

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER ACADEMIQUE**

En :« Electrotechnique»

Spécialité :« Commandes Electriques»

Présenté par :

MAMMAR Abla

et

SEBIANE Djihane

Intitulé du mémoire

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

Soutenu en vidéo conférence, le 30 / 09 /2021 , devant le jury composé de :

MELIANI Sidi Mohamed	Prof	Univ. Tlemcen	Président
MECHERNENE Abdelkader	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur
TIOURSI Mustapha	Prof	Univ. Tlemcen	Encadrant
BENHABIB Mohamed Choukri	MCA	Univ. Tlemcen	Co-encadrant

Année Universitaire : 2020 – 2021

Résumé

L'hydrogène produit par des énergies renouvelables est une solution qui prend de l'essor de plus en plus.

Le but de ce travail est de simuler le comportement du couplage direct entre un générateur photovoltaïque et un électrolyseur de type PEM pour produire de l'hydrogène.

Cette étude confirme les résultats obtenus par ailleurs. En effet, elle montre que le système peut s'approcher du fonctionnement optimal en dimensionnant correctement l'électrolyseur. Ceci se fait en calculant le nombre de cellules à mettre en série et/ou en parallèle pour que l'adaptation se fait aux points de puissance maximale.

Mot clés : hydrogène_ énergies renouvelables_ photovoltaïque_ électrolyseur_

Summary

Hydrogen produced by renewable energies is a solution that is becoming more and more popular.

The aim of this work is to simulate the behavior of direct coupling between a photovoltaic generator and a PEM electrolyzer to produce hydrogen.

This study confirms the results obtained elsewhere. Indeed, it shows that the system can approach the optimal operation by correctly dimensioning the electrolyzer. This is done by calculating the number of cells to be put in series and/or in parallel so that the adaptation is done at the maximum power points.

Key words : Hydrogen_ renewable energies_ photovoltaic_ electrolyzer

المخلص

في الرؤية الجديدة للطاقة ، يحتل الهيدروجين مكان الصدارة ، ويُعتبر حاليًا ناقلًا مثيّرًا للطاقة تتنوع طرق إنتاج الهيدروجين، ولكن يبدو أن إنتاجه عن طريق التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الطاقات المتجددة يعتبر هو الحل الأمثل من الناحية الاقتصادية والبيئية

لإنتاج H2 نستعمل طريقة التحليل الكهربائي PEM وذلك بربطه مباشرة مع المولد الكهروضوئي

الكلمات المفتاحية: هيدروجين_ الطاقات المتجددة_ كهروضوئي_ التحليل الكهربائي

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre Dieu de nous avoir donné la force et le courage.

A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr. Tioursi Mustapha notre promoteur et Mr Benhbib Mohamed Chokri qui ont fourni des efforts énormes, par leurs Informations leurs conseils et leurs encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance

Nos plus chaleureux remerciements pour nos parents et les familles SEBIANE et MAMMAR en général.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A mes très chers parents pour m'avoir toujours soutenue
et encouragé par leur présence et leur conseils de tous les
Instants, et pour m'avoir toujours entourée de leur amour.
Qu'ils trouvent à travers ce travail le fruit et la récompense
de leurs efforts.*

*A mes très chers frères **Mohammed Islem** et **Abd allah**, ma
chère sœur **Manel**, et la complicité qui nous unies.*

A toute ma famille oncles, tantes, cousins et cousines.

*A ma chère amie **Chaïma Djamaa** je t'adresse mes chaleureux
remerciements pour ton soutien moral tout au long de mes
études*

*A ma collègue **Abla** en reconnaissance de notre amitié.*

*Et à tous ceux qui me sont chers de loin et de près et qui
partagent une place dans mon cœur.*

*Et particulièrement à **Mr Tioursi Mustapha** et **Mr Benhabib** pour
leurs soutien permanent.*

Djihane

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.*

*Mon très cher frère Mohamed Fares , Ma très chère sœur Amina
A toute ma famille oncles, tantes, cousins et cousines.*

*A ma chère amie Djihane je t'adresse mes chaleureux
Remerciements pour ton soutien moral tout au long de mes études.*

Et à tous ceux qui me sont chers de loin et de près et qui

Partagent une place dans mon cœur.

*Et particulièrement à **Mr Tioursi Mustapha** et **Mr Benhabib** pour son
Soutien permanent.*

Abla

Table des matières

<i>Table des matières</i>	<i>i</i>
<i>Nomenclatures</i>	<i>I</i>
<i>La liste des figures</i>	<i>IV</i>
<i>La liste des tableaux</i>	<i>V</i>
<i>Introduction général</i>	<i>1</i>

Chapitre I : Revue bibliographique sur l'hydrogène et ses applications

1- Introduction	3
2- Généralités sur l'hydrogène	3
a- Propriétés sur l'hydrogène	3
b- L'hydrogène comme vecteur énergétique	6
3- Applications de l'H ₂	6
a- La pile à combustible	6
b- Le véhicule à hydrogène	9
4- Production de l'H ₂	11
a- Production par biomasse	11
b- Production par l'électrolyse de l'eau.....	11
5- Transport et stockage de l'hydrogène.....	12
a- Stockage de l'hydrogène	12
➤ Le stockage sous forme gazeux	12
➤ Le stockage sous forme liquide	12
➤ Le stockage sous forme d'hydrures métalliques	13
➤ Le stockage sous basse pression	13
b- Transport de l'hydrogène	14
➤ Transport par route	14
➤ Transport par mer	14
➤ Le transport de l'hydrogène par gazoducs	14
Conclusion	15

