance terre soleil.

$h(i)$: Hauteur du soleil.

T_L : Facteur de trouble.

$M(i)$: 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 (D) par l'heure i est statistiquement donné par :

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} \cdot C(j) - \sin[h(i) - 2] \exp\left[-\log^2\left(\frac{T_L}{22 \cdot M(i)^{-0,65}}\right)\right] \quad (\text{II, 8})$$

A.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) : $0 \leq \xi \leq 1$

A.4. Rayonnement global (ϕ_{GH})

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

$$\phi_{GH} = S_H + D_H + R_H \quad (\text{II, 9})$$

B. Rayonnement solaire sur un plan incliné [24]

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

B.1. Rayonnement direct

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

$$R_b = \frac{S_B}{S_H} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)} \quad (\text{II, 10})$$

R_b : Rapport de flux direct.

S_B : Flux direct pour un plan d'inclinaison.

S_H : Flux direct horizontal.

ω : Déclinaison du soleil.

δ : Angle horaire du soleil.

Alors le flux direct pour le plan incliné B

$$S_B = R_b \cdot S_H$$

$$S_B = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)} \cdot S_H \quad (\text{II, 11})$$

B.2. Rayonnement diffus

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

Pour l'heure i : utilisons le modèle « WILLMOTT »

$$D_b = D_H \left[F(i) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + (1 - F(i)) \cdot \frac{\cos \theta(i)}{\sin h(i)} \right] \quad (\text{II, 12})$$

Avec :

$$F(i) = 1 - K_T(i) \cdot \left[1 - \frac{S_H}{\phi_H} \right]$$

$$K_T(i) = \frac{|\theta_{\phi_H}(i)|}{\theta(i)}$$

$K_T(i)$: Coefficient de sérénité.

$\theta(i)$: Angle d'incidence du rayon direct par rapport au plan incliné.

B.3. Rayonnement réfléchi

La fraction du flux réfléchi par le sol sur la surface inclinée est proportionnelle au flux global horizontal.

$$R_B = \phi_{GH} \left[\xi \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (\text{II, 13})$$

Avec :

ϕ_{GH} : Flux global horizontal.

ξ : Albédo du sol.

B.4. Rayonnement global incliné

Il est la superposition des flux direct, réfléchi et refus dont il est la somme des trois composantes:

$$\phi_{GB} = S_B + D_B + R_B \quad (\text{II, 14})$$

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

$$\varphi_{GB} = R \cdot \varphi_{GH} \quad (\text{II, 15})$$

R : Rapport du flux global.

$$D'où : \quad R = \frac{\varphi_{GB}}{\varphi_{GH}} = \left(1 - \frac{D_H}{\varphi_{GH}}\right) \cdot R_b + \frac{D_H}{\varphi_{GH}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \xi \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (\text{II, 16})$$

Avec :

R_b : Rapport du flux direct

On connaissant le flux global et les composantes du flux pour un plan horizontal on peut déterminer le flux global incliné reçu par un plan :

$$\varphi_G = R \cdot \varphi_{GH} \quad (\text{II, 17})$$

1.3. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

1.3.1. L'effet photovoltaïque [25]

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. À l'encontre de l'énergie solaire passive et de l'énergie solaire active, l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

1.3.2. Types des systèmes photovoltaïques [25]

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer en six groupes distincts. Les trois premiers groupes sont des systèmes autonomes, non reliés à un réseau électrique. Les trois autres types sont des systèmes PV reliés différemment au réseau électrique.

1.3.2.1. Système autonome sans batterie

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompe à eau : le réservoir d'eau sert de stockage).

1.3.2.2. Système autonome avec batterie

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

1.3.2.3. Système hybride PV/génératrice

Ce système utilise les avantages de l'énergie photovoltaïque et de la génératrice au diesel, au propane ou à l'essence. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Les systèmes hybrides PV/génératrices sont souvent utilisés pour les tours de communications ainsi que pour les refuges et les camps forestiers en régions éloignées. Ils peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles les éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques.

1.3.2.4. Système PV sur réseau diesel

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

1.3.2.5. Système PV sur réseau décentralisé

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande).

1.3.2.6. Système PV centralisé

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement.

1.3.3. Les éléments d'un système de captage photovoltaïque

1.3.3.a. Générateur Photovoltaïques

- **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.

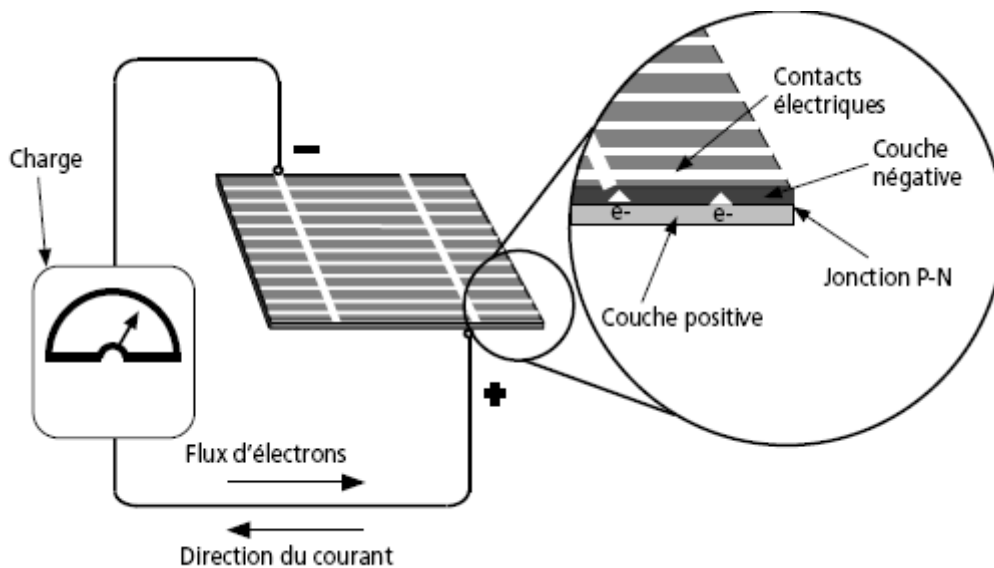


Figure II.6 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [25]

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 II.6). 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 [26].

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

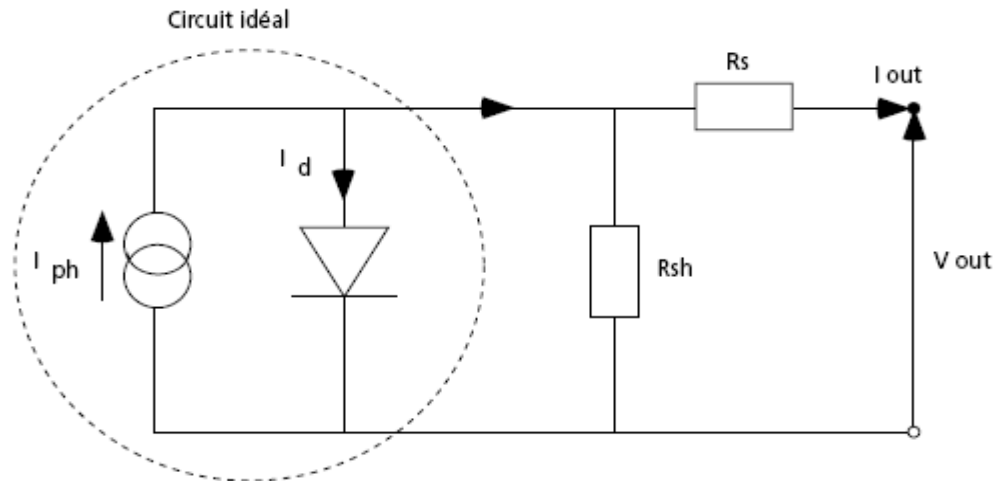


Figure II.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [25].

Pour la cellule idéale. L'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'une cellule est [27] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp(C_1 (V + R_s I)) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (\text{II, 18})$$

Avec :

$$C_1 = \frac{q}{A \cdot K \cdot T_c}$$

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

I_{ph} : Photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

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

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

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

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

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

T_c : Température de jonction (K).

Cette représentation schématique de la photopile est idéalisée. Une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_p). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V (voir figure II.8) de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles (voir annexe 3);
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

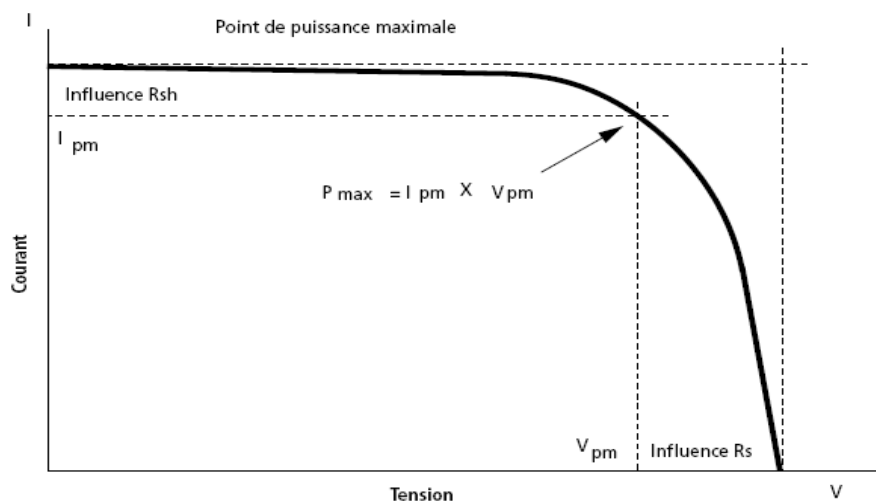


Figure II.8 : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [25]

Les études récentes se montrent que la résistance $R_p \gg \gg \gg R_s$, donc le terme $\frac{V + R_s I}{R_p}$ va négliger. L'équation (II, 18) devient [12] :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp(C_1 (V + R_s I) - 1)] \quad (\text{II, 19})$$

• **Influence de l'ensoleillement et de la température [28]**

Nous avons vu que le courant produit par la photopile (I_{ph}) est pratiquement proportionnel au flux lumineux (ϕ). Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour $T_c = 25^\circ\text{C}$). La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- la puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement;
- les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (voir figure II.9)

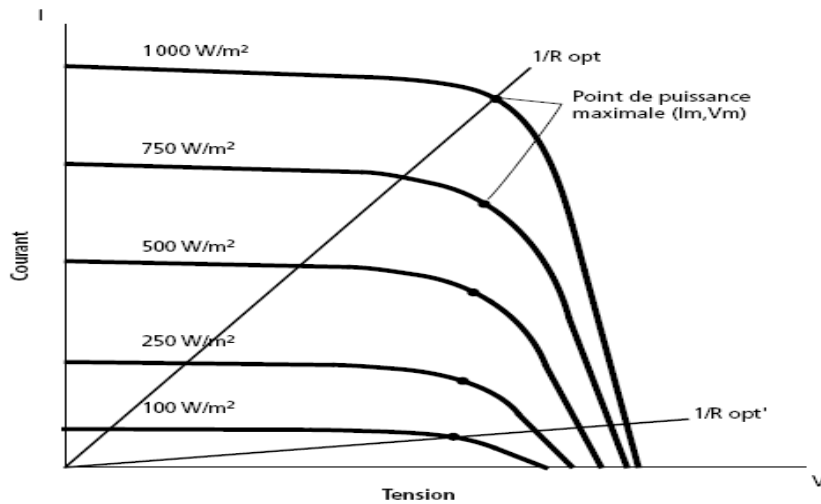


Figure II.9 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V [25]

L'influence de la température (voir annexe 3) est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur (voir figure (II.10)). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ $0,025 \text{ mA/cm}^2/\text{°C}$ alors que la tension décroît de $2,2 \text{ mV/°C/cellule}$. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0,4\%/°\text{C}$. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

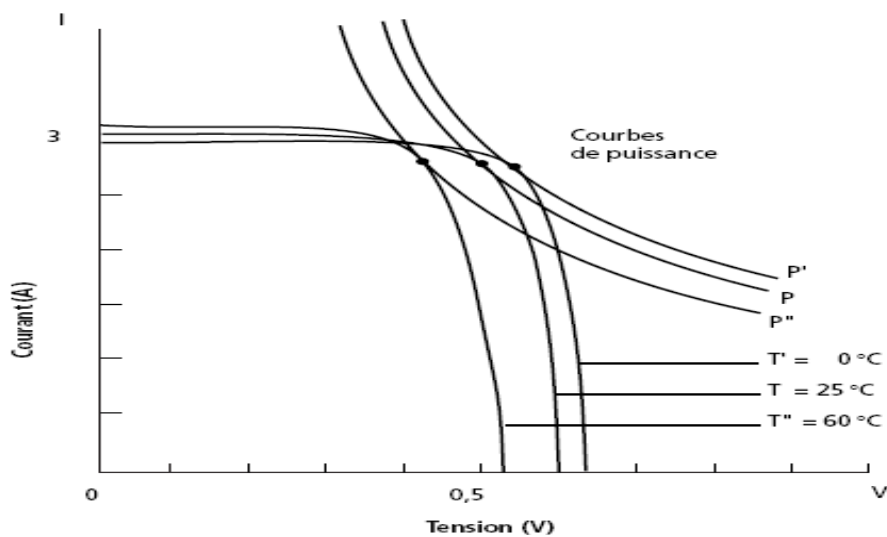


Figure II.10 : Influence de la température sur la courbe I-V [25]

- **Les modules solaires photovoltaïques**

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules (voir figure II.11) auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente. On protège les modules avec des diodes by-pass (Schottky) afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées [28].

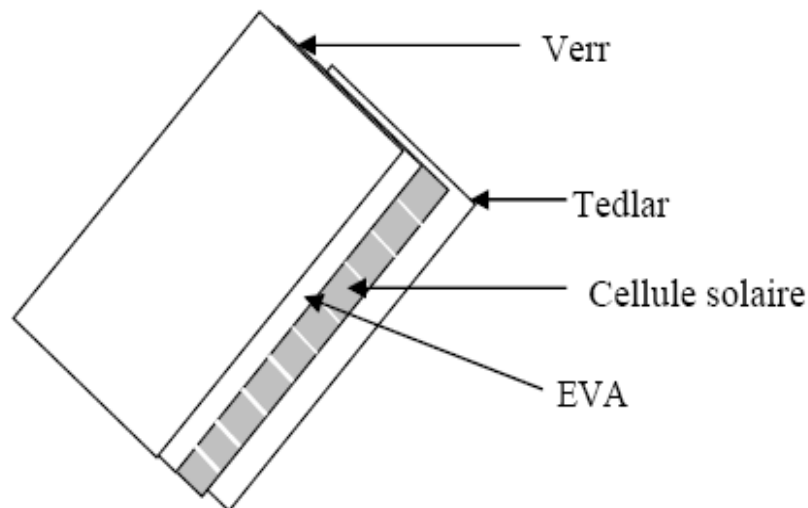


Figure II.11 : Module photovoltaïque [20]

Un bilan électrique permet de calculer l'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'un module PV [27].

$$I_{\text{module}} = I_{\text{ph}} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{N.A.K.T_j}(V + R_{\text{se}}I) - 1\right) \right] \quad (\text{II, 20})$$

$$R_{\text{se}} = N.R_s$$

- Caractéristiques d'un module:

1. *La puissance-crête (W_c)* [25] 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 [20].
3. *Tension à vide V_{co}* : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil "[20].
4. *Courant de court-circuit, I_{cc}* : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil "[20].
5. *Point de fonctionnement optimum, (V_m, I_m)* : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_m * I_m$ [20]
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 : $V_{co} * I_{cc}$ [20].

- **Le champ photovoltaïque**

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques (voir figure II.12) 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 [25].

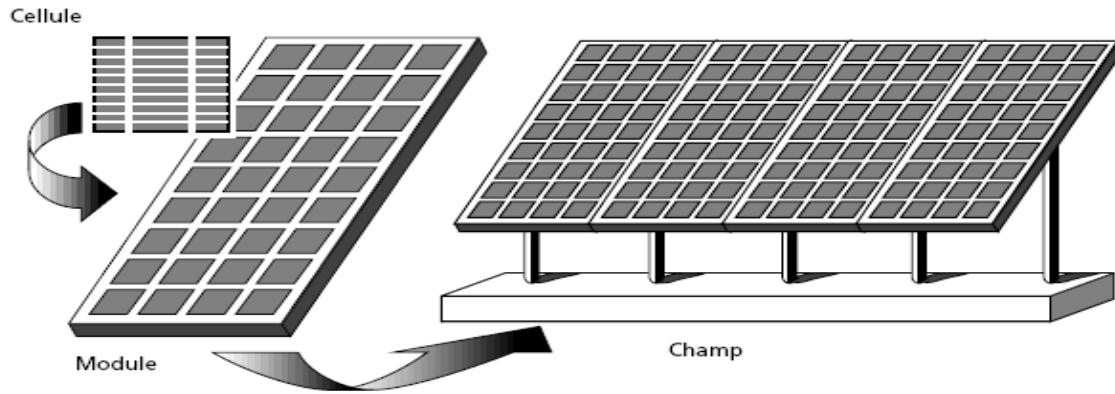


Figure II.12 : Composantes d'un champ de modules photovoltaïques [25]

Pour intégrer les modules au niveau système, le champ PV peut être associé à un organe MPPT (Maximum Power Point Tracking). Il permet d'ajuster, en chaque instant, la puissance électrique fournie par le champ à sa valeur maximale (dans les conditions d'ensoleillement et de température de l'instant considéré) en déplaçant le point de fonctionnement du module sur sa courbe caractéristique [15].

Le calcul de la géométrie optimale du champ photovoltaïque consiste à modifier les configurations des associations série des modules PV de façon à faire fonctionner la charge dans la zone de puissance maximale. Un calcul de la géométrie optimale du champ photovoltaïque doit effectuer à chaque changement du point de fonctionnement dû aux variations des conditions météorologiques. Pour atteindre les valeurs nominales requises pour un fonctionnement optimal, il faut brancher les modules PV selon la relative à un groupement mixte formé de la mise en série de N modules et M en parallèle (figure II.13) On obtient dans ce cas [26]:

$$I_g = M.I_{\text{module}} \quad V_g = N.V_{\text{module}}$$

La relation du courant lié à une tension [20] :

$$I = M.I_{ph} - M.I_0 \left[\exp(C_2(V.M + N.R_{se}I) - 1) \right] \quad (\text{II, 21})$$

$$C_2 = \frac{C_1}{M.N}$$

Alors :

$$V = \frac{1}{C_2} \left[1 + \ln \left(\frac{I - M.I_{ph}}{M.I_0} \right) \right] - R_{se}I$$

Cette relation est vraie si toutes les cellules solaires constituant le générateur sont identiques.

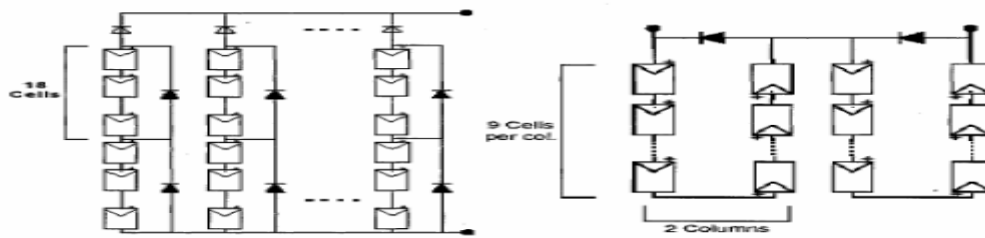


Figure II.13 : Configurations des associations série parallèle des modules PV [20]

1.3.3.b. Les batteries [25]

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet:

- la demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande;
- l'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques) ;

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité. Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes:

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge**. Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension**. Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

1.3.3. La régulation [25]

Différents systèmes électroniques sont utilisés pour protéger la batterie contre une charge trop élevée ou une décharge trop profonde.

- Une charge trop élevée entraînera une électrolyse de l'eau en hydrogène et oxygène, ce qui pourra éventuellement amener les plaques en contact avec l'air et provoquera un vieillissement prématuré de la batterie. La formation d'hydrogène représente également un risque certain d'explosion dans un local peu ventilé.
- Une décharge profonde répétée provoque une sulfatation irréversible des plaques et, par conséquent, une diminution de la capacité de la batterie. Cette sulfatation peut également provoquer des courts circuits entre les plaques et rendre l'accumulateur inopérant.

1.3.3.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 continu), 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].

- a) Le convertisseur DC/DC (hacheur élévateur ou abaisseur de tension, selon le niveau de tension cible) permet de relier le champ PV à un bus continu, auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun [15].
- b) L'onduleur (convertisseur DC/AC) sera utilisé lorsque le champ PV est raccordé au réseau électrique ou dans les systèmes incluant un bus alternatif [15].

1.3.3.e. La Charge [20]

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.

2. Electrolyse de l'eau

2.1. 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.

2.2. Principe général de l'électrolyse de l'eau [15]

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.

2.3. Qualité de l'eau d'alimentation [29]

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:

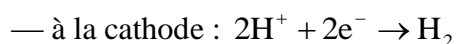
- formation de boues ;
- action des chlorures (les halogénures en général) qui détruisent la protection par nickelage ou le nickel massif des anodes ;

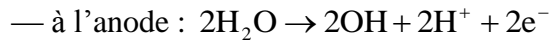
Après une première épuration, l'eau traverse un filtre à charbon actif, puis subit une déminéralisation totale par passage sur un filtre à couche mixte à échangeur d'ions. On souhaite obtenir une résistivité électrique supérieure à $2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ (soit $2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$).

2.4. Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau

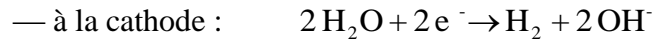
2.4.1. Thermodynamique

- a) En solution acide, on admet généralement que la décomposition de l'eau s'effectue suivant les réactions [33]:

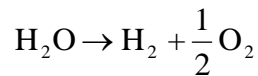




b) En solution alcaline, par contre, les ions OH^- prédominent et le phénomène est habituellement exprimé par :



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 sous la forme [34] :

$$E_{\text{rev}} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{II, 22})$$

avec

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

T (K) : température thermodynamique,

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

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

$P_{\text{H}_2} = P_{\text{O}_2} = P(\text{Pa})$: pression de service de l'électrolyseur,

$a_{\text{H}_2\text{O}}$: activité de la solution,

d'où [34]:
$$E_{\text{rev}} = E_0 + \frac{3RT}{4F} \ln P - \frac{RT}{2F} \ln a_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{II, 23})$$

Cette tension de décomposition réversible s'établit à $1,229 \text{ V}$ dans les conditions normales.

À température ambiante (20°C), on a [34]:

$$E_{\text{rev}} = 1,233 + 0,043 \text{ 5 lg } P \quad (\text{II, 24})$$

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 II.14) lorsque la pression augmente.

La **tension thermoneutre** correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur. Elle s'exprime par [34]:

$$E_{th} = \frac{\Delta H}{2F} = 1,48 \text{ V} \quad (\text{à } 298 \text{ K}) \quad (\text{II, 25})$$

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.

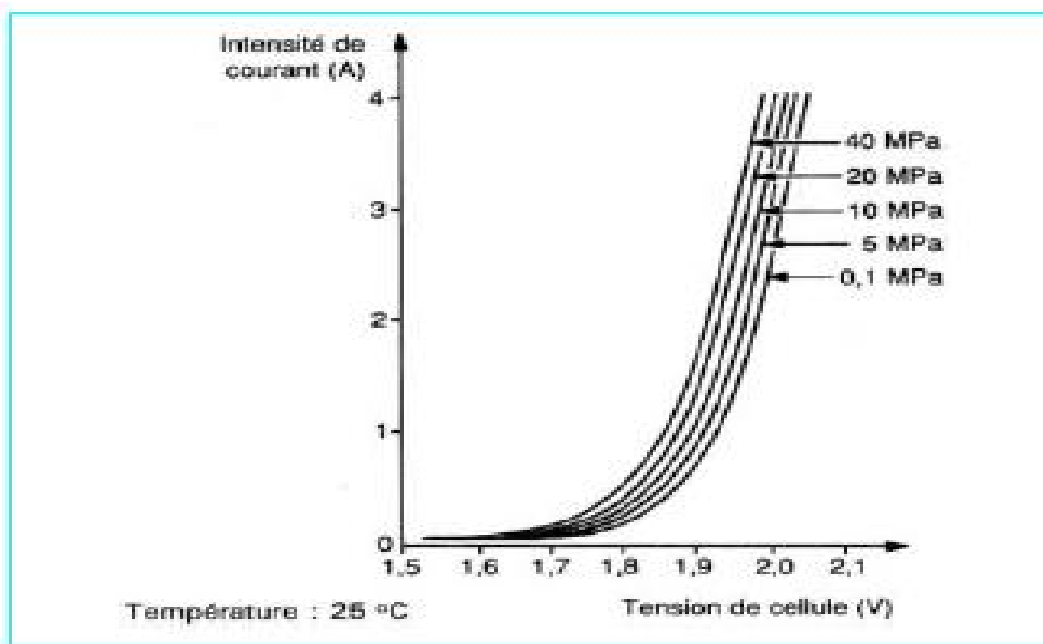


Figure II.14 : Influence de la pression sur les caractéristiques de fonctionnement de l'électrolyseur [29]

2.4.2. Cinétique [30]

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

$$E = E_{rev} + \eta_a + \eta_c + R_c J \quad (\text{II, 26})$$

avec

η_a (V) : surtension anodique,

$\eta_c(V)$: surtension cathodique,

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

$J(\text{A}/\text{cm}^2)$: densité de courant,

La figure II.15 présente un exemple de répartition de la tension en fonction de la densité de courant.

