

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Electrotechnique Industriel
Présenté par :

KHERIDLA Youcef

KHINECHE Kaddour

Thème:

***Modélisation Et Simulation D'un
Système De Production D'hydrogène
Par Voie Photovoltaïque***

Soutenu publiquement

Le: 08/06/2014

Devant le jury:

M ^{dme} ZIDANI Ghania	MA (A)	Président	UKM Ouargla
M ^f DJAFOUR Ahmed	MC (B)	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^f LOUAZENE Mohamed Lakhdar	MA (A)	Examineur	UKM Ouargla
M ^f KADRI Ahmed Yacine.	MA (B)	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2013/2014

Résumé

L'énergie est la base pour le développement actuel dans le monde dans les différents domaines, mais les sources traditionnelles d'énergie comme le charbon, pétrole et l'énergie nucléaire, possèdent des graves répercussions à l'environnement, et en plus de ça ils sont des énergies non renouvelables. Et ici apparaitre l'énergie renouvelable comme une solution de rechange, comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne et l'énergie marine.

L'Algérie est l'un des états importants qui possède des moyennes climatiques parmi lesquelles l'exploitation de l'énergie renouvelable.

Ce qui nous motive pour faire ce travail qui étudié la production d'hydrogène par un système hybride (générateur photovoltaïque – électrolyseur PEM), dans le but de minimise les pertes dans le système, par la modélisation des éléments de système et la simulation de fonctionnement par l'exécution d'un organigramme sous MATLAB. Pour augmente la quantité d'hydrogène produite et rendre cette solution rentable par rapport au d'autre solution, afin de facilité l'utilisation d'hydrogène comme élément de stockage d'électricité par l'utilisation des piles à combustibles, d'après ce qu'il possède des caractéristiques physiques et chimiques.

Mots clé : Hydrogène, électrolyseur PEM, Photovoltaïque

ملخص:

تعتبر الطاقة حجر الزاوية في التطور الذي يشهده العالم في مختلف المجالات، ولكن المصادر التقليدية للطاقة كالفحم، البترول والطاقة النووية لها تأثير خطير على البيئة، و بالإضافة لذلك فهته الطاقات غير متجددة (ناضبة).

وهنا تظهر الطاقات المتجددة كبديل عنها، ومن بينها الطاقة الشمية وطاقة الرياح وطاقة المياه وطاقة الأمواج.

الجزائر تعتبر من الدول المهمة التي تمتلك إمكانات بيئية ضخمة تسمح لها باستغلال هاته الطاقات.

هذا ما حفزنا للقيام بهذا العمل الذي يتناول دراسة نظام إنتاج الهيدروجين باستعمال نظام هجين (مولد فوطوفولطائي- محلل كهربائي). بهدف تخفيض الضياعات في النظام، من خلال نمذجة، مكونات النظام ثم محاكاة عمل هذا النظام عن طريق إنشاء وتنفيذ برنامج معلوماتي بهدف رفع كمية الهيدروجين المنتجة لتسهيل استعمال الهيدروجين كمخزن للطاقة الكهربائية لاستعماله كوقود من خلال خلايا الوقود لما يتوفره من خصائص كيميائية وفيزيائية مميزة.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين، الفوطوفولطائي، المحلل الكهربائي.

Remerciements

*En premier lieu, nous remercions Dieu qui nous a procuré
.ce succès*

*Promoteur "Dr. A. DJAFOUR " pour ses conseils
précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'elle
nous a apportés durant l'étude et la réalisation de ce
.document*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aux messieurs
le président et les membres de jury d'avoir accepté
.d'examiner et d'évaluer notre travail*

*Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous
ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du
.présent travail*

*Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant
tout, trouvent ici l'expression de nos remerciement les
plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides,
soutien et encouragement afin de nous assurer cette
.formation dans les meilleures conditions*





Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à
Mes très chères parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont
jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

Mes très chères sœurs

Mes très chers frères

Ma grand-mère qui Dieu le garde

Toute ma famille

Tous mes amis

Kaddour



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

*Mes très chères parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont
jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

Mes très chers frères Ahmed, Badri, amine, moussa, adel, Kaddour

Mes très chères sœurs et Tous mes amis d'université et de travail

Ma grand-mère qui Dieu le garde

Toute ma famille

Youcef

Nomenclature

THT	Tetrahydrothiophène
POX	Oxydation partielle
SOE	Solid Oxide Electrolyser
EHT	électrolyseur Haut température
PEM	membrane échangeuse de protons
K_T	Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté
ρ :	L'albédo au sol
β	L'angle d'inclinaison
ω_S	L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal
ω'_S	L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné
PN	:Positif Négatif
I_D	Courant inverse de diode
I_0	Courant de saturation de diode, dépendant de la température
I_{Light}	Photocourant, dépendant de l'intensité de l'irradiation
R_{SH}	Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant
R_S	Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts
V_{PV}	Tension aux bornes de la cellule
I_{PV}	Courant fourni par la cellule
m	Indice du matériau (compris entre 1 et 2 selon de la technologie)
k	Constante de Boltzmann
T	Température en Kelvin
q	Charge de l'électron
V_{oc}	Tension de circuit ouvert
I_{cc}	Courant ce court-circuit
GPV	générateur photovoltaïque
NOCT	Température Nominale de Fonctionnement de cellule solaire
T_{cell}	Température de la cellule
T_{amb}	Température ambiante
G	Irradiation solaire (kW/m^2).

EVA	Ethylène-Vynil-Acétate
A	Facteur d'idéalité.
N_p	Nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque
N_s	Nombre de module série dans le champ photovoltaïque
I_{gén}	Le courant délivré par le générateur
α	Le facteur de température de courant
β	Le facteur de température de tension
V	volume d'hydrogène produit (ml)
Q	Débit de production d'hydrogène (ml/s)
R	Constant de gaz parfait
Z	Nombre d'électron requis pour libérer une molécule
s	Nombre de cellules séries d'électrolyseur
p	Nombre de cellules parallèle d'électrolyseur
N_{cellules}	Nombre de cellules d'électrolyseur
F	Constant de Faraday
P	pression atmosphérique
E_h	Pouvoir calorifique d'H ₂ (12.75 J/ml)
I_f	Le courant de point de fonctionnement.
V_f	La tension de point de fonctionnement
f(x_n)	Le dérivé de la fonction f(x _n)
x_n	La présente itération.
x_{n+1}	L'itération suivante.
E	éclairage (w/m ²)
S	surface de générateur
η_e	Le rendement d'électrolyseur
η_s	Le rendement global
η_u	Le rendement d'adaptation
η_m	Le rendement de module photovoltaïque

LISTE DES FIGURES

N° figure	TITRE	PAGE
Fig I.1	Production d'énergie mondial primair	03
Fig I.2	Liaisons hydrogène dans l'eau	07
Fig I.3	Cellule d'électrolyse de l'eau	09
Fig I.4	Schéma de fonctionnement d'un four solaire	12
Fig I.5	Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de 'hydrogène	13
Fig II.1	Composantes du rayonnement solaire	17
Fig II.2	Spectre d'irradiantes solaire	19
Fig II.3	Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque	20
Fig II.4	Caractéristiques d'une jonction PN sous éclairment.	21
Fig II.5	Caractéristique de la convention diode générateur	21
Fig II.6	Schéma équivalent le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN	22
Fig II.7	Circuit équivalent d'une cellule PV et schéma conventionnel d'une cellule PV	22
Fig II.8	Différentes techniques de cellules photovoltaïques	23
Fig II.9	Courbes courant -tension sous différentes températures et niveaux d'irradiation.	25
Fig II.10	Module photovoltaïque	26
Fig II.11	Boîte de jonction	26
Fig II.12	Branchement des modules en séries	27
Fig II.13	Branchement des modules en parallèles.	28
Fig II.14	Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque	28
Fig II.15	Système synoptique de production de l'hydrogène solaire	30
Fig III.1	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	31
Fig III.2	Simulation avec température fixé et différents éclairments (I-V) pour T=25°C	36
Fig III.3	Simulation avec température fixé et différents éclairments (P-V) pour T=25°C	37

Fig III.4	Simulation avec éclairage fixé et différents températures (I-V) pour $E=1000\text{W/m}^2$	37
Fig III.5	Simulation avec éclairage fixé et différents températures (P-V) pour $E=1000\text{W/m}^2$	38
Fig III.6	Simulation de la caractéristique (I-V) avec des données réelles du site de Ouargla	38
Fig III.7	L'électrolyse PEM	39
Fig III.8	Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur	39
Fig III.9	Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimique	40
Fig III.10	Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimental et simulé pour $T_{el}=80^\circ\text{C}$	43
Fig III.11	Point de fonctionnement du système	44
Fig III.12	Caractéristiques (I-V) du couplage, une cellule d'électrolyseur- module PV	47
Fig III.13	La variation de rendement d'utilisation	49
Fig III.14	La variation des rendements calculés	49
Fig III.15	Variation d'éclairage et température en fonction de temps	50
Fig III.16	Caractéristiques (I-V) de couplage avec $s=8$, $p=1$	51
Fig III.17	Variation de courant et tension en fonction de temps	51
Fig III.18	Evolution de débit en fonction de temps	52
Fig III.19	Variation de puissance d'électrolyseur en fonction de temps	52
Fig III.20	Evolution de volume en fonction de temps	52
Fig III.21	Variation des rendements en fonction de temps	53
Fig III.22	Variation de rendement d'utilisation en fonction de temps	53

Liste des tableaux

Tab I.1	Données techniques actuelles(2008) des électrolyseurs	10
TabII.1	Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium	24
Tab III.1	Caractéristique de module photovoltaïque type BP 585F	36
Tab III.2	Les éclairagements et les températures de la journée de 24/4/2004	38
Tab.III.3	Données expérimentaux d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-V)	41
Tab.III.4	Caractéristiques du couplage d'une cellule d'électrolyseur avec un module	48

SOMMAIRE

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	01
Chapitre I : L'hydrogène Comme Un énergie De Future	
I.1. INTRODUCTION.....	03
I.2. LES SOURCES D'ENERGIES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	03
I.2.1. Le Charbon	04
I.2.2. Le Pétrole	04
I.2.3. Le Gaz Naturel	04
I.2.4. Les Sources D'énergie Nucléaires	05
I.3. LES ENERGIES RENOUVELABLE.....	05
I.3.1. Energie Solaire Photovoltaïque.....	05
I.3.2. Energie Solaire Thermique.....	06
I.3.3. Energie Eolienne.....	06
I.3.4. La Biomasse	06
I.4. L'HYDROGENE COMME ENERGIE STOCKE INTERMEDIAIRE.....	06
I.4.1. Caractéristiques de L'hydrogène	07
I.4.2. Les Avantages	07
I.5. LES MAJOR METHODES DE PRODUCTION D'HYDROGENE	08
I.5.1. production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures	08
I.5.2. Production d'hydrogène à partir du charbon	09
I.5.3. l'électrolyse de l'eau	09
I.5.4. Production nucléaire d'hydrogène	10
I.5.5. Production à partir des énergies renouvelables	11
I.5.5.1 Production d'hydrogène en utilisant la biomasse	11
I.5.5.2. solaire thermique	12
I.6. STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE	12
I.6.1. Le stockage sous forme gazeux	12
I.6.2. Le stockage sous forme liquide.....	13
I.6.3. Le stockage sous forme d'hydrures métalliques	13
I.6.4. Le stockage sous basse pression.....	13
I.7. TRANSPORT DE L'HYDROGENE	14
I.7.1. transport par route	14
I.7.2. Transport par mer	14

Sommaire

I.7.3. le transport de l'hydrogène par gazoducs	14
I.8. CONCLUSION	15
Chapitre II : L'énergie Photovoltaïque	
II.1. INTRODUCTION	16
II.2. PARAMETRES DES RADIATION SOLAIRES	16
II.2.1. Composants de la radiation solaire	16
a- Rayonnement direct	16
b- Rayonnement diffus	16
c-Rayonnement réfléchis	17
II.2.2 L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée	17
II.2.3.Spectre du rayonnement.....	18
II.2.4. Durée d'insolation	19
II.3. CONVERSION D'ENERGIE	19
II.3.1. Energie solaire	19
II.3.2. Effet photoélectrique et jonction PN.....	20
II.3.3. La cellule photovoltaïque	21
II.3.4. Le silicium et ses propriétés	23
II.3.5. Technologie de cellules photovoltaïque	23
a. Silicium polycristallin	24
b. Silicium monocristallin	24
c. Silicium amorphe en couche mince.....	24
II.3.6. Impact de la température et l'irradiation solaire sur la caractéristique I-V.....	25
II.3.7.Le générateur photovoltaïque.....	26
II.3.8.1. Le panneau solaire	27
a. Montage en série	27
b. Montage en parallèle	27
II.4. DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES PV.....	28
II.4.1. Système autonome sans batterie.....	28
II.4.2. Système autonome avec batterie.....	29
II.4.3. Système fonctionnant au fil du soleil.....	29
II.4.4. Système avec appoint électrique.....	29
II.5. SYSTEME DE PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE.....	29
II.6. CONCLUSION	30

Sommaire

Chapitre III : Modélisation De Système De Production d'Hydrogène

III.1. INTRODUCTION.....	31
III.2. Modélisation de générateur photovoltaïque	31
III.2.1. Modèles de simulation de la caractéristique I-V.....	31
III.2.2. Paramètres de champ photovoltaïque	33
III.2.3. Evolution de la caractéristique (I-V)	34
III.2.4. l'organigramme pour tracer la caractéristique (I-V)	35
III.2.5. Résultats de Simulation	36
<i>a) Résultat de Simulation avec température fixé $T=25\text{ °C}$ et différentes éclairagements</i>	36
<i>b) Résultat de simulation avec un éclairement fixé $E=1000\text{ w/m}^2$ et différentes températures.</i>	37
<i>c) Résultat de simulation avec des données réel de site Ouargla</i>	38
III.3. MODELISATION D'ELECTROLYSEUR	39
III.3.1. Modèle d'électrolyseur.....	39
III.3.2. La caractéristique courant-tension d'électrolyseur	42
III.4. MODELISATION DE COUPLAGE (PV-ELECTROLYSEUR)	43
III.4.1. Calcul du point de fonctionnement.....	44
III.4.2. Organigramme de couplage direct.....	46
III.4.3. Les résultats de simulation.....	47
<i>a) Les caractéristiques (I-V) du couplage</i>	47
<i>b) Le rendement d'utilisation (adaptation)</i>	49
<i>c) Rendement de système et d'électrolyseur</i>	49
III.5. DIMENSIONNEMENT D'ELECTROLYSEUR.....	50
III.5.1 Résultat de simulation.....	50
<i>a) Caractéristique de couplage</i>	51
<i>b) Tension et courant d'électrolyseur</i>	51
<i>c) Débit d'hydrogène</i>	52
<i>d) La puissance d'électrolyseur</i>	52
<i>e) Volume d'hydrogène</i>	52
<i>f) Rendement de système et d'électrolyseur</i>	53
<i>g) Rendement d'utilisation</i>	53

Sommaire

III.6. CONCLUSION.....	54
Conclusion Générale	
CONCLUSION GENERALE.....	55
Bibliographie	56
Annexes	59

INTRODUCTION
GENERALE

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causé par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer à l'être. Une énergie renouvelable est une énergie utilisant des éléments naturels, renouvelés plus rapidement qu'ils ne sont consommés. Ainsi, le solaire, l'hydraulique, le géothermique, l'éolien sont des énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement.

Avec la récente catastrophe nucléaire de Fukushima au Japon, le recours aux énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement apparaît comme une des meilleures alternatives aux énergies fossiles. Bien que de nombreuses applications existent déjà. L'effort de recherche dans ce domaine s'est intensifié, pour que l'énergie de demain soit la plus verte possible.

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. Concernant l'Algérie, un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, le Nord méditerranéen et le Sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recours aux énergies renouvelables.

La conversion photovoltaïque du rayonnement solaire en électricité est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules solaires. Un système couplant un champ photovoltaïque et un électrolyseur permet de stocker l'électricité par l'intermédiaire d'un stockage sous forme de gaz (l'hydrogène).

Comme substitut aux énergies fossiles, l'hydrogène possède d'excellentes propriétés physico-chimiques et thermiques lui conférant la qualité de combustible universel. Ce vecteur d'énergie est le seul qui peut être produit à partir de l'eau et d'une large variété de sources d'énergies renouvelables, puis utilisé sans être préjudiciable pour l'environnement[1].

L'objectif de notre mémoire est de contribuer à une meilleure compréhension d'une nouvelle technologie de production et de stockage d'une énergie propre. Cette étude est conçue pour susciter de futurs travaux dans ce domaine.

Dans cette étude nous présentons une étude par simulation d'un système photovoltaïque en vue de produire de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau, la production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques, on utilisant les données climatiques de la région de Ouargla. La modélisation des éléments du système a été présentée et un organigramme

pour la simulation des performances de système a été exécuté sous MATLAB, pour la détermination des conditions les plus favorables pour une meilleure production d'hydrogène.

Ce travail a été organisé et structuré en trois chapitres:

Le premier chapitre représente les énergies non renouvelable et ces inconvénients, et d'une façon générale l'hydrogène, ces caractéristiques et ces modes de production.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques.

Le troisième chapitre est consacré l'étude d'un système de production d'hydrogène solaire par le couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur PEM. Nous avons présenté des modèles mathématiques qui décrivent les comportements électriques du panneau photovoltaïque et de l'électrolyseur. La fin du chapitre concerne la simulation de couplage direct pour la production de l'hydrogène. D'après les résultats obtenus, il est possible de choisir le système adéquat de production d'hydrogène.

Enfin nous terminons par une conclusion générale.

*L'HYDROGENE COMME
ENERGIE
DE FUTURE*

I.1. INTRODUCTION :

L'hydrogène pouvant être produit à partir des énergies fossiles pétrole, gaz ou charbon à partir d'eau grâce aux énergies renouvelables hydraulique, solaire ou éolien ou grâce au nucléaire, ou encore à partir de la biomasse, le gaz dihydrogène (de symbole H₂, appelé communément hydrogène) est un vecteur d'énergie universel. Ces différents moyens de synthèse ont comme principaux avantages de pouvoir produire l'hydrogène dans n'importe quel endroit du globe en fonction des sources d'énergies localement disponibles, ce qui permettrait à de nombreux états d'aboutir à une certaine indépendance énergétique. «Certaine», car l'hydrogène en tant que vecteur énergétique ne pourra résoudre seul les problèmes annoncés de pénurie en énergies fossiles.

Elles peuvent être utilisées dans des domaines d'applications comme les transports, la production d'électricité et de chaleur pour des habitations ou le secours électrique.

I.2. LES SOURCES D'ENERGIES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX :

Une énergie non renouvelable est une source d'énergie dont la capacité à se renouveler est faible voire inexistante à l'échelle humaine. Son utilisation est limitée car la consommation de cette source d'énergie par l'homme est plus rapide que sa régénération à l'inverse des sources. Les énergies non renouvelables représentent 89% de l'énergie consommée en 2009 (d'après l'agence internationale de l'énergie).

On distingue généralement les types suivant d'énergie non renouvelable :

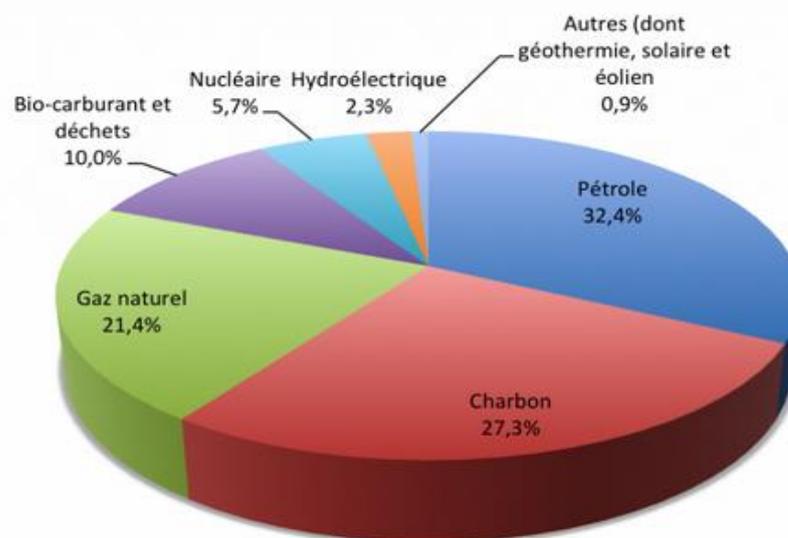


Fig.I.1 : Production D'énergie Mondial Primair [02]

I.2.1. Le Charbon :

Le charbon est le combustible fossile le plus anciennement utilisé. Il a rendu possible la première révolution industrielle à la fin du 18^{ème} siècle en Angleterre et fourni les bases énergétiques essentielles de la seconde à la fin du 19^{ème} siècle. Bien que la concurrence du pétrole et du gaz naturel aient fait progressivement baisser sa contribution à la fourniture d'énergie dans le monde, il est encore la deuxième énergie primaire utilisée derrière le pétrole et devant le gaz naturel. On peut également citer le fait qu'il est à l'origine de sous-produits utilisés dans l'industrie pharmaceutique, l'industrie des colorants, les plastiques et les produits de synthèse textiles, les engrais, etc. Enfin, il est également utilisé pour la consommation domestique (chauffage, cuisson des aliments) dans certains pays [03].