Chapitre II : Etude bibliographique sur les générateurs photovoltaïque

II.1. Introduction	17
--------------------------	----

II.2 Energie du soleil	a. Energie renouvelable.....	17
	b. Rayonnement extraterrestre.....	18
	c. Rayonnements direct et diffus.....	18
II.3 Spectre du rayonnement.....		19
II.4 L'effet photovoltaïque		20
	La cellule photovoltaïque	21
	b. Différents types de cellules solaires [15].....	24
	• Cellules monocristallines	24
	• Cellules poly cristallines.....	24
	• Cellules amorphes	25
II.5 Modélisation des cellules photovoltaïques.....		25
	a. Le modèle idéal	26
	a. Rendement d'une cellule.....	28
	b. Principe de fonctionnement	28
	c. Les paramètres des cellules photovoltaïques[21].....	29
II.6 Générateur photovoltaïque		30
II.7Le panneau photovoltaïque		33
	a. Association des cellules photovoltaïques PV [27].....	34
	b. L'influence de l'éclairement et de la température [28].....	34
II.8 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques [29].....		37
	• Avantage	37
	• Inconvénients.....	38
II.9. Conclusion		38

Chapitre III : Electrolyseur

III.1.	Introduction	40
III.2	Principe de fonctionnement d'électrolyse d'eau	40
III.3	Les types d'électrolyseurs [31]	41
	a. Les électrolyseurs Alcalins commercialisés et représentant la quasi-totalité des.....	41
	b. Les électrolyseurs PEM	42
	b.1 Principe de fonctionnement	42
	a. Electrolyseurs alcalins	43
	b. Electrolyseurs PEM	44
	c. Electrolyseurs à haute température	45
	b.2 Modélisation de l'électrolyseur	46
	➤ Modèle thermique	47
	➤ Modèle électrochimique	49
	➤ Modèle thermodynamique	50

➤	Modèle d'anode	51
➤	Modèle de membrane	52
➤	Modèle de Tension	54
➤	Modèle de stockage	55
b.3	Avantages et inconvénients d'électrolyseur PEM	55
	Les avantages [34].....	55
	Les inconvénients [35].....	55
III.4	Conclusion	56
 <i>Chapitre VI : Etude de coupage directe générateur PV / Electrolyseur</i>		
1.	Introduction	58
a.	Modèle choisi	59
a.1.	Modèle de simulation de la caractéristique I-V	59
a.2-	Paramètres de champ photovoltaïque	62
b-	Simulation de la caractéristique I=f(V)	62
b.1-	résultats pour une température constante T=25 °C et différents éclairagements	63
b.2-	résultats pour un éclairage constant E=1000 W/m ² et différentes températures	64
b.3-	résultats pour une journée typique.....	65
3.	Modélisation de l'électrolyseur PEM	66
a)	Modèle choisi	67
b)	Simulation de la caractéristique I=f(V)	68
4.	Modélisation du couplage PV/Ely	69
a.	Le point de fonctionnement du système	69
b.	Influence de dimensionnement de l'électrolyseur	70
c.	Calcul du débit d'hydrogène	72
d.	Calcul du volume d'hydrogène	73
e.	Rendements	73
➤	Rendement d'électrolyseur Le rendement d'électrolyseur est donné par l'équation suivante	73
➤	Rendement d'adaptation	73
➤	Rendement de générateur photovoltaïque	73
g.	Conclusion	78
	Conclusion général	79
	Références bibliographique.....	80

Nomenclatures

h : la constante de Planck

v : la fréquence

c : la vitesse de la lumière

ID : le courant qui traverse la diode

Io : courant de saturation de diode dépendant de la température

Iph : photo-courant dépendant de l'intensité de l'irradiation

Rsh : représente l'admittance parallèle du générateur de courant

Rs : cette résistance modélise les pertes ohmiques (matériaux et contacts)

V : tension aux bornes de la cellule

I : courant produit par la cellule photovoltaïque

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

q : charge de l'électron

Pm : la puissance maximal produite

E : éclairement

S : la surface (m^2)

Tc : température de la cellule ($^{\circ}C$)

Ta : température ambiante ($^{\circ}C$)

Em : éclairement moyen (W/m^2)

TUC : température d'utilisation de la cellule ($^{\circ}C$)

Uth : Tension théorique(V)

Uanode : Surtension anodique (V)

Ucathode : Surtension cathodique (V)

Uohm : Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur

T (J.K-1) : Température de l'électrolyse,

Ta (°C) : Température ambiante,

Teau (°C) : Température de l'eau,

Ns : Nombre des cellules,

Ucell (V) : Tension d'une cellule,

Uth (V) : Tension thermo-neuter d'une cellule,

I : Intensité (A),

Rt : Résistance thermique,

he : Coefficient d'échange .

Tini : Température initiale (K),

Ct : Capacité thermique de l'appareil,

Δt : Intervalle de temps (s).

η_a : Surtension anodique (V),

η_c : Surtension cathodique (V).

RSPE : Résistance globale ($cm^2\Omega$).

I0 : Intensité aux électrodes (A),

I : Intensité (A).

α : Coefficient de transfert de charge 0,5

ν_e : Coefficient stœchiométrique à l'anode $\nu_e = 2$ et à la cathode $\nu_e = -2$ **η** : Surtension (V).

EVA : Ethylène-Vynil-Acétate

A : Facteur d'idéalité.

Np : Nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque

Ns : Nnombre de module série dans le champ photovoltaïque

Igén : Le courant délivre 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

Ncellules : Nombre de cellules d'électrolyseur

F : Constant de faraday

P : pression atmosphérique

E : éclairement (w/m²)

S : surface de générateur

η_{el} : Le rendement d'électrolyseur

η_s : Le rendement global

η_u : Le rendement d'adaptation

La liste des figures

Chapitre I : Revue bibliographique sur l'hydrogène et ses applications

Figure1.1: Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC

Figure1.2 : constitution d'une véhicule à hydrogène

Figure1.3 : Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de

Chapitre II : Etude bibliographique sur les générateurs photovoltaïque

Figure 2.1 : les rayonnements

Figure2.2: les irradiations

Figure 2.3 : Effets photovoltaïque

Figure2.4 : Principe de la conversion photovoltaïque

Figure2.5: Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Figure :2.6 structure d'une cellule

Figure2.7 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

Figure 2.8 : Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²)

Figure 2.9: Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²)

Figure2.10 : Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium mono cristallin, (b),silicium poly cristallin, (c) silicium amorphe.