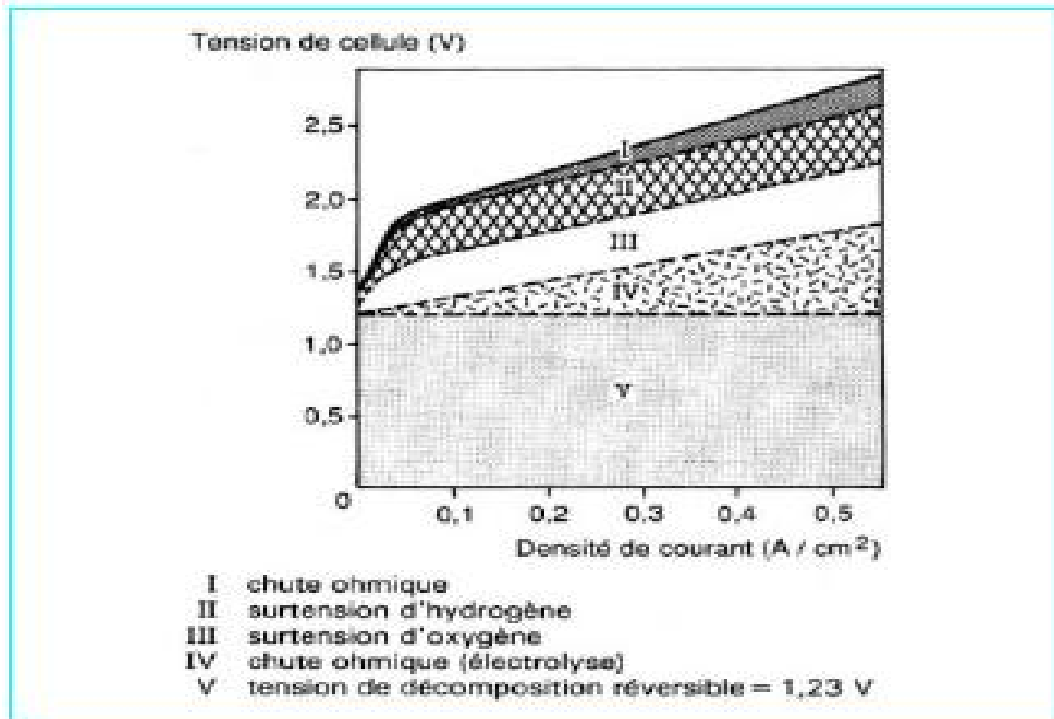


Figure II.15 : Exemple de décomposition d'une courbe caractéristique tension-densité de courant pour une cellule d'électrolyse de l'eau [29]

2.4.3. Effet de la température sur la tension d'électrolyse [15]

Des études expérimentales menées sur l'électrolyse montrent que l'ensemble des irréversibilités présentes dans une cellule d'électrolyse diminue lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente. La résistance ionique, qui est prépondérante, diminue alors, permettant de diminuer la tension pratique de l'électrolyseur et donc sa consommation énergétique.

En outre les réactions comme l'oxydation de l'eau en oxygène nécessitant d'être catalysées en raison de leur forte irréversibilité sont de même favorisées par un accroissement de la température.

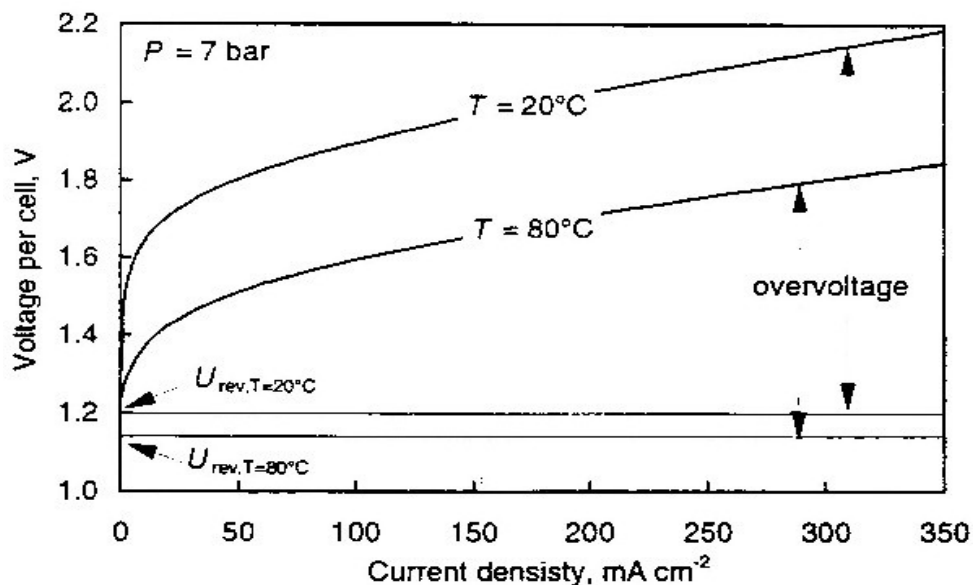


Figure II.16 : Influence de la température sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin [15].

L'augmentation de température est limitée par la tenue des matériaux de l'électrolyseur. Au-delà d'une certaine température, il est nécessaire d'opérer l'électrolyse sous pression afin de réduire les pertes d'eau par évaporation.

On peut observer sur cette figure la possibilité d'obtenir des rendements élevés, voire supérieurs à 100 % (à faible intensité) dans le cas où la chaleur serait apportée à la réaction de manière externe.

2.4.4. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse [15]

Bien que pour des raisons thermodynamiques, une augmentation de la pression tende à augmenter la tension de l'électrolyseur et donc à diminuer son rendement énergétique (voir figure II.17), en pratique, l'influence de la pression sur la tension de cellule à densité de courant et température constantes dépend de la technologie de l'électrolyseur. Pour la technologie dite « zero gap » (plaques bipolaires), on n'observe aucune influence de la pression et ce, dans une large gamme.

Cette constatation pousse les industriels à développer des électrolyseurs à plaques bipolaires dont la pression de fonctionnement est supérieure à 30 bar. Ils peuvent ainsi s'affranchir d'un étage de compression, très énergivore, pour conditionner les gaz produits à 200 bar.

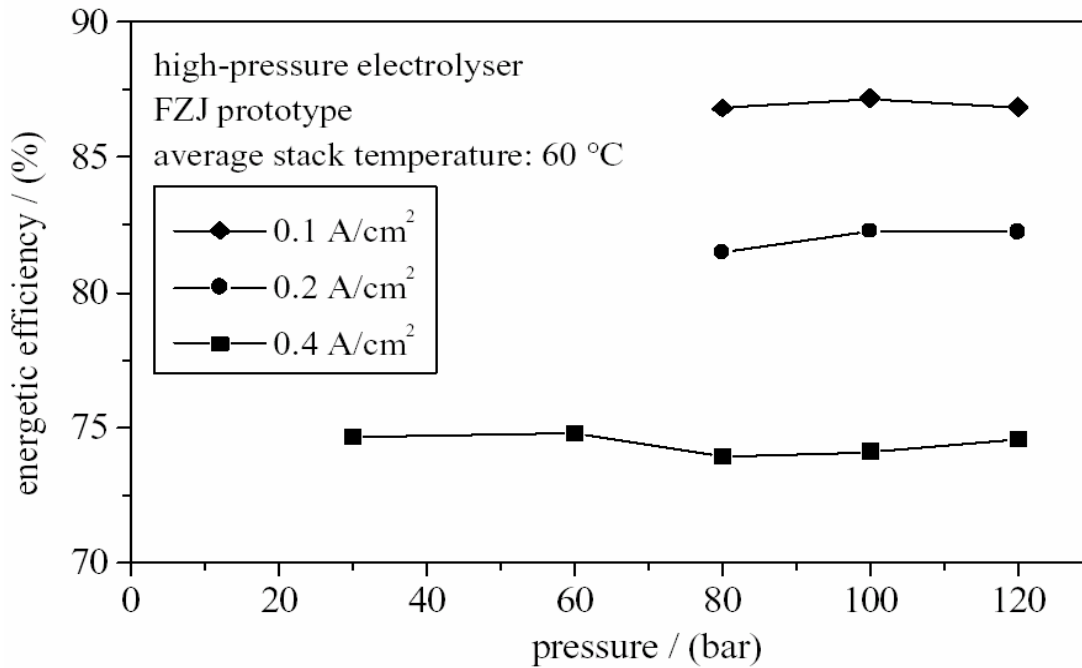


Figure II.17 : Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin à technologie 'zero gap' [15].

En revanche, pour les électrolyseurs à diaphragme, à haute pression, la taille des bulles de gaz produites fait chuter la résistance de l'électrolyte et donc la tension d'électrolyse.

2.4.5. Effet de la pression sur la pureté des gaz produits [15]

La pureté des gaz (principalement l'oxygène) dépend à la fois de l'intensité et de la pression. La figure II.18 nous montre que la concentration de l'hydrogène dans l'oxygène augmente avec la pression. A faible intensité et à pression constante, le débit d'hydrogène produit est faible. Du fait de la petite taille des molécules d'H₂, ce gaz diffuse à travers la membrane pour se rendre du côté anodique où est produit l'oxygène. Ce phénomène est constant quelle que soit l'intensité. L'oxygène produit est donc moins pur lorsque l'intensité est faible. Cette diffusion peut entraîner un risque d'explosion (si la concentration d'hydrogène dans l'oxygène atteint la valeur critique de 4% en volume). C'est pourquoi on équipe habituellement les électrolyseurs de capteurs pour mesurer la concentration d'hydrogène dans l'oxygène produit. Enfin, on limite généralement le fonctionnement de l'électrolyseur à une intensité minimale et donc à une puissance minimale pour éviter la production d'un mélange explosif. Ce régime minimal augmente lui aussi avec la pression.

Bien que l'augmentation de la pression de fonctionnement de l'électrolyseur soit favorable d'un point de vue énergétique (on peut s'affranchir d'une unité de compression pour le stockage des gaz produits, réduisant ainsi la consommation électrique du système), elle pénalise la qualité des gaz produits, à faible régime

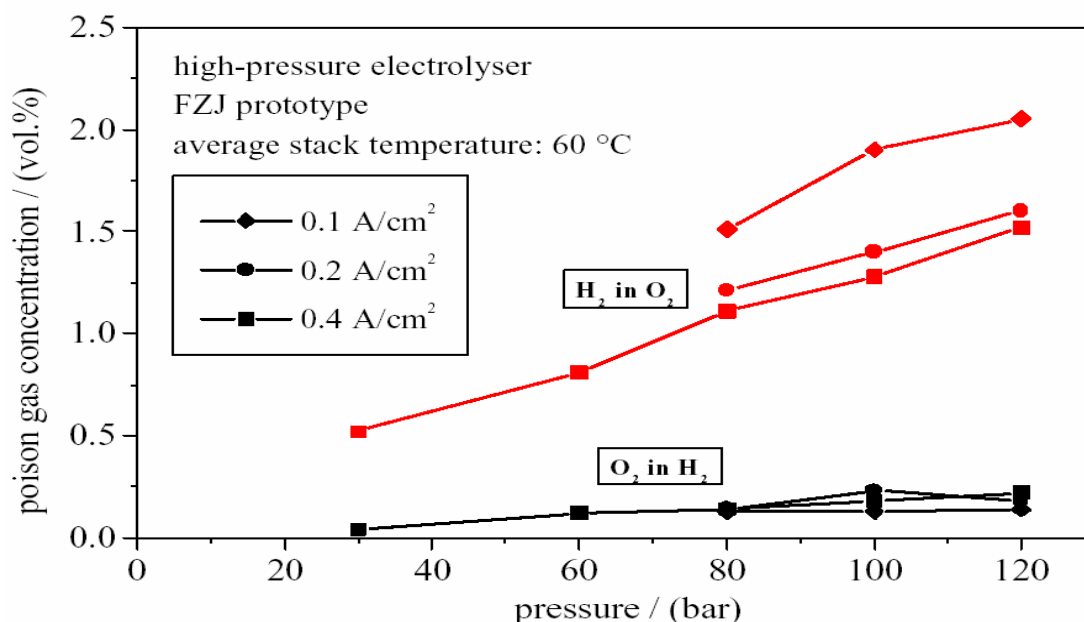


Figure II.18 : Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produits par électrolyse alcaline [15]

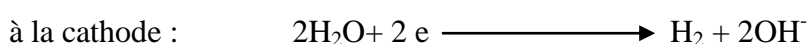
2.5. Les différentes technologies d'électrolyseurs

2.5.a. Electrolyseurs alcalins

2.5.a.1. Principe [31]

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⁺). Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous



La figure ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline.

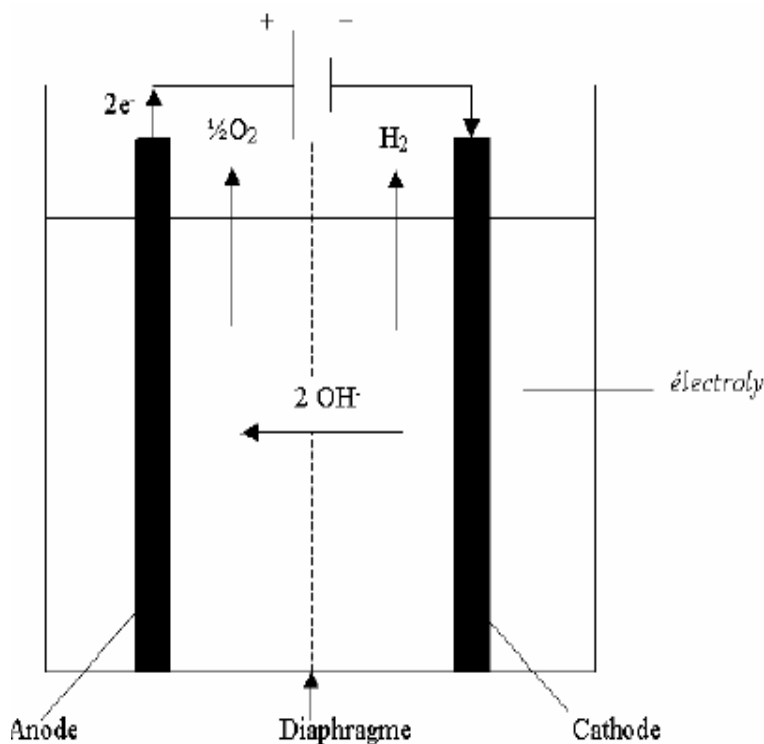


Figure II.19 : Principe de l'électrolyse alcaline [15].

2.5.a.2. Matières premières [33]

L'électrolyse est réalisée généralement à partir d'une **solution aqueuse d'hydroxyde de potassium** dont la concentration variable en fonction de la température de fonctionnement est:

- de 25 % en masse pour une température de 80 à 90 °C;
- de 30 à 35 % à 120 °C;
- de 40 % à 160 °C ;

Ces concentrations correspondent à la conductivité électrique maximale de la solution à la température considérée. Le choix se porte de préférence sur des solutions de potasse au lieu de solutions de soude, car:

- pour une température donnée, leur conductivité est supérieure à celle des solutions de soude;
- elles ont en général une teneur plus faible en impureté chlorure liée à la fabrication de l'hydroxyde;
- leur pression de vapeur saturante est inférieure pour une même température, ce qui permet de réduire le débit d'eau de réfrigération destinée à condenser la vapeur entraînée par l'hydrogène ;

2.5.a.3. Qualité de l'hydroxyde de potassium [35]

Les concentrations en chlorure et en sulfate doivent être inférieures à 0,01 % en masse. Il est parfois ajouté directement du silicate de sodium ou de potassium en concentration correspondant à l'équilibre de la dissolution de l'amiante à la température considérée. Il est souhaitable d'éviter les renouvellements trop fréquents de la solution d'hydroxyde.

2.5.a.4. Les matériaux [32]

L'anode est généralement en nickel ou en acier doux. Un dépôt surfacique catalytique est utilisé pour réduire les surtensions cathodiques. Il est constitué d'alliages de Nickel (Nickel- Soufre, Nickel de Raney, Nickel-Zinc) ou d'oxydes métalliques (alliages de Fer, Cobalt et Tungstène). En 2002, de nombreuses recherches ont encore lieu pour développer de nouveaux alliages de Nickel. Les alliages associés aux métaux de transition tels que : Al, Zn, Fe, Co, Cr et Mo sont présentés comme les plus prometteurs.

La cathode est en acier nickelé ou en nickel massif. Le dépôt catalytique est un alliage Ni-Co avec une structure spinelle.

Le diaphragme apparaît comme un élément clé des électrolyseurs alcalins au même titre que les électrodes. Jusqu'au milieu des années 90, le matériau le plus utilisé pour constituer le diaphragme est l'amiante. Les problèmes de santé relatifs à l'amiante ont conduit au développement de matériaux de substitution. La Zircone était proposée mais non compatible avec une utilisation industrielle en raison de son coût élevé. Aujourd'hui, le matériau de base des diaphragmes semble être le nickel, sous formes d'oxydes.

On peut également noter l'emploi de membranes alcalines telles que IMET® (Inorganic Membrane Electrolysis Technology) proposées par "Hydrogen Systems". La pression d'utilisation de tels systèmes est de 4 à 30 bar pour une consommation spécifique de 4,2 kWh/Nm³. Les débits d'hydrogène sont dans la gamme 1 à 60 Nm³/h.

2.5.a.5. Caractéristiques de fonctionnement [15]

Actuellement, les électrolyseurs à technologie alcaline commercialement disponibles ont des températures de fonctionnement comprises entre 80 et 90 °C. Pour des températures de fonctionnement supérieures, on parle d'électrolyse alcaline dite avancée. Dans les années 90, la technologie alcaline dite avancée avait une température de fonctionnement d'au plus 180°C. Au-delà, la tenue mécanique et chimique des matériaux

n'est pas suffisante. Il faut également noter que de tels niveaux de températures en technologie alcaline avancée nécessitent un fonctionnement sous pression. Cette technologie n'a véritablement pas pu être développée commercialement notamment à cause de la mauvaise tenue des matériaux à ce niveau de température.

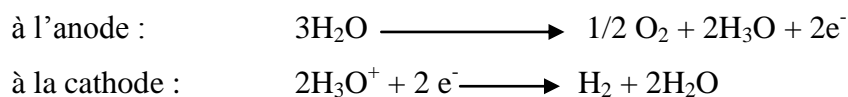
La pression de fonctionnement de la plupart des électrolyseurs industriels à technologie alcaline s'échelonne de 1 jusqu'à environ 30 bar (absolus). Une unité de compression est ainsi nécessaire en sortie d'électrolyseur si l'on veut stocker l'hydrogène produit à plus haute pression. Un fonctionnement à une pression plus élevée permettrait de s'affranchir de cet organe de compression. Des recherches sont actuellement en cours pour optimiser la filière de production d'hydrogène électrolytique (optimisation des électrolyseurs notamment en technologie alcaline; adaptation des auxiliaires à la technologie ; stockage à haute pression de l'hydrogène produit ; stockage de l'oxygène produit). Le développement d'électrolyseurs à technologie alcaline fonctionnant sous pression (30 bar) est actuellement mené par MTU Friedrichshafe GmbH (un fabricant de moteurs commerciaux). Cette étude devra conduire d'ici septembre 2006 à un prototype d'une puissance de l'ordre du MW et avec un objectif de prix inférieur à 500 €/kW installé.

Finalement, les électrolyseurs à technologie alcaline présentent une gamme de puissance allant du kW au MW. Les températures de fonctionnement sont généralement incluses dans l'intervalle 80- 90°C pour des pressions inférieures à 30 bar. Les rendements énergétiques de tels électrolyseurs sont de l'ordre de 75 à 90 %, pour une durée de vie supérieure à 80 000 heures de fonctionnement, pouvant même aller jusqu'à 160 000 heures (soit environ 18 ans).

2.5.b. Electrolyseurs PEM

2.5.b.1. Principe [31]

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



Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure II.20. Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM.

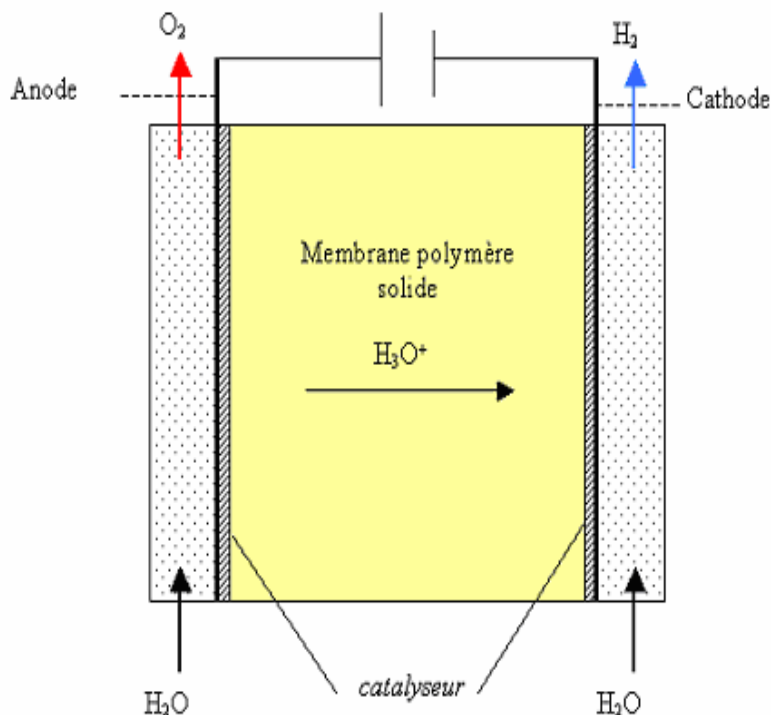


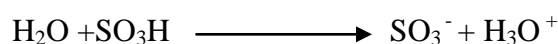
Figure II.20 : Principe schématique de l'électrolyse PEM [15].

2.5.b.2. Les matériaux [15]

L'anode est constituée d'un composite graphite-PTFE collé à un treillis métallique en laiton, le collecteur de courant étant composé pour sa part de titane. Le catalyseur est constitué d'oxydes de métaux nobles à base de ruthénium (Ru) et d'iridium (Ir).

La cathode est constituée de graphite poreux avec un dépôt catalytique de platine ou d'oxyde métallique. Mais le coût du platine étant élevé, les recherches actuelles visent à remplacer ce catalyseur.

L'électrolyte de l'électrolyseur PEM joue à la fois le rôle de conducteur protonique et de diaphragme. Il est constitué d'une membrane composée de fluoropolymère solide comprenant des groupements acides sulfoniques (SO₃H). Ces groupes se transforment aisément en leur base conjuguée, selon la réaction suivante, sous l'action d'un champ électrique :



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

Actuellement, la membrane la plus utilisée est la membrane dite *nafion* (échangeur d'ions) commercialisée par Dupont de Nemours (société de science). De nombreuses recherches sont en cours afin de trouver un matériau de substitution au *nafion* en raison de son prix élevé.

2.5.b.3. Caractéristiques de fonctionnement [15]

Les températures pratiques de fonctionnement varient entre 80 et 120°C pour des pressions comprises entre 0,1 et 0,7 MPa (surfaces d'électrodes jusqu'à 2500 cm²). La figure II.21 montre que des rendements de plus de 90% peuvent être atteints pour un électrolyseur PEM en développement dans le cadre du programme WE-NET (World Energy – NETwork). Les objectifs de développement de ce programme sont d'atteindre les conditions opératoires suivantes :

- Température = 80°C
- Pression = 0,7 MPa
- Surface d'électrode = 2500 cm²
- Rendement $\geq 90\%$ (par rapport au PCI de l' H_2)
- Densité de courant: 1A/cm²

Travailler à une pression suffisante (> 1 MPa) permettrait de s'affranchir d'au moins un étage (voire de l'unité entière) de compression en sortie d'électrolyseur, ce qui conduirait à diminuer considérablement les coûts des systèmes PEM.

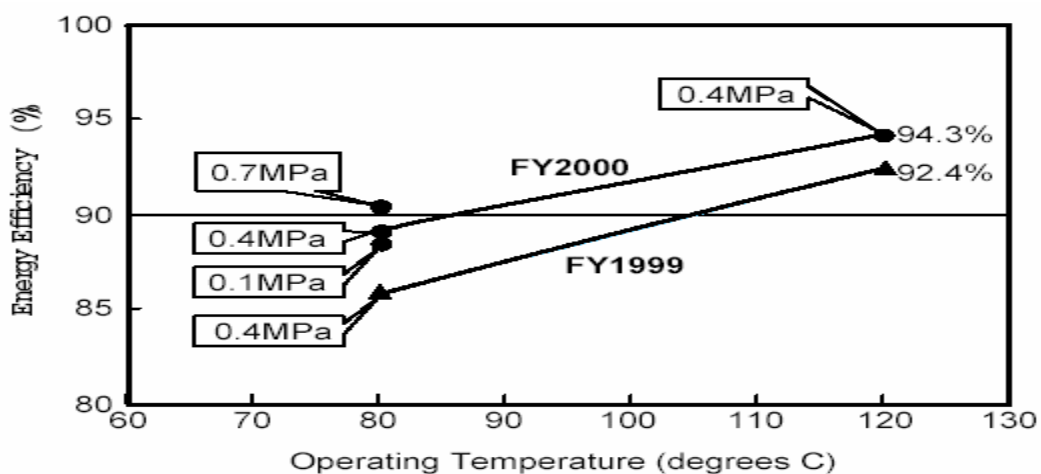


Figure II.21 : Evolution du rendement en fonction de la température d'un électrolyseur PEM [15]

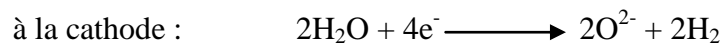
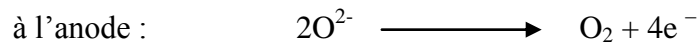
Les électrolyseurs PEM commercialisés par Proton Energy Systems présentent des densités de courant de 1,2 A/cm² avec une surface de 929 cm². Les surfaces commercialisées sont de 28, 93 et 929 cm². Des tests de durée de vie de 60 000 heures avec un bon comportement des électrolyseurs PEM sont annoncés.