- **Inconvénients**

- Les impuretés du charbon sont une importante source de pollution lors de sa combustion (souffre notamment). le charbon c'est un Energie non-renouvelable et couteuse à extraire.
- Comme pour tout carburant fossile, sa combustion libère du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, phénomène à l'origine de l'accroissement de l'effet de serre atmosphérique.

I.2.2. Le Pétrole :

Le pétrole est un liquide visqueux qui tire son nom du latin Petra - oléum : l'huile de roche. Sa couleur lui vaut le surnom d'or noir. Connu depuis la nuit des temps, il a d'abord été utilisé pour le calfatage des embarcations puis comme lubrifiant et comme carburant d'éclairage (lampes à pétrole, torches). Ce n'est qu'à partir des années 1860 environ que l'on commence à rechercher le pétrole, en Allemagne et surtout aux États-Unis d'Amérique.

Au début du 19^{ème} siècle, le pétrole représentait environ 40% de la consommation mondiale d'énergie.

- **Inconvénients**

- Le transport du pétrole est à l'origine de nombreuses pollutions, en particulier des "**marées noires**" mais aussi d'incendies.
- Comme pour le charbon, sa combustion produit du dioxyde de carbone qui, libéré dans l'atmosphère, participe à l'accroissement de l'effet de serre [04].

I.2.3. Le Gaz Naturel :

Ce que l'on désigne sous l'expression gaz naturel est un gaz hydrocarboné provenant du sous-sol terrestre. Composé en grande majorité de méthane (CH₄), le gaz naturel libère son énergie chimique par combustion en émettant relativement peu de substances polluantes. Ses

gisements sont souvent liés à ceux du pétrole et l'exploitation de champs pétrolifères amène généralement à une production simultanée de pétrole et de gaz naturel.

- **Inconvénients**

- Le gaz naturel peut devenir explosif lorsque certaines conditions de concentration et de température sont remplies. Cependant, il n'y a généralement pas de risque.
- Le gaz naturel est incolore et inodore. Il est donc indétectable par les sens humains. C'est la raison pour laquelle il faut impérativement l'odoriser. Le mercaptan ou le tetrahydrothiophène (THT) sont les substances généralement employées à cet effet.

I.2.4. Les Sources D'énergie Nucléaires :

L'énergie nucléaire est produite par les noyaux des atomes qui subissent des transformations : ce sont les réactions nucléaires.

- **Principe :**

Lorsqu'un neutron percute le noyau de certains atomes lourds, le noyau impacté se scinde en deux noyaux plus légers. Cette réaction, appelée fission nucléaire, se traduit par un dégagement d'énergie très important. Elle donne lieu à une réaction en chaîne entre les noyaux des autres atomes, qui dégage une énergie cinétique récupérée sous forme de chaleur dans les réacteurs nucléaires et transformée en électricité [05].

- **Inconvénients**

- Les gisements d'uranium sont peu nombreux et donc très recherchés.
- Les déchets produits par l'industrie de l'uranium et les centrales nucléaires forment la majeure partie des déchets radioactifs terrestres. Ces déchets sont radioactifs et par conséquent dangereux pour les êtres vivants qui peuvent se trouver en contact ou à proximité d'eux.

I.3. LES ENERGIES RENOUVELABLES :

I.3.1. Energie Solaire Photovoltaïque:

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron. Outre les avantages liés au faible coût de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette énergie répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux.

I.3.2. Energie Solaire Thermique:

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turboalternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques [06].

I.3.3. Energie Eolienne:

Par définition, l'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Elle est le fruit de l'action d'aérogénérateurs, de machines électriques mues par le vent et dont la fonction est de produire de l'électricité.

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air [06]

I.3.4. La Biomasse :

La biomasse est la matière végétale dérivée de la photosynthèse, réaction entre le CO₂ dans l'air, l'eau et la lumière du soleil. Typiquement, la photosynthèse convertit moins de 1% de la lumière du soleil disponible [07]. Cette énergie est stockée dans les liaisons chimiques des végétaux. Plus récemment, la biomasse fossilisée (charbon et pétrole) a été exploitée.

Brûler des combustibles fossiles en utilisant de la biomasse « âgée » en relâchant du « nouveau CO₂ »; contribue à l'effet de serre et épuise une ressource non-renouvelable alors que brûler une « nouvelle » biomasse n'y contribue pas, parce que la croissance de nouvelles plantations assure que le CO₂ est absorbé par la nouvelle plante [08].

I.4. L'HYDROGENE COMME VECTEUR ENERGETIQUE INTERMEDIAIRE

Dans le domaine d'énergie renouvelable surtout l'énergie produit par la photovoltaïque il y a un problème de continuité de production d'électricité dans la nuit ou les jours nuageux. Pour cela on utilise des techniques pour assurer la continuité de production d'électricité comme les batteries et l'hydrogène...

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

I.4.1. Caractéristiques de L'Hydrogène :

Hydrogène (du grec « qui produit de l'eau »), élément de symbole H, incolore, inodore et insipide, de numéro atomique 1. On confondait l'hydrogène avec d'autres gaz, jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontre en 1766 que l'Hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Le chimiste montra plus tard que l'hydrogène était une substance indépendante, qui se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau (Voir Fig I.2). En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma hydrogène [09]

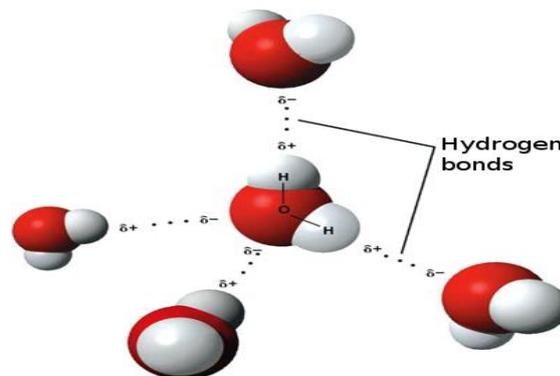


Fig.I.2 Liaisons hydrogène dans l'eau.

I.4.2. Les Avantages :

En effet, les avantages de l'hydrogène sont nombreux [10]:

- 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 l'annexe1)
- 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).

I.5. LES MAJORS METHODE DE PRODUCTION D'HYDROGENE :

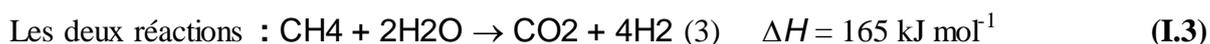
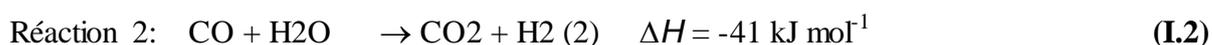
L'hydrogène a un avenir certain dans le domaine de l'énergie. Nous étudierons donc les possibilités envisageables pour sa production à grande échelle. Dans le cas d'une production à grande échelle, il faut tenir compte des rendements et des possibilités économiques.

I.5.1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures :

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de convertir des hydrocarbures en hydrogène. Néanmoins, elles entraînent la formation de dioxyde de carbone, qui est au centre des polémiques actuelles sur les problèmes liés à l'effet de serre. Elles présentent donc des avantages économiques et pratiques mais ne sont pas très écologiques.

- **Le vaporeformage de gaz naturel :**

Le gaz naturel contient essentiellement du méthane. Toutefois, il doit généralement être désulfuré avant d'être dirigé vers l'unité de vaporeformage. Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse (I.1) et la conversion du CO (I.2). On notera que ces réactions sont thermodynamiquement équilibrées, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire à la réaction chimique pour s'effectuer, une partie de la charge ne réagit pas et reste mélangée aux produits. Dans le cas du vaporeformage, ceci se traduit par une fraction significative de méthane (CH₄) et de monoxyde de carbone (CO) en sortie d'unité [11].



- **Oxydation partielle (POX) :**

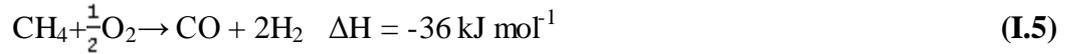
L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. A haute température (classiquement de 900 à 1500 °C) et à pression élevée (classiquement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène (I.4) en tant qu'oxydant 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



Le procédé d'oxydation partielle de gaz naturel n'est généralement pas utilisé pour la production d'hydrogène : On lui préfère le plus souvent la technologie de vaporeformage

décrite plus haut. En revanche, on peut se tourner vers l'oxydation partielle de gaz naturel pour des applications en chimie, quand on recherche un ratio H_2/CO légèrement inférieur à 2.



I.5.2. Production d'Hydrogène à Partir Du Charbon :

Dans le monde, l'hydrogène est produit à 18 % à partir du charbon, contre 4 % en Europe. Le principal inconvénient de son utilisation est qu'il produit du CO_2 . Cependant le charbon étant mieux réparti à la surface du globe que le gaz naturel ou le pétrole, il représente une solution pour l'indépendance énergétique des pays

I.5.3. L'Electrolyse de l'Eau :

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau H_2O en hydrogène H_2 et oxygène O_2 lors d'une réaction d'oxydo-réduction. Le procédé industriellement disponible à l'heure actuelle consiste à réaliser cette électrolyse à l'aide d'électricité. Au regard du coût de la production par électrolyse, seul 4% de l'hydrogène est actuellement produit par électrolyse dans les cas où l'électricité est bon marché ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire.

- **Principe de l'électrolyse de l'eau :**

L'électrolyse de l'eau consiste en deux réactions chimiques ayant lieu séparément sur deux électrodes. A la cathode se produit la réduction de l'eau suivant l'équation (I.6) et à l'anode l'oxydation des ions hydroxydes selon l'équation (I.7).



Les électrons (e^-) intervenant dans les réactions sont apportés par le circuit électrique. Le schéma classique d'une cellule d'électrolyse est donné par la Fig. (I.3) Ci-dessous

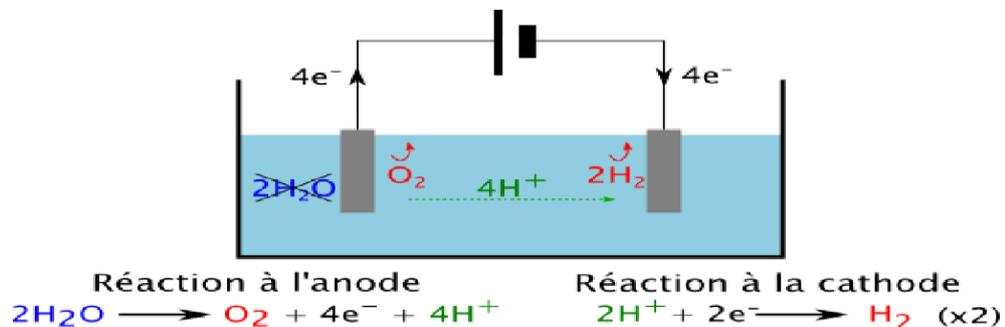


Fig.I.3 Cellule d'électrolyse de l'eau

- **Technologies des électrolyseurs d'eau :**

Il existe actuellement trois types d'électrolyseur d'eau classés selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement :

- **Les électrolyseurs Alcalins** : commercialisés et représentant la quasi-totalité des ventes d'électrolyseurs. L'électrolyse est réalisée à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) dont la concentration varie en fonction de la température de fonctionnement.

- **Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser) à oxyde solide** : un électrolyte en céramique, conducteur à haute température sont encore au stade de la recherche [12]. Cette technologie est directement issue des développements de piles à combustible de type SOFC, fonctionnant entre 600 et 1100°C et cet électrolyse à haute température (EHT) est un des procédés de production d'hydrogène à grande échelle les plus prometteurs pour le futur [13].

- **Les électrolyseurs PEM**, à membrane échangeuse de protons, sont encore cours de développement mais proches de la commercialisation. Cette technologie se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons PEM à basse température.

Les tableaux suivants montrent les différents types d'électrolyseurs et leurs données techniques [14]:

Tab.I.1 Données techniques actuelles(2008) des électrolyseurs

Type	Température de fonctionnement C°	Pression de fonctionnement Bars	Consommation électrique (H ₂) KWh/Nm ³	Etat du marché
PEM	80-100	1-70	6	développement
Alcaline	50-100	3-30	4-5	commercialise
Haute température	800-1000	?????	3-3.5	recherche

I.5.4. Production nucléaire d'hydrogène :

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO₂ est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la

molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

- L'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire
- Des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale nucléaire.

Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur : de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis.

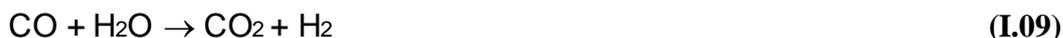
I.5.5. Production à partir des énergies renouvelables :

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie est portée par le souci de limiter le recours aux hydrocarbures en raison de la limitation des stocks disponibles mais aussi en raison de l'émission de gaz à effet de serre résultant de leur utilisation. Dans cette optique de protection de l'environnement, les technologies de production d'hydrogène utilisant les énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermique et hydraulique) sont en cours de développement.

Une utilisation classique consiste bien évidemment à produire de l'électricité à partir d'énergie renouvelable et d'utiliser cette électricité pour réaliser l'électrolyse de l'eau selon les techniques décrites précédemment [15].

I.5.5.1. Production d'hydrogène en utilisant la biomasse :

Pour produire du dihydrogène à partir de la biomasse, il faut faire une transformation thermochimique. Les produits de la biomasse sont composés principalement de $C_6H_9O_5$. La première étape consiste donc à sécher la matière qui devient alors $C_6H_7O_4$. Ensuite, on chauffe à $600^\circ C$, pour provoquer la dégradation thermique : c'est la thermolyse. Après cette étape, les produits sont à 70% gazeux, sous forme de CH_4 , H_2 , CO , CO_2 et quelques indésirables tels les goudrons. Les 30% solides restants sont essentiellement composés de carbone. On continue donc à élever la température jusqu'à $1000^\circ C$ pour gazéifier le carbone. On introduit ensuite de la vapeur d'eau qui, réagissant avec le carbone, produit du dihydrogène et du monoxyde de carbone. On convertit ensuite le CO par une réaction avec de l'eau.



Bilan

Après cette opération, on élève la température jusqu'à 1100°C afin d'éliminer les acides et les goudrons. Enfin, on raffine le gaz de biomasse pour récupérer le dihydrogène.

Le rendement de la transformation thermochimique est de 3KWh produits /1Kwh consommé.

I.5.5.2. Solaire thermique :

Le principe du solaire thermique consiste à concentrer le rayonnement en un point pour augmenter sa température. Le fonctionnement du four est schématisé Figure I.4 ci-dessous : une première série de miroirs orientables et situés sur la pente, captent les rayons solaires et les envoient vers une deuxième série de miroirs concentrateurs formant une parabole.

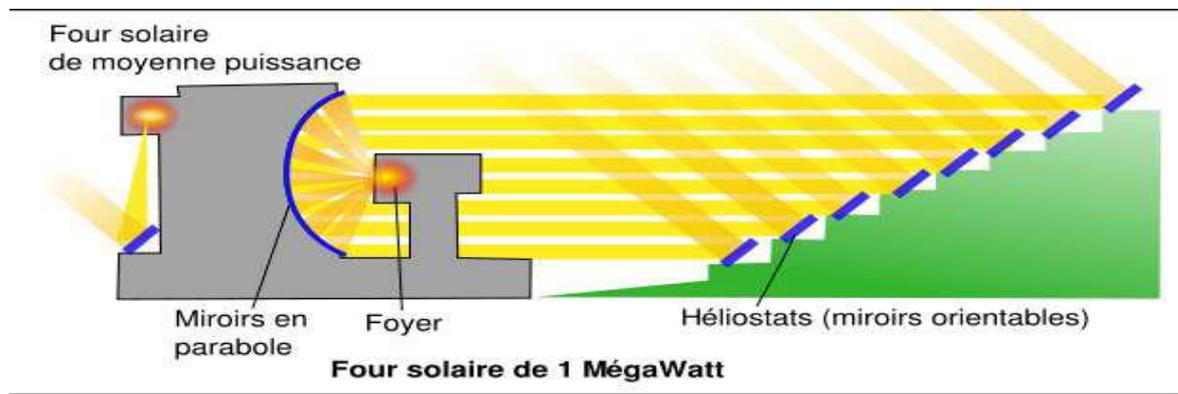


Fig.I.4 Schéma de fonctionnement d'un four solaire

La chaleur produite par le soleil peut alors être directement utilisée pour produire de l'hydrogène à partir de méthane [16,17] ou d'eau [18]. Dans le cas de l'eau, il est nécessaire de s'appuyer sur un cycle thermochimique type Zn/ZnO et on obtient de l'hydrogène mais également de l'oxygène. Il est donc nécessaire de rajouter une étape de séparation des gaz. Dans le cas du méthane, il est possible de travailler sans catalyseur, par pyrolyse, et dans ce cas les produits de réactions sont de l'hydrogène et du noir de carbone. Il n'y a donc pas d'étape de séparation.

I.6. STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE :**I.6.1. Le stockage sous forme gazeux :**

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses. Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Des progrès ont été faits : de 200 bars, pression des bouteilles distribuées dans l'industrie, la pression est passée à 350 bars

aujourd'hui et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de 700 bars. De plus, l'hydrogène est l'élément le plus petit de l'univers, il faut donc trouver des matériaux pouvant contenir l'hydrogène sans risque de fuite [19].

I.6.2. Le stockage sous forme liquide :

Pour cette technique, beaucoup d'énergie est utilisée pour le refroidissement aux températures qu'exige l'opération : -253°C . Stocker l'hydrogène sous cette forme est possible mais nécessite un développement plus poussé. En effet, cette méthode est déjà utilisée dans le domaine spatial. Mais l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier juste après l'hélium. Il est donc possible d'utiliser de l'hydrogène sous forme liquide pour le stocker mais cela revient très cher, ce qui rend son application impossible aux particuliers pour le moment. Il faut aussi ajouter le fait que près de 3 à 4% de l'hydrogène s'évapore chaque jour

I.6.3. Le stockage sous forme d'hydrures métalliques :

Dans cette méthode, l'hydrogène est « capturé » dans les interstices d'une poudre d'alliage métallique comprimée, un peu comme une éponge absorbe de l'eau. Cette technique est très avantageuse notamment une construction simple et un niveau élevé de sécurité. L'automobile reste pour l'instant hors de portée des hydrures existant actuellement, à cause du poids.

I.6.4. Le stockage sous basse pression :

Cette technique serait une alternative au stockage sous pression gazeuse. Elle consisterait à stocker l'hydrogène dans des matériaux capables d'absorber l'hydrogène et de le restituer lorsque cela est nécessaire. Il pourrait s'agir de matériaux carbonés ou encore certains alliages métalliques. Nous utilisons le conditionnel car ce mode de stockage n'est encore qu'un objet d'étude, il n'est pas encore au point.