Figure2.11. : Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

Figure2.12 : Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque à une diode

Figure2.13 : Dopage de type N

Figure2.14 : Dopage de type P

Figure2.15 : la cellule au champ PV

Figure2.16 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque

Figure 2.17: Câblage des cellules dans un module

Figure2.18: Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C

Figure2.19 : Panneau photovoltaïque

Figure2.20: caractéristique du groupement en série des cellules identiques

Figure2.21:Caractéristique du groupement en parallèle de cellules identiques

Figure2.22 : Caractéristique du groupement hybride des cellules identiques

Figure2.23:caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement

Figure2.24 : caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température

Chapitre III: Electrolyseur

Figure3.1 : Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse de l'eau.

Figure 3.2 : électrolyseur Alcalin

Figure 3.3 :L'électrolyse SOEC5

Figure3.4 : Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane)

Figure 3.5 :L'électrolyse alcaline

Figure 3.6 : principe schématique de l'électrolyse PEM.

Figure 3.7 : principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

Figure 3.8 : Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur

Figure 3.9 : Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique

Figure 3.10: Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimique

Chapitre VI : Etude de coupage direct générateur PV / Electrolyseur

Figure IV.1: Courbes du panneau photovoltaïque montrant le point de puissance maximale P_{max} sur la courbe I-V et la courbe P-V

Figure IV.2: Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque

Figure IV.3: Simulation de la caractéristique (I-V) avec différents éclairagements, pour $T=25^{\circ}\text{C}$

Figure IV.4: Simulation de la caractéristique (P-V) avec différents éclairagements, pour $T=25^{\circ}\text{C}$

Figure IV.5: Simulation de la caractéristique (I-V) avec différentes températures, pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure IV.6 : Simulation de la caractéristique (P-V) avec les différentes températures, pour $E=1000\text{W}/\text{m}^2$

Figure IV.7 : Simulation de la caractéristique (I-V) avec des données réelles du site de Ouargla[35]

Figure IV.8 Simulation de la caractéristique (P-V) avec des données réelles du site de Ouargla[35]

Figure IV.9 : Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale et simulé pour $T_{el} = 80^{\circ}\text{C}$

Figure IV.10 : point de fonctionnement du système.

Figure IV.11 : Caractéristiques (I-V) du couplage, une cellule d'électrolyseur- module PV

Figure IV.12 : Caractéristiques (I-V) de couplage avec $s=8$, $p=1$

Figure IV.13 : La variation de rendement d'utilisation

Figure IV.14 : Variation d'éclairage et température en fonction de temps

Figure IV.15 : Variation de courant en fonction de temps

Figure IV.16 : Evolution de débit en fonction de temps

Figure IV.17 Variation de puissance d'électrolyseur en fonction de temps

Figure IV.18. Evolution de volume en fonction de temps

Figure IV.19. Variation de rendement d'utilisation en fonction de temps

Figure IV.20 Variation des rendements en fonction de temps

La liste des tableaux

Tab I.1 : Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène.

Tab I.2 : Les différents types de piles à combustible.

Tab II.1: Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards <CST>
 $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$

Tab II.2: Données techniques actuelles(2008) des électrolyseurs

Tab IV.1 : les caractéristiques de PV type **BP 585F dont** dans les conditions standards ($E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$)

Tab IV.2 : Les éclairagements et les températures de la journée 04/04/2004 à Ouargla[35]

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

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

Introduction générale :

La production de l'hydrogène devient actuellement une nécessité vue son utilisation comme vecteur énergétique.

En effet, s'il est combiné aux piles à combustible, il permet de réduire fortement les émissions à effet de serre.

En utilisant une source renouvelable pour le produire par électrolyse de l'eau, on produira de l'énergie verte.

Toutes les études trouvées dans la littérature montrent que d'un point de vue technico-économique, la meilleure solution est de coupler le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur d'une façon directe (sans convertisseurs de puissance)

L'objectif de notre travail est de faire une étude par simulation de l'association d'un générateur photovoltaïque et d'un électrolyseur afin de produire l'hydrogène.

Ce travail a été organisé et structuré en quatre chapitres:

Le premier chapitre présente d'une façon générale l'hydrogène, ces caractéristiques et ces modes de production ,son mode de stockage et la procédure de transporter ce vecteur d'énergie.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes Photovoltaïques et leur modélisation.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de l'électrolyseur et notamment l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons PEM.

Et dans le dernier chapitre, on présente une étude sur la production d'hydrogène par couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur PEM. Nous montrons dans ce chapitre, les résultats obtenus.

Enfin une conclusion générale résumera notre travail et donnera les perspectives .

CHAPITRE I

1- Introduction

Depuis la révolution industrielle les besoins énergétiques humains n'ont cessé de croître, ils ont été satisfaits par l'exploitation des énergies naturelles, mais avec l'évolution technique et l'augmentation de la population mondiale le besoin énergétique a augmenté d'une façon inévitable qui a incité l'obligation de trouver d'autres sources ou manières de production d'énergie et l'une de ces nouvelles sources est l'exploitation de l'hydrogène.

L'hydrogène possède beaucoup de caractéristiques avantageuses comparé à d'autres éléments. C'est l'élément le plus léger et le plus abondant dans l'univers, et il peut être brûlé mélangé à l'oxygène tout en libérant une très grande quantité d'énergie.

L'hydrogène peut fournir de l'énergie pour tous les secteurs de l'économie : l'industrie, les habitations, les transports, les appareils mobiles. Il peut remplacer les carburants à base de pétrole pour les véhicules et représente une source d'électricité. L'avantage de l'hydrogène comparé aux combustibles fossiles est son bienfait par rapport à l'environnement. Sa consommation ne produit aucun polluant, aucune émission de carbone. Il peut également être produit sans générer de pollution selon l'une des méthodes suivantes : par électrolyse, en utilisant de l'électricité provenant de centrales nucléaires ou d'électricité d'origine renouvelable, par reformage de vapeurs de combustibles fossiles ou de gaz naturel si le processus est combiné avec un procédé de capture et de stockage du carbone, par des techniques thermo-chimiques ou biologiques en utilisant de la biomasse renouvelable.