2.5.c. Electrolyseurs à haute température

2.5.c.1. Principe [30]

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 O²⁻ (voir figure II.22). 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:**

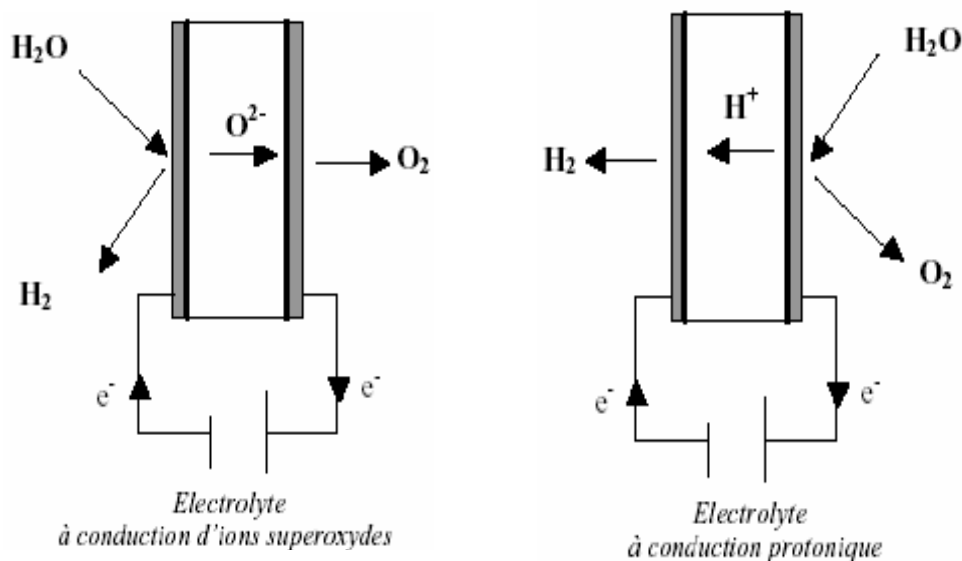
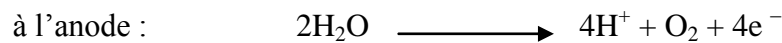


Figure II.22 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte [15].

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.

2.5.c.2. Les matériaux [30]

L'anode est constituée soit de manganites soit de chromites de lanthane, avec comme catalyseur du nickel de Cermet (Ni+ZrO₂).

La cathode est constituée de billes de nickel cofritté ou de cobalt voire de nickel de Cermet. L'emploi de cobalt est limité en raison de sa trop grande réactivité. Des oxydes mixtes de structures perovskites La_{1-x}Sr_xMO_{3-δ} (M: Mn, Co) sont également utilisés. Les catalyseurs employés à la cathode sont à base d'oxyde de cérium.

Il existe deux types d'électrolyte, les électrolytes à conduction d'ions superoxydes et ceux à conduction protonique. Dans le cas de l'électrolyte à conduction d'ions superoxydes, on utilise une céramique en zircone. Concernant l'électrolyte à conduction protonique, on utilise les oxydes de cérium et de zircone.

L'emploi de matériaux céramiques pour l'électrolyte présente certains avantages tels que l'absence de corrosion mais la fragilité des matériaux céramiques limite la taille des cellules d'électrolyse envisageables.

2.5.c.3. Caractéristiques de fonctionnement [15]

L'électrolyse à haute température s'effectue dans une gamme de températures qui varient entre 700 et 1000 °C. La tension d'une cellule varie entre 0,8 et 0,9 V à courant nul, au lieu d'environ 1,25 V (à 70 °C) pour l'électrolyse alcaline.

Au niveau du cœur de l'électrolyseur, l'énergie nécessaire à la production d'1 Nm³ d'hydrogène est comprise entre 3 et 3,5 kWh ; le rendement énergétique est compris entre 80 et 90 %.

2.6. Comparaison des différentes technologies d'électrolyse de l'eau [31]

Depuis 1998, une étude bibliographique est menée sur l'électrolyse de l'eau en technologie alcaline dans le cadre du programme WE-NET (World Energy – NETwork). Cette étude a pour but de comparer cette technologie par rapport à l'électrolyse PEM de l'eau. La figure II.23 permet ainsi d'esquisser une première comparaison.

On constate que la technologie alcaline à haute température et haute pression (dite technologie avancée) possède actuellement les meilleurs rendements pour des densités de courant inférieures à 1 A/cm².

Quand les objectifs du programme WE-NET concernant l'électrolyseur PEM (rendement de 90% pour une densité de courant de 1 A/cm²) seront atteints, cette technologie sera alors beaucoup plus intéressante que celle citée précédemment, les conditions de température et de pression étant beaucoup moins pénalisantes d'un point de vue énergétique. En outre l'absence de liquides corrosifs (KOH pour l'électrolyse alcaline) favorisera son utilisation.

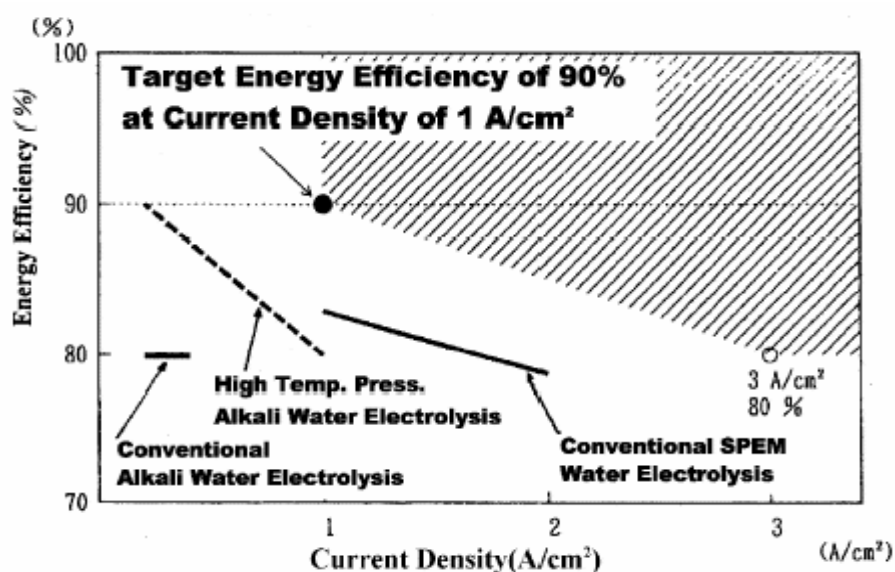


Figure II.23 : Rendements des différentes technologies électrolyseurs [31].

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

Chapitre III: Installation du système

1. Introduction

Le site géographique, le matériel utilisé, les expériences réalisées et les méthodes de mesure, sont des paramètres importants dans la discussion des résultats; leurs effets permettent de choisir les meilleures conditions pour aboutir aux meilleures productions d'hydrogène. Dans ce chapitre, on va présenter les éléments utilisés dans notre système d'étude, ainsi que les paramètres mesurés et calculés.

2. But du travail

L'objectif de ce travail est de développer une installation de production de l'hydrogène solaire, en raison de ses avantages par rapport aux autres combustibles, ainsi les meilleures conditions d'éclairage et d'électrolyse réalisées dans cette installation. Le présent travail fait au niveau de laboratoire de valorisation et promotion des ressources sahariennes (VPRS) à l'université Kasdi Merbah Ouargla.

3. Présentation du site

La Wilaya d'Ouargla est située au sud-est de l'Algérie (voir figure III.1), couvrant une superficie de 163230 Km². Elle demeure une des collectivités administratives les plus étendues du pays. Elle a une population totale estimée à 579608 habitants en 2004 [36].

Elle est limitée:

- au Nord par les wilayas de Djelfa, El Oued et Biskra;
- à l'Est par la Tunisie;
- à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa;
- au Sud par les wilayas de Tamanrasset et Illizi ;

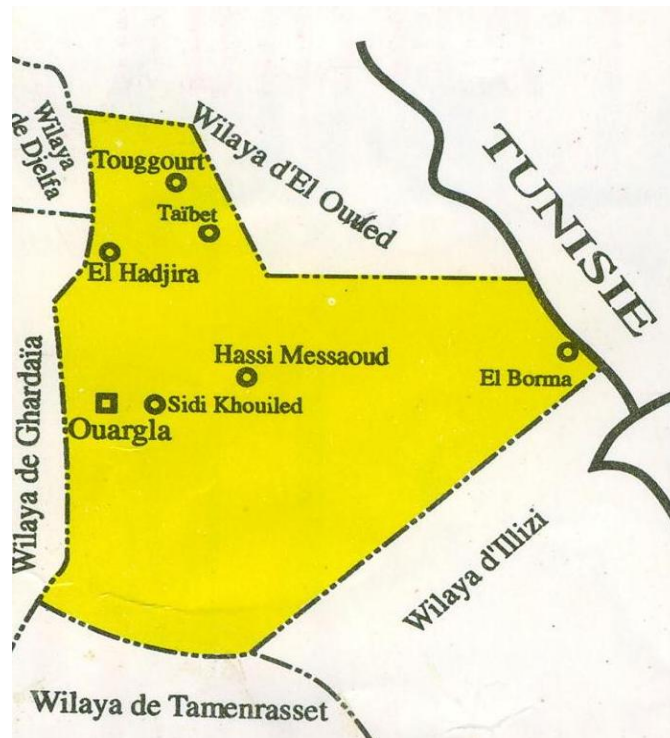
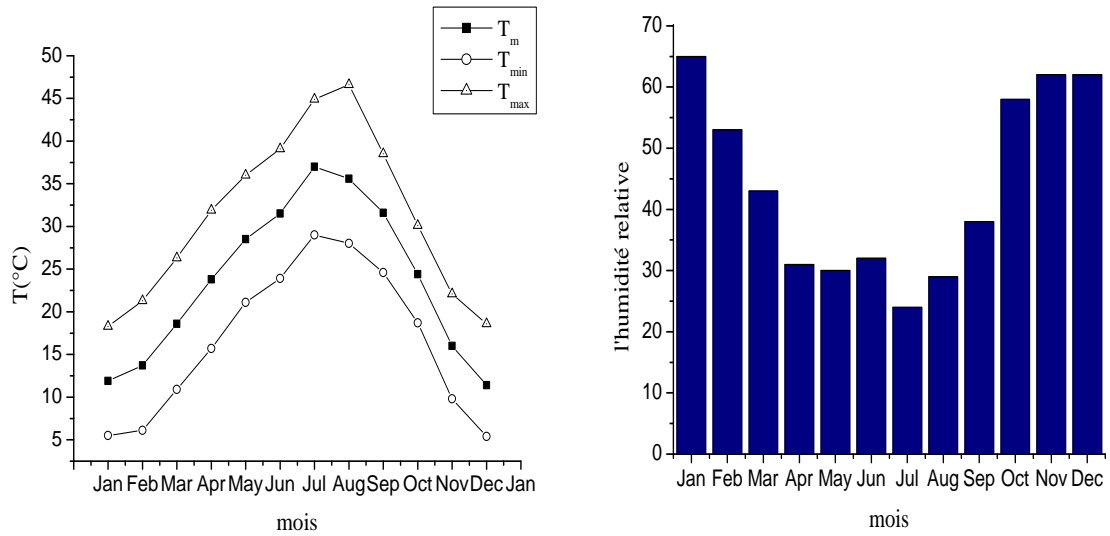


Figure III.1 : Situation de la Wilaya d’Ouargla [36]

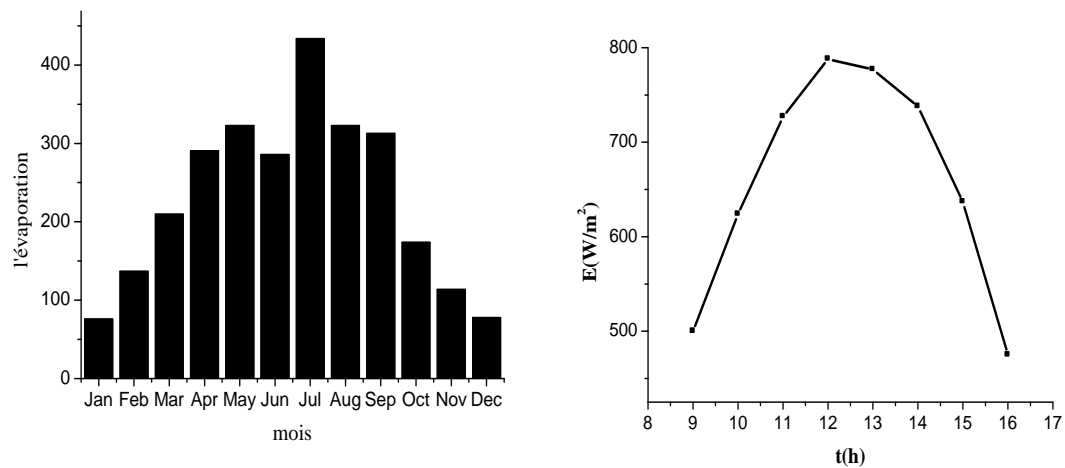
La ville de Ouargla se trouve à une altitude de 128 mètres et 32, 5° Est de la latitude. Elle est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduite, des températures élevées en période estivale (voir figure III.2), une forte évaporation et par une faible vie biologique de l'écosystème.

- L'insolation solaire moyenne est estimée en tant que 2900 kWh/m² annuellement, la ville de Ouargla change de 2,280 kWh/m² en décembre, à 7,620 kWh/m² en juillet, sur une surface horizontale. Le rayonnement diffus est évalué à 1,324 kWh/m² en janvier, et 1,984 kWh/m² en juillet.
- Les températures mensuelles enregistrées au mois le plus chaud (juillet) sont de 37° C à 50° C. Alors que celles du mois le plus froid (janvier) sont de 9,7 °C à 10,8° C.
- Les précipitations sont rares, irrégulières et varient entre 1 mm et 180 mm par année. Les précipitations moyennes annuelles sont de 48.8 mm/an à 77 mm/an.
- Le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année.
- L'humidité relative enregistre des taux tournant de 24 à 65 %; alors que l'évaporation est très importante (434 mm).



a-Température

b-Humidité



c-Evaporation

d-Eclairement solaire

Figure III.2 : Données climatiques de la région de Ouargla [36]

4. Éléments du système

Notre système (voir figure III.3) étudié est composé de deux éléments principaux :

- Générateur Photovoltaïque : les panneaux solaires.
- La charge : l'électrolyseur d'eau.

Et un élément de conditionnement qui est composé en général d'un régulateur et un convertisseur, dans notre travail on utilise uniquement le régulateur.

Et pour le suivi des expériences, on utilise quelques appareils de mesures tels que le pyranomètre, le voltmètre, l'ampèremètre, le multimètre et le thermomètre.

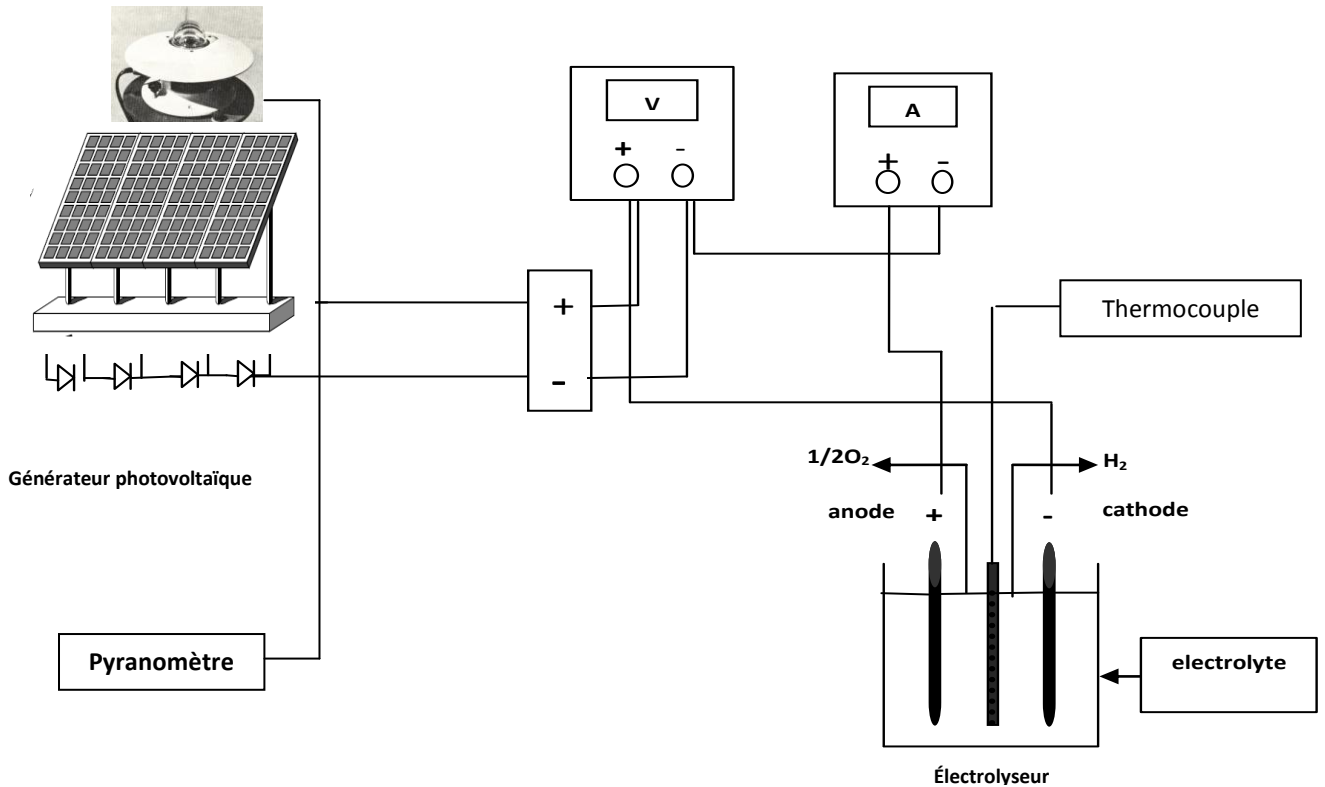


Figure III.3 : Montage de l'expérience

4.1. 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 qui peuvent être reliés en série et/ou en parallèle selon la puissance requise. Le générateur photovoltaïque doit être exposé au soleil autant que possible de façon à recueillir le maximum d'ensoleillement sur l'année.

Le module solaire photovoltaïque (figure III.4) est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement. Il sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment dans les centrales solaires photovoltaïques. Nos modules sont disposés sur la

terrasse du laboratoire VPRS à l'université de Ouargla, qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison fixé à 31° vers le sud, comme angle optimale de cette région. [24]



Figure III.4 : Module solaire photovoltaïque SM50

Les modules solaires utilisés dans notre système sont de type SM50, à technologie poly-cristalline et qui possèdent les caractéristiques présentées au tableau III.1.

Tableau III.1 : Caractéristiques des modules solaires [38]

Paramètres électriques		Module solaire
Puissance crête P_c	[W]	50
Tension minimale	[V]	12
Courant crête	[A]	2.87
Tension crête	[V]	17.39
Courant de court circuit I_{CC}	[A]	3.15
Tension de circuit ouvert V_{OC}	[V]	21.35
NOCT	[°C]	45.3
Coefficient de température à I_{CC}	[A/°C]	1.48
Coefficient de température à V_{OC}	[V/°C]	-2.3
Longueur	[mm]	1075
Largeur	[mm]	418
Nombres de cellules		36

4.2. Système de conditionnement photovoltaïque

Un système de conditionnement de puissance relie l'installation photovoltaïque et la charge est installée en vue de manipuler ces différents paramètres. La figure III.5 présente les différents éléments du système de conditionnement et qui comporte un régulateur, des interrupteurs liés aux panneaux solaires et un onduleur DC/AC.



Figure III.5 : Système de conditionnement photovoltaïque

Le régulateur (voir figure III.6) est l'appareil de contrôle dans ce système de conditionnement ; il est considéré comme un élément central dans le système photovoltaïque. Il contrôle les flux d'énergie. Il doit également assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, alarmes, fusibles, inversions de polarité). Il peut être aussi utilisé pour commander la recharge par d'autres sources d'énergie (génératrices d'appoint, éolienne, etc.).

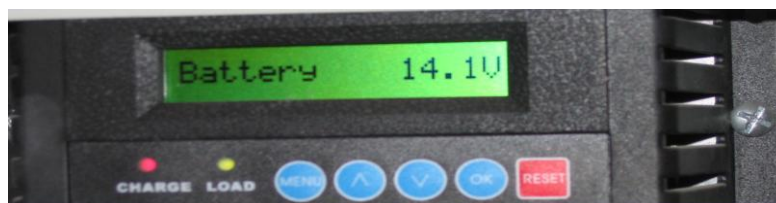


Figure III.6 : Le régulateur utilisé

4.3. Electrolyseur

La charge utilisée dans le système photovoltaïque est présentée par un électrolyseur de type alcalin (voir figure III.6).

L'électrolyse est la décomposition de la molécule d'eau par le passage d'un courant électrique, d'un corps ionisé (en général dissous dans l'eau) dénommé électrolyte (dans notre travail est l'hydroxyde de potassium KOH). Les particules chargées sont attirées vers l'électrode de signe contraire à leur charge, les anions vers l'anode et les cations vers la cathode.

Quelle que soit la dimension de la cellule d'électrolyse, le principe de fonctionnement reste le même :

- Une cathode unipolaire constituant le bac en graphite de la cellule pour la génération de l'hydrogène.
- Une anode, électrode positive aussi en graphite, pour la génération de l'oxygène.

La cellule est raccordée au courant produit par le panneau photovoltaïque. L'hydrogène généré et stocké dans le tube gradué jusqu'à ce qu'il soit rempli. Pour un bon fonctionnement de l'électrolyseur, les cellules nécessitent un appoint en eau déminéralisée à chaque essai.

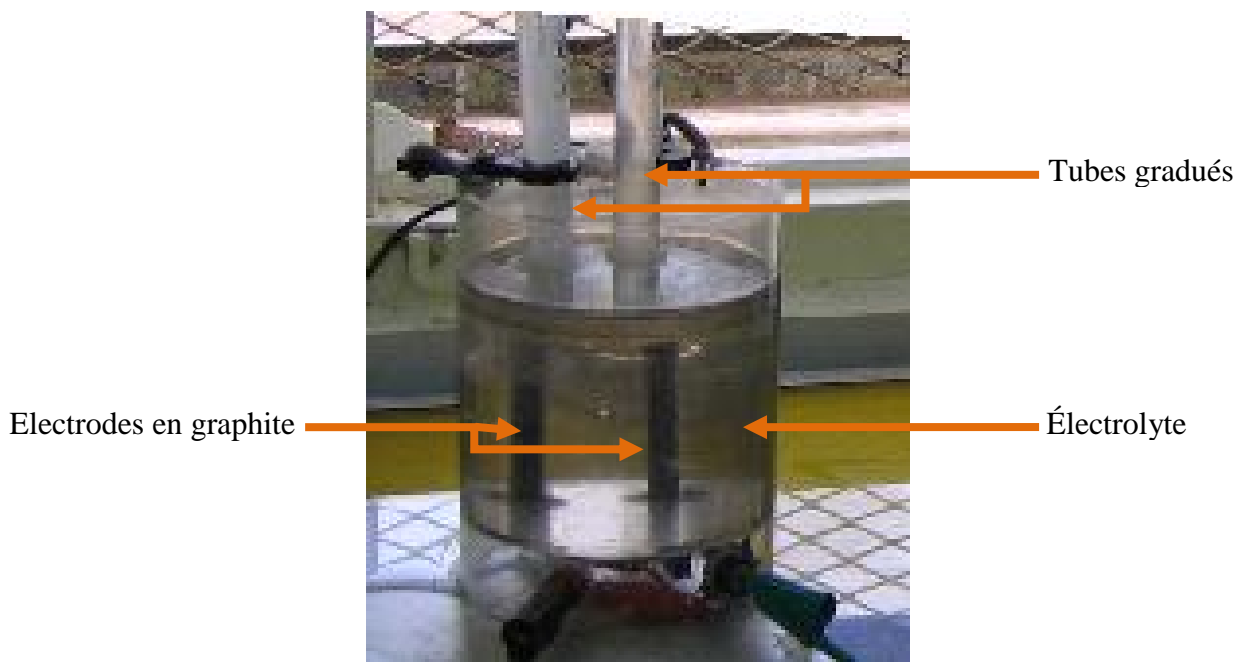


Figure III.7 : L'électrolyseur utilisé

4.4. Les appareils de mesures

4.4.1. Pyranomètre

Le pyranomètre (figure III.8) est un type d'actinomètre à large bande servant à mesurer l'irradiation solaire sur une surface plane, c'est un capteur qui est conçu pour mesurer la densité du flux de rayonnement solaire (en watts par mètre carré) à partir d'un champ de vision de 180 degrés.