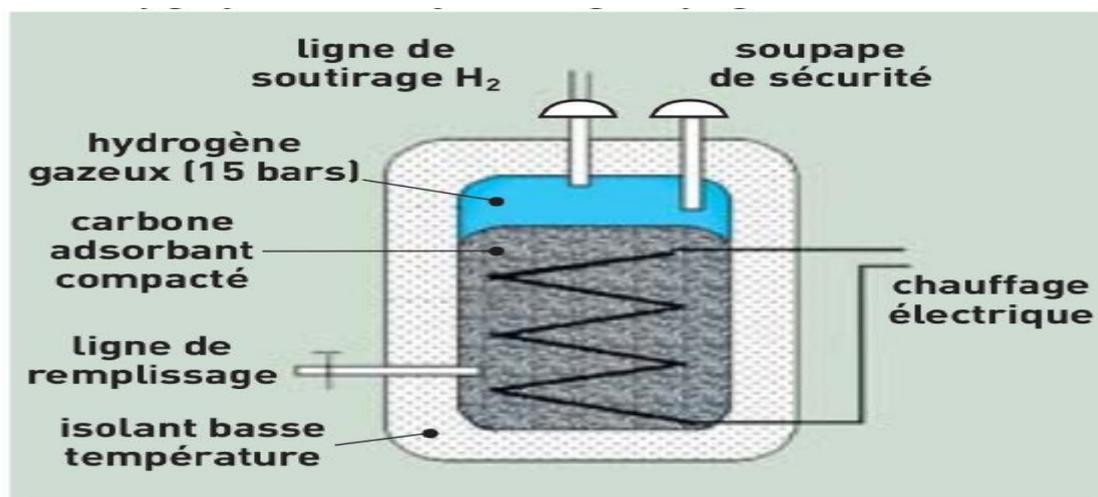


Figure I.5 : Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de l'hydrogène

I.7. TRANSPORT DE L'HYDROGENE :**I.7.1. Transport par route :**

Le transport de l'hydrogène liquide par camion est le plus courant pour l'alimentation des stations-services à hydrogène comme cela est le cas pour les stations de démonstration mises en œuvre dans de nombreux pays. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs cryogéniques cylindriques à l'image des camions citernes transportant des liquides. Ces véhicules peuvent transporter jusqu'à 3.5 t d'hydrogène liquide pour un poids total de 40 t. Quand il est utilisé en grande quantité comme substance chimique de base (industrie pétrolière, synthèse de l'ammoniac) l'hydrogène est en général acheminé par gazoduc, le transport sous forme liquide par camion étant plutôt réservé à des applications nécessitant des quantités moindres, comme l'industrie électronique [20].

I.7.2. Transport par mer :

Le fait que l'hydrogène liquide soit dense et que les réservoirs cryogéniques le contenant puissent avoir de très importantes capacités suggère assez naturellement le transport par mer depuis les lieux pouvant avoir une grande capacité de production à ceux de forte consommation.

L'hydrogène liquide aurait été contenu dans de grands réservoirs cryogéniques sphériques à double paroi de 3000 m³.

I.7.3. Le transport de l'hydrogène par gazoducs :

Le transport de l'hydrogène par gazoducs (plusieurs dizaines de bar), existe depuis des décennies sans aucun accident majeur reporté. Ces réseaux servent à alimenter des sites industriels. La longueur cumulée dans le monde de gazoducs hydrogène est estimée entre 2.000 et 3.000 km à comparer à plus de 1.000.000 km pour le transport du gaz naturel.

En s'orientant vers une économie de l'hydrogène, des modèles sur le transport de l'hydrogène comparent la livraison par gazoduc et par camion de capacités d'hydrogène. A partir d'un seuil de pénétration du marché, le transport de l'hydrogène par canalisation s'avère plus économique. Diverses études ont donc été engagées pour développer ce moyen de transport. Parmi celles-ci, citons quelques exemples non-exhaustifs :

Injecter de l'hydrogène dans les canalisations de gaz naturel existantes. Cette méthode permettrait d'assurer une transition « douce » vers un avenir où l'hydrogène aurait une part significative dans le bouquet énergétique [20].

I.8. CONCLUSION :

Dans le cadre de notre étude, nous avons constaté que le dihydrogène présente des atouts majeurs qui lui assurent un bel avenir en tant que vecteur énergétique intermédiaire. En effet, ses applications recouvrent un large éventail des besoins énergétiques humains : il est utilisable dans le domaine des transports, des applications stationnaires et portables, sans compter son rendement énergétique élevé. De plus, c'est une énergie propre si sa production s'opère à partir d'une énergie non polluante comme le rayonnement solaire. Cet avantage est capital suite aux récentes polémiques à propos de l'effet de serre.

L'ENERGIE
PHOTOVOLTAÏQUE

II.1. INTRODUCTION :

Cent ans après la découverte de l'effet photovoltaïque par Edouard Becquerel (1839), la première cellule capable de transformer l'énergie solaire en courant électrique fut mise au point par un groupe de chercheurs américains de « Bell Labs ». Resté très longtemps comme une curiosité de laboratoire, l'effet photovoltaïque a d'abord connu une utilisation dans le domaine du spatial, avant d'être utilisé comme source d'énergie en site isolé et de connaître le développement qu'on lui connaît aujourd'hui en application connectée au réseau. Cette pénétration du marché s'est accompagnée d'une augmentation du rendement, 4% pour la cellule de « Bell Labs » près de 42% pour le record mondial.

II.2. PARAMETRES DES RADIATION SOLAIRES :**II.2.1. Composants de la radiation solaire**

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous 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 [21].

On distingue plusieurs composantes de rayonnement solaire :

a- Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs [22].

b- Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on

admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste.

c- Rayonnement réfléchis :

L'albédo est la partie réfléchié par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [23].

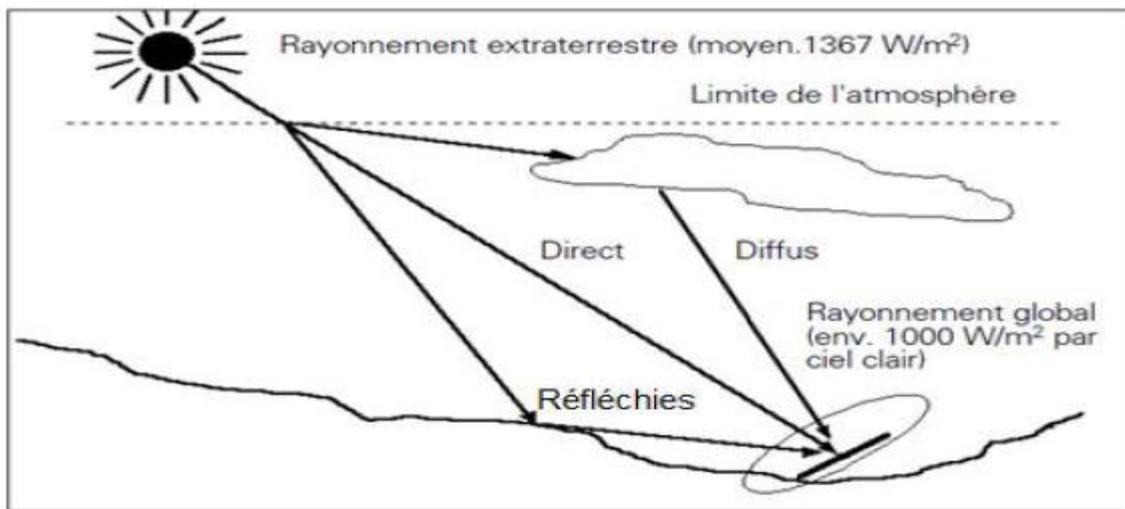


Fig.II.1 Composantes du rayonnement solaire

II.2.2. L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface inclinée :

Les panneaux solaires peuvent être installés au sol ou sur la toiture orientés vers le sud et à l' écart des zones ombragées. Ils devraient présenter un angle de telle sorte que la surface de captation soit perpendiculaire au rayonnement solaire.

Pour la conception des systèmes solaires, nous avons besoins de la moyenne journalière mensuelle de l'irradiation incidente sur un plan du capteur H_T .

En utilisant le modèle de LIU et JORDAN, le calcul de H_T est donné par l'équation suivante [24]:

$$H_T = H_b R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H_r \rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \tag{II.1}$$

Avec :

H : La moyenne mensuelle de l'irradiation journalière sur un plan horizontal

R_b :Facteur de conversion donné par :

$$R_b = \frac{\cos(\Psi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega'_s + \omega'_s \cdot \sin(\Psi - \beta) \sin\delta}{\cos(\Psi) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin(\Psi) \sin\delta} \tag{II.2}$$

H_d : La composante diffuse :

$$\frac{H_d}{H} = K_d = a + b * K_T \quad (\text{II.3})$$

Pour le Sahara Algérienne $\begin{cases} a = 0.91 \\ b = 0.98 \end{cases}$

K_T : Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté

Indice de clarté journalière : $K_T = \frac{H}{H_0}$

H_b : La composante directe $H_b = H - H_d$

ρ : L'albédo au sol

β : L'angle d'inclinaison

ω_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal

ω'_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné

$$\omega'_s = \text{Min}[\omega_s \cdot \cos^{-1}(-\tan(\Psi - \beta) \tan \delta)] \quad (\text{II.4})$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \tan \delta) \quad (\text{II.5})$$

II.2.3. Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ selon la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{II.6})$$

h : constante de Planck. $h = 6,62606957 \times 10^{-34}$ J·s,

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. Sa distribution en énergie est répartie en [25]:

Ultraviolet UV	0.20 < λ < 0.38 mm	6.4%
Visible	0.38 < λ < 0.78 mm	48.0%
Infrarouge	IR 0.78 < λ < 10 mm	45.6%

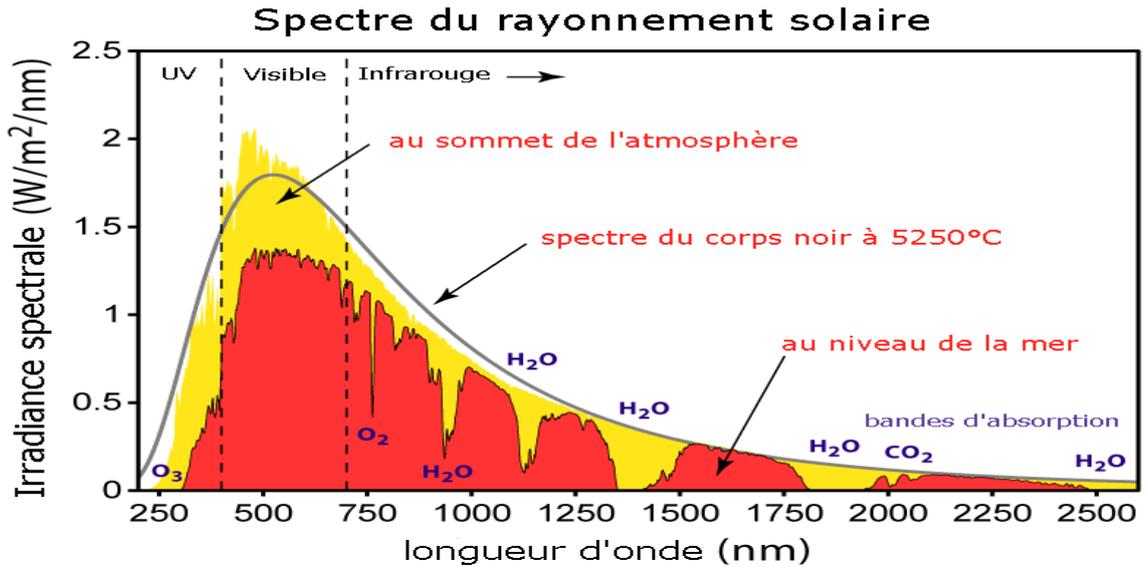


Fig.II.2 Spectre d'irradiation solaire [25].

II.2.4. Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont 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 qui elle-même dépend de la période de l'année considérée [26].

II.3. CONVERSION D'ÉNERGIE :

II.3.1. Énergie solaire :

On distingue deux types de conversion d'énergie à partir du soleil, la conversion photovoltaïque et la conversion photo thermique.

II.3.2. Effet photoélectrique et jonction PN

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée,

L'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension), s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [27].

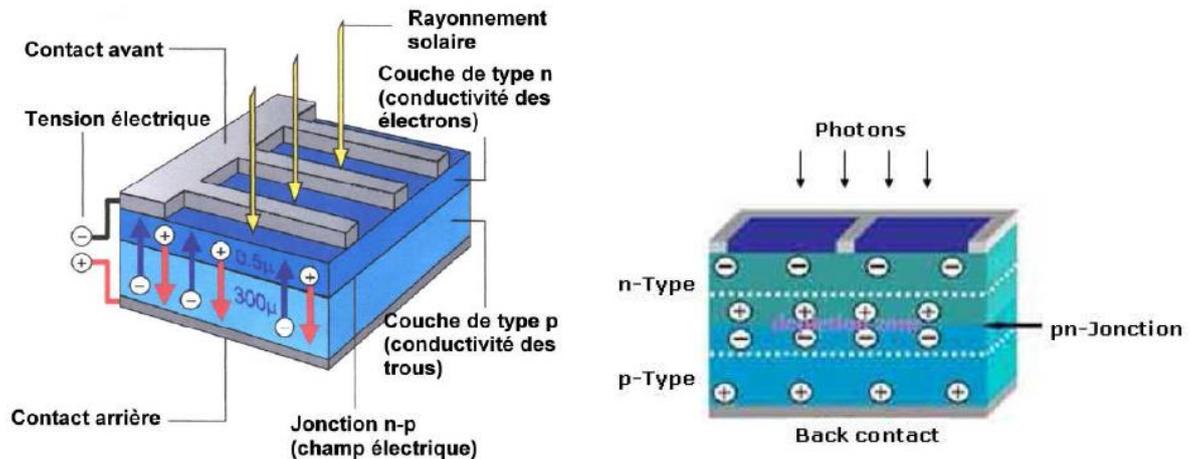


Fig.II.3 Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque

Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :

- La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.

- La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).

II.3.3. La cellule photovoltaïque :

L'élément fondamental dans un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque qui convertit l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique.

Une cellule photovoltaïque peut donc être assimilée à une photodiode en convention générateur dont les caractéristiques sont illustrées par les figures suivantes :

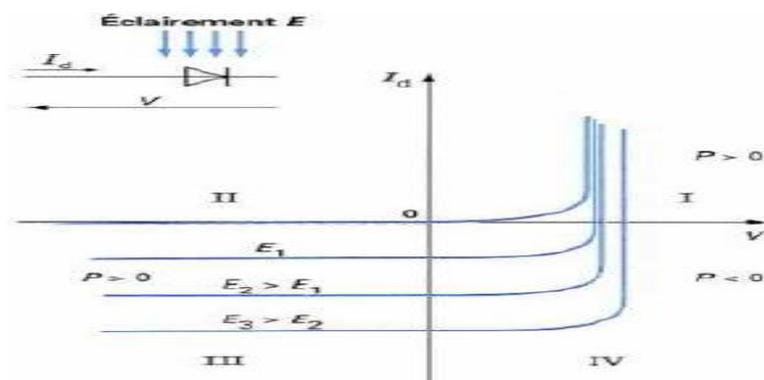


Fig II.4: Caractéristiques d'une jonction PN sous éclairement.

En convention récepteur, le quadrant IV correspond à un fonctionnement réel en générateur. Classiquement, on utilise pour une cellule photovoltaïque plutôt une convention générateur (on inverse la convention sur le signe du courant de la figure II.3), on obtient alors la caractéristique suivante :

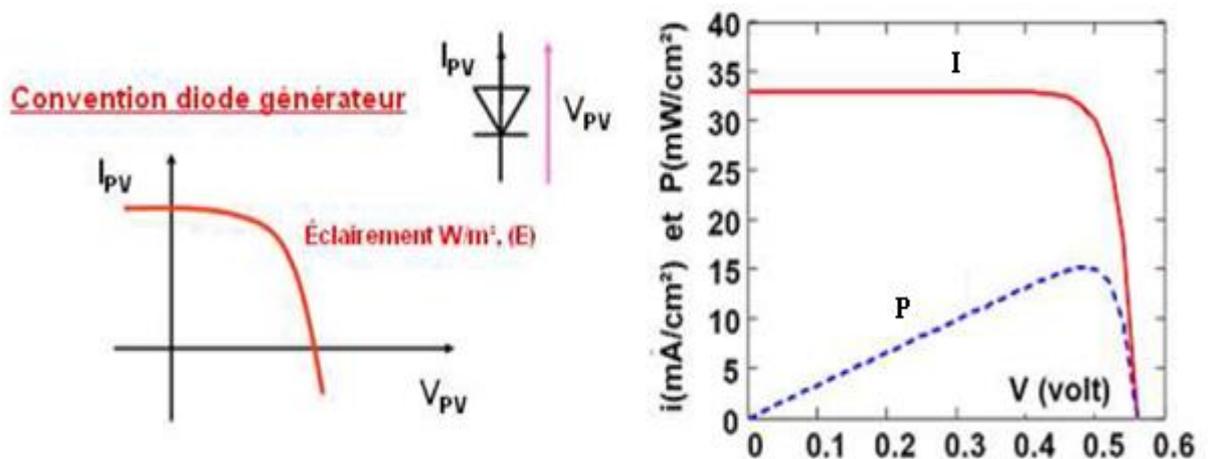


Fig.II.5 Caractéristique de la convention diode générateur

Le schéma équivalent le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN idéale comprend une source de courant I_{Light} , qui modélise le courant photoélectrique, associée à une diode en parallèle qui modélise la jonction P-N dont la polarisation détermine la tension (figure ci-dessous).

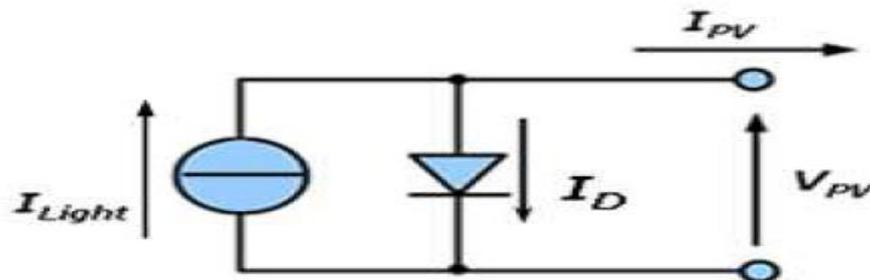


Fig.II.6 Schéma équivalent le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN

Un schéma équivalent plus complet d'une cellule solaire photovoltaïque (modèle à une diode) est illustré sur la figure ci-après. Il complète le schéma précédent en introduisant deux résistances R_{sh} et R_s qui modélisent les défauts de la cellule.