2- Généralités de l'hydrogène

a- Propriétés de l'hydrogène

L'hydrogène est en effet un gaz non toxique et très énergétique, capable de produire de la chaleur et de faire fonctionner des moteurs par combustion directe (moteurs à combustion interne) avec de l'eau pure comme résidu. Il peut même produire directement de l'électricité dans les piles à combustible avec, là encore, comme seul résidu, l'eau. Mais l'hydrogène ne se trouve dans la nature qu'à l'état combiné, surtout au niveau de l'eau et des hydrocarbures, d'où la nécessité de le produire. L'hydrogène n'est pas une énergie mais un vecteur d'énergie, comme c'est le cas de l'électricité. L'hydrogène, élément de symbole H est incolore et inodore, son numéro atomique 1 [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. En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « Air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma Hydrogène [2]. Le tableau suivant représente les 8 données de base physico-chimiques de l'hydrogène et quelques comparaisons avec le gaz naturel [3].

Propriété	valeur numérique
PCI (pouvoir calorifique inférieur)	10 800 kJ/Nm ³ 119 930 kJ/kg (gaz naturel) 50020 kJ/kg 3.00 kWh/Nm ³ 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770 kJ/Nm ³ 141 860 kJ/kg 3.55 kWh/Nm ³ 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm ³ (gaz naturel) 0.6512kg/Nm ³
Densité liquide à 20.3K	70.79 kg/m ³
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/kg.K (293K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg.K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/(m.K)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92 kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante du gaz	4 124.5 J/kg.K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20.268K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (μJ)	20 (gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³ de gaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)
Suppression de détonation (mélange stoechiométrique)	14.7 bars (gaz naturel 16.8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stoechiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

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

Comme la plupart des éléments gazeux, l'hydrogène est diatomique (ses molécules sont constituées de deux atomes). Aux températures élevées, il se décompose en atomes libres. L'hydrogène a les plus bas points d'ébullition et de fusion de tous les éléments hormis l'hélium l'hydrogène fond à - 259,2°C et bout à - 252,77°C. À 0 °C et sous une pression de 1 atm,

L'hydrogène est un gaz de densité 0,089. Sa masse atomique est de 1,007. L'hydrogène liquide fut obtenu pour la première fois, en 1898, par le chimiste britannique Sir James Dewar. Il est incolore (bleu clair en couches épaisses), avec une densité de 0,070. Évaporé sous pression réduite à grande vitesse, il se transforme en un solide incolore. Le gaz hydrogène est un mélange des deux formes différentes suivantes : l'orthohydrogène (les spins des noyaux sont parallèles) et le parahydrogène (les spins sont antiparallèles). L'hydrogène ordinaire contient environ trois quarts de la forme ortho et un quart de la forme para. Ces deux formes ont des points de fusion et d'ébullition semblables à ceux de l'hydrogène ordinaire. En pratique, le parahydrogène pur est obtenu par adsorption d'hydrogène ordinaire sur du charbon actif vers - 225 °C.[2]

b- Hydrogène comme vecteur énergétique

Un vecteur d'énergie transfère, dans le temps et l'espace, une quantité d'énergie : ainsi les vecteurs d'énergie rendent l'énergie disponible à un temps et un lieu différent de la disponibilité de la source primaire. Les vecteurs d'énergies en utilisation actuellement sont :

- ✓ Combustibles fossiles : Pétrole et dérivés, Gaz naturel et dérivé, Charbon et dérivés ;
- ✓ L'électricité ;
- ✓ Carburants synthétiques ;
- ✓ Les fluides caloporteurs ;
- ✓ Transmissions : mécaniques, hydraulique et pneumatique ;
- ✓ Rayonnement.

L'hydrogène est à considérer comme un vecteur d'énergie. 108.7 kilogrammes d'hydrogène peuvent être produits à partir de 1m³ d'eau, par électrolyse, en utilisant l'électricité renouvelable. L'énergie de cette quantité d'hydrogène est équivalente à 422 litres d'essence. L'hydrogène en qualité de vecteur énergétique permet : de stocker l'énergie renouvelable dans le temps ; de transférer l'énergie renouvelable dans l'espace. L'utilisation d'un vecteur d'énergie (ou d'une source d'énergie secondaire) comme l'hydrogène est nécessaire pour atteindre l'objectif « consommation nulle » en termes de ressources naturelles et « déchet zéro » en termes d'incidences sur l'environnement, excepté l'augmentation inévitable d'entropie. L'utilisation du carburant hydrogène est donc une option attrayante. [4]

3- Applications de l'H₂

a- Pile à combustible

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



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

l'eau. Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé. Le tableau ci-après détaille les divers types de piles couramment développées et la figure décrit le principe de fonctionnement du type dit Acide à Polymère Solide (PEMFC). Toutes ces piles fonctionnent généralement, autour d'un point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50%[4].

Type de pile	Electrolyte	Espèce ionique	T (°C)	Domaine d'utilisation
AFC	potasse (liquide)	OH-	80	Espace, transports, stationnaire Gamme : 1 - 100 kW
PEMFC et DMFC	polymère (solide)	H+	80	Portable, transports, stationnaire Gamme : 10 mW – 1 MW
PAFC	acide phosphorique (liquide)	H+	200	Stationnaire, transports Gamme : 200 kW - 10 MW
MCFC	sels fondus (liquide)	CO ₃ ²⁻	650	Stationnaire Gamme : 500 kW - 10 MW
PCFC	céramique (solide)	H+	400 à 600	Stationnaire, transports Gamme : 1 kW - 10 MW
SOFC	céramique (solide)	O ₂ ⁻	600 à 1000	Stationnaire, transports Gamme : 1 kW - 10 MW

Tableau I.2 : Les différents types de piles à combustible [4]

La science des matériaux actuelle a fait des piles a combustible une réalité dans certaines applications spécialisées. L'intérêt, de loin le plus grand, des recherches dans le monde entier est concentre sur la membrane échangeuse de protons (PEMFC) et les piles a oxyde solide (SOFC). Les PEMFC sont un type bien avance de piles à combustible qui convient aux voitures et aux moyens de transport (si elles sont fabriquées a un cout compétitif).