Figure III.8 : Pyranomètre

4.4.2. Voltmètre et Ampèremètre

4.4.2.1. Voltmètre

Le voltmètre (figure III.9) est un instrument utilisé pour mesurer la différence de potentiel électrique entre deux points dans un circuit électrique, grandeur dont l'unité de mesure est le volt (V). Les voltmètres analogiques sont utilisés comme indicateurs rapides de l'ordre de grandeur ou de la variation de la tension mesurée.



Figure III.9 : Le voltmètre utilisé

4.4.2.2. Ampèremètre

L'ampèremètre (figure III.10) est un instrument de mesure utilisé pour mesurer le courant électrique dans un circuit. Les courants électriques sont mesurés en ampères (A), d'où le nom. De plus petites valeurs de courant peuvent être mesurées en utilisant un milliampèremètre ou un microampèremètre. Pour mesurer l'intensité du courant traversant un dipôle (dans notre cas c'est l'électrolyseur), on branche l'ampèremètre en série avec ce dipôle. Son sens de branchement doit être respecté: le sens positif du courant impose l'entrée de ce courant par la borne positive de l'ampèremètre.



Figure III.10 : L'ampèremètre utilisé

4.4.3. Multimètre

Le multimètre (figure III.11) est un appareil de mesure qui possède plusieurs fonctions. Il peut être utilisé comme :

- **Ampèremètre** : pour mesurer l'intensité du courant électrique (en Ampères : A).
- **Voltmètre** : pour mesurer la tension entre deux points du circuit (en Volts : V).
- **Ohmmètre** : pour mesurer la résistance (en Ohms : Ω).
- **Capacimètre** : pour mesurer la capacité des condensateurs (en Farad : F).
- **Fréquence** : pour mesurer la fréquence du signal électrique (en Hertz : Hz).
- **Thermomètre** : pour mesurer la température à l'aide d'une sonde à thermocouple (en $^{\circ}\text{C}$).

De plus, le multimètre possède des entrées pour :

- vérifier la **continuité** du courant.
- tester une **diode**.
- tester un **transistor**.



Figure III.11: Le multimètre utilisé

4.4.4. Thermocouple

Un thermocouple (figure III.12) est une jonction entre deux métaux différents qui produit une tension liée à une différence de température . Les thermocouples sont utilisés largement comme capteurs pour la mesure et le contrôle de température, ils peuvent également être utilisés pour convertir la chaleur en énergie électrique. Ils sont équipés des connecteurs standards.

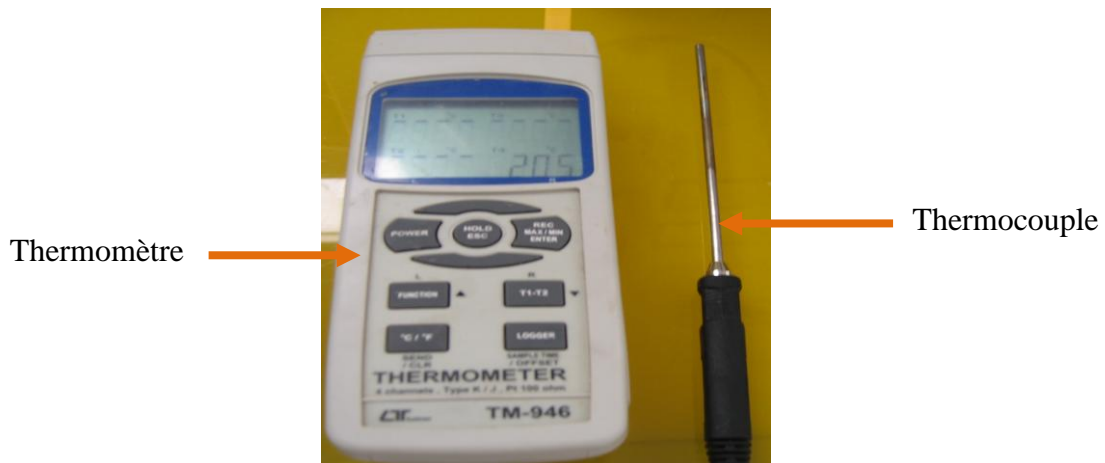


Figure III.12 : Thermomètre

5. Etudes des caractéristiques du système

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

5.1. Les caractéristiques I-V des panneaux solaire

5.1.1. Méthode expérimentale

Dans cette expérience, les panneaux solaires sont reliés à:

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

Selon le schéma de montage suivant :

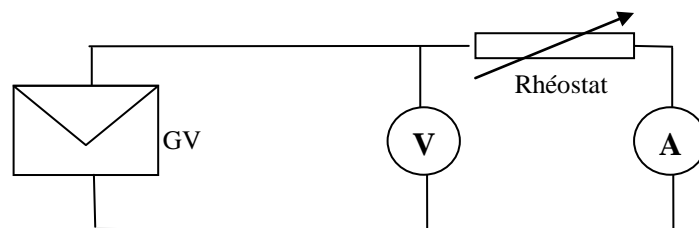


Figure III.13 : Montage électrique de l'expérience d'étude des caractéristiques I-V des panneaux solaires

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

La figure ci-dessous présente le montage de cette expérience.

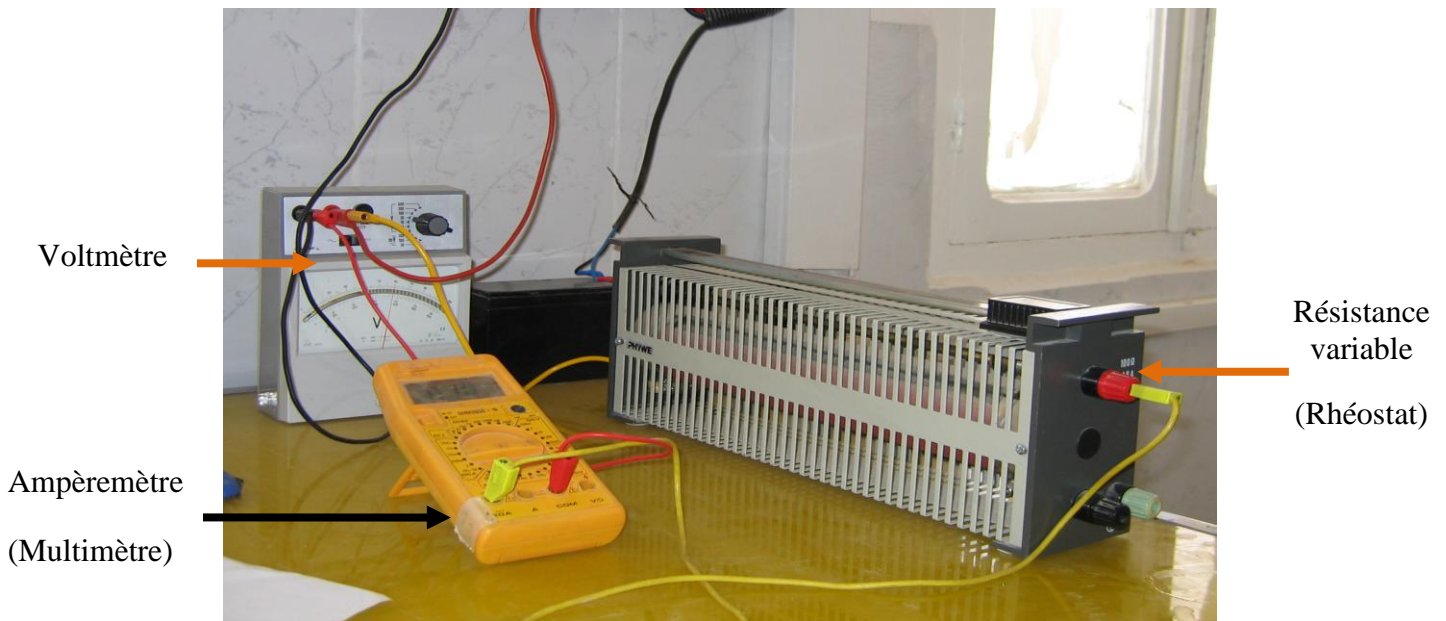


Figure III.14 : Expérience d'étude des caractéristiques I-V des panneaux solaires

5.1.2. Simulation numérique

La simulation numérique (ou expérience numérique) permet de reproduire sur un ordinateur un phénomène physique complexe dont on souhaite étudier l'évolution. Elle repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques qui sont adaptés aux moyens numériques.

Dans notre étude, on a effectué la simulation par deux moyens, l'un est un logiciel nommé PVSYST4, et l'autre est la programmation des équations décrivant le fonctionnement du système et résolue par le logiciel Matlab 7.

5.1.2.1. Résolution par le logiciel PVSYST4 [37]

Le code PVSYST4 est un logiciel informatique permettant l'analyse de fonctionnement et le traitement des données des systèmes photovoltaïque.

Il étudie les systèmes photovoltaïques reliés à un réseau ou les systèmes PV autonome servant pour différentes applications tel que le pompage incluant les bases de données étendues météorologiques et les outils généraux d'énergie solaire.

5.1.2.2. Modélisation mathématique utilisant Matlab

Le programme appliqué est donné en annexe 2 et résumé dans l'organigramme présenté ci-dessous :

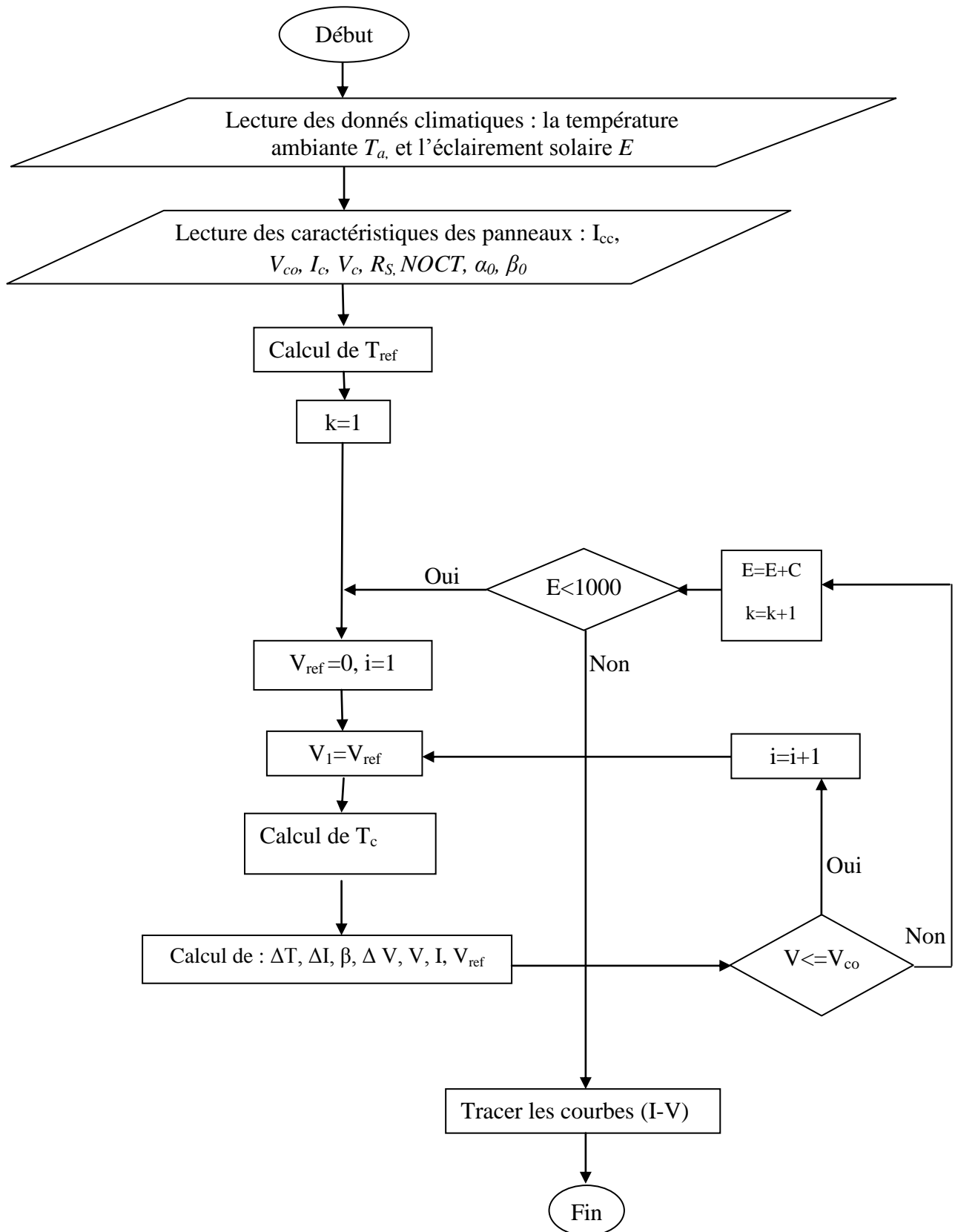


Figure III.15 : Organigramme de calcul

5.2. Les caractéristiques I-V d'électrolyseur

La puissance d'électrolyseur est un paramètre très intéressant dans le couplage PV-électrolyseur, pour cette raison l'étude des caractéristiques courant-tension devient une étape nécessaire. Dans cette étude, l'électrolyseur est connecté au générateur DC (voir la figure III.16). Il est préférable de débiter l'expérience avec une tension faible (par exemple 2V) et d'augmenter cette valeur progressivement.

Les valeurs du courant et de la tension sont enregistrées et la courbe caractéristique de l'électrolyseur est tracée. Ces mesures sont réalisées pour une concentration et une température fixe égales respectivement à 2g/l et 25°C.

6. Optimisation des paramètres d'électrolyseur

L'analyse du système nous permet de voir l'évolution du fonctionnement de l'électrolyseur dans plusieurs conditions et ceci en faisant varier les différents paramètres. Nous avons menés plusieurs expériences pour observer l'effet de ces paramètres sur le fonctionnement tels que la concentration, la température et l'électrolyte.

6.1. Le choix d'électrolyte

On utilise trois types d'électrolytes (NaOH, KOH, NaCl), et pour chacun d'eux nous menons les expériences suivantes :

- Les caractéristiques I-V d'électrolyseur à concentration et température fixe (2g/l, 25°C).
- Le choix de concentration d'électrolyte à tension et température fixe (10V , 25°C).
- Le choix de la température initiale à tension et concentration fixe (10V, 2g/l).

6.2. L'effet de la concentration d'électrolyte

Dans cette expérience, nous faisons varier la concentration d'électrolyte et nous enregistrons les variations du courant. Nous augmentons progressivement la concentration d'électrolyte après chaque lecture du courant. Les mesures sont instantanées et réalisées pour une température fixée à 25°C et une tension égale à 10V.

6.3. L'effet de la température initiale

La température initiale avec laquelle on démarre une expérience joue un rôle important surtout dans l'évolution de la conductivité électrique d'électrolyte, ce qui engendre une variation du courant et du débit d'hydrogène produit. Ces mesures sont faites de manière instantanée (concentration et tension fixe (2g/l ,10V)) pour que la température de la solution reste constante et égale à la température initiale choisie.

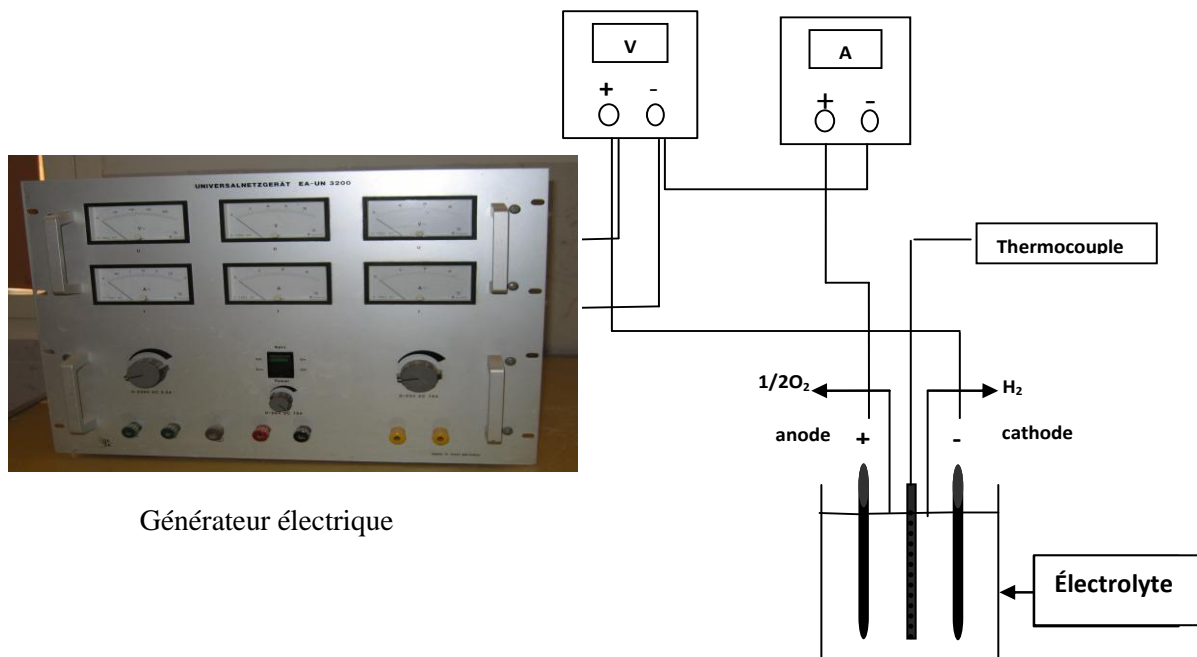


Figure III.16 : Montage d'étude pour la détermination des caractéristiques de l'électrolyseur

7. Couplage PV-Electrolyseur : production d'hydrogène solaire

Le temps de réponse des composants et leur aptitude à un fonctionnement variable sont essentiels pour ces systèmes. En effet, l'ensoleillement est une source variable et la charge peut avoir des évolutions importantes et instantanées.

Le but de cette étude a été d'évaluer le fonctionnement du système dans son ensemble, plus particulièrement la chaîne de production d'hydrogène. Cette étude comporte la représentation de fonctionnement du système sur un jour type. Le montage de cette étude est présenté sur la figure III.3. Les intensités de l'éclairage solaire sont mesurées chaque demi-heure.

Le couplage direct (voir figure III.17) semble être la configuration la plus efficace car elle évite les pertes dans un convertisseur. La modularité des générateurs photovoltaïques (modules à connecter en série ou en parallèle) permet une parfaite adaptation du couplage direct.

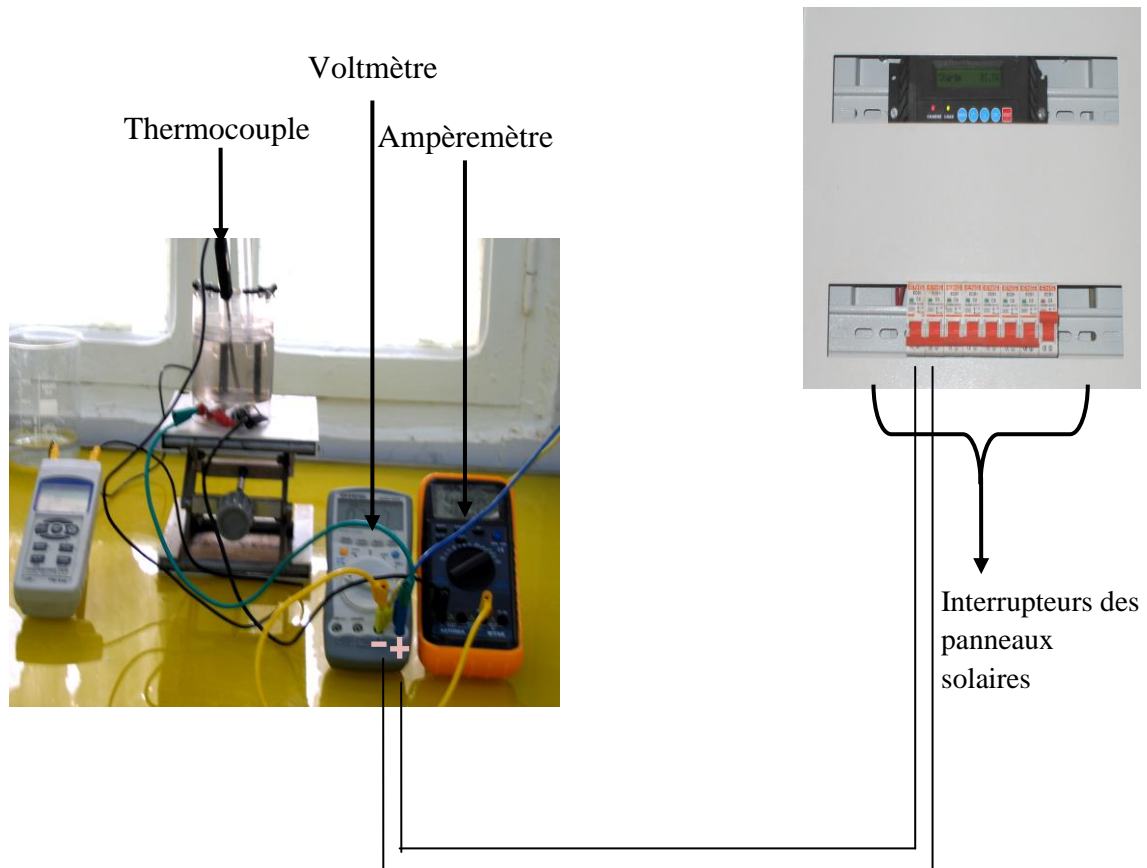


Figure III.17 : Système électrolyseur-panneaux PV

8. Paramètres de calcul

Les paramètres de calcul sont les termes qu'on ne peut pas mesurer et qui sont nécessaires pour l'analyse de fonctionnement des sous-systèmes de production. Pour ce faire, nous utilisons des relations mathématiques explicites.

- **Débit volumique d'hydrogène** : est calculé traditionnellement à partir le mesure de volume d'hydrogène dégagé sur le temps nécessaire de ce dégagement.

$$Q_{vH_2} = \frac{V_{H_2}}{t}$$

- **Puissance absorbée par l'électrolyse** : est la puissance consommée par l'électrolyseur pour électrolyser l'eau; dans notre étude c'est la puissance photovoltaïque.

$$P_m = V \cdot I$$

- **Puissance utile par l'électrolyse**: est la puissance utilisée par l'électrolyseur pour produire l'hydrogène.

$$P_u = PCI \cdot Q_{vH_2} \cdot \rho$$

- **L'énergie électrique consommée** : est le produit de la puissance photovoltaïque au temps

$$W = P_m \cdot t$$

- **Rendement photovoltaïque** : est le rapport de la puissance photovoltaïque sur la puissance du rayonnement solaire

$$R_{PV} = \frac{V \cdot I}{E \cdot S_p}$$

- **Rendement utile** : est le rapport de la puissance utile sur la puissance photovoltaïque

$$R_U = PCI \cdot \frac{Q_{vH_2}}{P_m} \cdot \rho$$

- **Rendement solaire** : est le produit du rendement utile et le rendement photovoltaïque

$$R_S = PCI \cdot \frac{Q_{vH_2}}{E \cdot S_p} \cdot \rho = R_{PV} \cdot R_U$$

Chapitre IV :
Résultats et interprétations

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus pour différentes expériences et manipulations étudiées, et ce comme suit :

- l'étude des caractéristiques I-V des panneaux solaires ; il est nécessaire de faire des mesures de l'éclairement solaire sur un plan incliné de 30° et au site choisi, ainsi que la détermination du point de fonctionnement optimal pour l'alimentation du système d'électrolyse.
- l'étude des caractéristiques de l'électrolyseur ; où sont étudiées l'influence de différents paramètres tels que : la tension, le courant, la température et concentration d'électrolyte.
- En dernière étape, nous essayons d'adapter les deux unités suite aux caractéristiques obtenues et ceci pour permettre une production d'hydrogène optimisée. Les mesures sont faites pour différentes journées de l'année, et les résultats présentés dans ce mémoire sont pour la journée du 6/7/2010, qui est une journée claire.

2. Etude du rayonnement solaire

L'analyse du rayonnement solaire permet d'exploiter la quantité d'énergie produite par le soleil pour un jour, ou un mois, ou une année. Le rôle d'inclinaison saisonnière des capteurs photovoltaïque est très important pour l'évolution de cette quantité d'énergie. Il peut varier même à chaque seconde. L'étude de l'influence d'inclinaison sur le rayonnement solaire est une étape nécessaire dans cette étude.

Rappelons aussi que l'évolution de ces rayonnements dépend des caractéristiques du site choisi tel que la latitude, l'altitude et la longitude. Tous ces paramètres nous permettent d'expliquer les résultats obtenus dans les mesures d'éclairement solaire.