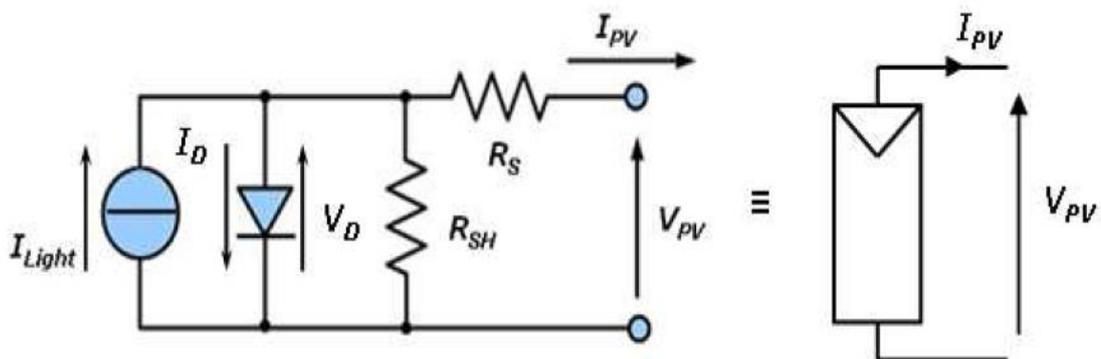


Fig.II.7 Circuit équivalent d'une cellule PV et schéma conventionnel d'une cellule PV

I_D = Courant inverse de diode

I_0 = Courant de saturation de diode, dépendant de la température

I_{Light} = Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation

R_{SH} = Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant

R_S = Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

V_{PV} = Tension aux bornes de la cellule

I_{PV} = Courant fourni par la cellule

Le fonctionnement du circuit en générateur peut ainsi être formalisé par un système d'équations résultant des lois de Kirchhoff.

$$I_{PV} = I_{Light} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_s)}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} + (I_{PV} \cdot R_s)}{R_{SH}}\right) \tag{II.7}$$

Avec

$$V_{th} = \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \tag{II.8}$$

Où

A = facteur d'idéalité (compris entre 1 et 2 selon la technologie)

q = Charge de l'électron

II.3.4. Le silicium et ses propriétés :

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium. En plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables. Le silicium constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable [28]

II.3.5. Technologie de cellules photovoltaïques :

Il existe différentes technologies constituant les cellules photovoltaïques illustrées par la figure suivante :

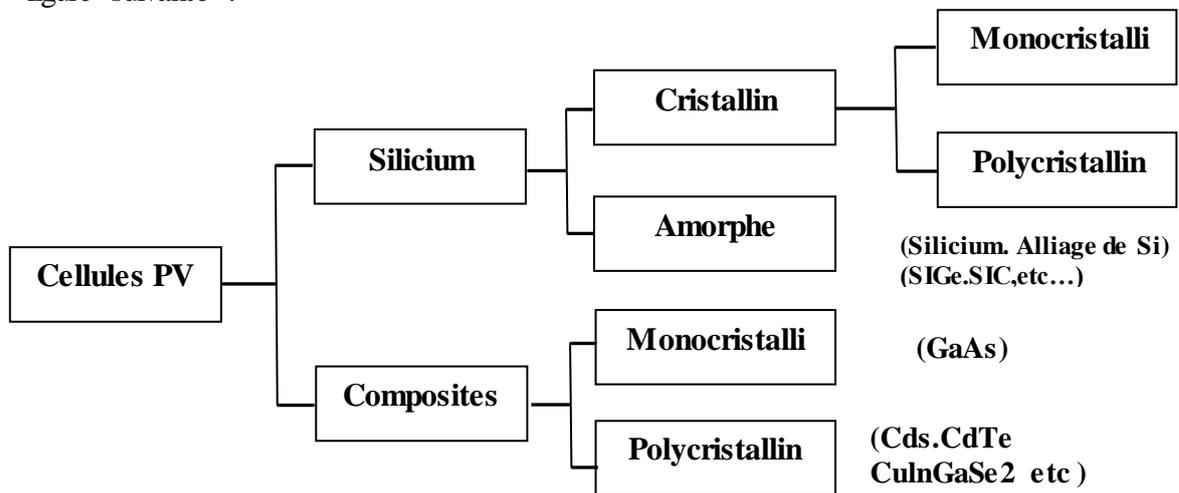


Fig.II.8 Différentes techniques de cellules photovoltaïques

On distingue les trois catégories principales qui se disputent le marché. Ils ont des caractéristiques, des durées de vie, et des sensibilités différentes [29] (Tab.II.1).

a) Silicium polycristallin :

Il est constitué de plusieurs monocristaux juxtaposés dans différentes orientations donnant à la cellule un aspect mosaïque.

Le silicium polycristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial en raison de son bon rendement (environ 15 %) pour des coûts de fabrication maîtrisés. Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix.

b) Silicium monocristallin :

Il est constitué d'un seul cristal offrant à la cellule un arrangement parfait des atomes. Il présente un rendement légèrement supérieur au silicium polycristallin (environ 19 %). Néanmoins, il reste assez onéreux en raison de son exigence de grande pureté et de l'importante quantité d'énergie nécessaire à sa fabrication.

c) Silicium amorphe en couche mince :

Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [30].

Tab.II.1 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium.

	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Silicium amorphe
Types			
Rendement	De 15% à 19%		7% à 10%
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mouvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mouvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

II.3.6. Impact de la température et l'irradiation solaire sur la caractéristique I-V:

La température T et l'irradiation G ont un impact direct sur les performances d'une cellule photovoltaïque comme illustre la figure 1-25. Quand la température des cellules augmente la tension de circuit ouvert diminue sensiblement tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement. Alors on peut remarquer que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé, au contraire d'un environnement chaud.

Pour les cellules en silicium cristallin, V_{co} baisse d'environ 0.37% pour chaque degré Celsius de plus, I_{cc} augmente de 0.05% pour les mêmes conditions.

La température du GPV dépend non seulement de la température ambiante mais aussi des effets de l'irradiation de la cellule. Puisque seule une petite fraction de l'insolation qui touche le module est convertie en électricité, la plupart de l'énergie incidente est absorbée et convertie en chaleur [31].

Pour aider les concepteurs de systèmes à tenir compte des variations de performances de la cellule avec la température, les fabricants fournissent souvent un indicateur appelé NOCT. La température de la cellule NOCT est dans un module lorsque la température ambiante est de 20 °C, rayonnement solaire égal à 0,8 kW/m², et vitesse du vent à 1 m/s. Pour tenir compte des autres conditions ambiantes, l'expression suivante peut être utilisée :

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \times G \tag{II.9}$$

T_{cell} , T_{amb} : Température de la cellule et température ambiante,
 G : irradiation solaire (kW/m²).

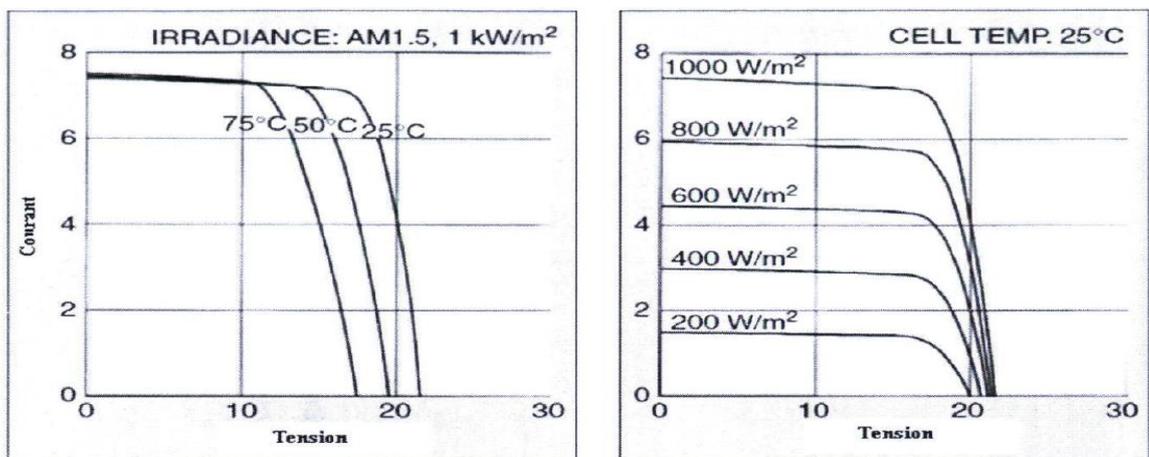


Fig.II.9 Courbes courant -tension sous différentes températures et niveaux d'irradiation.

II.3.7. Le générateur photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I-10-a). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) figure (I-10-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [32].

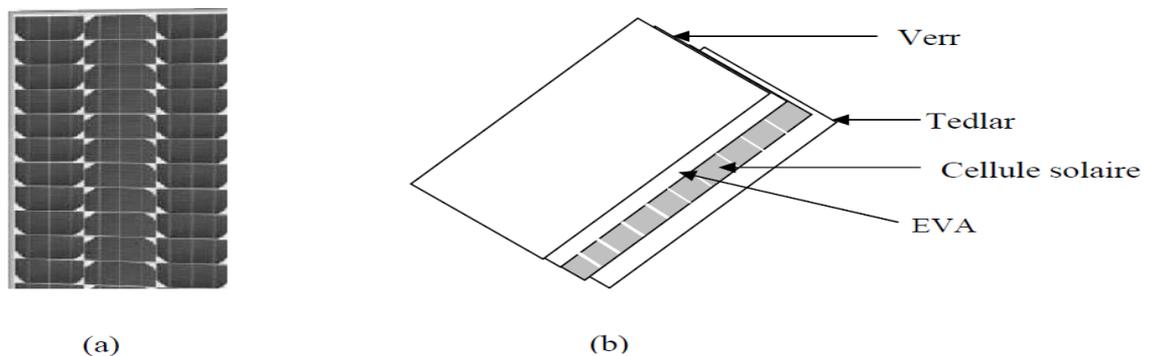


Fig.II.10 Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles figure (I-5). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre.

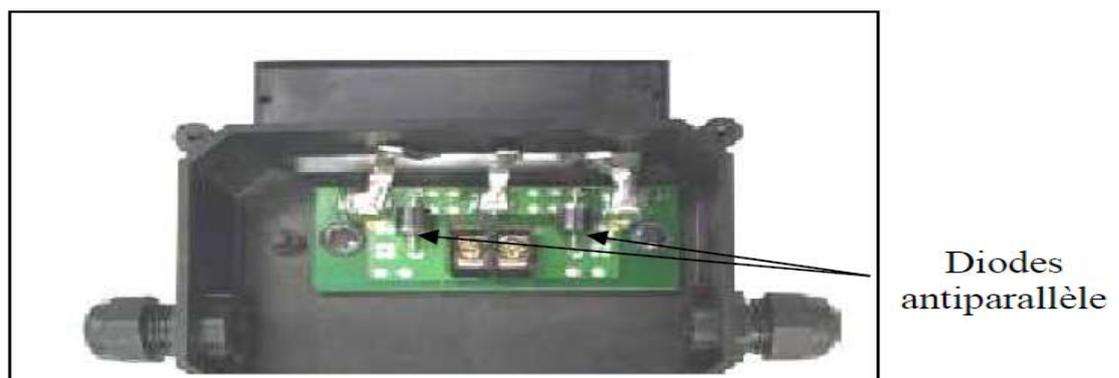


Fig.II.11 Boîte de jonction.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.

- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module .Il ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [29].

II.3.8.1. Le panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) 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.

a. Montage en série :

Les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique, lorsque les panneaux sont montés en série l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si l'ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible. L'intensité restant faible, les sections de câbles sont moins importantes [28].

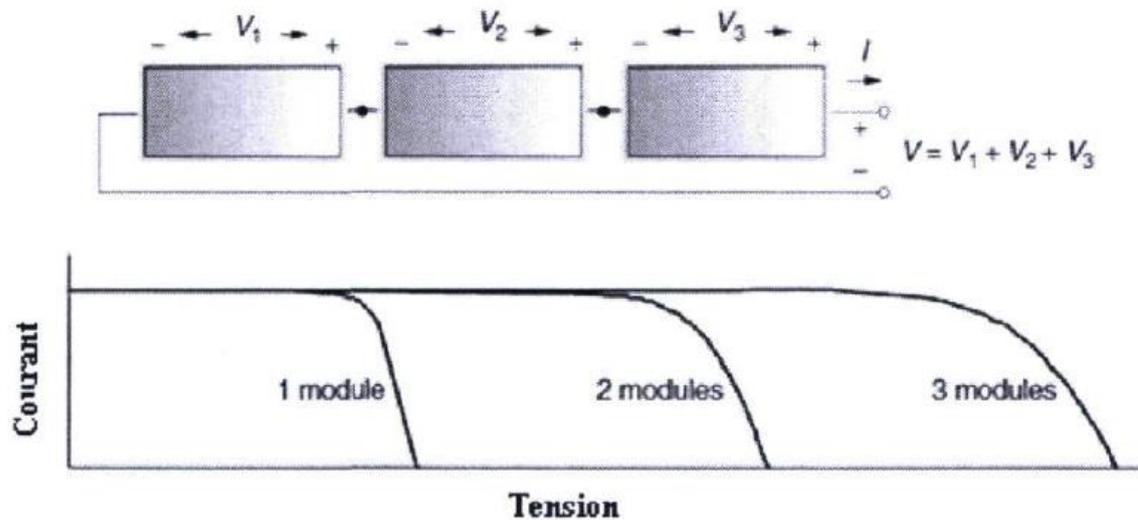
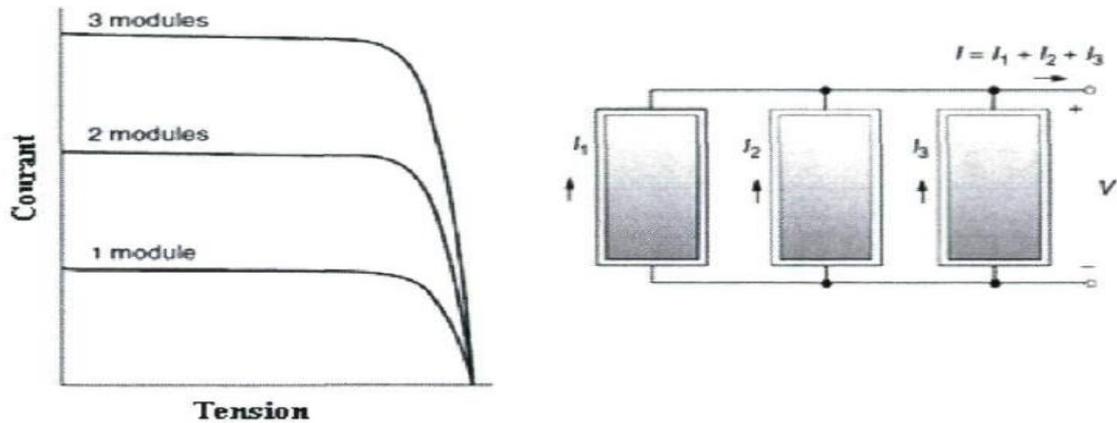


Fig.II.12 Branchement des modules en série

b. Montage en parallèle :

Les courants des différents modules s'additionnent et la tension reste identique. Un tel montage peut demander une section de câble plus importante due à la forte intensité.



FigII.13 Branchement des modules en parallèles.

II.4. DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES PV :

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- un système de régulation et de stockage.
- une source auxiliaire d'appoints.

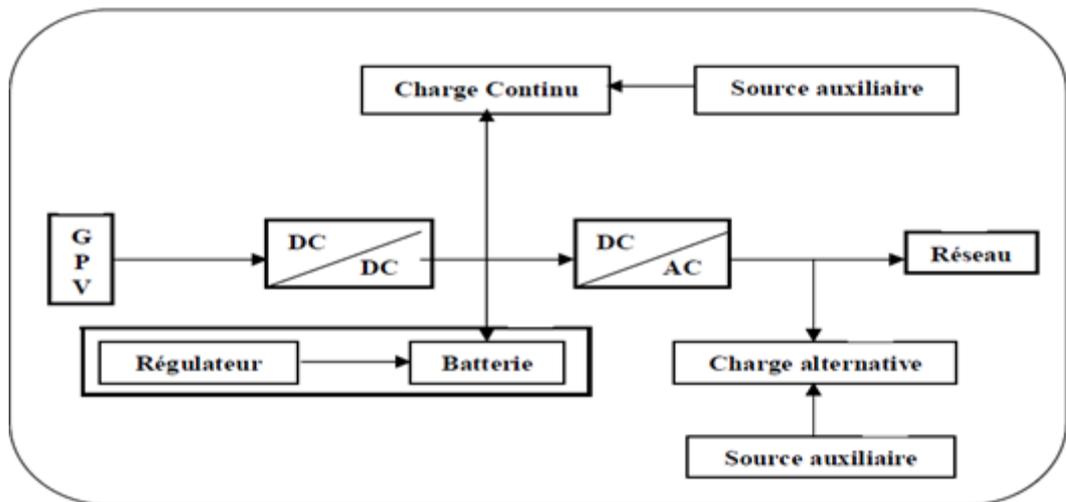


Fig.II.14 Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque

II.4.1. Système autonome sans batterie :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par une charge de type continu est alimente directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

II.4.2. Système autonome avec batterie :

Ces systèmes sont représentés par dans le cas où la charge est de type continu et la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

II.4.3. Système fonctionnant au fil du soleil :

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit.

II.4.4. Système avec appoint électrique :

Pour ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu ou de type alternatif.

Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie comme l'hydrogène [30].

II.5. SYSTEME DE PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE:

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

Les cycles thermochimiques purs et hybrides par exemple sont à l'échelle de Recherche et développement, tandis que les procédés photochimiques et photo biologiques sont encore au premier stade de la recherche. L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement. Figure II.15 montre le schéma synoptique d'un procédé de production d'hydrogène par électrolyse.

On voit, de cette figure, que l'on peut diviser le système en trois parties :

- Le système d'appoint énergétique pour la décomposition de l'eau. Ce système peut être un champ de panneaux photovoltaïques ou un système hybride. L'utilisation de stations géothermiques a aussi été prise en considération [33].

- Le système de l’électrolyse de l’eau. Les techniques les plus importantes couramment utilisées pour la production de l’hydrogène sont les électrolytes alcalines, les membranes polymères et les oxydes de céramiques

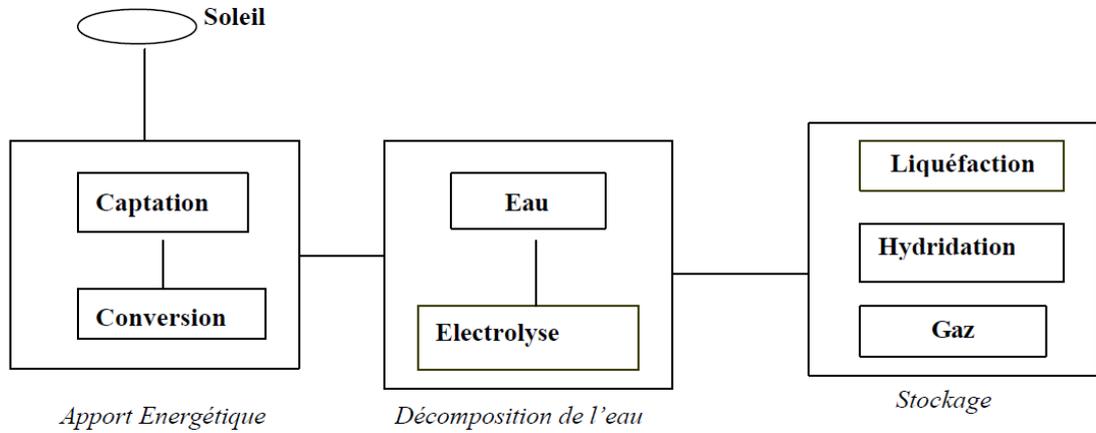


Fig.II.15 Système synoptique de production de l’hydrogène solaire

II.6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technologie photovoltaïque, commençant par quelques notions sur le rayonnement solaire, et les différentes méthodes de conversion d’énergie, Ensuite on a expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïque et ses différents types et ses caractéristiques.

Le système photovoltaïque possède plusieurs types de configuration selon l’utilisation et selon le mode de stockage.

*MODELISATION ET
SIMULATION
DE COUPLAGE DIRECT
GPV-ELECTROLYSEUR*

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude d'un système de production d'hydrogène solaire par le couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur PEM. Pour ce fait, on a modélisé et le générateur photovoltaïque, l'électrolyseur et la simulation de couplage direct entre eux.