Leur efficacité est aux environs de 45-50%, supérieure à n'importe quel moteur a combustion interne (80% si l'énergie thermique est récupérée).

La pile DFCTM (Direct carbonate fuel cell) adopte un reformeur de méthane interne, ayant pour résultat une performance accrue, compacité, une meilleure gestion thermique et moindre cout. Cependant, le carburant alimentant la pile à combustible doit passer par deux étapes préliminaires, élimination des impuretés (sulfures) et pré reforming pour cracker les

hydrocarbures a longue chaine. Le gaz obtenu, riche en méthane, est introduit dans la pile a combustible DFC produisant un courant continu [5].

Le développement de procédés industriels utilisant les piles a combustible est en étude.

Un système de production d'énergie de 14kW a été installé ou une pile a combustible de type SOFC est alimentée par de la biomasse gazéifiée. Le système a été optimisé par des Cycles de récupération de la chaleur et de combustible des gaz de sortie de la pile afin de Préchauffer le gazéificateur de biomasse. Le système a une efficacité globale 34% avec une utilisation de combustible a 57% .

Afin d'optimiser l'utilisation des piles à combustible domestiques, un réseau d'échange d'énergie peut être créé afin de transférer l'énergie entre différentes habitations. Une étude montre qu'il est nécessaire d'avoir huit (8) huit habitations interconnectées au minimum afin d'assurer un équilibre au système.

Les piles à combustible microbiologiques (MFC) sont des bioréacteurs qui convertissent l'énergie chimique des liaisons chimiques des composés organiques en énergie électrique, par réaction catalytique des micro-organismes dans des conditions anaérobies. Il est possible de produire de l'électricité directement en employant des bactéries pour décomposer les substrats organiques. La recherche s'intéresse à ces MFC comme source de courant ou d'hydrogène sans production de gaz a effet de serre. Les MFC peuvent être employés dans les stations de traitement des eaux usées en dégradant les composés organiques pour produire de l'électricité. Actuellement, elles sont employées comme détecteur de la demande biologique en oxygène. Les chercheurs tentent de maîtriser la production des MFC a une grande échelle est optimiser leur rendement[6].

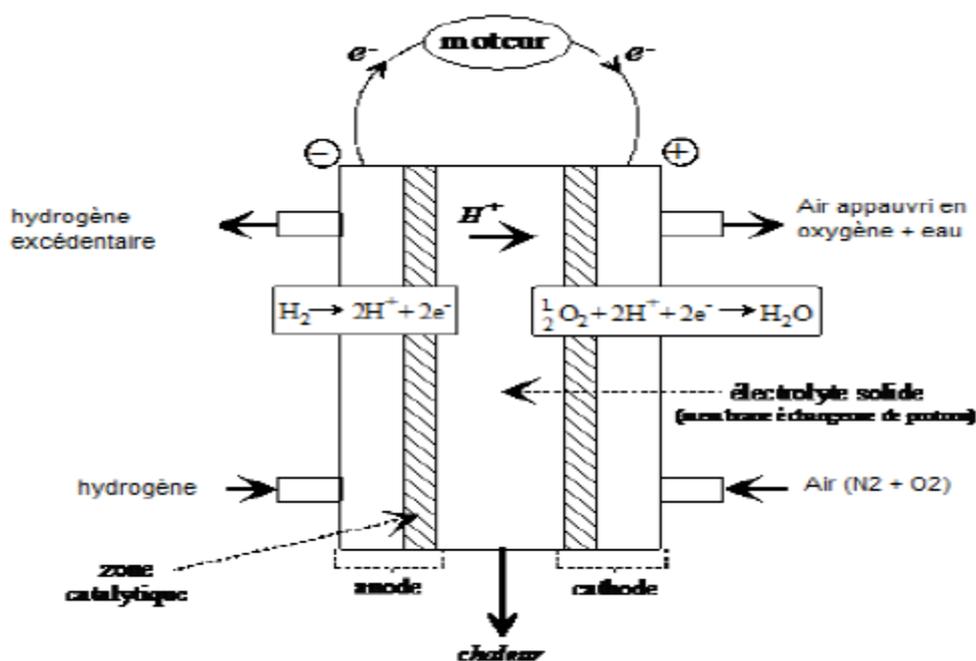


Figure I.1 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC

b- Le véhicule à hydrogène

Divers projets de démonstration de véhicules à hydrogène sont en étude dans le monde. Les coûts actuels des systèmes sont assez importants. Ils sont calculés sur la base de tous les paramètres qui ont été testés pendant les projets. Ce coût n'est pas le coût futur de l'hydrogène, car les projets de démonstration ne sont pas conçus pour tester l'efficacité maximale ou le fonctionnement optimal, mais simplement pour voir si les performances du matériel rendent un tel système possible et faisable pour un développement futur. Les prochaines générations de piles à combustible, de bus, de véhicules avec leurs composants auxiliaires, etc. seront probablement différentes des systèmes actuellement testés [7].