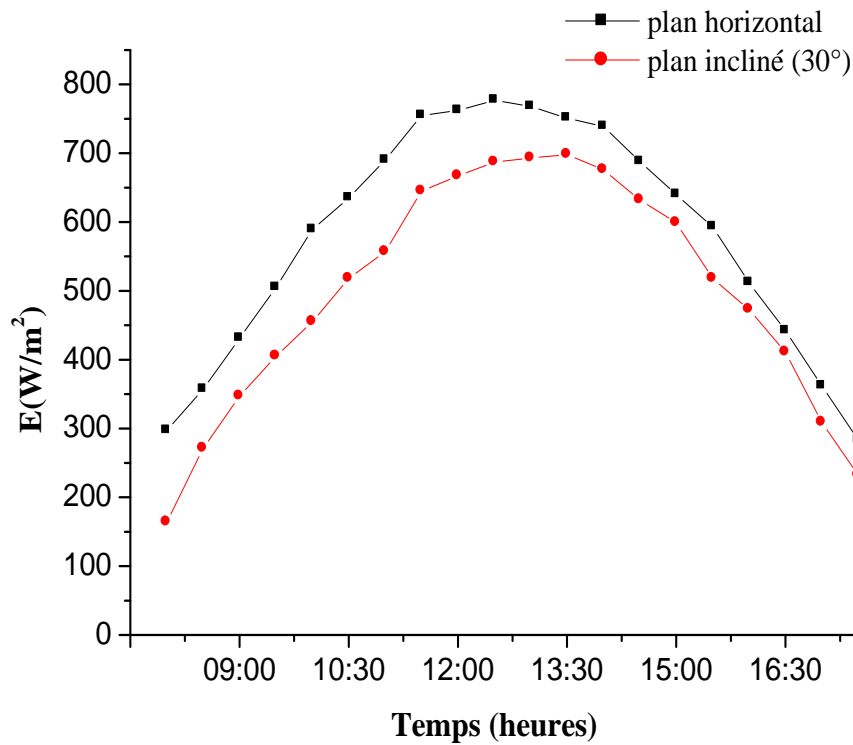


Figure IV.1 : Eclairement solaire pour deux plans (plan incliné à 30° et plan horizontal)

La figure (IV-1) représente l'évolution journalière de l'éclairement solaire sur deux plans : plan horizontal et plan incliné à 30° par rapport à l'horizontal. On remarque dans cette figure une augmentation continue de l'éclairement solaire pour les deux plans étudiés jusqu'à une valeur maximale (698 W/m^2 pour le plan incliné et 777 W/m^2 pour le plan horizontal) à 13 heures, puis l'éclairement diminue jusqu'à atteindre la valeur 120 W/m^2 pour le plan horizontal et 95 W/m^2 pour le plan incliné à 17 heures. L'éclairement solaire est variable en fonction du temps, ainsi que la captation par un panneau photovoltaïque est variable en fonction de l'inclinaison de ce dernier par rapport à l'horizontale. Ceci nous conduit à dire que si le panneau est fixé pour un seul angle d'inclinaison, on ne peut pas obtenir une grande puissance. Toutefois, nous pouvons opter pour un angle optimal d'inclinaison pour chaque saison de l'année. L'angle optimal pour la saison d'été où a été conduit nos expériences est de 0° c'est à dire le plan horizontal.

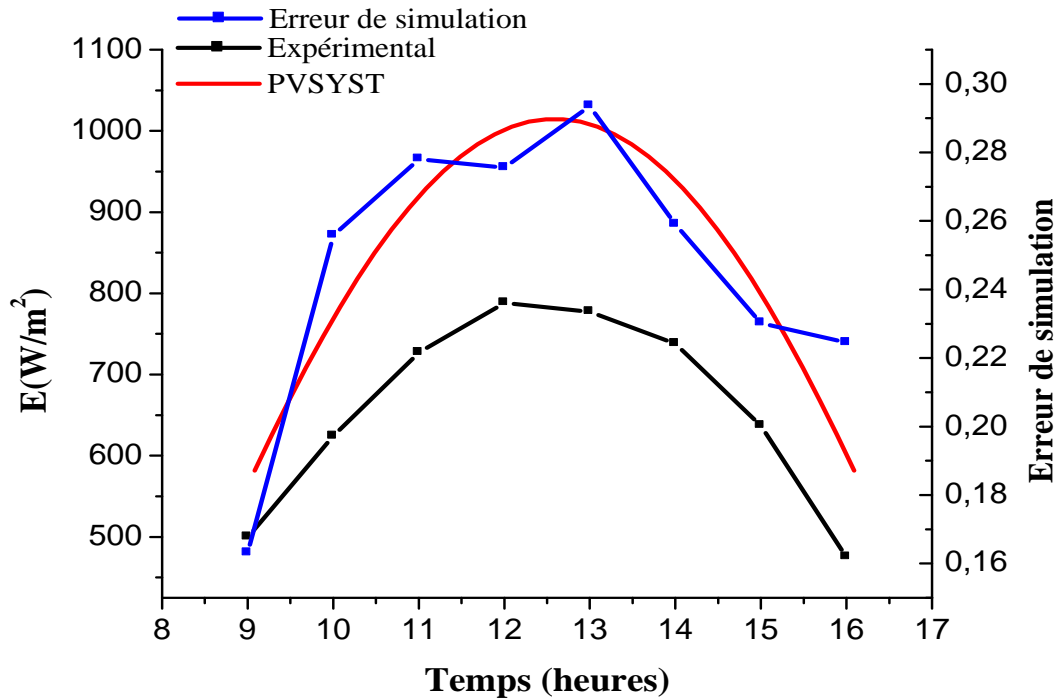


Figure IV.2 : Éclairage sur un plan horizontal par deux méthodes

La figure (IV.2) représente l'évolution journalière de l'éclairage solaire fait par deux méthodes expérimentalement, et simulation par le logiciel PVSYST (voir annexe 1). On remarque dans ces courbes les mêmes évolutions d'éclairage solaire de la figure précédente, ainsi un existante d'un écart atteint jusqu'aux 29% entre l'expérimental et la simulation. Cette figure montre que la simulation n'est pas une méthode de référence dans les mesures donc il faut toujours valider par l'expérimental.

3. Etude des caractéristiques I-V des panneaux solaires

Les principales caractéristiques des panneaux solaires sont le courant I_{PV} , et la tension V . Ils varient en fonction des différents paramètres tels que l'éclairage solaire et le système de montage des panneaux (série ou parallèle). L'étude de ces caractéristiques permet de voir :

- la différence entre la simulation et l'expérimental.
- L'intérêt du montage en série dans l'amélioration du rendement des panneaux solaires.

Nous avons utilisé trois méthodes différentes pour la détermination des caractéristiques I-V des panneaux solaires. Une première méthode expérimentale où on a utilisé un montage électrique décrit dans le paragraphe III.5.1.1. Nous permettant la détermination des caractéristiques. Une deuxième méthode basée sur la simulation où on a utilisé deux logiciels, l'un est appelé PVSYST (annexe 1), et l'autre, la modélisation des équations du modèle physique présenté en annexe 2 et résolu par Matlab 7.

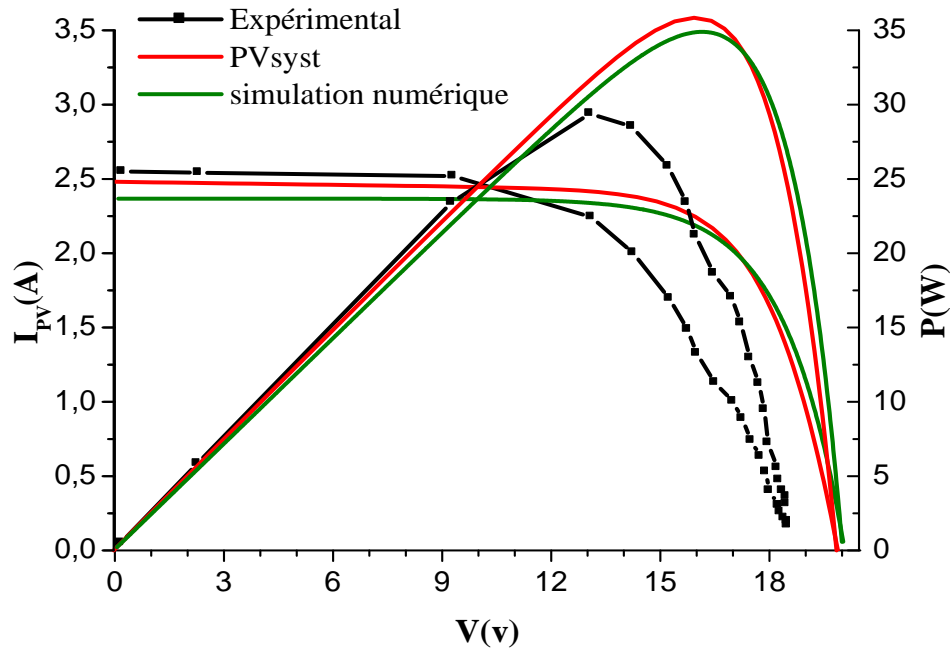


Figure IV.3 : Caractéristiques du panneau obtenues par différentes méthodes

Les résultats obtenus nous permettent de tracer l'évolution du courant et la puissance photovoltaïque en fonction de la tension comme représentés sur la figure (IV.3). Pour les faibles tensions, la courbe représentant le courant est quasi constante jusqu'à une valeur de tension de 10 V. La valeur du courant dans cette zone est désignée par le courant de court-circuit I_{cc} . Pour ce qui est de la puissance, nous remarquons une évolution croissante quasi-linéaire en fonction de la tension jusqu'à la valeur de 10V atteignant une puissance de 25 W. Au de-là de cette valeur de la tension, le courant commence à diminuer, mais la puissance continue de croître jusqu'à une valeur maximale de 35 W pour une tension de 15 V. Cette zone est appelée la zone de fonctionnement. Après cette zone, la baisse de courant sera accompagnée par une chute de la puissance jusqu'à annulation,

point correspondant à la tension maximale celle qui nommée par la tension de circuit ouvert V_{co} .

L'écart entre les trois méthodes est important surtout dans la zone de fonctionnement des panneaux. Cet écart peut être expliqué par les hypothèses de calcul optées pour la simulation telle que l'existence de résistance shunt et les phénomènes de transfert de chaleur au niveau des panneaux.

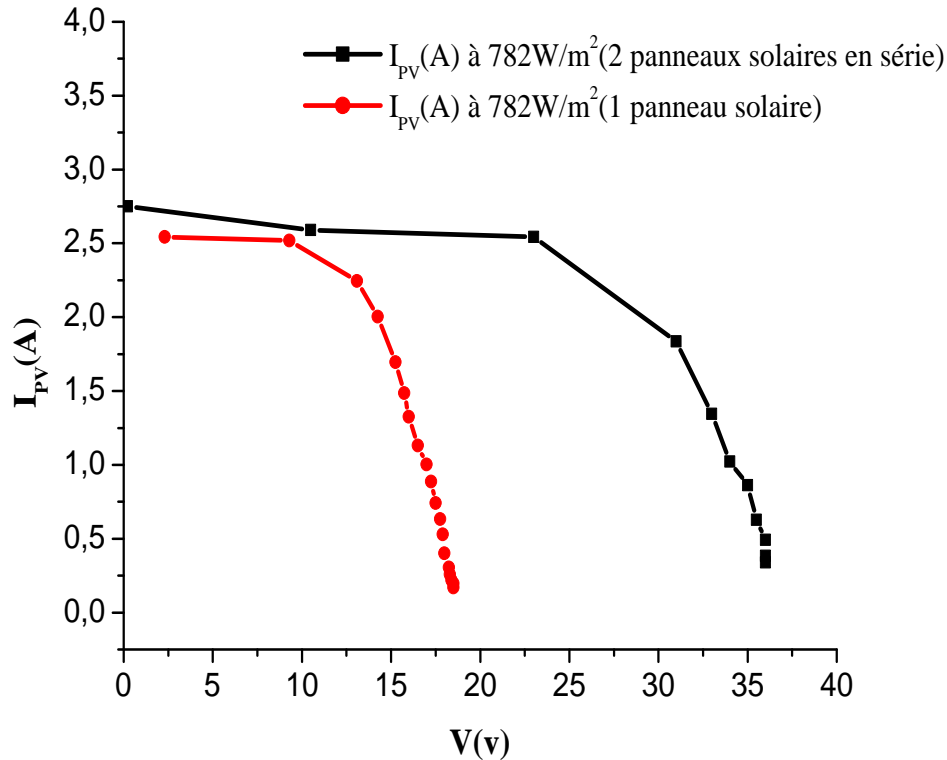


Figure IV.4 : Caractéristiques I-V pour deux configurations (panneau seul et deux panneaux en série)

La figure (IV.4) représente une comparaison entre l'utilisation d'un panneau seul et deux panneaux en série. Cette figure montre que le montage de deux panneaux en série permet de doubler la tension et par conséquent élargir la zone de fonctionnement. Ceci a pour but l'augmentation de la tension maximale et de ce fait, la puissance maximale du système.

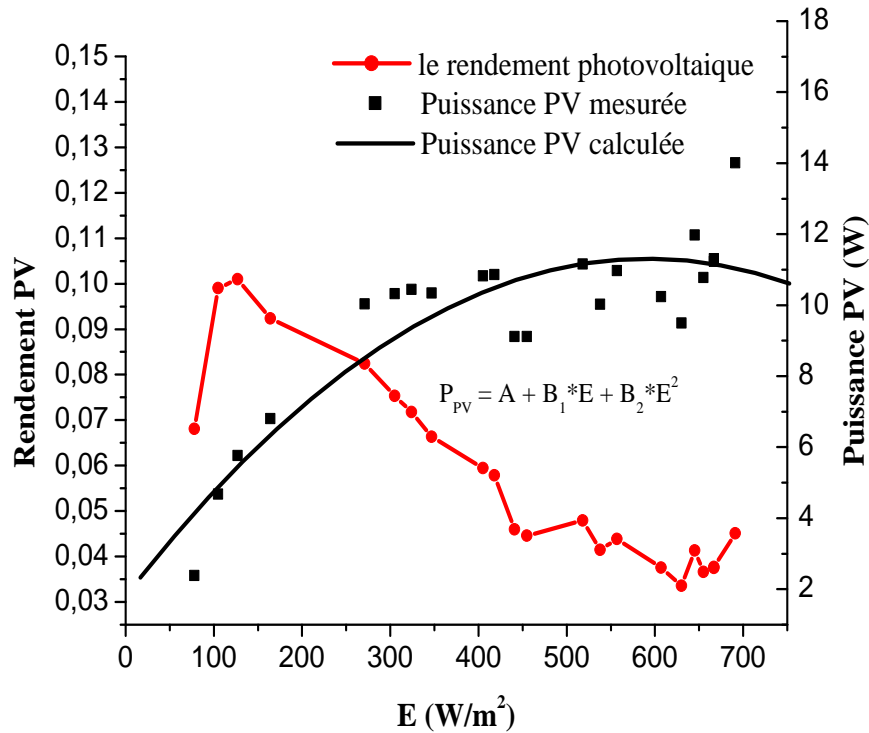


Figure IV.5 : Le rendement photovoltaïque et la puissance photovoltaïque en fonction de l'éclairement solaire

La figure (IV.5) représente l'évolution du rendement photovoltaïque solaire (PV) et de la puissance photovoltaïque en fonction de l'éclairement solaire. Nous remarquons dans cette figure une augmentation continue de puissance PV en fonction de l'éclairement, ceci est dû essentiellement à l'augmentation du courant et de la tension de fonctionnement avec l'éclairement solaire.

La tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. L'ordre de grandeur des pertes est de 2,3 mV par degré Celsius par cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 1,48 A par degré Celsius) [38]. Donc l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II, la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction [39].

4. Etude des caractéristiques de l'électrolyseur

L'étude des caractéristiques de l'électrolyseur nous permet d'obtenir l'influence de quelques paramètres de travail tels que : la tension, la température de l'électrolyte et la concentration d'électrolyte. L'influence de ces paramètres sur le courant et le débit d'hydrogène est observée, d'où l'intérêt d'examiner l'évolution de ces paramètres. Nous observons lors des différentes expérimentations, par ailleurs, une parfaite corrélation entre le courant d'électrolyse et la quantité d'hydrogène produite.

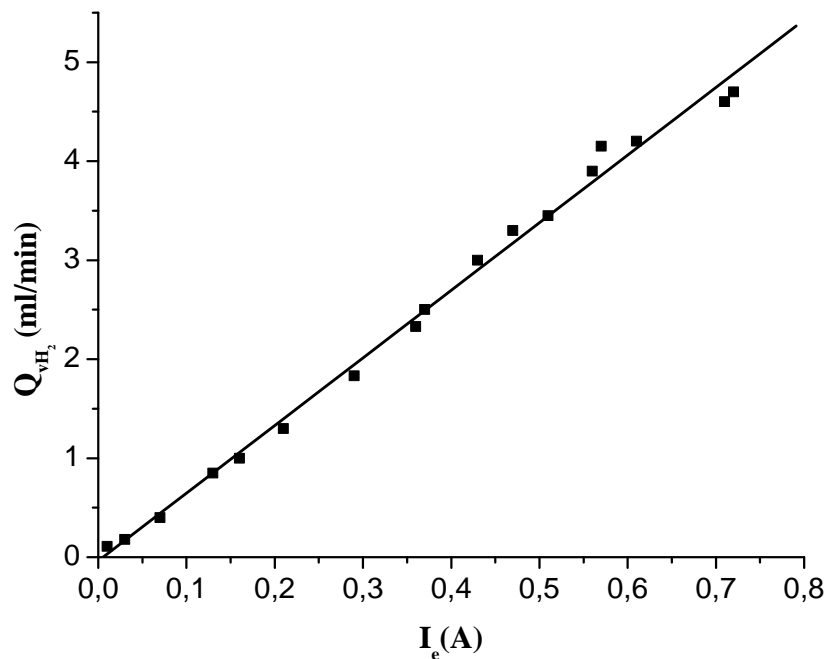


Figure IV.6 : Evolution de production d'hydrogène en fonction du courant d'électrolyseur

La figure ci-dessus représente l'évolution de production d'hydrogène en fonction du courant d'électrolyseur à température et concentration d'électrolyte KOH constantes (25°C, 2g/l). Dans cette figure, on observe bien d'un accroissement linéaire du débit d'hydrogène provenant des pertes ohmiques. Cette puissance électrique est fonction quadratique du courant.

Nous constatons aussi suite aux expériences, que dans l'électrolyseur de type alcalin, la consommation d'eau dans ce dernier est proportionnelle à la production d'hydrogène et donc au courant d'électrolyse.

4.1. Effet de la tension et la température initiale

Les électrolyseurs alcalins sont actuellement les plus utilisés. Les performances de cette technologie se sont beaucoup améliorées par l'augmentation de la température initiale et la tension de la cellule d'électrolyseur.

4.1.1. Effet de la tension

4.1.1.1. Réalisation discontinue

La tension d'alimentation de l'électrolyseur joue un rôle important dans la production d'hydrogène. L'effet qu'elle produit sur la production d'hydrogène a été mesuré et présenté comme suit :

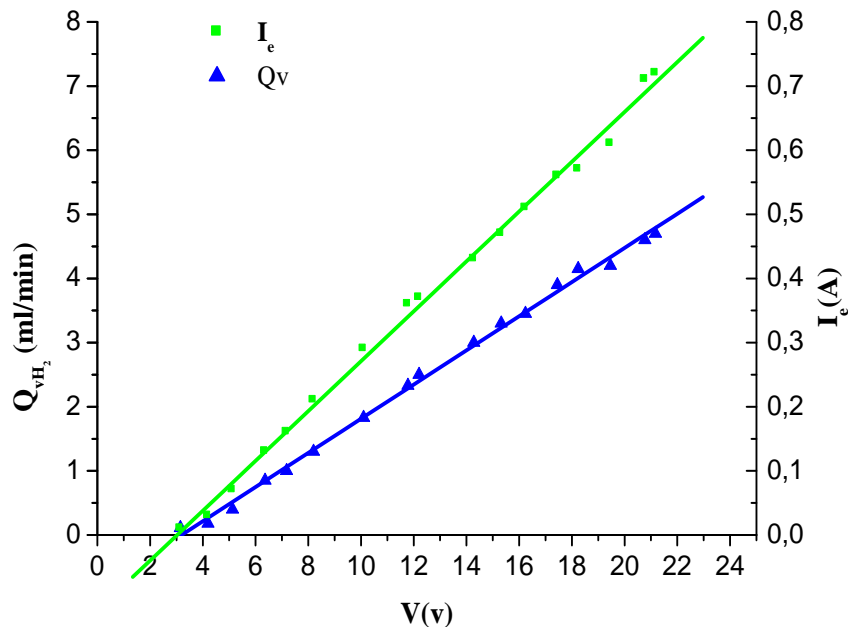


Figure IV.7 : Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de la tension de la cellule d'électrolyse

Dans cette expérience, nous avons fait varier la tension d'électrolyse et nous avons observé les résultats de cette manipulation qui sont la production d'hydrogène et le courant à l'intérieur de la cellule d'électrolyse. La figure (IV.7) représente l'évolution de la production d'hydrogène et le courant en fonction de la tension de cellule d'électrolyse à concentration d'électrolyte KOH fixée à 2g/l, et une température fixe 25°C. Pour garder la température fixée à la valeur choisie qui est de 25 °C, il a fallu prendre des mesures

instantanées et refroidir la solution après chaque mesure pour retrouver la température fixée.

On observe qu'à 3 Volt, l'électrolyse d'eau débute avec une certaine consommation électrique. Au de-là cette consommation électrique devient importante. Pour cela nous remarquons une augmentation linéaire du débit d'hydrogène et du courant en fonction de la tension.

4.1.1.2. Réalisation continue

Le phénomène de l'électrolyse d'eau est accompagné généralement par une évolution de la température et du courant de l'électrolyseur. Pour mettre en évidence cette évolution, on a élaboré une expérience qui nous permet d'étudier la variation de température et du courant à différents valeurs de la tension d'alimentation par un générateur électrique. Dans cette étude, nous suivons l'expérience jusqu'à observer une stabilité de la température. Les figures (IV-8), (IV-9), (IV-10) représentent l'évolution de température d'électrolyte, courant d'électrolyseur et la production d'hydrogène respectivement pour trois valeurs de la tension 8, 14 et 18V.

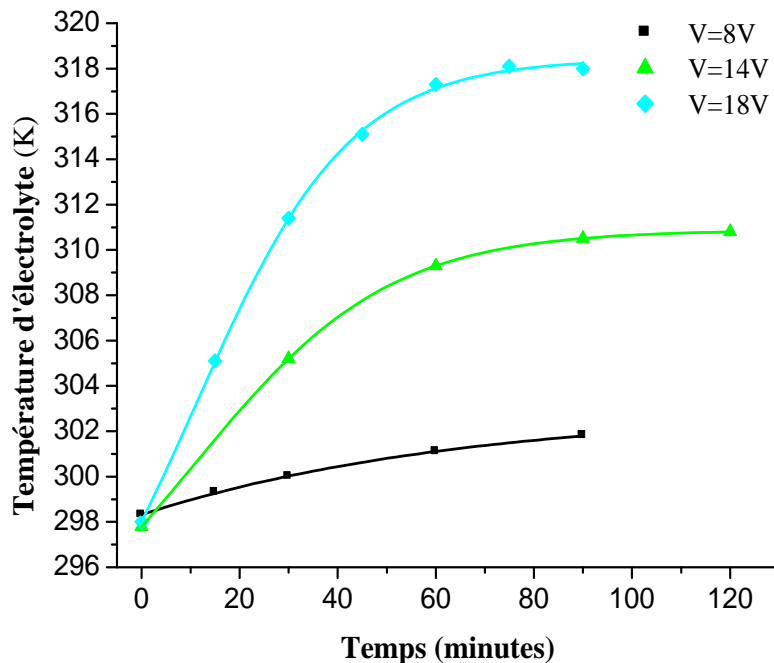


Figure IV.8 : Evolution de température d'électrolyte à différents tensions alimentées par le générateur en fonction du temps

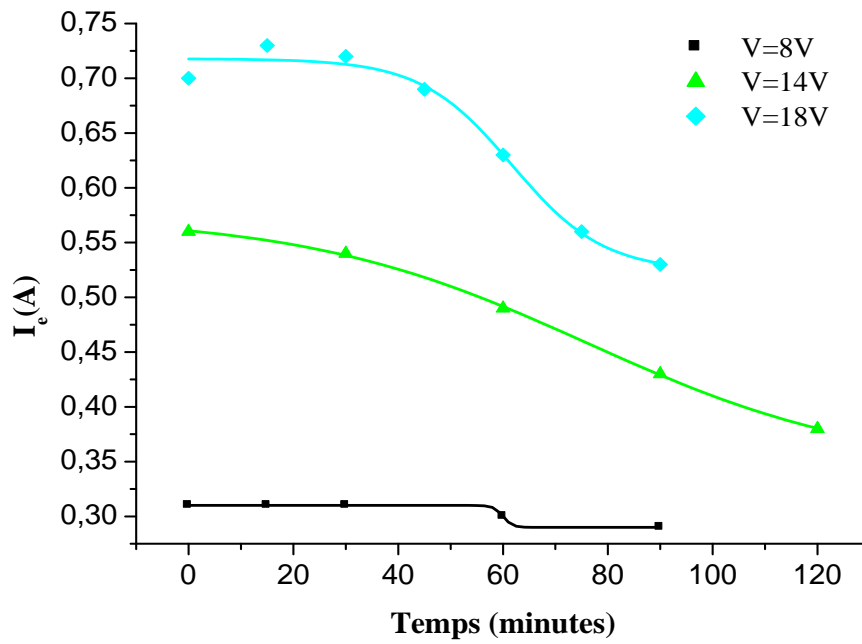


Figure IV.9 : Evolution du courant d'électrolyseur à différentes tensions alimentées par le générateur en fonction du temps

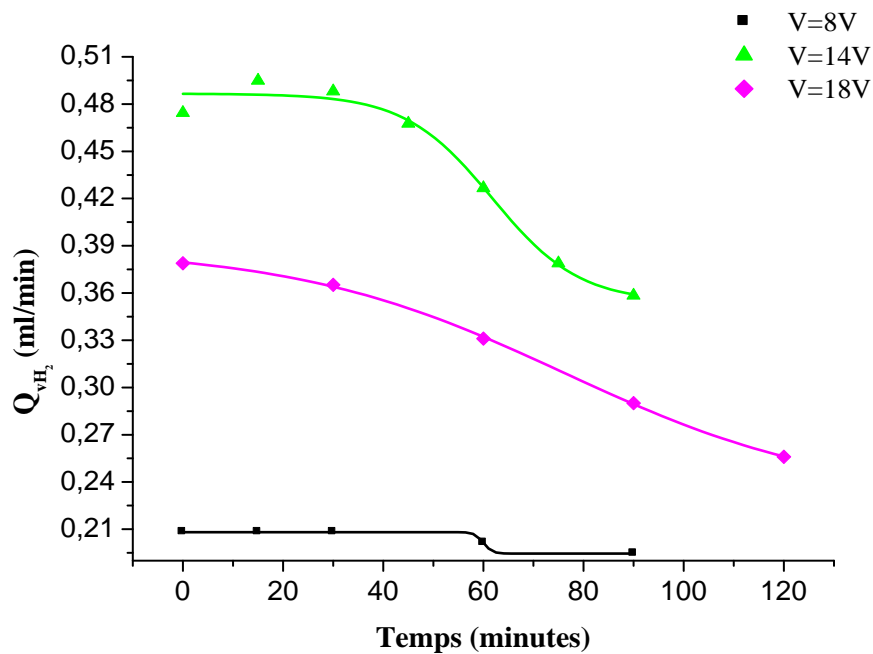


Figure IV.10 : Evolution de production d'hydrogène à différentes tensions alimentées par le générateur en fonction du temps

Nous remarquons dans ces graphes ce qui suit :

- La croissance de la température d'électrolyte atteint une valeur limite (300, 310, et 318 K) respectivement pour les trois valeurs de tension présélectionnées. Cette valeur limite désigne une stabilité, ceci veut dire que la réaction d'électrolyse d'eau a atteint l'équilibre thermodynamique. Notons que la température d'équilibre évolue lorsque la tension varie, ceci se traduit par une variation de la conductivité électrique.
- L'accumulation des nouvelles espèces dans la solution (produits de la dissociation des électrodes) conduit à une augmentation de la conductivité électrique, ainsi elle crée une résistance supplémentaire dans la solution. Ce phénomène peut créer une difficulté au passage des électrons entre les électrodes. Cette résistance exige une diminution du courant. En effet, la production d'hydrogène sera décroissante à cause de sa dépendance linéaire au courant d'électrolyseur.
- La stabilité du courant et du débit d'hydrogène déduit de l'état d'équilibre de la réaction d'électrolyse d'eau. Celle-ci résulte une température d'équilibre permanent.