III.2. MODELISATION DE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

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

III.2.1. Modèles de simulation de la caractéristique I-V :

On peut représenter notre module photovoltaïque par la fig III.1 :

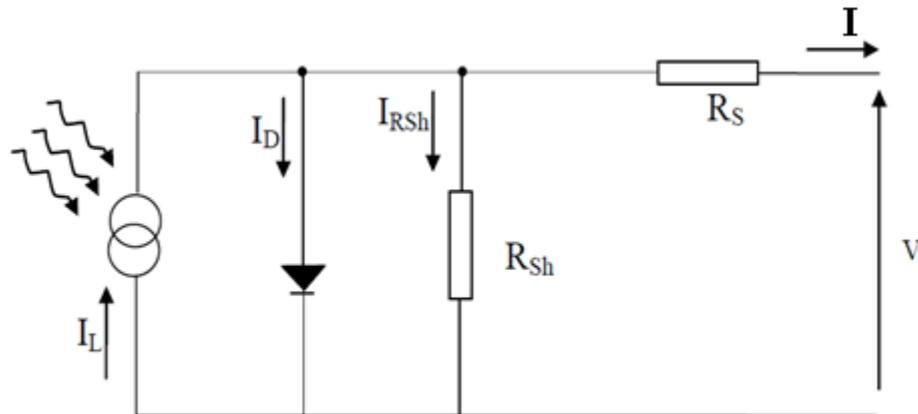


Fig.III.1 Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque

D'après le circuit de module photovoltaïque on applique la loi de nœud pour trouver la relation entre le courant et la tension [34]:

$$I = I_L - I_D - I_{RSh} \quad (\text{III.01})$$

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V+(I.R_s)}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.02})$$

Tell que :

$$V_{th} = \frac{A * T_c * k}{q} \quad (\text{III.03})$$

A : facteur d'idéalité.

$$I_{RSh} = \frac{V+(R_s * I)}{R_{Sh}}$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+(I.R_s)}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V+(R_s * I)}{R_{Sh}} \quad (\text{III.04})$$

Pour des modules supposés dépourvus de fuites (R_{sh} infinie et $I_{RSh} \sim 0$) cette relation est comme suite

$$I = I_L - I_D \quad (\text{III.05})$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+(I.R_s)}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.06})$$

On remplacer V_{th} dans l'équation de courant :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(q \frac{V+(I.R_s)}{A * T_c * k}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.07})$$

A partir de cette équation il y a quatre paramétrés inconnue : I_L (photo-courant), I_0 (courant de saturation), A (facteur d'idéalité) et R_s (résistance série)

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

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

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left[\exp\left(q \frac{I_{cc} * R_s}{A * T_c * k}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.08})$$

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

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp\left(q \frac{V_{co}}{A * T_c * k}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.09})$$

- Dans le point de puissance maximale :

$$I_m = I_L - I_0 \left[\exp\left(q \frac{V_m + (I_m * R_s)}{A * T_c * k}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.10})$$

Pour déterminé les paramètres inconnues on utilise la méthode explicit simplifiée :

On suppose que :

$$I_{cc} = I_L \quad (III.11)$$

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{co}}{A \cdot T_c \cdot k} \right) \right] \quad (III.12)$$

$$I_m = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V_m + (I_m \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot k} \right) \right] \quad (III.13)$$

$$I_0 = I_{cc} \left[\exp \left(-q \frac{V_{co}}{A \cdot T_c \cdot k} \right) \right] \quad (III.14)$$

$$I = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \frac{(V - V_{co} + (I \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot k} \right) \right] \quad (III.15)$$

$$I_m = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \frac{(V_m - V_{co} + (I_m \cdot R_s))}{A \cdot T_c \cdot k} \right) \right] \quad (III.16)$$

$$R_s = \frac{\frac{A \cdot T_c \cdot k}{q} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) + V_{co} - V_m}{I_m} \quad (III.17)$$

Pour déterminé le facteur d'idéalité A :

$$\frac{dP}{dV} = 0 = \frac{dI}{dV} V + I \frac{dV}{dI} \quad (III.18)$$

$$A = \frac{q(2V_m - V_{co})}{n_s k T \left[\frac{I_{sc}}{I_{cc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]} \quad (III.19)$$

n_s : Le nombre de cellule sérié

III.2.2. Paramètres de champ photovoltaïque :

$$I_{0(gén)} = N_P * I_{0(mod)}$$

$$V_{r(gén)} = N_s * V_{r(mod)}$$

$$R_{s(gén)} = \frac{N_s}{N_P} * R_{s(mod)}$$

Donc l'équation de générateur est de la forme :

$$I_{gén} = I_{cc} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V_{gén} + (I_{gén} \cdot R_{s(gén)}))}{A \cdot T_c \cdot k} \right) - 1 \right] \quad (III.20)$$

N_p : nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque

N_s : nombre de module série dans le champ photovoltaïque

I_{gén} : le courant délivré par le générateur

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

$$V_{gén} = -I_{gén} \cdot R_{s(gén)} + V_{th} * \log\left(\frac{-I_{gén} + I_{cc} + I_0}{I_0}\right) \quad (III.21)$$

III.2.3. Evolution de la caractéristique (I-V) :

La courbe (I-V) de l'équation (III.20) est une courbe arbitraire de référence, applicable à un niveau d'éclairement et de température de la cellule en particulier. Pour d'autres valeurs d'éclairement et de température, l'évolution de l'équation (III.20) se fait par les équations suivantes :

$$\Delta T = T_c - T_{c\ ref} \quad (III.22)$$

$$I_0 = I_{0\ ref} * \left(\frac{T_c}{T_{c\ ref}}\right)^3 * \exp\left(E_{gap} * \frac{q}{A*k} * \left(\frac{1}{T_{c\ ref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right) \quad (III.23)$$

$$V_{co} = V_{co\ ref} + \left(\frac{A*k*T}{q}\right) * \log\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \beta * \Delta T \quad (III.24)$$

$$I_{cc} = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) * I_{cc\ ref} + \alpha * \Delta T \quad (III.25)$$

$$V_m = V_{m\ ref} + \left(\frac{A*k*T}{q}\right) * \log\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \beta * \Delta T \quad (III.26)$$

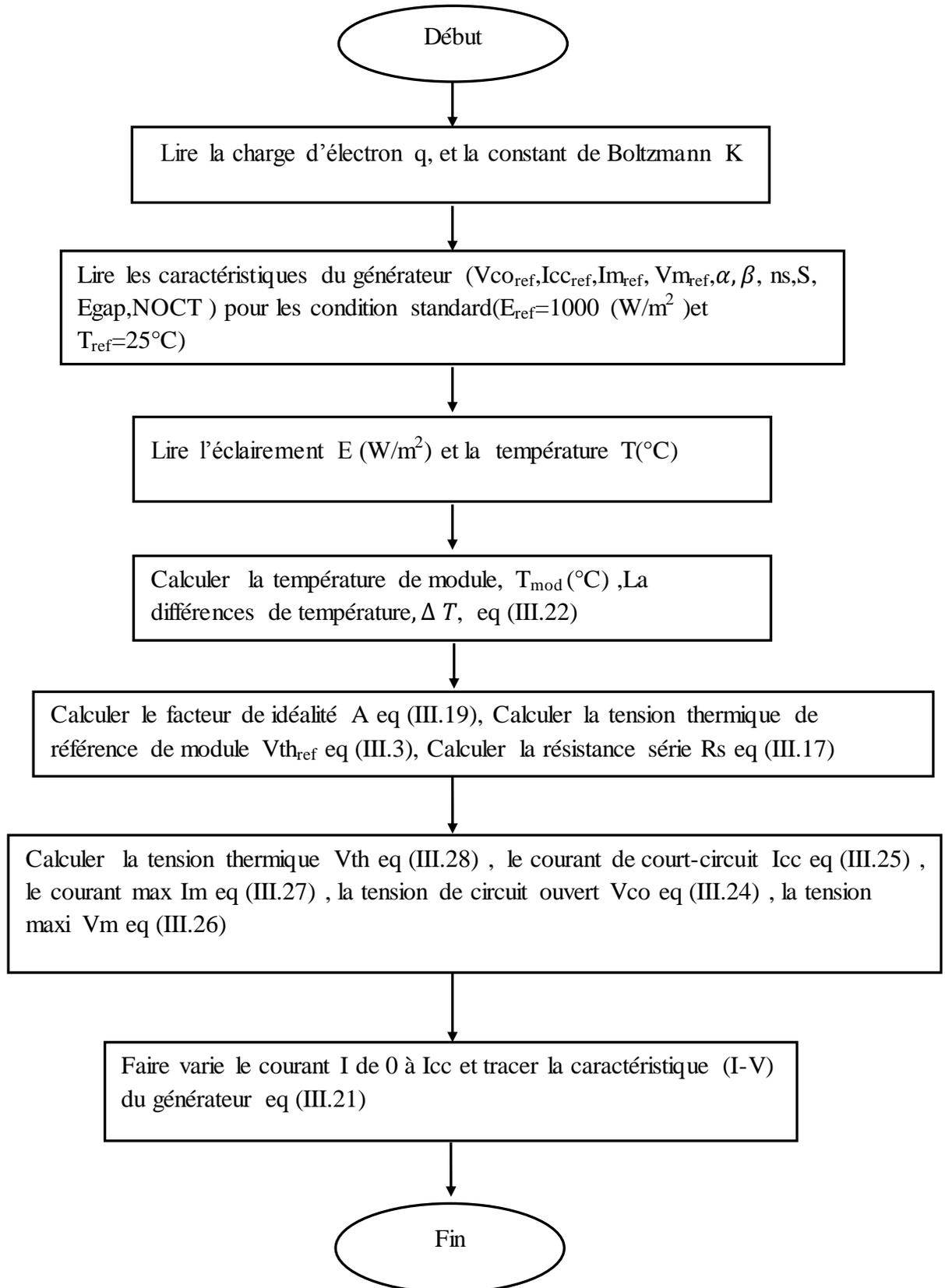
$$I_m = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) * I_{m\ ref} + \alpha * \Delta T \quad (III.27)$$

$$V_{th\ mod} = (V_{th\ mod\ (ref)} * T_c) / T_{c\ ref} \quad (III.28)$$

α : Coefficient de variation du courant en fonction de la température ;

β : Coefficient de variation de la tension en fonction de la température.

III.2.4. L'organigramme pour tracer la caractéristique (I-V) :



III.2.5. Résultats de Simulation :

Avant l'exécution de notre l'organigramme nous avons choisi le module photovoltaïque du type *BP 585F* avec les caractéristiques dans les conditions standards ($E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ °C}$ voir le tableau (III.1):

Tab III.1 caractéristique de module photovoltaïque type BP 585F[35]

$P_m(\text{w})$	85
$V_{co}(\text{v})$	22.03
$I_{cc}(\text{A})$	5
$V_m(\text{v})$	18
$I_m(\text{A})$	4.72
$\alpha(\text{mA/C}^\circ)$	3.2
$\beta(\text{mV/C}^\circ)$	-80
N_s	36
$\text{NOCT}(\text{C}^\circ)$	47

a) *Résultat de Simulation avec température fixé $T=25 \text{ °C}$ et différents éclairagements :*

Pour étudier les performances du module, nous avons varié l'éclairement avec une température fixé ($T=25 \text{ °C}$). La figure (III.2) montre que le courant varié proportionnellement avec l'éclairement et la même chose par rapport à la tension, mais de façon moins sensible.

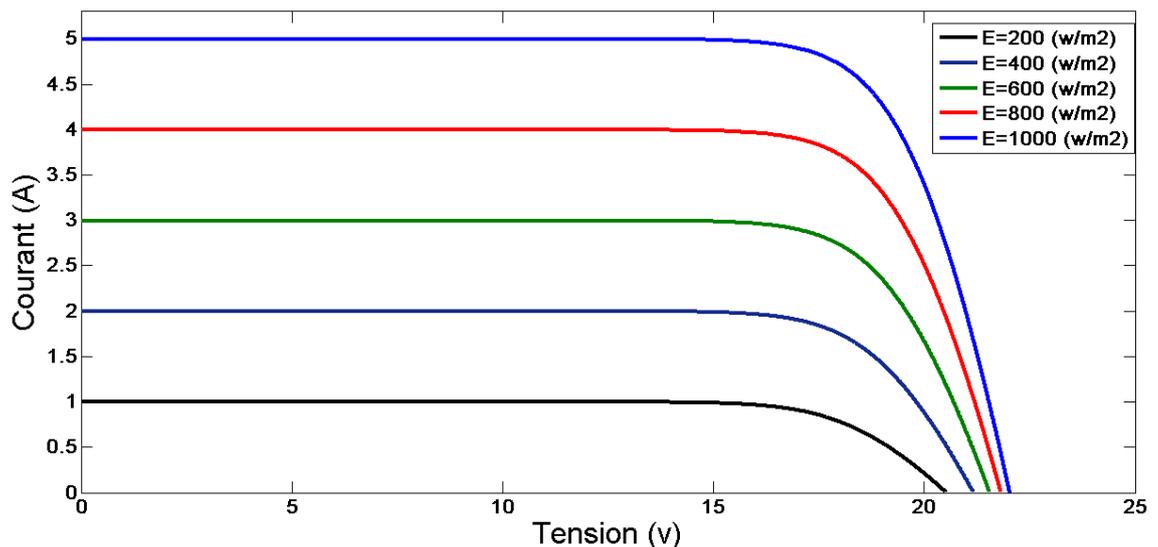


Fig.III.2 Simulation de la caractéristique (I-V) avec différents éclairagements, pour $T=25 \text{ °C}$
Selon la figure suivante la puissance électrique délivrée par le module varie énormément avec l'éclairement.

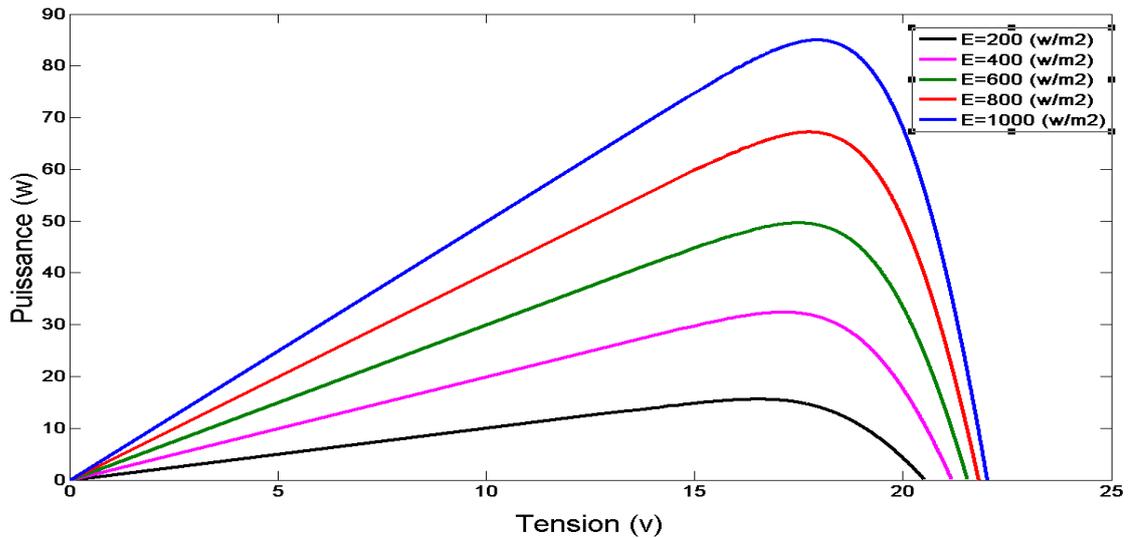


Fig III.3 Simulation de la caractéristique (P-V) avec différents éclairements, pour $T=25^{\circ}\text{C}$

b) Résultat de simulation avec un éclairement fixé $E=1000 \text{ W/m}^2$ et différentes températures :

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

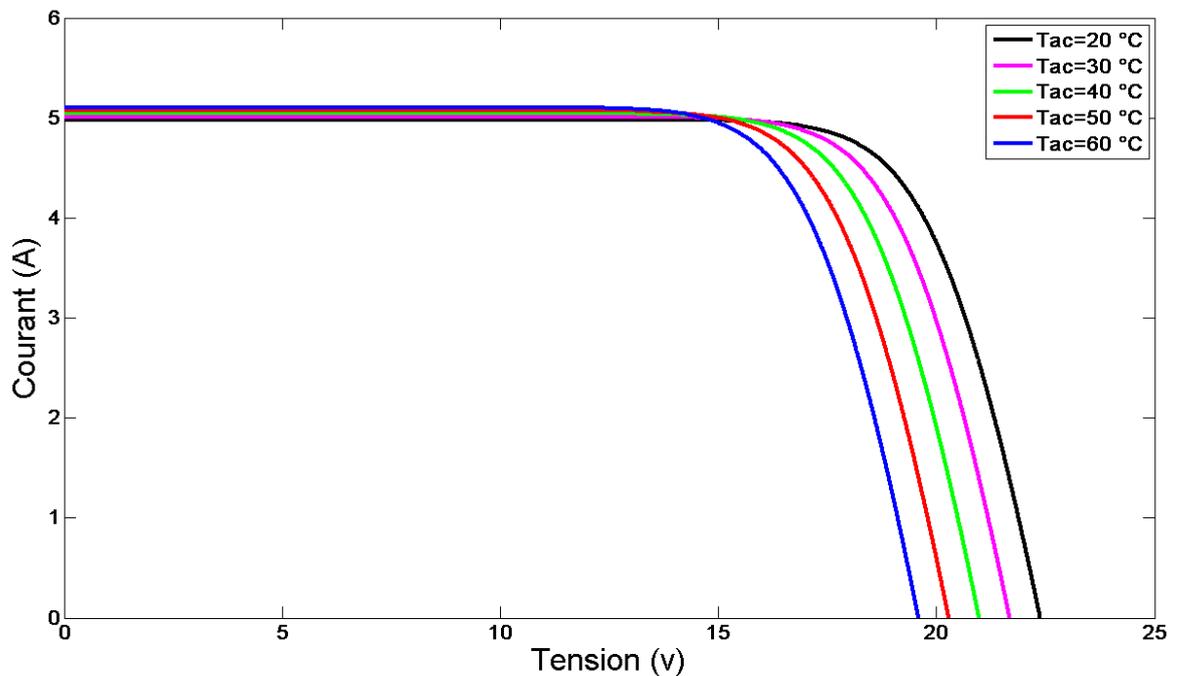


Fig III.4 Simulation de la caractéristique (I-V) avec différentes températures, pour $E=1000 \text{ W/m}^2$

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

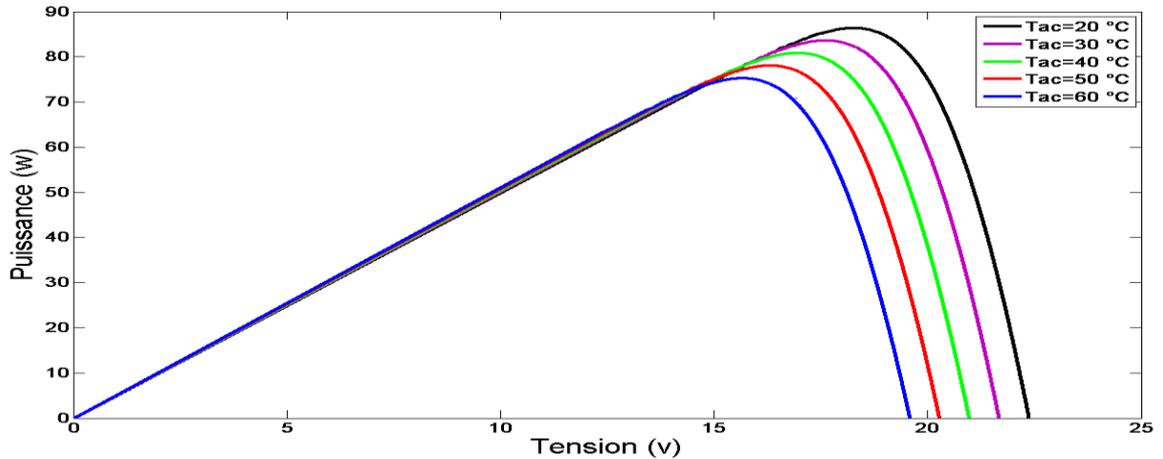


Fig.III.5 Simulation de la caractéristique (P-V) avec les différentes températures, pour $E=1000W/m^2$

c) Résultat de simulation avec des données réel de site Ouargla :

Dans le but de tester le module avec des données réelles on a utilisé les résultats rangés dans le tableau suivant :

Tab. III.2 Les éclairagements et les températures de la journée 04/04/2004 à Ouargla [36]

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

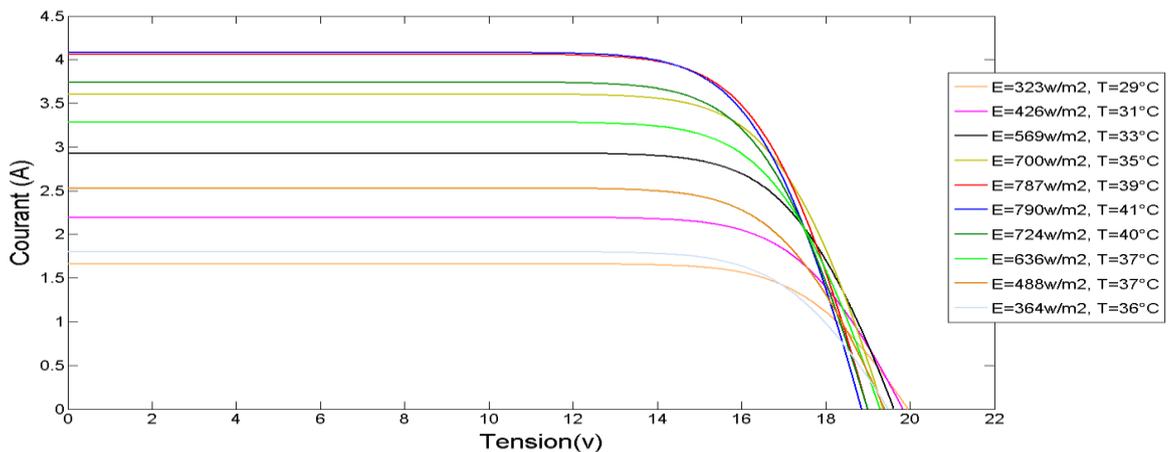


Fig.III.6 Simulation de la caractéristique (I-V) avec des données réelles du site de Ouargla

III.3. MODELISATION D'ELECTROLYSEUR :

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

Les PEM sont fabriquées à partir de membranes en polymère pur ou de membranes composites où les matériaux forment une matrice de polymère. Un des matériaux les plus communément utilisés par les constructeurs de membrane échangeuse de protons est le Nafion, la figure III.7 représenté le structure d'un électrolyseur PEM.