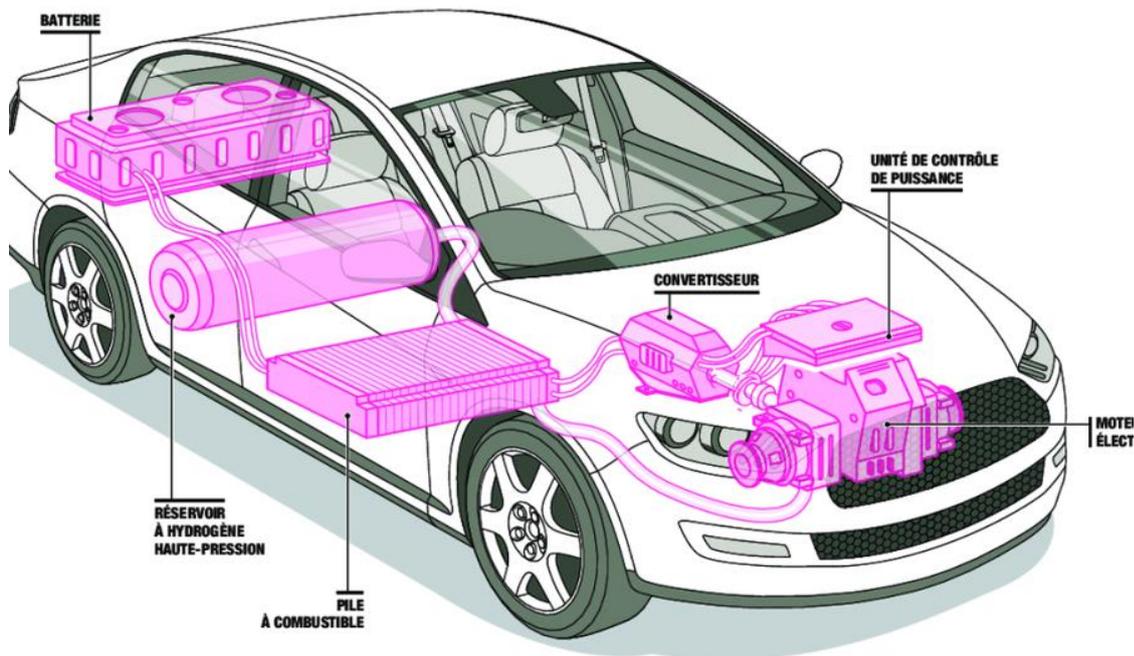


Figure I.2 : constitutions d'un véhicule à hydrogène

Les voitures du futur seront très probablement les véhicules hybrides essence-électrique, car elles peuvent réduire la consommation d'essence et les émissions de gaz à effet de serre de 30 à 50%, sans changer la classe du véhicule et donc sans perte de puissance ou de sécurité. Les plus prometteuses sont les hybrides modulaires. De telles voitures pourraient abaisser la consommation jusqu'à 1 litre d'essence par 150 km de trajet. Les véhicules électriques semblent être une excellente option. Mais l'évolution serait aussi sociale, sur ce que doit être une voiture et non ce qu'elle est actuellement. Les voitures hybrides et électriques ont des avantages par rapport aux véhicules conventionnels [6].

Les véhicules PFCHEV (hybride modulaire) utilisent la combinaison de pile à combustible, Batteries, super capacité et moteur à combustion interne pour motoriser le véhicule. L'aspect Modulaire du véhicule permet de charger le véhicule à partir du réseau électrique et produire

De l'hydrogène et oxygène durant la nuit afin de motoriser le véhicule durant les 32 premiers Kilomètres (demi-distance moyenne parcourue par jour).

La première étude publique de bus à hydrogène a été effectuée pour servir de standard de référence pour des essais futurs et afin de tester l'acceptation sociale. Les résultats d'un sondage indiquent que 93% des personnes interrogées sont favorables aux bus à hydrogènes et seulement 3% sont contre l'idée [6].

4- Production de l'hydrogène H₂

a- Production par biomasse

Il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable. Quand on l'exploite de manière naturelle elle est peu menacée mais lorsqu'il s'agit d'une biomasse cultivée (pour les biocarburants par exemple) ou en cas de surexploitation massive de la ressource (comme la déforestation), la production d'une telle énergie peut rapidement avoir de lourds impacts environnementaux. En Algérie, les données pour une évaluation significative de potentiel de biomasse sont rares. Cependant les évaluations grossières donnent une valeur de 2.106 m³/an de produit de forêt et de déchets industriels et domestiques traités. Les résidus d'olive et de dattes sont les ressources les plus importantes ayant un potentiel élevé de biomasse [7].

Pour produire de l'hydrogène à partir de la biomasse, il faut faire une transformation thermochimique. Les produits de la biomasse sont composés principalement de C₆H₉O₅. La première étape consiste donc à sécher la matière qui devient alors C₆H₇O₄. Ensuite, on chauffe à 600°C, pour provoquer la dégradation thermique : c'est la thermolyse. Après cette étape, les produits sont à 70% gazeux, sous forme de CH₄, H₂, CO, CO₂ 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°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 [7].

b- Production par l'électrolyse de l'eau

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau en milieu alcalin est la première technologie à être utilisée pour la production d'hydrogène à une échelle industrielle. Cependant, en raison de sa demande élevée en énergie 4.5-5kWh/Nm³H₂ son cout est élevé.

C'est le facteur limitant de cette technologie, sauf pour les pays où l'électricité n'est pas chère. Diverses techniques sont à l'étude pour améliorer ce procédé, comme le développement de nouvelles membranes, cellules à intervalle zéro et développement de nouveaux électrolytes, de nouvelles électrodes et activateurs d'ions. Les activateurs d'ions sont des complexes de métaux (cobalt, molybdène...), ils permettent de réduire l'énergie d'électrolyse jusqu'à 10%.

L'hydrogène par électrolyse est le plus propre si l'électricité est d'origine renouvelable.

Le coût de production est diminué si l'électricité pendant les heures creuses est employée.

L'utilisation de l'électricité durant les heures creuses mènerait à une utilisation améliorée des usines de production électrique et par conséquent à une réduction des émissions de CO₂.

L'utilisation de l'hydroélectricité pour la production de l'hydrogène est plus

favorable en termes de coût et environnement.

La combinaison électrolyseur-pile à combustible peut constituer une solution viable pour le contrôle de la puissance électrique à fournir par les systèmes à énergie renouvelable (éolien et photovoltaïque). L'électrolyseur fonctionne en période hors pic de demande d'électricité et la pile à combustible fonctionne en période de pic de demande électrique.