4.1.2. Effet de la température initiale d'électrolyte

La température initiale avec laquelle on démarre une expérience joue un rôle important surtout dans l'évolution de la conductivité électrique d'électrolyte, ce qui engendre une variation du courant et du débit d'hydrogène produit. La figure IV.11 représente l'évolution du débit d'hydrogène produit et le courant d'électrolyse en fonction de la température initiale de l'expérience. Ces mesures sont faites de manière instantanée pour que la température de la solution reste constante et égale à la température initiale choisie.

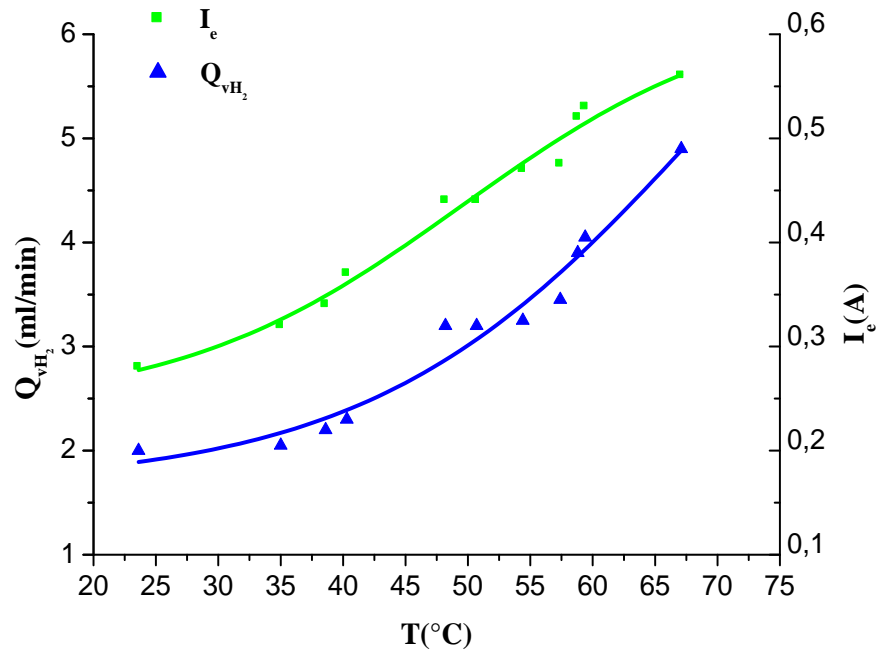


Figure IV.11 : Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de la température initiale de la cellule d'électrolyse

La figure (IV-11) représente l'évolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de la température initiale de la cellule d'électrolyse à concentration d'électrolyte KOH fixée à 2g/l et une tension fixe de 10V. Nous remarquons dans cette figure une augmentation du courant d'électrolyseur en fonction de la température initiale d'électrolyse; ainsi une croissance de débit d'hydrogène. Sur la figure IV.8 nous remarquons que la température d'électrolyse atteint une valeur maximale après un certain temps de fonctionnement, alors que le débit d'hydrogène produit continue d'augmenter au-delà de cette valeur maximale atteinte pour la température (figure IV.11). Donc on peut déduire que si par un moyen externe, nous pouvons améliorer la température de fonctionnement de l'électrolyseur, nous aurons ainsi un meilleur débit d'hydrogène produit et par conséquent un meilleur rendement.

4.1.3. Variation de la température initiale avec la tension

L'assemblage entre l'évolution de température initiale et la variation de tension présente un multiple effet sur le courant d'électrolyseur. La figure au dessous montre cette influence.

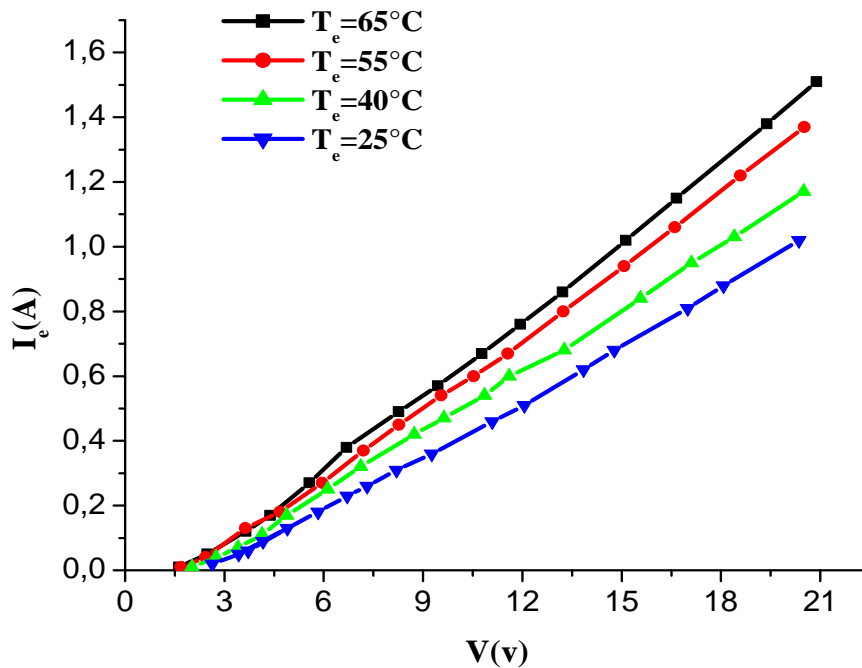


Figure IV.12 : Evolution du courant d'électrolyseur en fonction de la tension à différentes températures initiales de la cellule d'électrolyse

La figure (IV-12) présente l'évolution du courant d'électrolyseur en fonction de la tension à différentes températures initiales de la cellule d'électrolyse à concentration constante d'électrolyte KOH de 2g/l. L'augmentation de température initiale (25, 40, 55, 60°C) produit une augmentation du courant d'électrolyseur pour une même valeur de la tension.

4.2. Effet de la concentration d'électrolyte

L'eau pure conduit peu l'électricité, ce qui conduit à l'emploi d'un additif hydrosoluble (électrolyte) dans la cellule d'électrolyse pour fermer le circuit électrique (autrement dit, faire en sorte que les potentiels chimiques en jeu permettent la réaction chimique). Ces électrolytes sont habituellement des bases ou des sels tels que KOH ou NaCl.

Afin de connaître la concentration d'électrolyte nécessaire pour une production optimale d'hydrogène, on a mesuré l'évolution du courant et du débit d'hydrogène à différentes concentrations de l'hydroxyde de potassium KOH.

La figure (IV-13) représente l'évolution du courant d'électrolyseur et du débit d'hydrogène en fonction de la concentration d'électrolyte à température initiale fixée à 25°C et une tension constante de 10V.

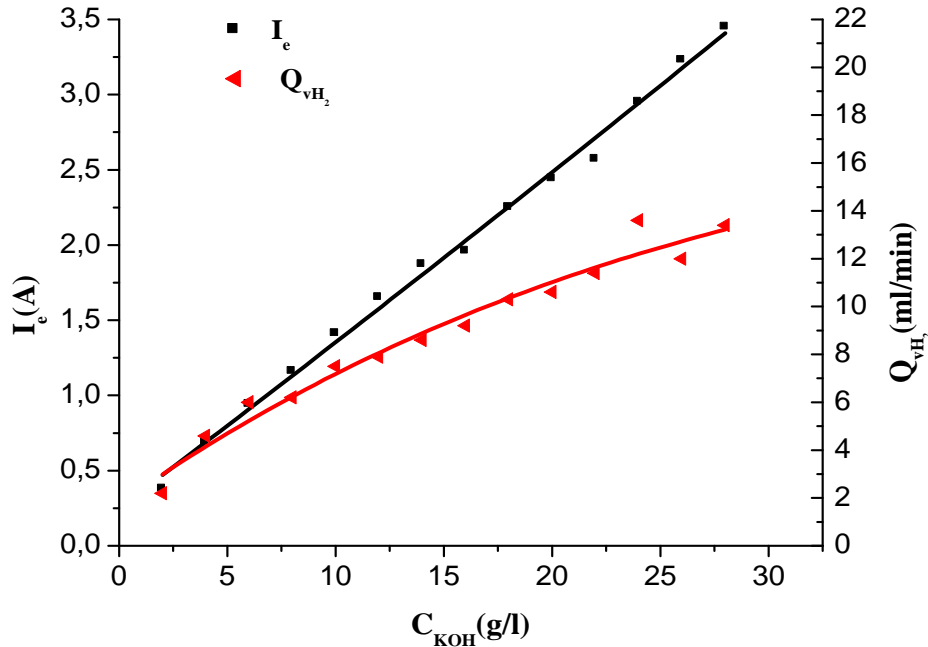


Figure IV.13 : Evolution du courant d'électrolyseur et le débit d'hydrogène en fonction de la concentration d'électrolyte

À chaque essai de cette expérience, on introduit une nouvelle concentration d'électrolyte plus élevée. Pour garder la température fixée à 25 °C, il a fallu prendre des mesures instantanées et refroidir la solution après chaque mesure pour retrouver la température fixée.

Cette figure montre que le courant d'électrolyseur et la production d'hydrogène augmentent avec la concentration d'électrolyte. Dans un électrolyseur alcalin, l'électrolyte circule quand le composant est alimenté. Cette circulation est proportionnelle à l'intensité.

L'augmentation de concentration d'électrolyte produit une augmentation des espèces d'électrolyte KOH existantes dans la solution, donc le nombre des électrons et celui des molécules d'hydrogène réduites seront augmentés, ce qui engendre une augmentation du courant d'électrolyseur et du débit d'hydrogène.

L'électrolyse industrielle est réalisée généralement à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25% en masse à 80°C jusqu'à 40% à 160°C).

4.3. Choix d'électrolyte

Pour faire le choix d'un électrolyte, nous avons testé trois types d'électrolytes disponibles sur le marché KOH, NaOH et NaCl. Les figures (IV-14), (IV-15), (IV-16) représentent l'évolution de production d'hydrogène et celui du courant d'électrolyseur en fonction de la tension, de la température initiale et de la concentration d'électrolyte et ceci pour les trois types d'électrolytes utilisés. Il est à noter que les conditions opératoires de température, de tension, et de concentration d'électrolyte sont les mêmes pour chaque électrolyte.

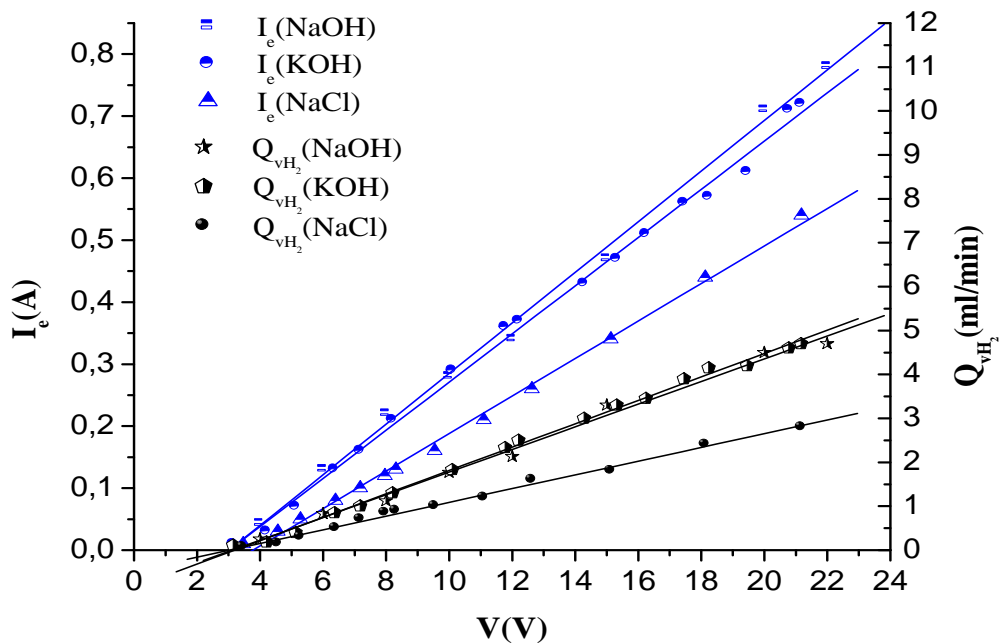


Figure IV.14 : Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de tension

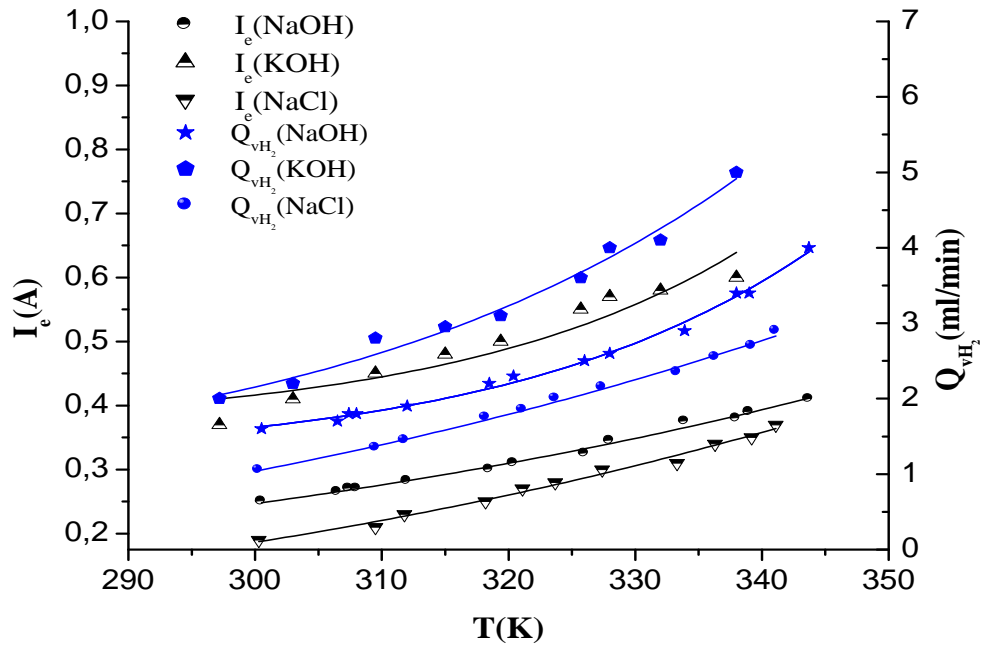


Figure IV.15 : Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de la température initiale

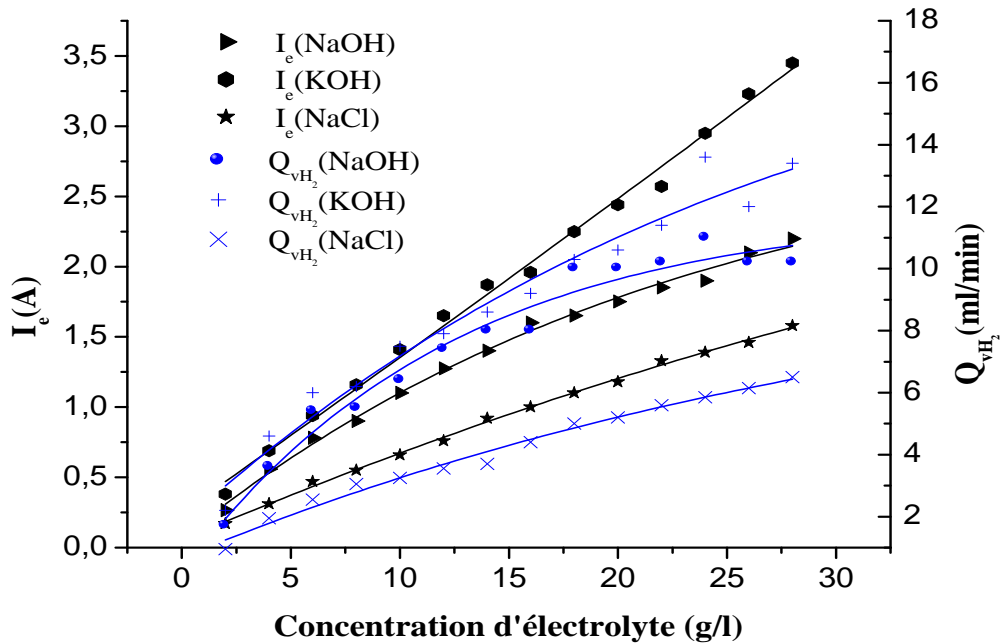


Figure IV.16 : Evolution de production d'hydrogène et le courant d'électrolyseur en fonction de concentration d'électrolyte (T=25°C)

D'après les figures IV-14, IV-15 et IV-16 nous remarquons certaines différences entre les trois types d'électrolytes :

- L'effet de la tension à concentration et température fixe (2g/l, 25°C) sur le courant et le débit d'hydrogène pour l'hydroxyde de potassium KOH et l'hydroxyde de sodium NaOH sont très semblables. Par contre pour le chlorure de sodium NaCl, le débit d'hydrogène et le courant sont très faibles comparés aux deux autres électrolytes. Cette baisse de production d'hydrogène pour le chlorure de sodium peut s'expliquer par la faible conductivité électrique de la solution. Le KOH et le NaOH sont des bases fortes caractérisés par leur forte conductivité qui augmentent la concentration des ions hydroxydes, ces mêmes ions contribuent à la formation de l'hydrogène au sein de la solution. Ce phénomène est faiblement observé pour le cas du NaCl qui est un sel à faible conductivité dans les mêmes conditions expérimentales.
- Sur la figure IV.15, nous observons que pour une température initiale fixée, l'électrolyte KOH présente le meilleur débit d'hydrogène produit pour une tension et une concentration fixes égales respectivement à 10 V et 2 g/l. Les molécules de KOH sont plus conductrices que les deux autres électrolytes pour les différentes températures testées.
- Les mêmes expériences conduites pour différentes valeurs de concentration, confirment que le KOH comme électrolyte donne de meilleures taux de production d'hydrogène que les deux autres électrolytes.

5. Etude de couplage PV-électrolyseur

Un des aspects importants dans ce travail est l'étude du couplage du système PV-électrolyseur en utilisant une alimentation directe PV pour le fonctionnement de l'électrolyseur. Pour effectuer ces expériences, nous avons choisi une journée claire (06/07/2010) et nous avons effectué les mesures des différents paramètres servant pour la détermination des caractéristiques pour les deux systèmes. La concentration d'électrolyte et la température initiale sont fixés respectivement égales à 2g/l et 25°C. Les expériences ont débuté à 7 :00 h du matin et nous avons terminé à 18 :00 h. Les figures IV.17, IV.18, IV.19, IV.20 et IV.21 résument les résultats obtenus des différentes expériences.

5.1. Les caractéristiques I-V du couplage PV-électrolyseur

L'adaptation de l'électrolyseur avec le système PV nous a permis de tracer les courbes présentées sur la figure (IV-17). Les mesures du courant du système PV et celui de l'électrolyseur ont été effectués selon deux montages différents.

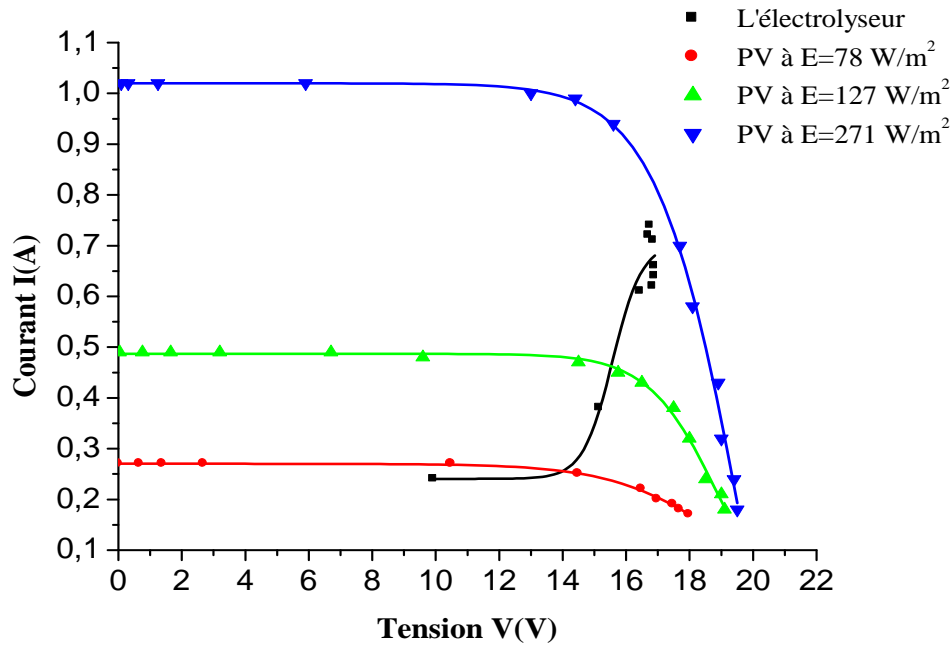


Figure IV-17 : Evolution des caractéristiques I-V du système PV-électrolyseur en fonction de tension

La figure (IV-17) représente l'évolution du courant du système PV-électrolyseur en fonction de la tension. L'intersection entre la courbe caractéristique de l'électrolyseur et la courbe caractéristique du système PV présente la zone de fonctionnement et la puissance nécessaire du système électrolytique [40]. On peut donc déduire les zones de fonctionnement obtenues pour le système PV-électrolyseur pour les trois valeurs d'éclairement solaire :

- Eclairement de 78 W/m^2 : tension de 13 à 16 V et le courant de 0,2 à 0,3 A.
- Eclairement de 127 W/m^2 : tension de 13 à 17 V et le courant de 0,35 et 0,4 A.
- Eclairement de 271 W/m^2 : tension de 14 à 18 V et le courant de 0,8 et 1 A.

5.2. Fonctionnement du système sur un jour type

Le fonctionnement typique de l'installation s'observe à partir de mesures en continu, dont nous présentons ici l'évolution temporelle pour un beau jour d'été, à savoir le 6 juillet 2010. Les résultats principaux de cette étude sont représentés dans les figures IV-18 et IV-19.