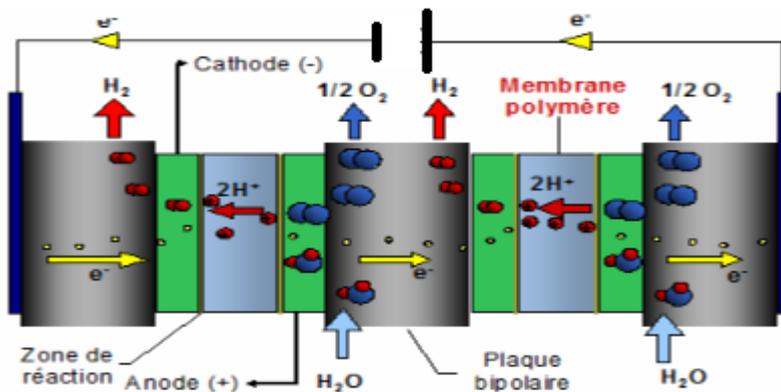


Fig.III.7 L'électrolyse PEM.

III.3.1. Modèle d'électrolyseur :

L'électrolyseur de l'eau est constitué de plusieurs cellules d'électrolyseurs connectées en série et en parallèle. Le modèle d'électrolyseur considéré ici est basé sur les caractéristiques des cellules individuelles. Le calcul de la tension de fonctionnement requise, et les débits d'hydrogène et de l'oxygène sont tous effectués sur une base par cellule, tandis que les valeurs correspondantes pour l'unité d'électrolyse ensemble sont trouvés tout simplement en multipliant par le nombre des cellules séries et parallèles

Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur sont représentées ci-dessous :

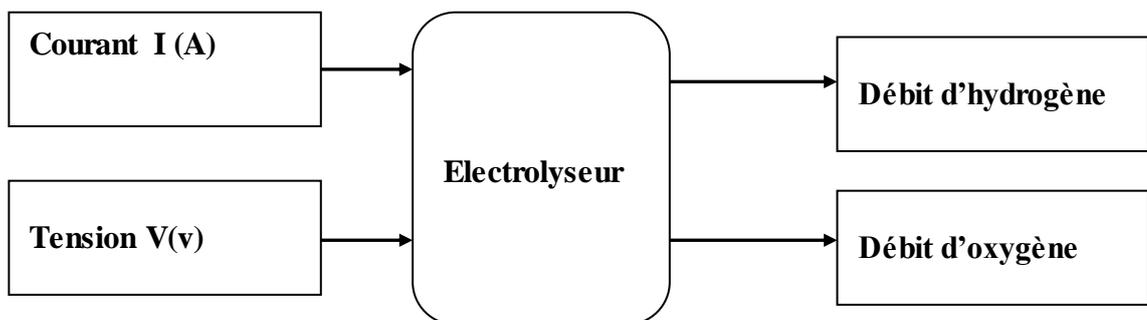


Fig.III.8 Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur

L'électrolyseur utilisé dans cette étude est de type PEM membrane échangeur de proton de gamme de laboratoire constituée d'une cellule avec le composé Pt/Nafion/Pt, EME électrode membrane électrode, dans laquelle le platine métallique est en plaqué à la surface de membrane, [37]. La figure dans l'Annexe présente les caractéristiques typiques de tension en fonction de la densité de courant pour une cellule d'électrolyseur à des différentes températures de fonctionnement.

L'électrolyseur est une charge pour le système, son point de fonctionnement est défini en fonction de sa connexion avec la source d'énergie.

Le schéma équivalent d'électrolyseur :

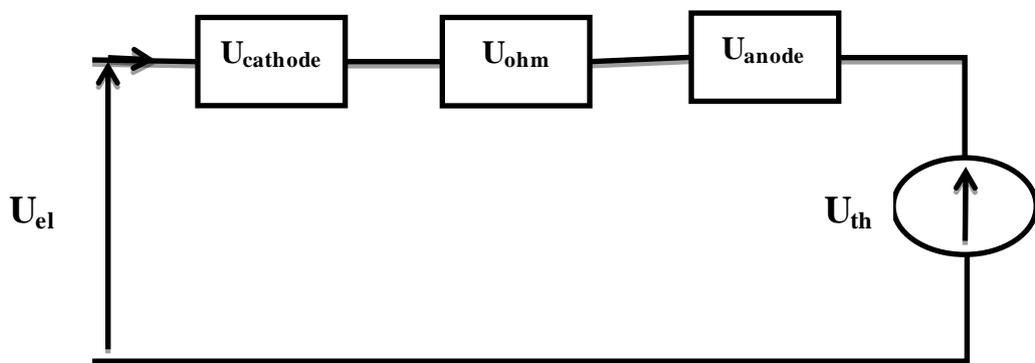


Fig.III.9 Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique

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

$$U_{el} = U_{th} + U_{anode} + U_{cathode} + U_{ohm} \quad (\text{III.29})$$

Où :

U_{th} : Tension théorique

U_{anode} : Surtension anodique (V)

$U_{cathode}$: Surtension cathodique (V)

U_{ohm} : Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur R_{el}

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

$$V_e = a + b * \text{Log}(I) + c * I \quad (\text{III.30})$$

Les paramètres a, b et c pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression).

Pour un électrolyseur constitué de nombre des cellules série s et parallèles p.

D'après l'équation (III.30) la relation tension-courant de la loi de Tafel, pour cette configuration d'électrolyseur, est donnée par l'équation suivante :

$$V_{N_{\text{cellules}}} = s * (a + b * \text{Log}(I_e/p) + c * I_e/p) \quad (\text{III.31})$$

$V_{N_{\text{cellules}}}$: La tension totale d'électrolyseur

I_e Le courant total d'électrolyseur.

- **Volume de production d'hydrogène :**

Par l'utilisation de la loi des gaz parfaits le volume de gaz produit est calculé par l'équation suivante :

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{ItRT}{ZFP} = Q * t \quad (\text{III.32})$$

Tel que : $n = \frac{I*t}{Z*F}$

Par l'utilisation de la méthode d'intégration de trapèze, on a calculé le volume d'hydrogène pendant un intervalle du temps.

- **Débit de production d'hydrogène :**

$$Q = \frac{N_{\text{cellules}} * R * I_f * T}{Z * F * P} = \frac{N_{\text{cellules}} * 8.32 * I_f * T}{2 * 96500 * 0.1013} \quad (\text{III.33})$$

V : volume d'hydrogène produit (ml)

Q : Débit de production d'hydrogène (ml/s)

T : Température de l'électrolyte

R : Constant des gaz parfaits

Z : Nombre d'électron requis pour libérer une molécule

N cellules : Nombre de cellules d'électrolyseur s*p

F : Constant de Faraday

P : Pression atmosphérique

T : Temps correspondant à la production de volume V

I_f Le courant de fonctionnement d'électrolyseur

- **Le rendement d'électrolyseur :**

Le rendement d'électrolyseur est donné par l'équation suivante [38]:

$$\eta_{el} = \frac{1.23 * s}{V_f} \quad (\text{III.34})$$

V_f : La tension du point de fonctionnement.

s : Nombre de cellules séries

III.3.2. La caractéristique courant-tension d'électrolyseur :

Pour notre étude nous avons choisi l'électrolyseur de type PEM .

A partir des graphes expérimentaux avec différent températures (Voir L'annexe 3), on a choisi le graphe de la température $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ et déterminé les points (I-V) qui sont indiqués sur le tableau suivant :

Tab.III.3 : Données expérimentaux d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-V)

[Voir l'annexe 3]

T=80 °C	
Courant (A)	Tension (V)
0.14286	1.6857143
0.28571	1.7333333
0.42857	1.762069
0.5714	1.7896552
0.85714	1.8275862
1.000	1.85
1.2857143	1.873333
1.7142857	1.9066667
2.000	1.933333
2.5714286	1.973333
3.000	2.0071429
4.000	2.0821429
5.000	2.15

Pour déterminer les facteurs a , b et c nous choisissons 3 points à partir du graphe de notre électrolyseur avec $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$, et on a remplacé les valeurs des courant et tension de ses point dans l'équation (III.30). Nous obtenons donc, le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} 1.6857143 = a + b * \text{Log}(1/7) + c * (1/7) \\ 1.85 = a + b * \text{Log}(1) + c * (1) \\ 2.15 = a + b * \text{Log}(5) + c * (5) \end{cases} \quad \text{(III.35)}$$

La solution de ce système d'équations donne les 3 facteurs :

$$\begin{cases} a = 1.8018 \\ b = 0.0632 \\ c = 0.0482 \end{cases}$$

En fin le modèle d'une cellule d'électrolyseur est écrit comme suit :

$$V = 1.801 + 0.0632 * \text{Log}(I) + 0.0482 * I \quad \text{(III.36)}$$

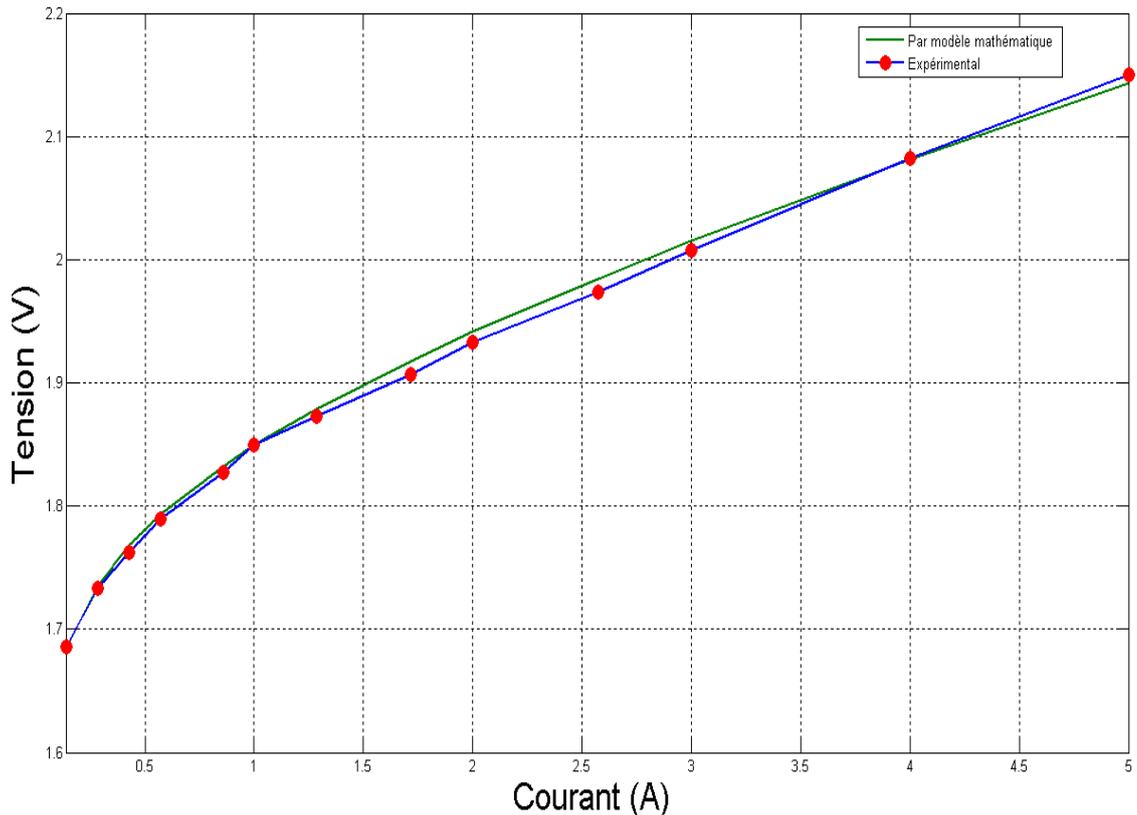


Fig.III.10 Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale et simulé pour $T_{e1} = 80^{\circ}\text{C}$

III.4. MODELISATION DE COUPLAGE (GPV-ELECTROLYSEUR) :

La source de notre système est le générateur PV, l'électrolyseur est la charge dans ce système.

Pour l'étude de notre système (G PV-électrolyseur), on a fait le couplage entre les deux graphes de la caractéristique (I-V), pour trouver le point de fonctionnement de ce dernier. Le point de fonctionnement représente l'intersection entre les deux graphes.

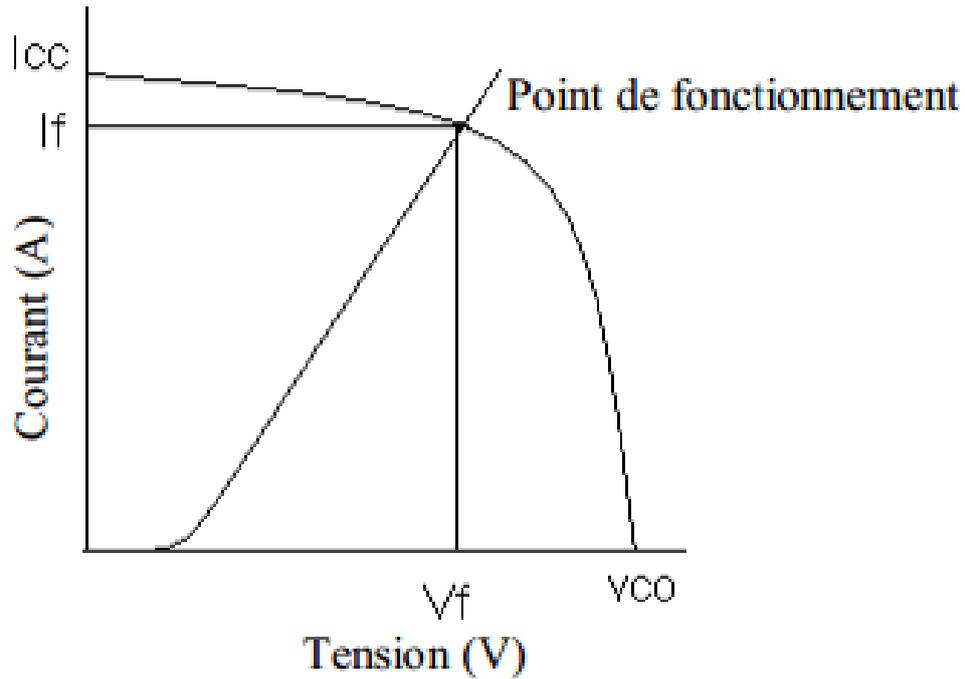


Fig.III.11 point de fonctionnement du système

III.4.1. Calcul du point de fonctionnement :

Les conditions de couplage :

- La tension de l'électrolyseur doit être égale à la tension du générateur photovoltaïque :

$$1.801 + 0.0632 * \text{Log}(I) + 0.0482 * I = -I_{\text{gén}} \cdot R_{s(\text{gén})} + V_{th} * \log\left(\frac{-I_{\text{gén}} + I_{cc} + I_0}{I_0}\right) \quad (\text{III.37})$$

- Le courant du générateur doit être égal au courant de l'électrolyseur : $I_g = I_e$

$$f(I) = -1.801 - 0.0632 * \text{Log}(I) - 0.0482 * I - I_{\text{gén}} \cdot R_{s(\text{gén})} + V_{th} * \log\left(\frac{-I_{\text{gén}} + I_{cc} + I_0}{I_0}\right) = 0 \quad (\text{III.38})$$

L'équation (III.38) est une équation non linéaire. La résolution de cette équation se fera par la méthode de Newton-Raphson d'écrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{III.39})$$

$f'(x_n)$: Le dérivé de la fonction $f(x_n)$

x_n : La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante.

$$\varepsilon = x_{n+1} - x_n \quad (\text{III.40})$$

Telle que ε est le critère d'arrêt.

- **Le rendement global du système :**

Le rendement global est calculé par :

$$\eta_s = \frac{I_f * 1.23 * S}{E * S} \quad (\text{III.41})$$

E : éclairement (W/m^2), S : surface de générateur (m^2)

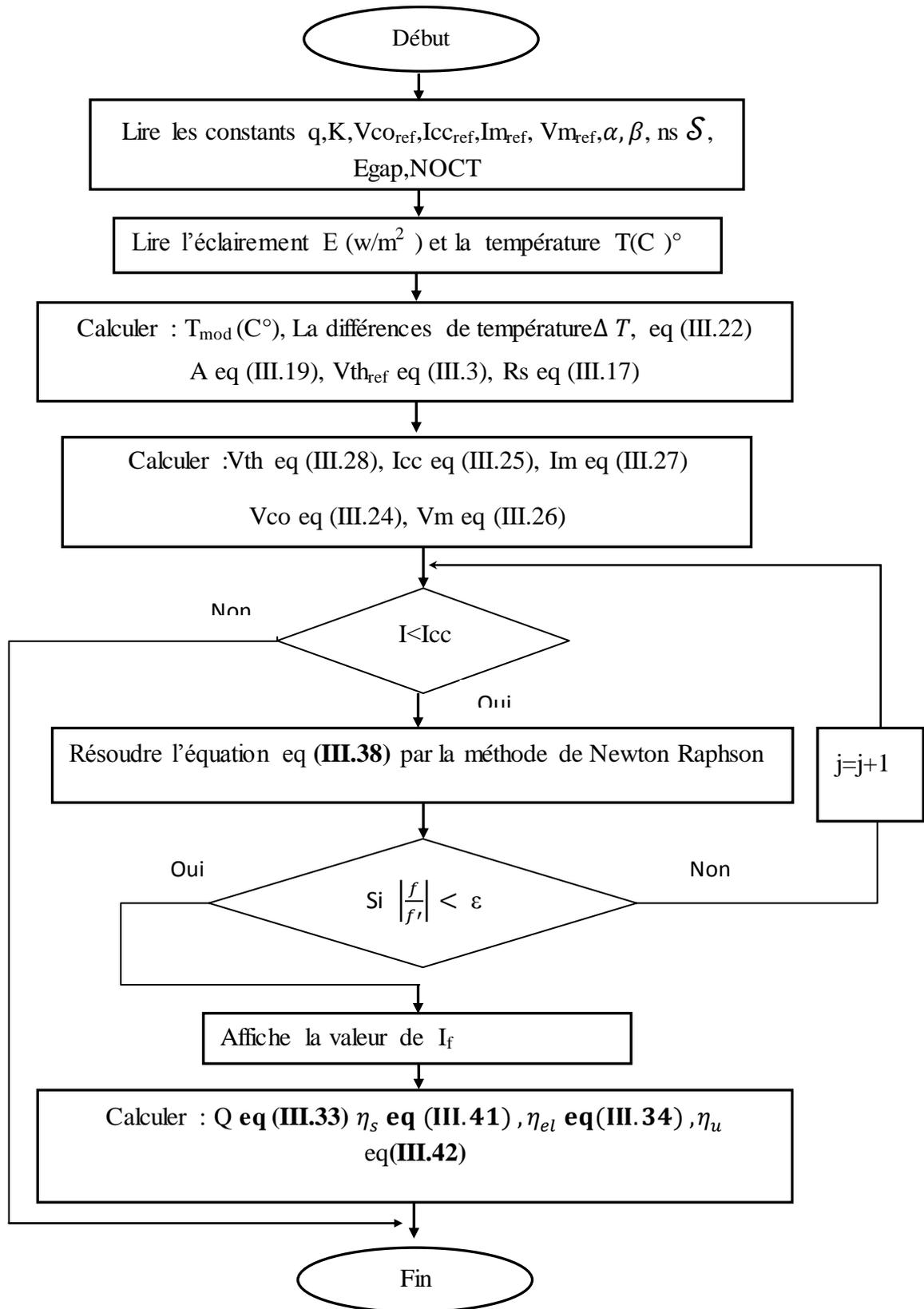
- **Le rendement d'adaptation**

$$\eta_u = \frac{I_f * V_f}{I_m * V_m} \quad (\text{III.42})$$

- **Le rendement de générateur photovoltaïque :**

$$\eta_s = \frac{I_f * V_f}{E * S} \quad (\text{III.43})$$

III.4.2. Organigramme de couplage direct :



III.4.3. Les résultats de simulation :

Pour exécuté notre organigramme de couplage nous avons choisi les données de l'éclairement, E (W/m^2) et de température T ($^{\circ}C$) d'un jour mesurées à Ouargla en 2004.