Les batteries sont utilisées pour un stockage à très court terme. Des algorithmes de contrôle basés sur la logique floue sont développés afin d'optimiser la gestion [7].

5- Transport et stockage de l'hydrogène

a- Stockage de l'hydrogène :

➤ 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 [8].

➤ 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 [8].

➤ 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 par 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.

➤ **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 [8].

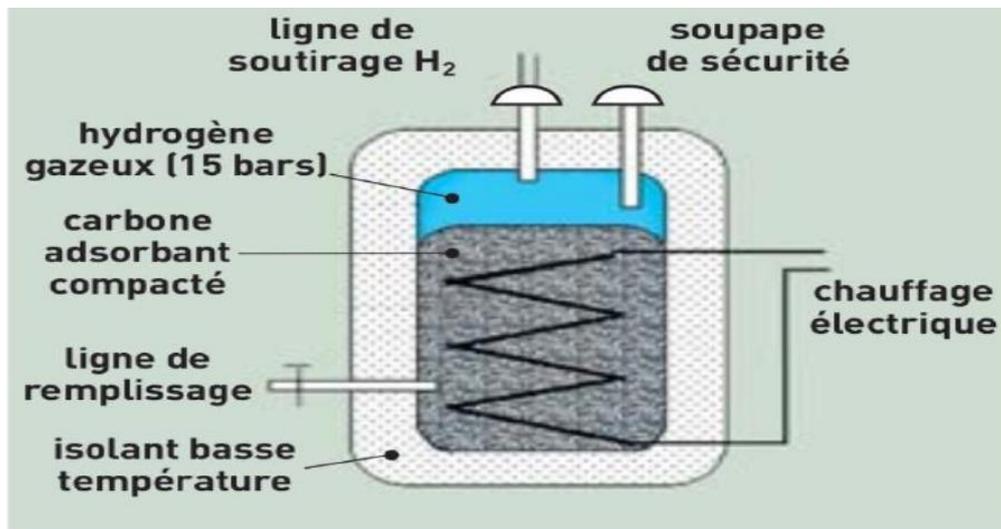


Figure I.3: Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de l'hydrogène

b- Transport de l'hydrogène :

➤ **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 [10].

➤ **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.

➤ **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

Conclusion :

Dans le cadre de notre étude bibliographique, 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.

CHAPITRE II

II.1. Introduction :

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource infinie. Elles rassemblent quelque filière technologique suivant la source d'énergie améliorée. Il ya plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydro-électrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables résultent du soleil d'une façon direct ou indirect. Donc elles sont disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera[11].

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe de rayonnement solaire Produise par le soleil sous forme des photons en énergie électrique à l'aide des méthodes de conversion nommés cellule photovoltaïque qui constituent des modules ou panneaux.

En effet le mot " photovoltaïque " mot grecque vient de " photo "qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité [12]

Il existe deux procédés pour transformer l'énergie solaire en électricité :

- Systèmes de conversion thermodynamique.
- Système directs, créés sur les interactions physiques entre les photons de la radiation incidente et les électrons du matériau c'est l'effet photovoltaïque.

II.2 Energie du soleil

a. Energie renouvelable

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques et, sous forme stockée, de nos réserves de gaz, pétrole et charbon. Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermie, moins de 1 W/m²), les marées et l'énergie nucléaire (fission et peut-être fusion). Nos réserves d'uranium sont très faibles (quelques dizaines d'années). Les énergies fossiles ne sont pas inépuisables, mais surtout leur utilisation mène à une libération de CO₂ qui modifie l'équilibre global du bilan thermique de la planète par l'effet de serre. Si bien qu'à long terme, la seule solution viable pour l'homme, en attendant les réacteurs à fusion nucléaire (encore hypothétiques), est de se restreindre aux

énergies renouvelables: solaire, hydraulique, vent, biomasse, marées et énergie thermique des mers.

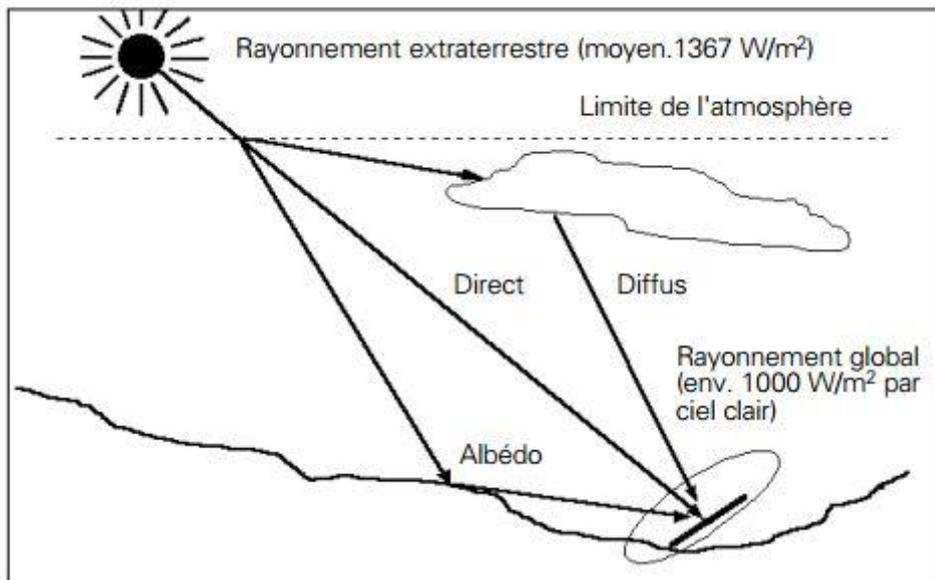
b. Rayonnement extraterrestre

L'énergie du soleil est produite par réactions de fusion thermonucléaire, les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (2 protons + 2 neutrons) avec dégagement d'énergie. Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques. Le spectre de ce rayonnement correspond à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K, dont le maximum est situé dans le domaine visible. La densité moyenne d'énergie reçue par la terre, appelée constante solaire, est de **1367 W/m²**. La valeur réelle du rayonnement extraterrestre varie de $\pm 3.3\%$ au cours de l'année du fait de l'ellipticité de l'orbite terrestre:

c. Rayonnements direct et diffus

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes:

- 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.
- 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. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumsolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon (cf. figure)
- L'albédo est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.



figureII.1. rayonnements

II.3 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement lié à la longueur d'onde λ :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$$

où h est la constante de Planck, ν la fréquence, c la vitesse de la lumière. Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de **AM0**. Sa distribution en énergie est répartie en:

ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4%

visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%

infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6%

Spectre AM 1.5 de référence

La figure 2.2 montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à 1.5 masse d'air.