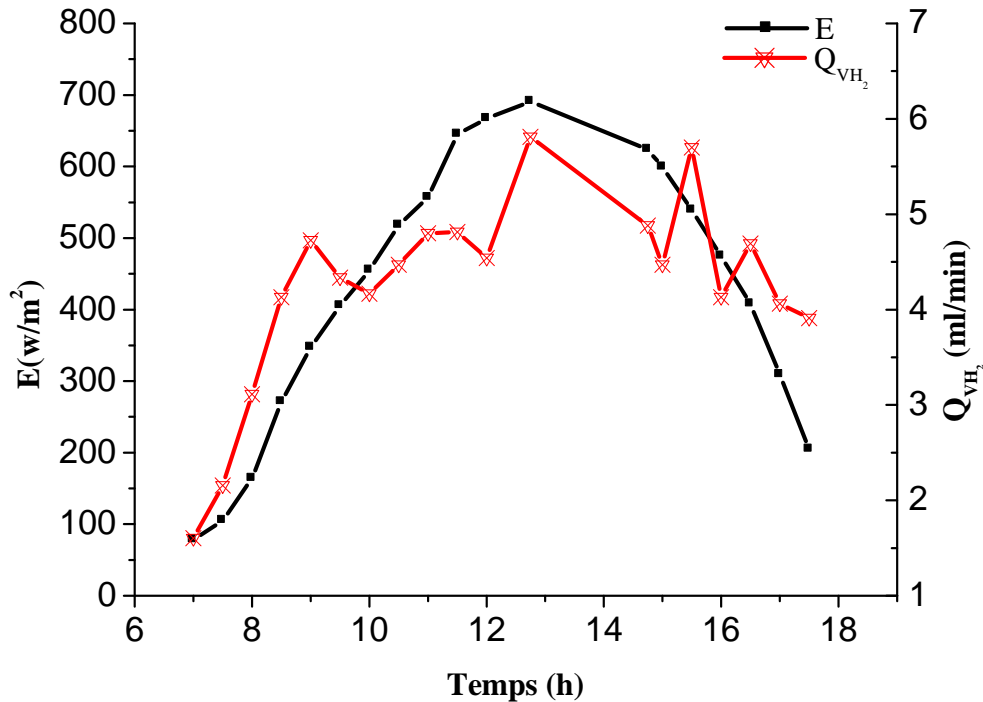


Figure IV-18 : Evolution de l'éclairement solaire et la production d'hydrogène en fonction du temps (06/07/2010)

La figure (IV-18) représente l'évolution d'éclairement solaire, production d'hydrogène en fonction du temps. On distingue clairement dans cette figure que le débit d'hydrogène est directement affecté par l'intensité du rayonnement solaire. Et dans les moments de l'éclairement maximal (11:00 h à 13 :00 h), la production d'hydrogène était aussi maximale (6 ml/min).

D'après cette description, on peut déduire une existence de corrélation entre l'ensoleillement et le débit d'hydrogène.

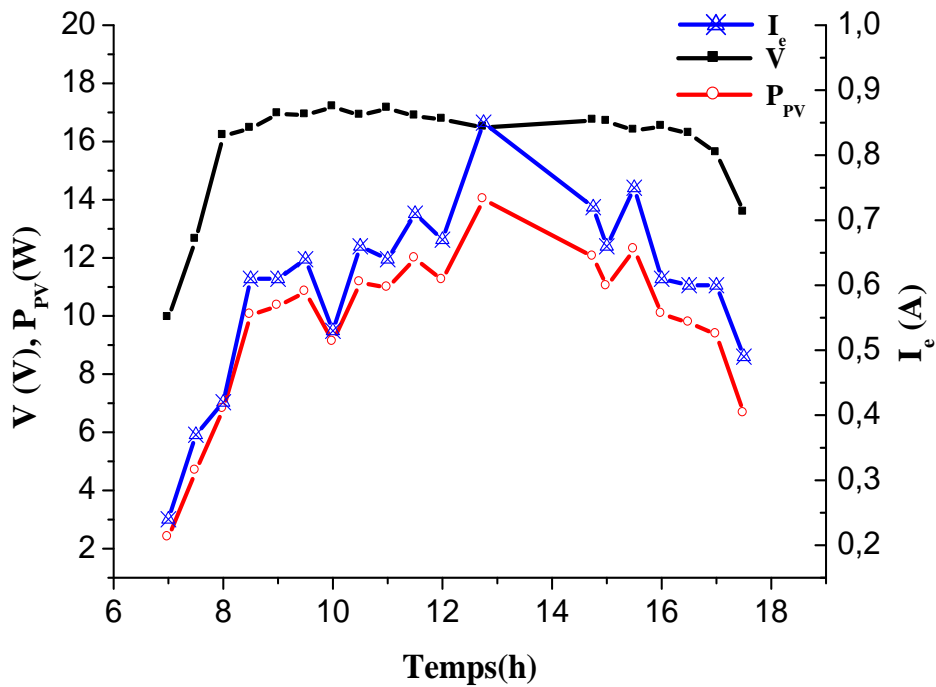


Figure IV-19 : Evolution du courant d'électrolyseur, puissance PV et la tension en fonction du temps (06/07/2010)

La figure (IV-19) représente l'évolution du courant d'électrolyseur, de la puissance PV et la tension d'électrolyseur en fonction du temps. Nous remarquons dans cette figure que le courant d'électrolyseur est directement lié à l'évolution de la puissance PV. Alors que la tension d'électrolyseur reste constante pendant toute la période allant de 9:30 h à 17:00 h de la journée.

Le courant atteint la valeur maximale de 1A à 13:00, c'est le moment de l'éclairement maximal, où aussi la production d'hydrogène atteint sa valeur maximale (6 ml/min). Ces résultats confirment la corrélation linéaire entre le courant et le débit d'hydrogène, ce qui apparaît clairement dans ses courbes (courant et débit d'hydrogène).

5.3. Evolution du rendement

Pour confirmer la performance du système, un calcul du rendement est effectué pour les deux sous-systèmes. Les figures IV-20 et IV-21 présentent les résultats de cette conception.

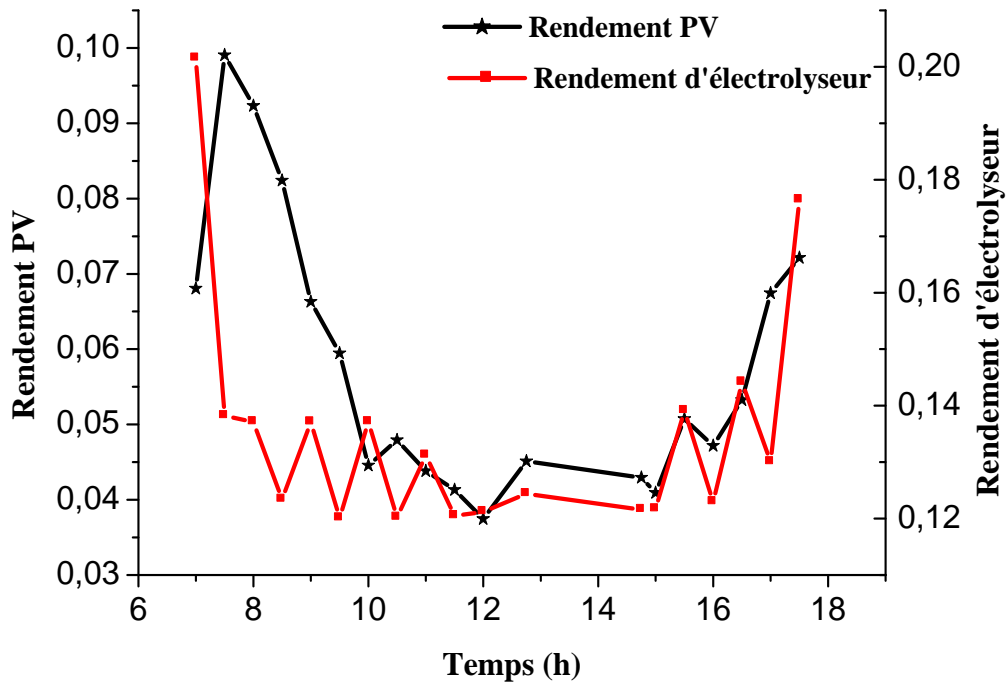


Figure IV-20 : Evolution du rendement PV, et rendement d'électrolyseur en fonction du temps

La figure (IV-20) représente l'évolution du rendement PV et le rendement d'électrolyseur en fonction du temps. Les valeurs de rendement pour les deux systèmes sont relativement faibles. Ils ne dépassent pas 10% pour le système PV, et 20% pour l'électrolyseur. Ces faibles rendements semblent surtout pour les fortes intensités du rayonnement solaire. Par contre, le rendement sera plus grand dans les moments de faible éclairage solaire (réveil et coucher du soleil). Le faible rendement de l'électrolyseur est dû essentiellement à la faible concentration d'électrolyte KOH utilisé (2g/l). Nous pouvons noter que dans le cas des électrolyseurs industriels, la concentration utilisée est d'environ 25% de masse ; et ce qui donne un rendement industriel d'environ 60% à 80%.

Le rendement PV est généralement faible lorsqu'on utilise des panneaux solaires poly-cristallins 8-10%. Les faibles valeurs du rendement obtenu peuvent être expliquées par une mauvaise captation solaire, vu l'orientation non optimisée du capteur photovoltaïque. La température ambiante élevée (environ 47°C) peut aussi avoir un effet négatif sur la conversion photovoltaïque, ceci peut expliquer les faibles valeurs du rendement.

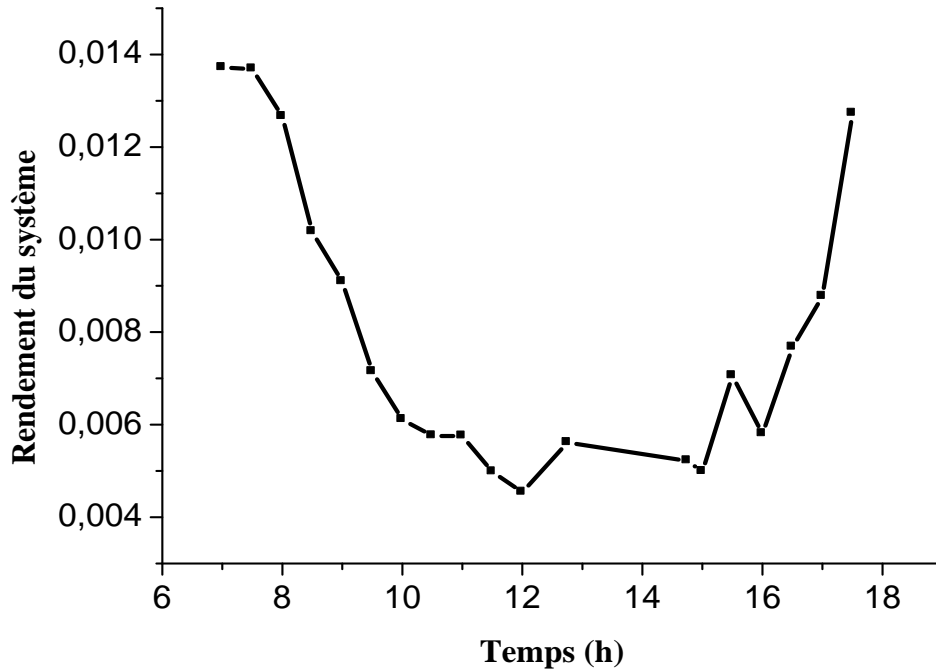


Figure IV-21 : Evolution du rendement du système PV-électrolyseur en fonction du temps

Le produit des deux rendements (PV et électrolyseur) donne le rendement du système PV-électrolyseur [41]. Son évolution en fonction du temps pour la même journée est présentée sur la figure (IV-21).

Les résultats obtenus du rendement sont faibles, car le rendement PV et celui d'électrolyseur sont aussi faibles. Ceci montre que les paramètres du sous-système auraient un effet important sur le couplage du deux sous-systèmes, présenté par l'effet de l'éclairement solaire, température d'électrolyte, concentration de l'électrolyte, le choix d'électrolyte, la tension et le courant de la cellule d'électrolyse.

Conclusion générale

Conclusion générale

La croissance de la consommation énergétique et les risques environnementaux associés ont pris une importance tout à fait particulière. L'évolution de la situation environnementale de notre Terre conduit la quasi-totalité des futurologues au même constat, à savoir l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et corrélativement une augmentation progressive et inéluctable de la température moyenne au sol avec ses conséquences prévisibles et dramatiques. A cette préoccupation environnementale, il faut ajouter celle posée par le niveau des réserves mondiales de combustibles fossiles, même si elle est peut être mise au second plan aujourd'hui.

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

Compte tenu des perspectives vers lesquelles nos sociétés se dirigent, pour la satisfaction de ses besoins énergétiques, l'hydrogène est une des alternatives fréquemment évoquées, avec la capacité de jouer un rôle de premier ordre dans les prochaines décennies.

La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau, sont parmi les procédés de production d'hydrogène. Le travail présenté dans ce mémoire s'intègre dans le cadre d'une production d'hydrogène par électrolyse de l'eau par voie solaire.

L'objectif global est la mise en évidence de ce processus de production et l'évaluation des performances de ce genre de système et l'analyse des différents paramètres pouvant contribuer à l'optimisation de ce processus.

Pour atteindre notre objectif, un banc d'essai expérimental a été monté comprenant un générateur photovoltaïque, un électrolyseur d'eau de type alcalin et différentes instrumentations accompagnant notre installation.

Le générateur PV se compose de modules photovoltaïques 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.

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.

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

L'étude de l'influence de quelques paramètres sur le processus de production d'hydrogène par électrolyse d'eau a révélé les constatations suivantes :

- L'évolution du débit d'hydrogène en fonction du courant d'électrolyseur est une évolution linéaire qui dépend pratiquement des phénomènes de dissociation de l'eau : l'oxydation et la réduction qui sont effectués dans les deux électrodes (l'anode et la cathode).
- Le fonctionnement optimal du module photovoltaïque, est étroitement lié aux conditions climatiques d'une part et à la charge utilisée d'autre part (50 Wc de puissance pour un éclairement 1000W/m^2). En ce qui concerne les conditions climatiques, le panneau doit être placé dans une localité à forte insolation de sorte à extraire le maximum de puissance tout en tenant compte que l'augmentation de la température ambiante diminue le rendement du module.
- Les variations de l'éclairement solaire produisent un changement du courant d'électrolyse d'eau, suivi par une variation du débit d'hydrogène dégagé (le débit maximal est 6 ml/min pour un éclairement maximal de 700W/m^2). Ces deux paramètres conduisent à une influence du rendement du système.
- L'augmentation de tension d'électrolyseur présente une élévation du courant (1 A du courant d'électrolyseur pour une tension de 24v) à cause de l'augmentation du

nombre des électrons déplacés, résulte une croissance de la production d'hydrogène.

- L'élévation de la température et de la concentration d'électrolyte créent une croissance de conductivité ionique exige une augmentation du courant intérieur de l'électrolyseur. Un courant de 0,7A pour 70°C de température.
- Concernant la concentration d'électrolyte, les résultats montrent son effet important dans la production d'hydrogène (15 ml/min de débit d'hydrogène à concentration 28g/l de KOH). Elle favorise l'augmentation du nombre des ions existants dans la solution d'électrolyte, principalement les ions hydroxydes OH⁻ (lorsqu'on utilise un électrolyte forte KOH) conduisant à une croissance de la quantité d'hydrogène et d'oxygène produits.
- L'efficacité de l'électrolyseur est améliorée par l'augmentation de la température de fonctionnement. La valeur de la température étant limitée par l'électrolyte qui est dans notre cas l'hydroxyde de potassium KOH. Les débits d'oxygène et d'hydrogène produits par l'électrolyseur sont inhérents à la température de fonctionnement et la concentration d'électrolyte.
- La comparaison entre les trois types d'électrolytes KOH, NaOH, NaCl apparait le KOH (25% du rendement) comme le préférable électrolyte au point de mesure de son rendement et son production par rapport les autres électrolytes.

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

- Une variation saisonnière d'inclinaison des panneaux solaires au but d'augmenter la puissance PV.
- Addition d'un convertisseur DC-DC pour fixer la puissance absorbée par l'électrolyseur.
- Utilisation des batteries de stockage d'électricité dans les moments d'absence d'ensoleillement.

- Favoriser une solution d'électrolyte avec une température et une concentration élevées.
- Utilisation d'autres types d'électrodes caractérisés par leurs faibles solubilités ou l'ajout d'une membrane permettant seulement le passage des ions OH^- et des électrons.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Th. Alleau, **Le stockage des renouvelables**, FICHE 0.1, Mémento de l'Hydrogène, AFH2, 2008
- [2] AFH2 - LD, **Situation mondiale de l'énergie**, Mémento de l'Hydrogène, 2007.
- [3] R. Boudries-Khellaf ; **Etude d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire en Algérie**, Rev. Energ. Ren. p17-29 : Zones Arides ,2002
- [4] P. Malbrunot, **L'énergie et l'hydrogène**, AFH2, Mémento de l'Hydrogène 2008
- [5] Association Française de l'Hydrogène, **Pourquoi l'hydrogène?**, Version 4.2 - Février 2004
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] K. Rajeshwar, R. Mc Connell Solar, S. Licht, **Hydrogen Generation Toward a Renewable Energy Future**, Springer 2008.
- [9] Microsoft® Encarta® 2009, **Hydrogène**, Microsoft Corporation, 2008.
- [10] La filière d'hydrogène, Pourquoi l'hydrogène, CLEFS CEA N°50/51, hiver 2004/2005.
- [11] S. His, **L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ?**, Institut français de pétrole, IFP - Diffusion des Connaissances, décembre 2003

- [12] D. Mathieu, MASTRANGELO Jean-François, VALMAGE François, **Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques?**, École des Ponts Paris Tech, Mars 2004
- [13] The International Energy Agency (IEA), **Hydrogen production and storage**, Hydrogen implementing agreement, 2005
- [14] P. Marion, S. Vinot, **production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles**, fiche 3.1.1, Mémento de l'Hydrogène, AFH2, 2009.
- [15] J. Labbé, **L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés**, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité "Énergétique", 2006
- [16] AFH2, **Les données de bases physico-chimiques sur l'hydrogène**, Mémento de l'Hydrogène, FICHE 1.2, mars 2001
- [17] L. Debiais, **Production et consommation d'hydrogène aujourd'hui**, Mémento de l'Hydrogène, FICHE 1.3, AFH2, 2008
- [18] Th. Alleau, **Les piles à combustible**, Mémento de l'Hydrogène, FICHE 5.2.1, AFH2, 2008
- [19] Ministère de l'Énergie et des Mines, **Guide des énergies renouvelables**, Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables, Édition 2007
- [20] M. Belhadj, **Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque Autonome**, Mémoire de Magister option : Microélectronique -Photovoltaïque, Centre Universitaire de Béchar, 2007-2008
- [21] Y.Jannot, **Thermique solaire**, Université de Lubumbashi, octobre 2003.
- [22] Lulin, **Investigation on Characteristics and application of hybrid solar/wind power generation systems**, **Ph.D.** The Hong Kong Polytechnic University, 2004.

- [23] M. Chegaar, A Lamir, A Chibani, **Estimation global solar radiation using sunshine hours**, 4^{ème} séminaire international Physique Énergétique, Bechar 2000.
- [24] M. Gapderou, **Atlas solaire de l'Algérie**, Tome 1, 2, OPU 1983.
- [25] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Syn, **Le pompage photovoltaïque**, IEPF /Université d'Ottawa /EIER/CREPA, 1998.
- [26] T. Markvard, **Solar Electricity**, second ed. Willey, USA, 2000
- [27] R.P. Mukund, **Wind and solar power systems**, Ph.D, P.e U.S merchant Marine Academy Kings Point, New York, CRC Press LLC1999.
- [28] T. Fogelman, **Système photovoltaïque pour les pays en déventement**, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME)
- [29] A. Damien, **Hydrogène par électrolyse de l'eau**, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, 2002
- [30] Kauranen P.S, Lund P.D, Vanhanen J.P, **Development of a self-sufficient solar-hydrogen energy system**, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, n°1, pp. 99-106, 1994.
- [31] Hashimoto A and al., **Development of PEM water electrolysis type hydrogen production system for WE-NET**, proceedings of 14th WHEC, Montreal, 2002.
- [32] **Investigations on storage technologies for intermittent renewable énergies :** Evaluation and recommended R&D strategy, INVESTIRE european project, 2003.
- [33] Norsk-hydro, **Procédé de préparation de cathodes actives pour des appareils électrochimiques**, Brevet français, no 2381836, 22 sept. 1978.
- [34] V.N. Morozov et V.B. AleskovskiiI, **Soviet electrochem**, 7, 9, p. 1220-1222 (1971).
- [35] D. Hall, **Electrodes for alkaline water electrolysis**, J. Electrochem. Soc, vol. 128, no 4, pp. 740-746, avril 1981.
- [36] Office National de Météo ONM, **wilaya d'OUARGLA**, 2008

- [37] PVSYST, **logiciel pour système photovoltaïque**, version 4 .37, A. Mermoud, GAP, Université de Genève, 2009.
- [38] Solar23 RENEWABLE-INDEPENDENT-DECENTRALIZED, **Solar module SM-50**, Germany, 2007.
- [39] M.L. Louazene, **Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla**, Mémoire de Magister Option : Maîtrise d'Energie, Université EL HADJ LAKHDAR, Batna, 2008.
- [40] T. Tani†, N. Sekiguchi, M. Sakai and D. Ohta, **Optimization of solar hydrogen systems based on hydrogen Production cost**, *Solar Energy* Vol. 68, No. 2, pp. 143–149, 2000
- [41] R. Boudries, R. Dizene, **Prospects of solar hydrogen production in the Adrar region**, *Renewable Energy*, pp. 2872-2877, 2011.

Annexes

Annexe 1[37]

(Description de PVSYST)

Le logiciel PVSYST est un logiciel d'étude et de simulation de systèmes photovoltaïques, développé dans la cadre du Groupe de Physique Appliquée (GAP) de l'Université de Genève par André Mermoud.

La complexité de la simulation d'un système photovoltaïque a été approchée à différents niveaux afin de permettre son accès selon la spécificité de différents publics: architectes, ingénieurs et chercheurs. Nous avons de ce fait séparé les avant-projets (conception Préliminaire), les projets (conception de projet) et les outils de validation et de vérification d'installations existantes (outils).

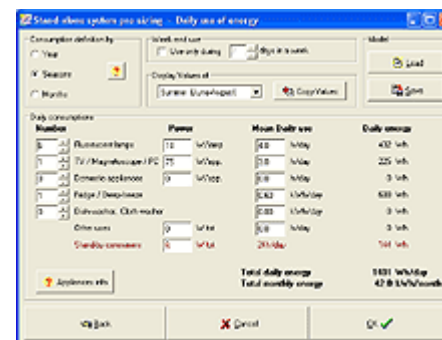
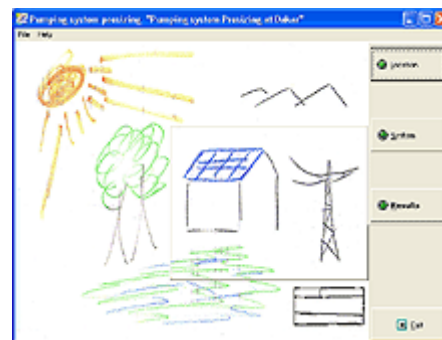
1. Conception Préliminaire

C'est le facile pré-classement d'un projet, dans 3 étapes simples :

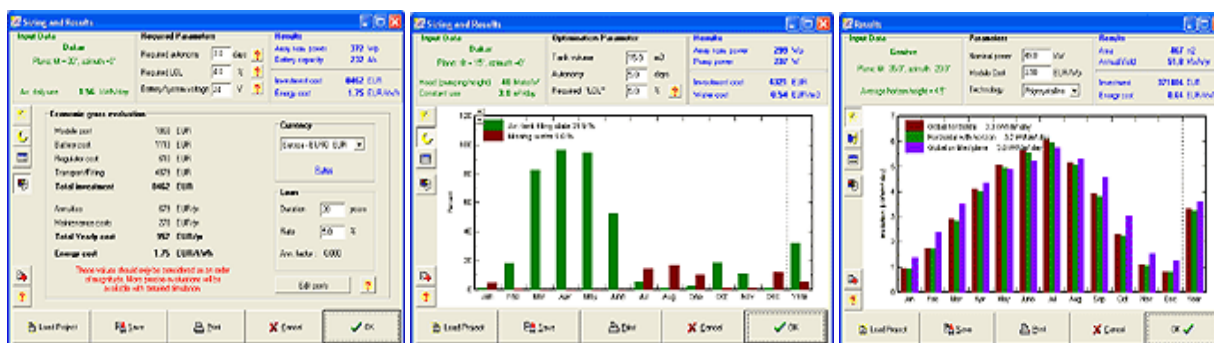
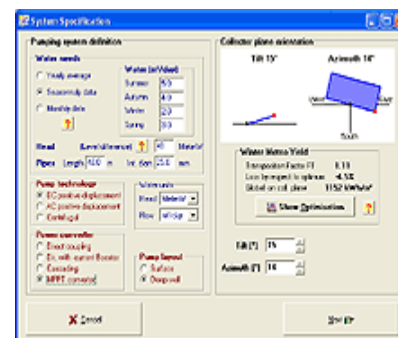
1. Choisissez l'endroit (vous pouvez également définir une ligne d'horizon)
2. Définissez le paramètre de système
3. Voyez les résultats, pouvez être enregistré ou imprimé.

Pour **les systèmes** reliés à un réseau, et particulièrement pour l'intégration de bâtiment, ce niveau architecte-orienté demande le secteur disponible, la puissance nominale ou le rendement d'énergie désirés. D'autres paramètres sont les propriétés générales au sujet de la technologie PV (mentionnant des couleurs, connexes à la technologie; transparent, etc..), disposition de support, ventilation.

Pour **les systèmes** autonomes, cet outil propose un classement par taille pour la capacité exigée de puissance et de batterie PV, donnés le profil de la charge d'un utilisateur et la probabilité acceptable qu'elle ne sera pas satisfaite (appelé probabilité d'" Perte-de-charge ", équivalentes à l'inverse " de la fraction solaire").