Nous présentons les résultats de simulation de couplage direct entre un panneau solaire **BP 585F** et une seule cellule d'électrolyseur de type PEM.

Après l'exécution de notre organigramme de couplage direct sous MATLAB nous avons trouvé les résultats suivants :

a) Les caractéristiques (I-V) du couplage

Nous présentons les résultats des mesures sur un panneau solaire **BP 585F** et l'électrolyseur avec une seule cellule et le couplage entre eux.

L'excitation de l'organigramme du couplage par un programme MATLAB représente les résultats suivants :

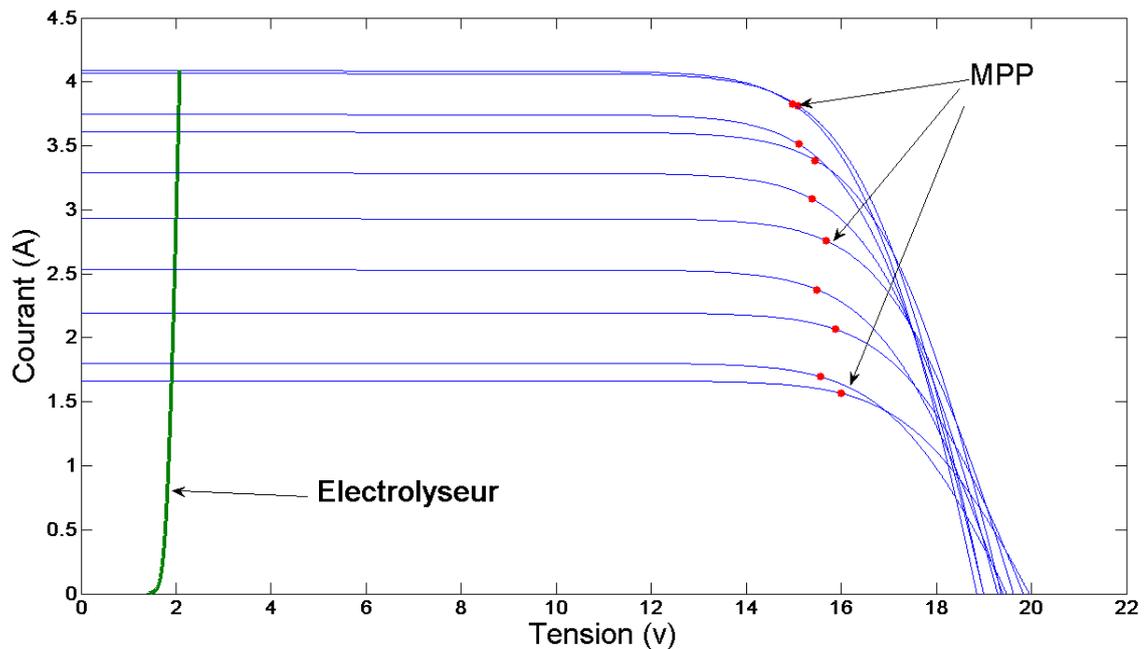


Fig.III.12 Caractéristiques (I-V) du couplage, une cellule d'électrolyseur- module PV

La figure III.12 représente la caractéristique (I-V) de générateur photovoltaïque et l'électrolyseur dans le cas d'utilisation d'une seule cellule avec différentes valeurs d'éclairements et de températures.

Le fonctionnement d'électrolyseur est défini par les points d'intersection entre la courbe (I-V) de GPV et l'électrolyseur.

Dans ce cas nous avons observé que la courbe d'électrolyseur ne passe pas par les points de puissance maximaux de générateur photovoltaïque pendant toute la journée.

Les résultats de simulation pour la journée 04/04/2004 sont présentés dans le tableau (III.3) suivant :

Tab.III.4 Caractéristiques du couplage d'une cellule d'électrolyseur avec un module

Heure	8 :00	9 :00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
E(w/m²)	323	426	569	700	787	790	724	636	488	364
T(°C)	29	31	33	35	39	41	40	37	37	36
I_m(A)	1.572	2.076	2.773	3.412	3.844	3.865	3.543	3.109	2.394	1.706
V_m(v)	15.75	15.57	15.30	14.97	14.53	14.37	14.54	14.9	15.05	15.20
I_{cc}(A)	1.663	2.20	2.93	3.608	4.064	4.086	3.746	3.287	2.53	1.803
I_f(A)	1.662	2.195	2.932	3.607	.065	4.086	3.746	3.287	2.531	1.803
V_f(v)	1.913	1.956	2.01	2.056	2.086	2.086	2.065	2.035	1.982	1.925
V_{co}(v)	19.78	19.6	19.32	19	18.56	18.39	18.57	18.93	19.08	19.22
P_m(w)	25.04	32.80	43.24	52.34	57.56	57.33	53.06	47.46	36.80	26.37
Q(ml/s)	0.25	0.33	0.44	0.542	0.610	0.614	0.563	0.494	0.380	0.271
V(l)	0	1.043	2.430	4.198	6.272	8.476	10.59	12.49	14.07	15.24
η_{el}(%)	64.29	62.87	61.18	59.82	58.97	58.93	59.56	60.43	60.07	63.89
η_u(%)	12.70	13.09	13.63	14.17	14.72	14.87	14.58	14.09	13.62	13.16
η_s(%)	1.005	1.006	1.006	1.006	1.008	1.009	1.010	1.009	1.012	1.017
η_m(%)	1.56	1.6	1.64	1.68	1.7	1.71	1.69	1.67	1.63	1.59

b) Le rendement d'utilisation (adaptation)

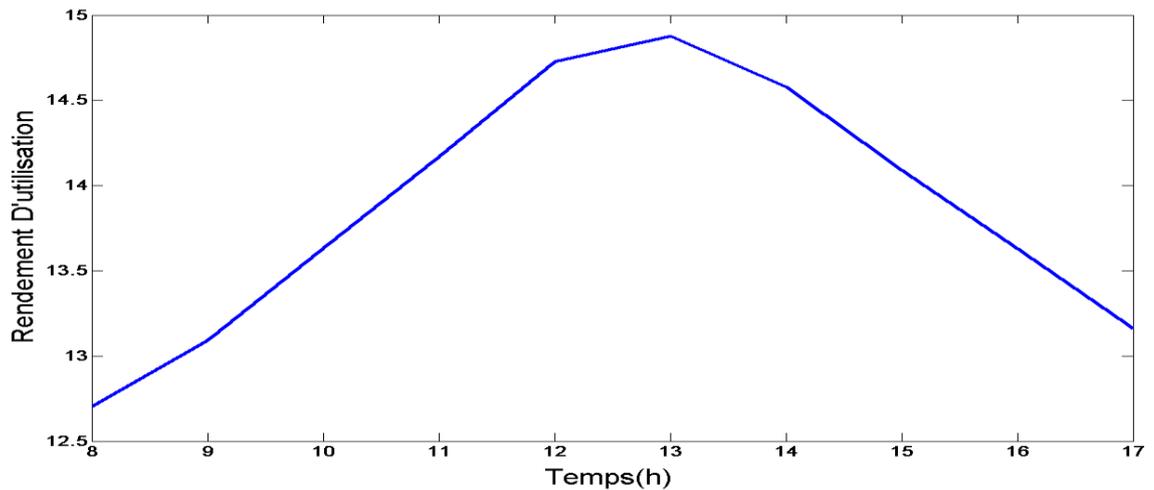


Fig.III.13 La variation de rendement d'utilisation

D'après la figure III.13 la variation de rendement est passée par trois étapes selon le temps :

1. [8h00 à 11h00] le rendement d'utilisation augmente jusqu'à 14.7%, parce que dans cette intervalle nous observons une augmentation de tension de couplage V_f et une diminution de tension de point de puissance maximale avec une variation très légères au niveau de courant ce qui signifie une progression de la puissance de couplage vers la puissance maximale de module PV.
2. [11h00 à 15h00] le rendement d'utilisation prend sa valeur maximum de fonctionnement 14.9%, avec l'éclairement et la température suivantes (790 W/m^2 41°C)
3. [15h00 à 17h00] le rendement d'utilisation diminue jusqu'à 13%,

A partir de 13h00.

c) Rendement de système et d'électrolyseur

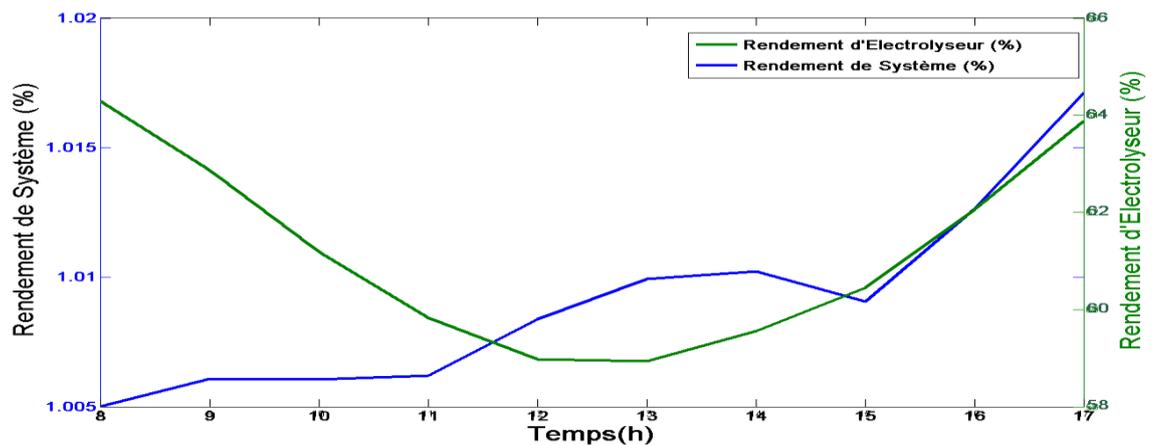


Fig.III.14 La variation des rendements calculés

Le rendement d'électrolyseur varie inversement avec l'augmentation de l'éclairement. Pendant les intervalles 8h à 10h et 15h à 17h le rendement prend des valeurs importantes. Durant l'intervalle 12h à 13h le rendement prend leur valeur minimale.

Le rendement global de système prend des valeurs faibles entre 1% et 1.02% car d'après la figure III.13 le rendement d'utilisation de générateur est faible entre 12.5% et 15% (non-adaptation) et aussi le rendement faible de générateur.

D'après les résultats de cette simulation on remarque que le rendement d'utilisation (adaptation) et le rendement global de système sont très faibles. Pour améliorer ces rendements nous allons procéder avec des nouvelles dimensions de l'électrolyseur.

III.5. DIMENSIONNEMENT D'ELECTROLYSEUR :

Pour assurer l'adaptation de l'électrolyseur au générateur PV avec l'éclairement de $E=569\text{W/m}^2$. Nous avons calculé les nombres des cellules séries et parallèles d'électrolyseur, en suivant les étapes suivantes et finalement nous arrondissons les valeurs de s et p à des nombres entiers car ils sont souvent décimaux

- **Calcul de p et s d'électrolyseur**

Pour calculer p et s on résout l'équation suivante :

$$\begin{cases} Vf = Vmax = s * (1.801 + 0.0632 * \text{Log}\left(\frac{Imax}{p}\right) + 0.0482 * \left(\frac{Imax}{p}\right)) \\ I_{cellule} = Imax/p \end{cases} \quad \text{(III.44)}$$

La résolution de ce système est :

$$s=8 \quad p=1$$

III.5.1 Résultat de simulation :

Après le dimensionnement nous avons exécuté notre organigramme sous MATLAB par l'utilisation des données suivantes comme exemple pour Ouargla :

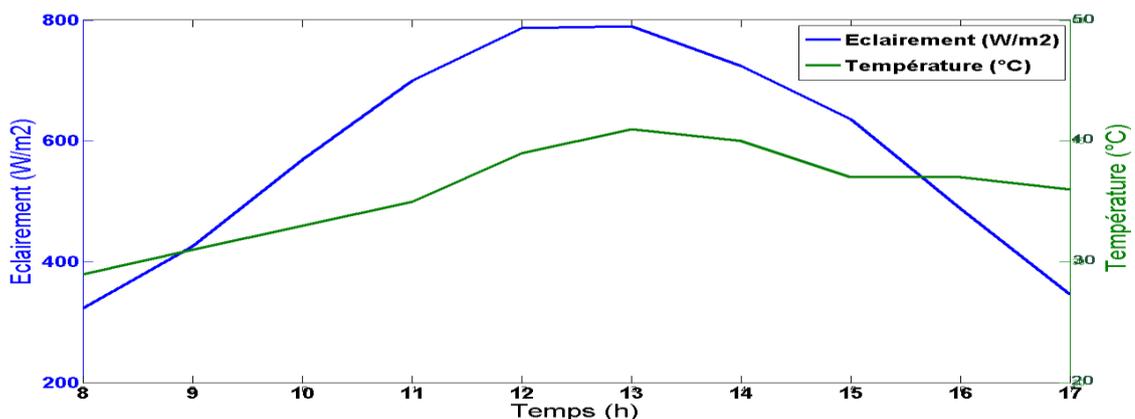


Fig.III.15 Variation d'éclairement et température en fonction de temps

La figure III.16 représenté la variation d'éclairement et la température mesurés en fonction de temps. L'éclairement prend des valeurs minimaux pendant les intervalles 8h à 10h et 15h à 17h et prend la valeur maximale 790 W/m^2 entre 12h à 13h, et la température prendra sa valeur maximal 41 C° à 13h. Par l'introduction de ces données dans notre programme nous avons reçu les résultats suivants :

a) *Caractéristique de couplage*

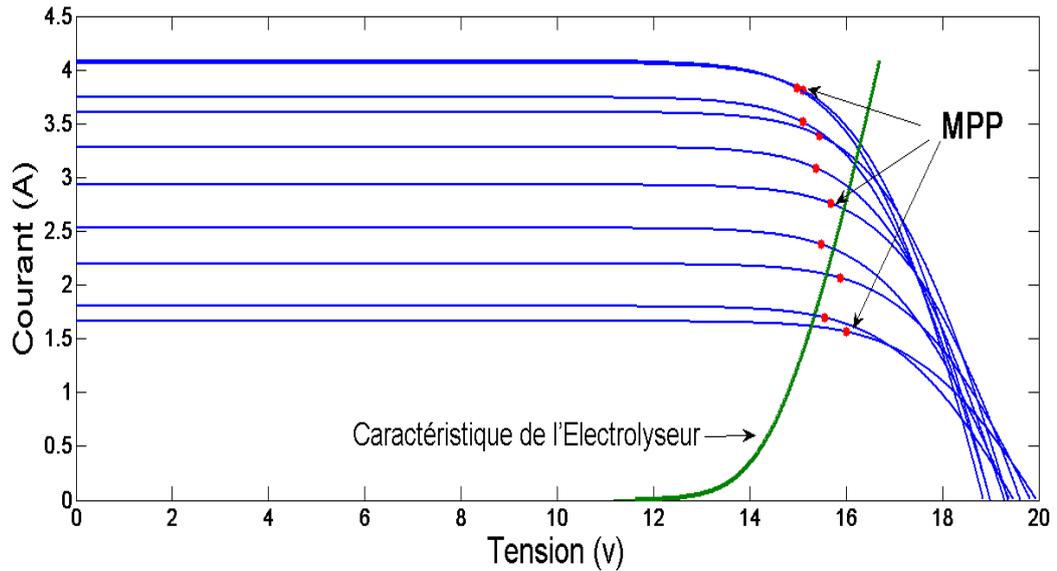


Fig.III.16 Caractéristiques (I-V) de couplage avec $s=8$, $p=1$

La figure III.16 représente la caractéristique (I-V) de générateur photovoltaïque et l'électrolyseur avec $s = 8$, $p = 1$ avec les différentes valeurs d'éclairements et de température. Dans ce cas nous observons un rapprochement remarquable entre les points de puissance maximale et les points de fonctionnement de système, surtout pour les moyens éclairements.

b) *Tension et courant d'électrolyseur*

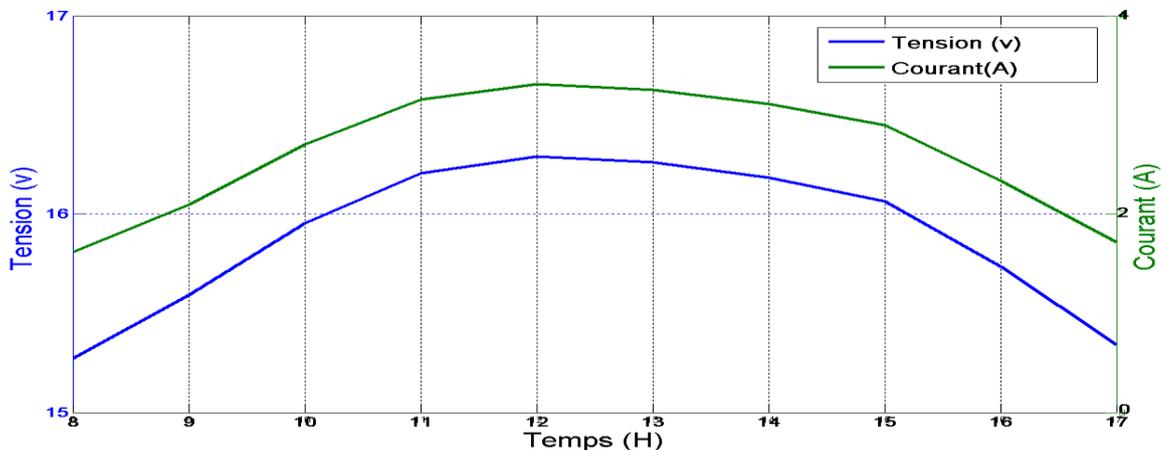
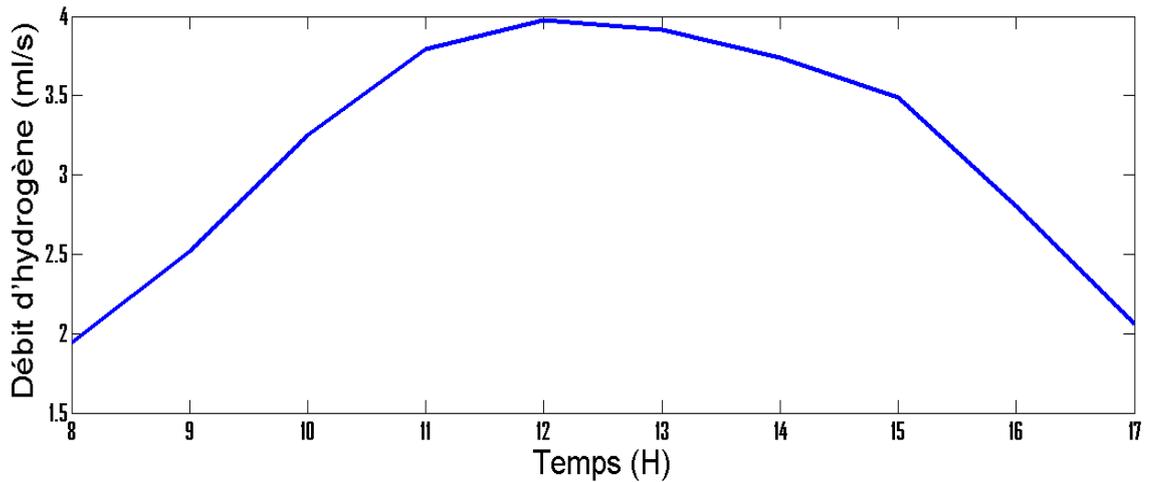
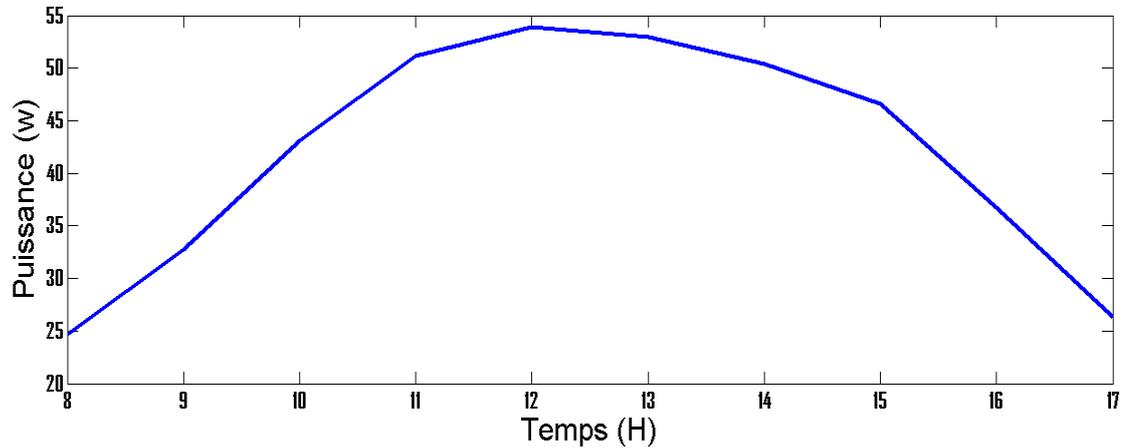
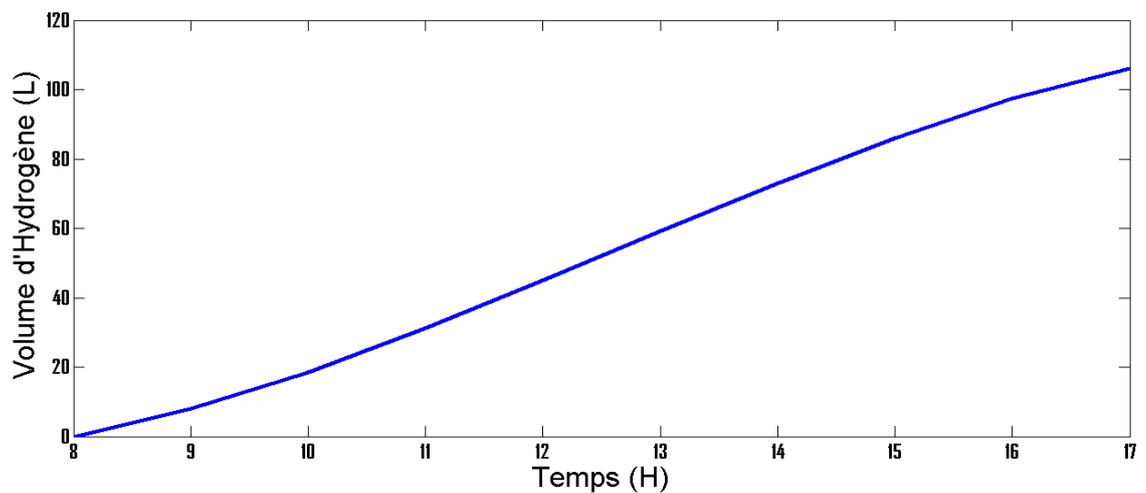


Fig.III.17 Variation de courant et tension en fonction de temps

c) Débit d'hydrogène**Fig.III.18** Evolution de débit en fonction de temps*d) La puissance d'électrolyseur***Fig.III.19** Variation de puissance d'électrolyseur en fonction de temps*e) Volume d'hydrogène***Fig.III.20** Evolution de volume en fonction de temps

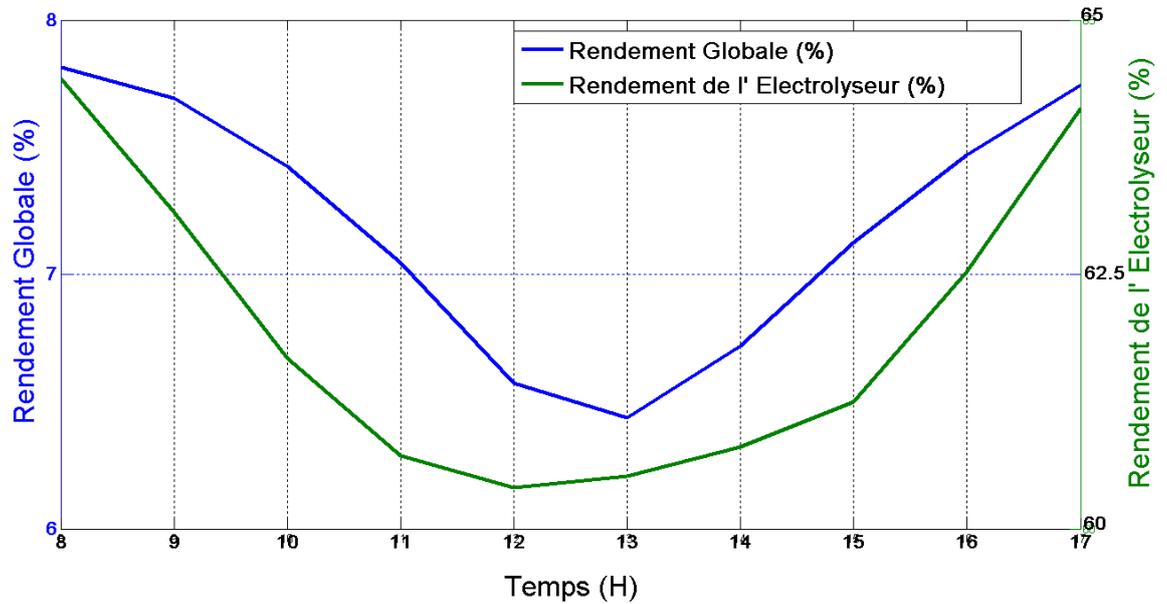
f) *Rendement de système et d'électrolyseur*

Fig.III.21 Variation des rendements en fonction de temps

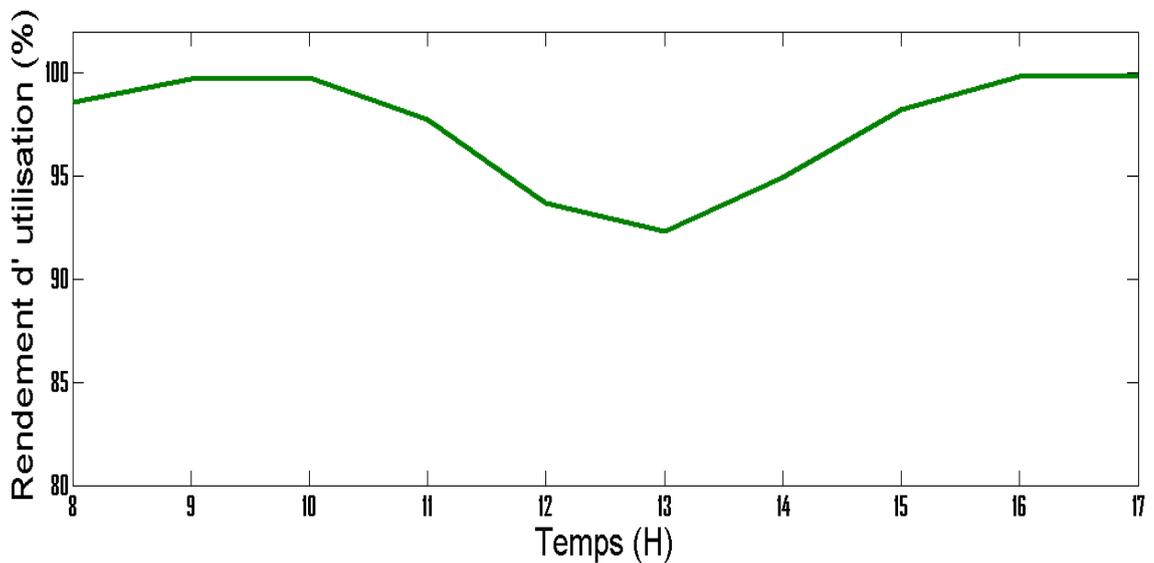
g) *Rendement d'utilisation*

Fig.III.22 Variation de rendement d'utilisation en fonction de temps

- **Analyse et interprétation des résultats**

Pour diminuer les pertes dues au non adaptation du système, on a simulé à l'aide du Programme développé les caractéristiques (I-V) du couplage avec la nouvelle configuration de l'électrolyseur. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures ci-dessus :

- Les figures (III.18-III.20) montrent que la variation de courant et le débit d'hydrogène et la puissance varient proportionnellement avec l'éclairement parce que les courbes de ces paramètres prennent leurs valeurs maximales entre 12h et 13h et prennent leurs valeurs minimales à 8h et 17h en corrélation avec l'évolution de la courbe d'éclairement.

- D'après la courbe de rendement d'électrolyseur on montre que l'allure prend des valeurs importantes à l'intervalle 8h à 11h et 15h à 17h et prend la valeur minimale entre 11h et 14h, car le rendement d'électrolyseur varie inversement avec la tension (figure III.18). D'après les Fig.III.22 et Fig.III.23 nous remarquons que le rendement global de système, varie entre 6% et 8% par rapport au premier cas parce que le rendement d'utilisation (adaptation) varie entre 92% et 99.7%. Le choix judicieux du nombre de cellules en série et en parallèle de l'électrolyseur améliore le résultat d'adaptation de système de telle sorte que les points de fonctionnement de système seront le plus proches possibles des points de puissance maximale (MPP) de GPV.

III.6. CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles mathématiques décrivant le comportement du module photovoltaïque et l'électrolyseur, ensuite nous nous intéressons au système constitué de ces deux éléments nous déterminerons les points de fonctionnement, les puissances maximales du module, les différents rendements et la production en hydrogène.

Le résultat de simulation du premier cas (une seule cellule d'électrolyseur) montre que la valeur maximale de rendement d'utilisation est de (15%) et celle de rendement global maximale de système est de (1%), des valeurs qui sont faibles cela est dû au non-adaptation du système. Pour améliorer l'adaptation de système nous avons changé les dimensions de l'électrolyseur, les résultats obtenus montrent une nette amélioration dans le transfert de puissance entre le générateur PV et l'électrolyseur.

*CONCLUSION
GENERALE*

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la méthode de production d'hydrogène à partir de couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur de type PEM (proton exchange membrane).

L'électrolyseur à Membrane polymère est considéré par beaucoup comme une technologie d'avenir, car elle peut bénéficier des nombreux développements sur les piles à combustibles de technologie PEM, et de la réduction des coûts associée. Cette technologie reste encore peu employée au regard de la production mondiale d'hydrogène. Tout cela justifie la poursuite des travaux de recherche.

L'objectif global de notre travail est l'étude d'un système photovoltaïque en vue de produire le maximum de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, la production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques, avec l'utilisation des données climatiques de la région de Ouargla.

Dans ce travail nous avons présenté la modélisation des éléments constituant le système de production d'hydrogène solaire tels que le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur et ensuite la simulation de couplage direct PV-Electrolyseur pour les différents éclairagements et températures. et aussi pour différentes combinaisons des cellules d'électrolyseur.

Les résultats obtenus permettent de voir dans le premier cas de couplage direct entre le GPV et l'électrolyseur d'une seule cellule que le volume d'hydrogène produit est très faible et une désadaptation entre le GPV et l'électrolyseur, pour augmenter le volume d'hydrogène et améliorer le degré d'adaptation entre les éléments du système nous avons testé par simulation une nouvelle dimension d'électrolyseur par le changement de nombre des cellules d'électrolyseur, les résultats obtenus montrent un rapprochement considérable entre les points de puissances maximales du GPV et celle des points de fonctionnement de système et une nette amélioration des performances de système ce qui signifie une augmentation de volume d'hydrogène produit par le système.

Comme perspective nous pensons à l'étude de système complet de production d'énergie électrique. Car l'outil de modélisation que nous avons développé permet de simuler le couplage direct GPV-Electrolyseur cet outil pourra être développé pour simuler le fonctionnement complet du système (GPV-Electrolyseur et pile à combustible).

BIBLIOGRAPHIES

BIBLIOGRAPHIES

- [1] Société française de chimie : L'actualité chimique, l'hydrogène, carburant de demain ? n°12, décembre 2001.
- [02] Sources: key world energy statistics international energy agency rapport 2012
- [03] G. Bessereau - A. Sanière «Charbon : ressources, réserves et production » Manuscrit transmis en décembre 2007. Innovation Energie Environnement.
- [04] stéphane thiers site <http://thiers.stephane.free.fr>.
- [05] Jean-Louis Bascdevant, James Rish et Michel Spiro « Energie Nucléaire » les éditions de L'école polytechnique. Janvier 2002.
- [06] Société du Groupe Sonelgaz « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique » document a été élaborée par le ministère de l'énergie et des mines. Mars 2011
- [07] Babu, B.V. and A.S. Chaurasia, modeling for pyrolysis of solid particle: kinetics and heat transfer effects. energy conversion and management, 2003.
- [08] FARADJI née Kherbouche Djamila « Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse » mémoire de DOCTORAT. Univ Abu Bakr Belkaid Tlemcen.
- [09] Microsoft® Encarta® 2009, "Hydrogène", Microsoft Corporation, 2008.
- [10] Association Française de l'Hydrogène, "Pourquoi l'hydrogène? ", V4.2 Février 2004.
- [11] J.P. Jonchère Fiche 3.1 – Final : octobre 2003 1ère émission : 2001 - Révision du 16 oct. 2003 Source : RAPPORT D'ÉTUDE 10/06/2008 N° DRA-08-95313-07833B Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés
- [12] Anatoly Demina, Elena Gorbova, Panagiotis Tsiakaras, « High temperature electrolyzer based on solid oxide co-ionic electrolyte: A theoretical model ». Journal of Power Sources 171 (2007) 205–211.
- [13] Samer RABIH « Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs Photovoltaïques » thèse de doctorat Univ de Toulouse 03/10/2008.
- [14] S. Abanades, G. Flamanta, Chem. Eng. and Process. : Process Intensification, 47 (2008) 490-498.

- [15] J. K. Dahl, K. J. Buechler, A. W. Weimer, A. Lewandowski, C. Bingham, *Int. J. of Hydrogen Energy*, 29 (2004) 725-736.
- [16] A. Steinfeld, *Int. J. of Hydrogen Energy*, 27 (2002) 611-619.
- [17] T. Sreethawong, S. Yoshikawa, *Int. J. of Hydrogen Energy*, 31 (2006) 786-796.
- [18] M. Kitano, K. Tsujimaru, M. Anpo, *App Catalysis A : General*, 314 (2006) 179- 183
- [19] J.P. Jonchère « production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles » mémento de l'hydrogène 1ère émission : 2001 .
- [20] Mémento de l'Hydrogène « liquéfaction, stockage et transport de l'hydrogene sous forme cryogenique »fiche 4.3 – révision de juillet 2011 source : afh2.
- [21] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine.
- [22]Office fédéral des questions conjoncturelles « Centrales photovoltaïques » Guide pour le dimensionnement et réalisation de projets 1996.Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [23] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », *Solar Energy*, vol. 4, no. 3, p. 1–19, Jul. 1960.
- [24]J. A. Duffie, A. Wiley and W.A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes », Second Edition. -Interscience Publication, 1991.
- [25] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [26] Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », mémoire de magister, option Microélectronique –Photovoltaïque Universitaire De Bechar.
- [27] dariga MEEKHUN « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteur sans fil autonomes pour l'application aéronautique »mémoire de doctorat, univ Toulouse.
- [28] A.Mefti, H.Mimouni « Evaluation du potentiel énergétique solaire » Bulletin des énergies renouvelables No 2, Décembre 2002.
- [29] A. Guen, « contribution à l'étude des système de télécommunications mobiles Alimentés par énergie solaire », thèse de magister, Université de Tlemcen, février 1992.

- [30] Boukhers Djamil « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage »mémoire de MAGISTER. Univ de Mentouri de Constantine. 28 / 11 / 2007.
- [31] SOFIANE ABADA « Etude Et Optimisation D'un Générateur Photovoltaïque Pour La Recharge D'une Batterie Avec Un Convertisseur Sepic » Mémoire pour l'obtention du grade de Maître Sciences (M.Se.). Université laval quebec 2011.
- [32] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie,(AFME).
- [33] B. Arnason et T. I. Sigfúson, « Iceland_ A future Hydrogen Economy », Int. J. Hydrogen Energy 25 (2 000) 389.
- [34] T. U. Townsend, « A method for estimating the long term performance of direct-coupled photovoltaic systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [35]<http://www.posharp.com/Businesses/daacacf6-2fa0-4fe2-b6f5-0211a36989a/aPanel/BP585F.pdf>. visité le 12-05-2014
- [36] Baouia. S « Etude et analyse d'un système photovoltaïque » Mémoire d'ingénieur, univ.Ouargla 2004.
- [37] P. Millet et al, « Design and performance of a solid polymer electrolyte water electrolyzer» International Journal of hydrogen Energy. Vol. 21, N°.2, pp. 87 - 93, 1996.
- [38] Gileadi E. «electrode kinetics for chemists chemical engineers and materials scientists» .New york :wiley 1993p 502-05[chapter 29].

ANNEXES

Annexe 1

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

Tableau : Quelques propriétés chimiques et physiques sur l'hydrogène normal et comparaisons avec le gaz naturel (valeurs en gras entre parenthèses) [11].

Annexe 2

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

Tableau : carte d'identité de soleil

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

Annexe 3

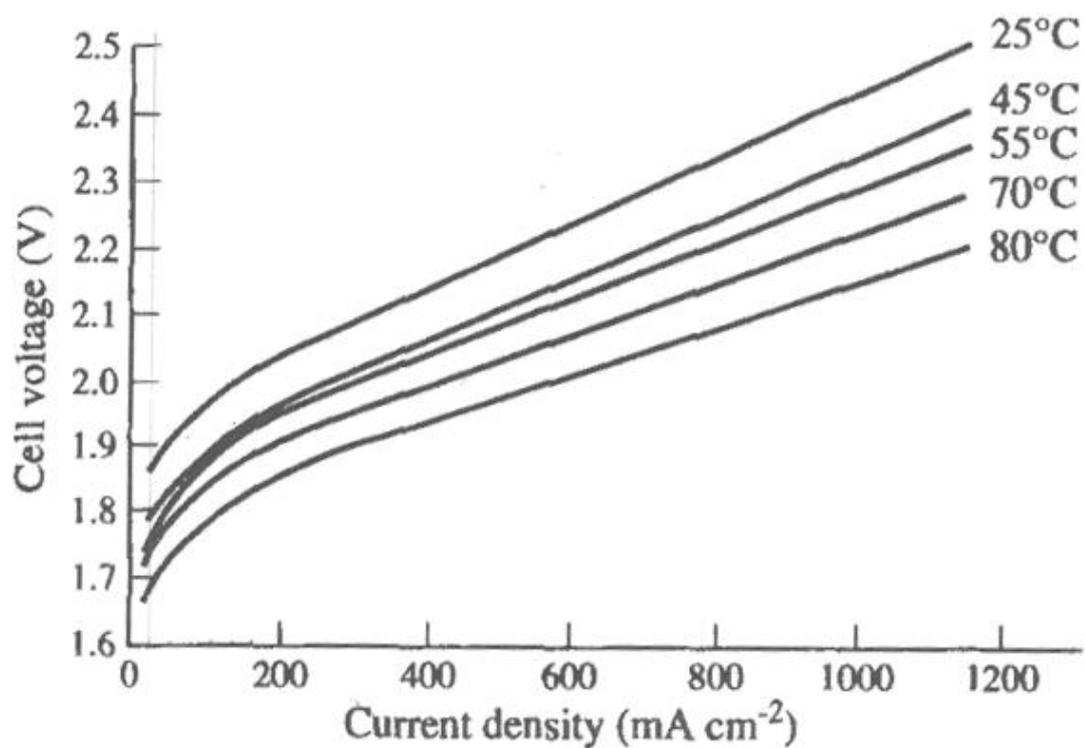


Figure : Variations de caractéristique (I-V) d'électrolyseur avec différentes températures

[Source] P. Millet et al, « Design and performance of a solid polymer electrolyte water electrolyzer» International Journal of hydrogen Energy. Vol. 21, N°.2, pp. 87 - 93, 1996.