Pour **des systèmes** de pompage, l'utilisateur devrait indiquer les besoins de l'eau et les conditions de pompage (profondeur de pompage). Pour une " Perte-de-charge " désirée, l'outil estimera la puissance exigée des pompes et du champ PV.



Dans ce **mode " de conception préliminaire "** les évaluations de rendement de système sont exécutées instantanément en valeurs mensuelles, en utilisant seulement très peu de caractéristiques générales d'un système, sans indiquer les composants spécifiques de système. Une évaluation approximative du coût de système est également disponible.

2. Conception de projet

La présente partie de génie-orienté vise à exécuter une conception complète du système en utilisant des simulations horaires détaillées. Ce niveau offre à l'utilisateur:

Une grande base de données des composants PV, d'endroit et des emplacements météorologiques.

Définition de l'orientation plan (avec la possibilité de tracking des plans, double-orientation ou le support de shed/sun-shields).

Un système expert pour faciliter la définition de disposition de système PV.

Paramètres détaillés permettant l'analyse fine d'effets, y compris des pertes thermiques de comportement, de câblage et de disparité, vraie perte de qualité de module, pertes d'angle d'incidence.

Définition d'horizon pour "ombrager loin" des calculs.

Un outil 3-D CAO pour « près d'ombrager » a détaillé des études.

Une évaluation économique détaillée à exécuter en utilisant de vrais prix composants, coûts additionnels et états d'investissement, dans n'importe quelle devise.

Formes condensées de résultat qui récapitulent tout le paramètre de système et les parcelles de terrain et les tables de résultat les plus significatives pour la simulation. Ces formes sont aisément disponibles sur l'imprimeur, ou peuvent être insérées dans les documents par la planchette.

D'autres résultats détaillés disponibles pour plusieurs douzaines de variables de simulation, qui peuvent être montrées en revue mensuelle, tableaux quotidiens ou horaires ou graphiques, être imprimées ou transférées à l'autre logiciel.

3. Outils

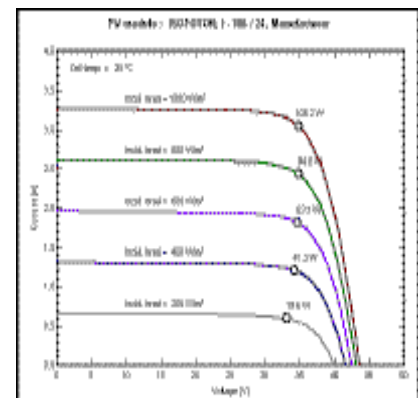
Les outils incluent **la gestion de base de données de météo** avec les affichages graphiques ou les tables des données.

PVsys inclut une base de données d'environ 330 emplacements dans le monde. Puisque la version 4,3 de PVsys peut facilement importer des données de météo de beaucoup de sources météorologiques populaires (Meteonorm Satellight USA TMY2 Helioclim-2 WRDC NASA-sse PVGIS-esra et la base de données complète du logiciel de Retscreen). Des dossiers faits sur commande de météo peuvent être facilement importés dans n'importe quel format d'ASCII (American standard code for information interchange)

La base de données composante se tient plus de 1750 modules PV, 650 inverseurs, presque 100 pompes et douzaines solaires de batteries ou de modèles de régulateur.

Les mises à jour faites sur commande de la base de données sont très faciles, sur la base des fiches techniques habituelles de fabricant.

La présente partie fournit également d'autres **outils graphiques ou tabulaires spécifiques**. La plupart d'entre eux résultats de rendement qui peuvent être exportés vers l'autre logiciel:

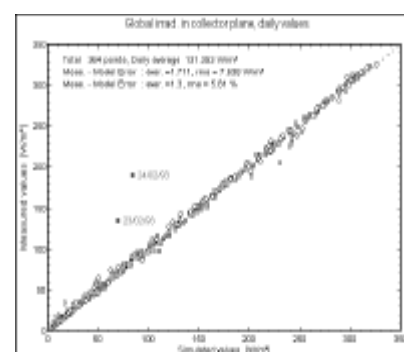


rendement étendu de la géométrie solaire (chemins du soleil, angles d'incidence, etc.),
 rendements clairs d'irradiation de ciel sur les plans inclinés,
 calculs rapides de météo sur les plans inclinés, avec l'horizon, hangars ou nuances de soleil-boucliers,
 parcelles de terrain de facteur de transposition, pour l'optimisation plate d'orientation,
 génération des dossiers synthétiques horaires de météo des valeurs mensuelles,
 parcelles de terrain horaires de météo, et calculs d'irradiation sur les plans inclinés, aussi avec la comparaison de sur-graphique avec le modèle de temps clair,
 divers graphiques du comportement du composant (modules PV, batteries, pompes),
 comportement électrique de champs PV sous des nuances partiels, disparité ou double-orientation,
 outil d'optimisation de tension d'opération,

Ceci constitue **un service didactique puissant** pour l'éducation aussi bien que pour les ingénieurs solaires expérimentés.

La présente partie offre également un outil général pour **importer des données mesurées** enregistrées sur de vrais systèmes PV (dans presque tout format d'ASCII).

Il effectue des comparaisons **étroites entre les valeurs mesurées et simulées** tenant compte de détecter et d'analyser même des mesures très petits de vrais systèmes.



Annexe 2

(Programme d'étude les caractéristique I-V des panneaux solaires)

```

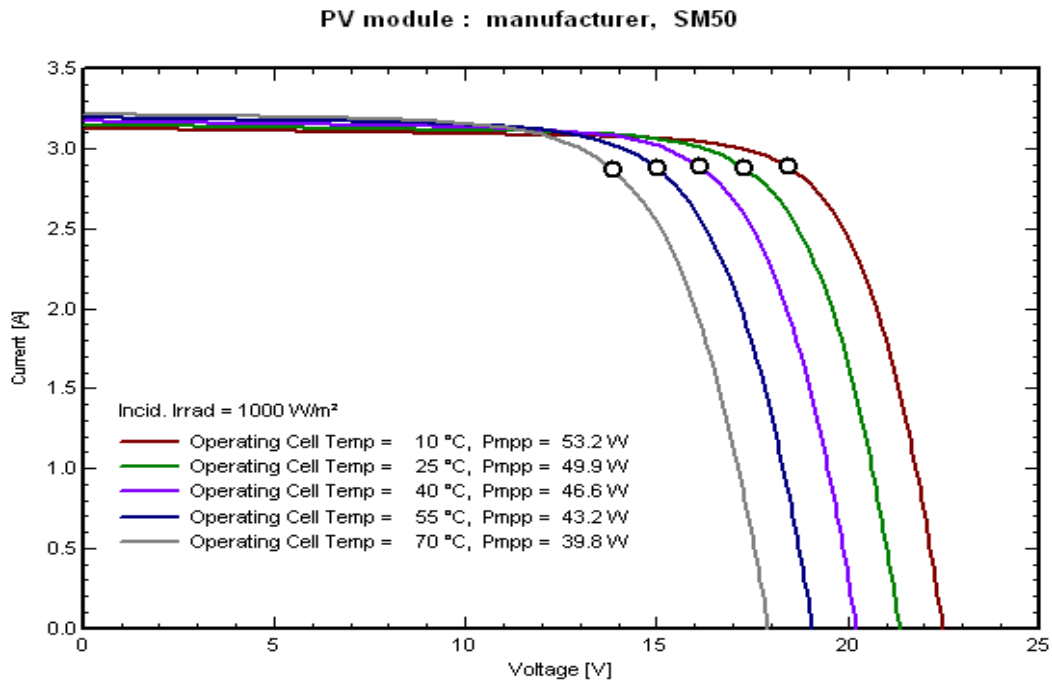
%%%%%%%% les caractéristiques I-V des panneaux solaires variés avec la
température et l'éclairement solaire *****
clear;
icc = 3.15; % courant de court circuit
vco = 21.35;%tension de circuit ouvert
ipm = 2.87; %courant de puissance maximal
vpm= 17.39; %tension de puissance maximal
rs=0.236; % résistance série
qref= 1000;% l'éclairement de référence
ta= 25; % température ambiante de référence
noct = 45.3;
tref = ta+qref/800*(noct-20);% température de jonction de référence
beta = -2.3;%coefficient de la tension en fonction de température
alpha= 0.0148;%coefficient de courant en fonction de température
ns = 1;%nombre des panneaux en séries
np=1;% nombre des panneaux en parallèles
q=782;%l'éclairement solaire mesuré
t=40;%température ambiante mesuré
c2=(vpm/vco-1)/log(1-ipm/icc);
c1= (1-ipm/icc)*exp(-vpm/(c2*vco));
k=1;
while q<=950
vref= 0;
i=1;
while vref<=vco
v1 = vref;
tc = t+q/800*(noct-20);
delt=tc-tref;
deli=alpha*q/qref*delt*(icc*(1-c1*(exp(vref/(c2*vco))-1)))+icc*q/qref-
icc;
beta = 0.004*v1;
delv= -beta*delt-rs*deli;
vg=ns*(v1+delv);% tension de générateur
ig =np*icc*(1-c1*(exp(vref/(c2*vco))-1))+np*deli;% courant de générateur
x(i,k) = vg;
y(i,k)=ig;
vref=vref+vco/1000;
i=i+1;
end;
t=t;
q=q+100;
k=k+1;
end;
y(:,1)
plot(x(:,1),y(:,1),('k'))
axis([0,25,0,3])
xlabel ('V(V)')
ylabel ('I(A)')

```

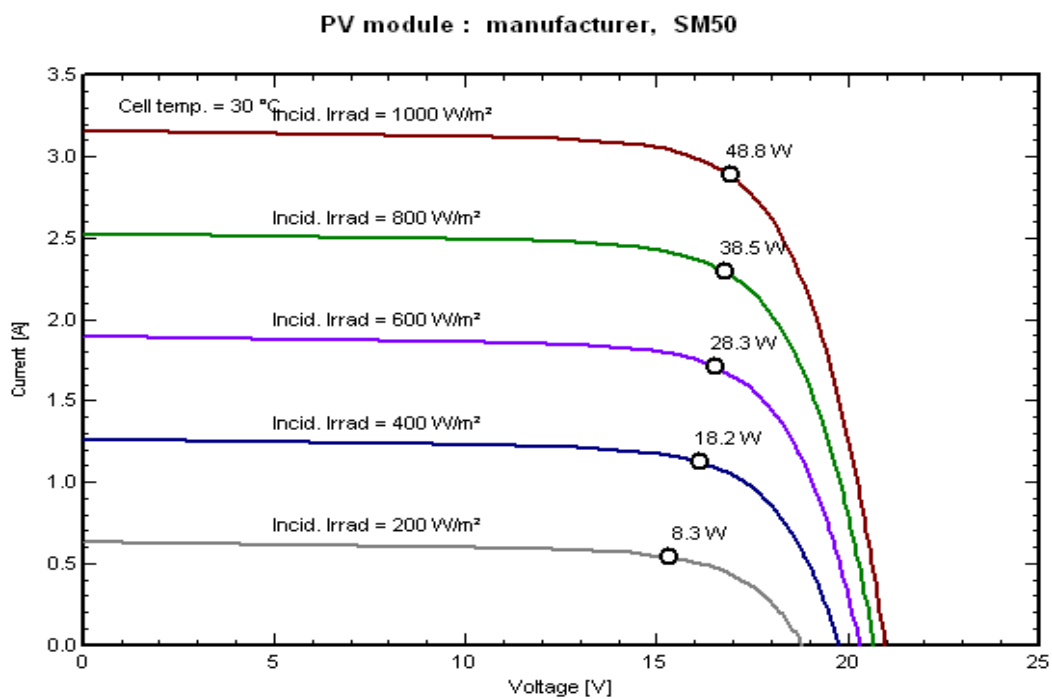
Annexe 3

(Les caractéristiques des panneaux solaires)

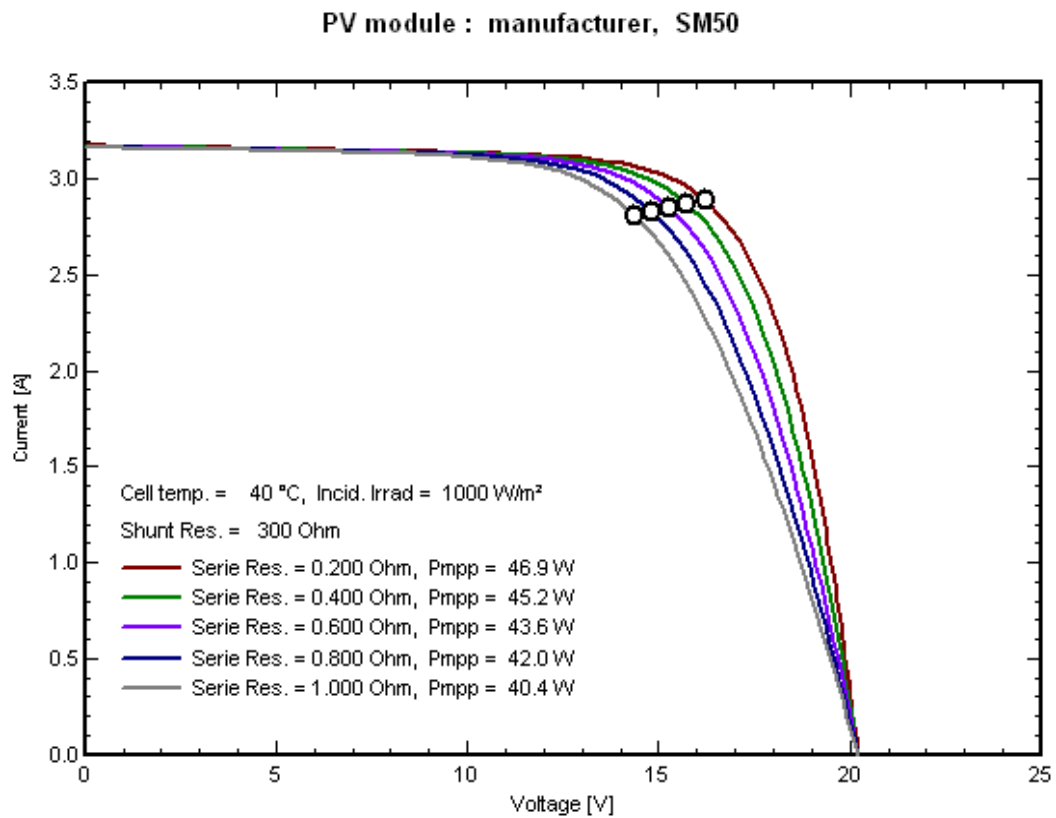
1. Effet de la température sur les caractéristiques I-V



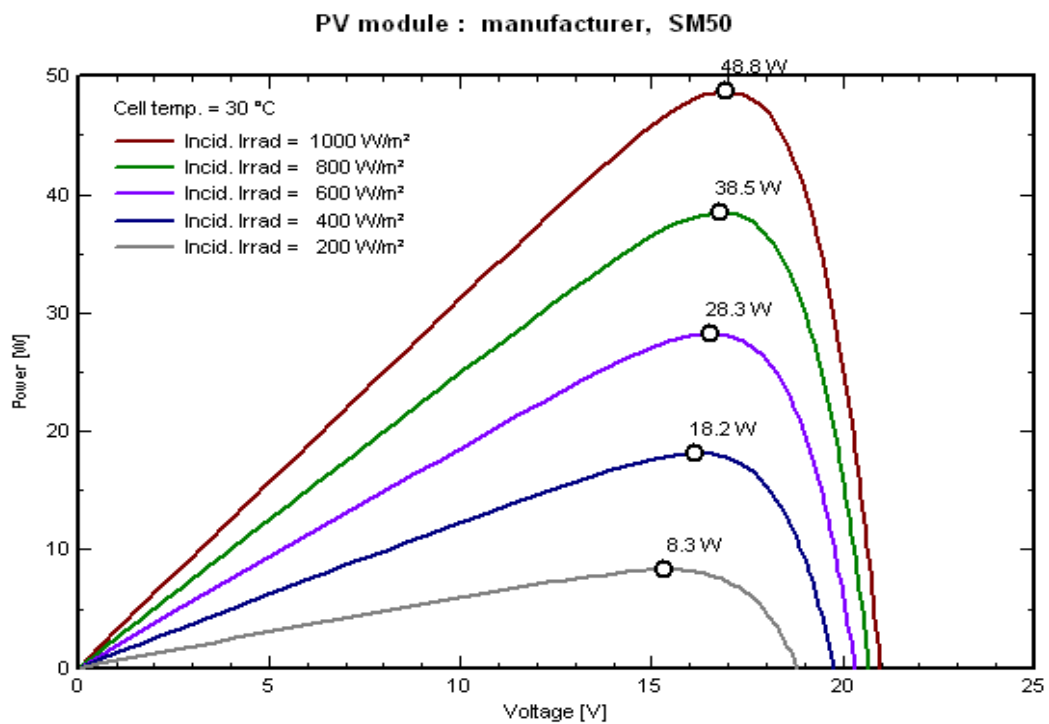
2. Effet de l'éclairement solaire sur les caractéristiques I-V



3. Effet de la résistance en série sur les caractéristiques I-V

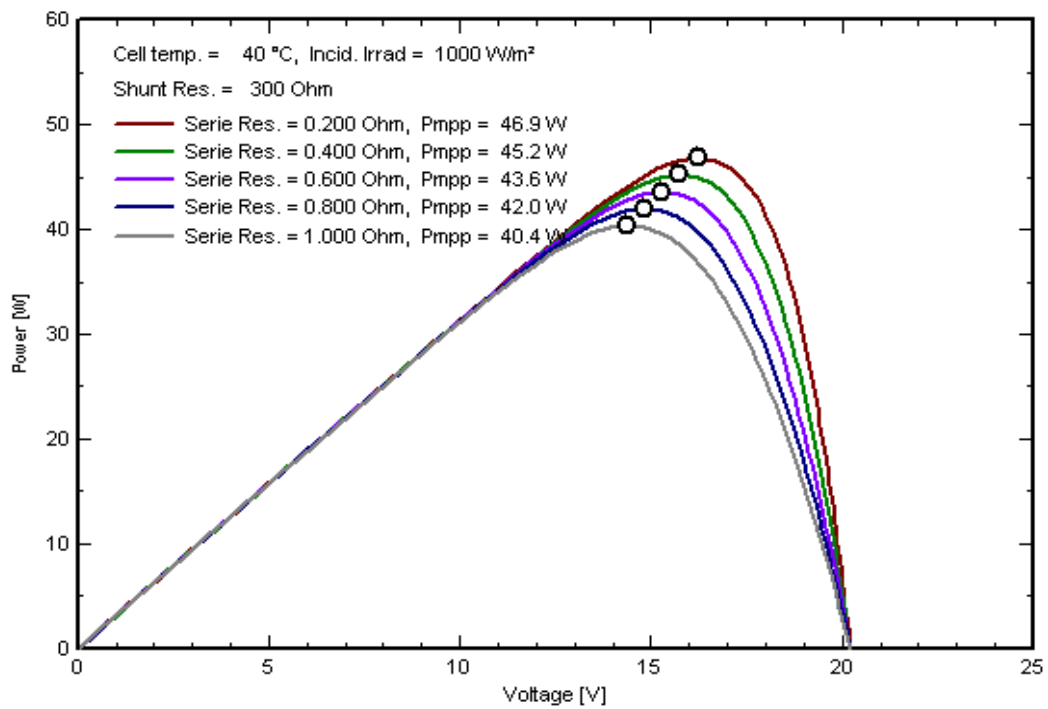


4. Effet de l'éclairement solaire sur les caractéristiques P-V



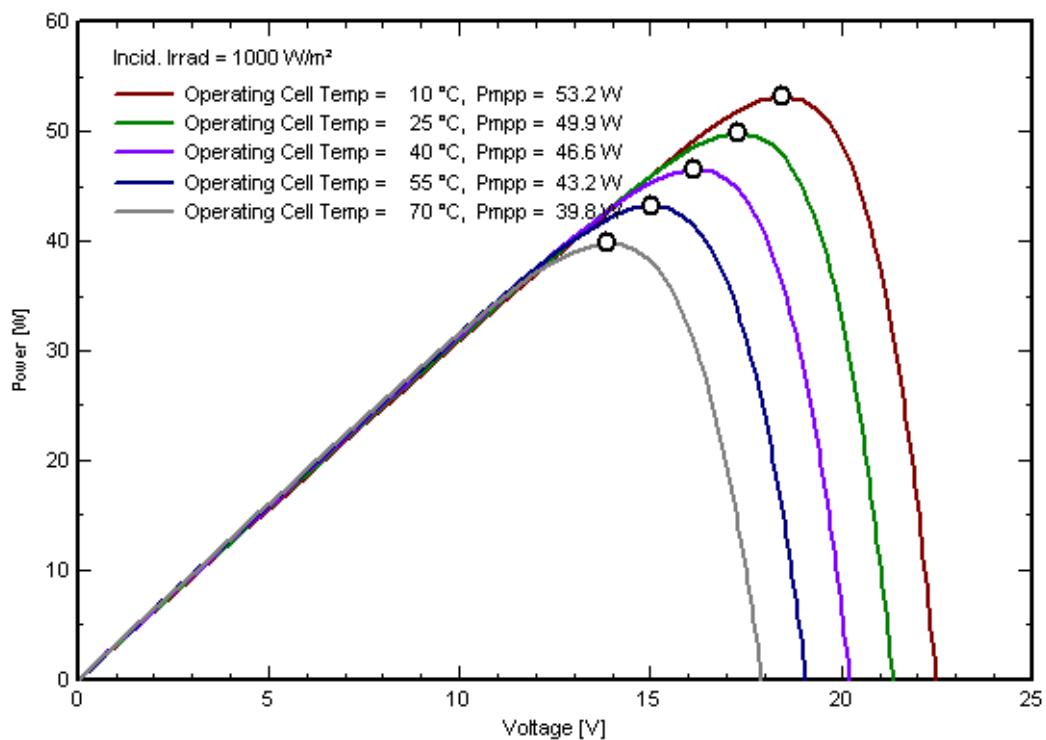
5. Effet de la résistance en série sur les caractéristiques P-V

PV module : manufacturer, SM50



6. Effet de la température sur les caractéristiques P-V

PV module : manufacturer, SM50



Résumé:

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

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

Cette production offrira non seulement une énergie propre mais aussi et surtout permettra d'augmenter et de diversifier ses ressources énergétiques.

L'objectif du présent travail est de développer une installation de production de l'hydrogène solaire, en raison de ses avantages par rapport aux autres combustibles (le gaz naturel, pétrole).

Nous effectuons l'expérimentation par un procédé de production d'hydrogène propre et rentable. Le système est constitué des panneaux photovoltaïques et d'un électrolyseur.

Les panneaux photovoltaïques, alimentent l'électrolyseur en énergie électrique. L'électrolyseur produit l'hydrogène et l'oxygène. Chaque étape du processus tels que la conversion photovoltaïque, l'électrolyse, ont été réalisés à l'échelle laboratoire où on a fait une analyse de fonctionnement de l'ensemble du système.

Les résultats obtenus montrent l'influence de quelques paramètres tels que l'éclairement solaire, température d'électrolyte, concentration de l'électrolyte, le choix d'électrolyte, la tension et le courant de la cellule d'électrolyse.

Mots clés : énergie solaire, conversion d'énergie, hydrogène, électrolyse de l'eau, photovoltaïque.

Abstract:

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

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

This production will not only offer up a clean energy but more importantly will permit increase and diversify its energy resources.

The objective of this work is to develop a facility for solar hydrogen production, due to its advantages over other fuels (natural gas, oil).

We conduct experiments by a clean and profitable method for hydrogen production. The system consists of photovoltaic panels and an electrolyzer.

Photovoltaic, fuel the electrolyzer by electrical energy. The electrolyzer produces hydrogen and oxygen. Each step of the process such as photovoltaic, electrolysis, have been implemented on a lab where we did an analysis of operation of the entire system.

The results obtained show the influence of some parameters such as solar irradiance, electrolyte temperature, electrolyte concentration, the electrolyte choice, voltage and current of the electrolytic cell.

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

مختصر

الهيدروجين هو الوقود وحامل الطاقة للمستقبل. نعي بميدروجين الطاقة الشمسية، هو إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية.

أنعم الله على الجزائر بموقع مناسب جدا لاستخدام الطاقة الشمسية، حيث لها مدة إشعاع وكمية طاقة محترقة مهمة جدا يجعل من الجزائر مكان مناسب لإنتاج الهيدروجين بالطاقة الشمسية. وهذا الإنتاج ليس فقط باستخدام طاقة نظيفة ولكن الأهم هو زيادة وتنوع مصادر الطاقة.

الهدف من هذا العمل هو تطوير منشأة لإنتاج الهيدروجين بالطاقة الشمسية، وذلك بسبب مزاياه مقارنة بغيره من أنواع الوقود (الغاز الطبيعي والنفط). نجري التجارب باستعمال طريقة لإنتاج الهيدروجين نظيفة ومرجحة. حيث يتألف النظام من ألواح الخلايا الشمسية ومحلل كهربائي للماء. ألواح الخلايا الشمسية تمول المحلل الكهربائي للماء بالطاقة الكهربائية. المحلل الكهربائي ينتج الهيدروجين والأوكسجين. كل خطوة من خطوات العملية مثل التحليل الكهربائي، و الكهروضوئية، تم تنفيذها بالمختبر حيث قمنا بتحليل عمل النظام بأكمله.

وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من نفوذ بعض المقادير مثل الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة المنحل بالكهرباء، تركيز المنحل بالكهرباء، اختيار المنحل بالكهرباء، والجهد والتيار الكهربائي للمحلل الكهربائي للماء.

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