La définition de ce spectre de ciel clair, noté **AM 1.5**, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. On peut également remarquer le spectre du diffus par beau temps, nettement renforcé vers le bleu du fait de la diffusion de Rayleigh sur l'air.

Les diffus par ciel couvert couvrent beaucoup mieux tout le spectre visible (ciel blanc). Cela a

son importance car nous verrons par la suite que la sensibilité des cellules photovoltaïques est maximale dans les régions rouge et infrarouge

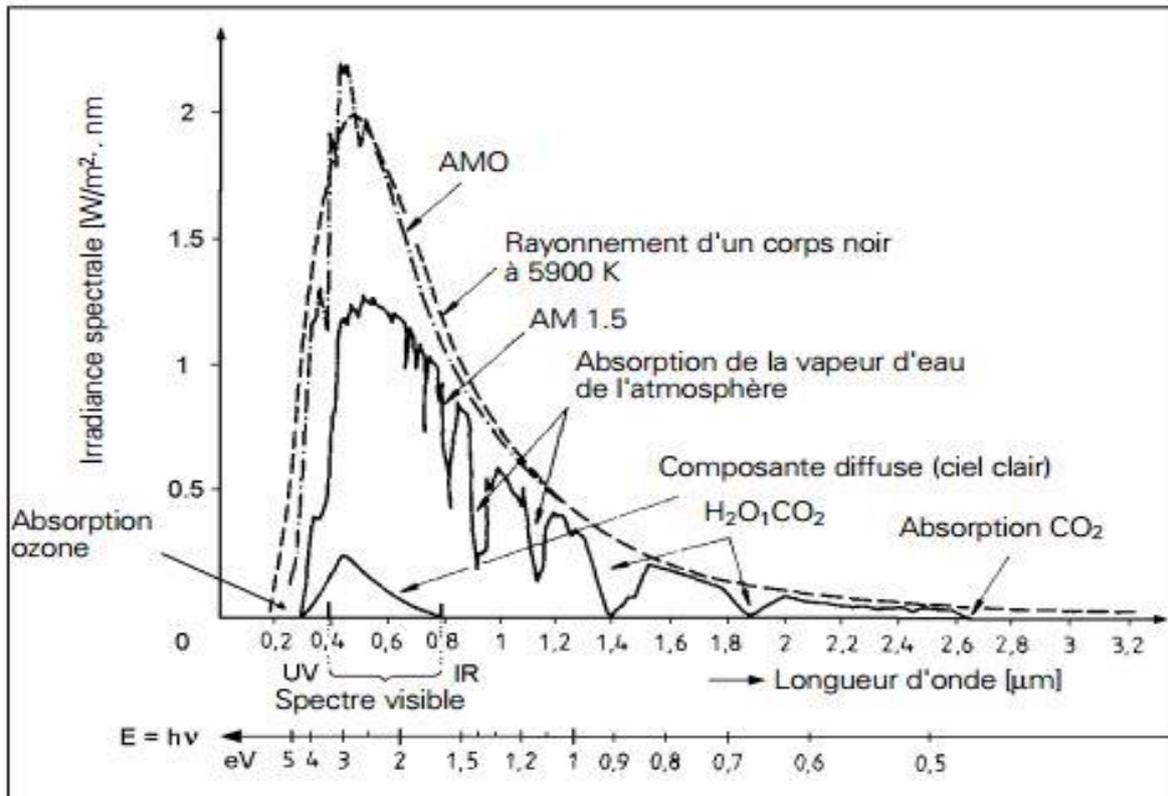


Figure II.2 les irradiations

II.4 Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (Photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (Silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique [12].

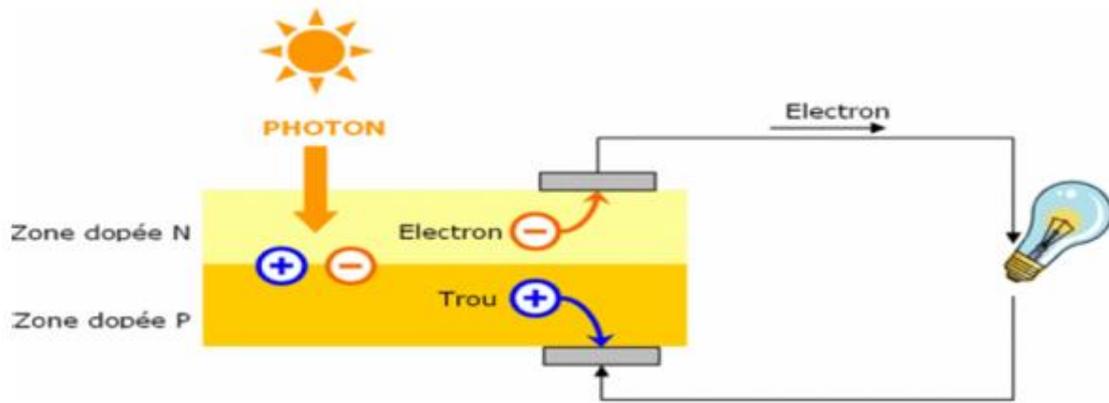


Figure II.3 : Effets photovoltaïque

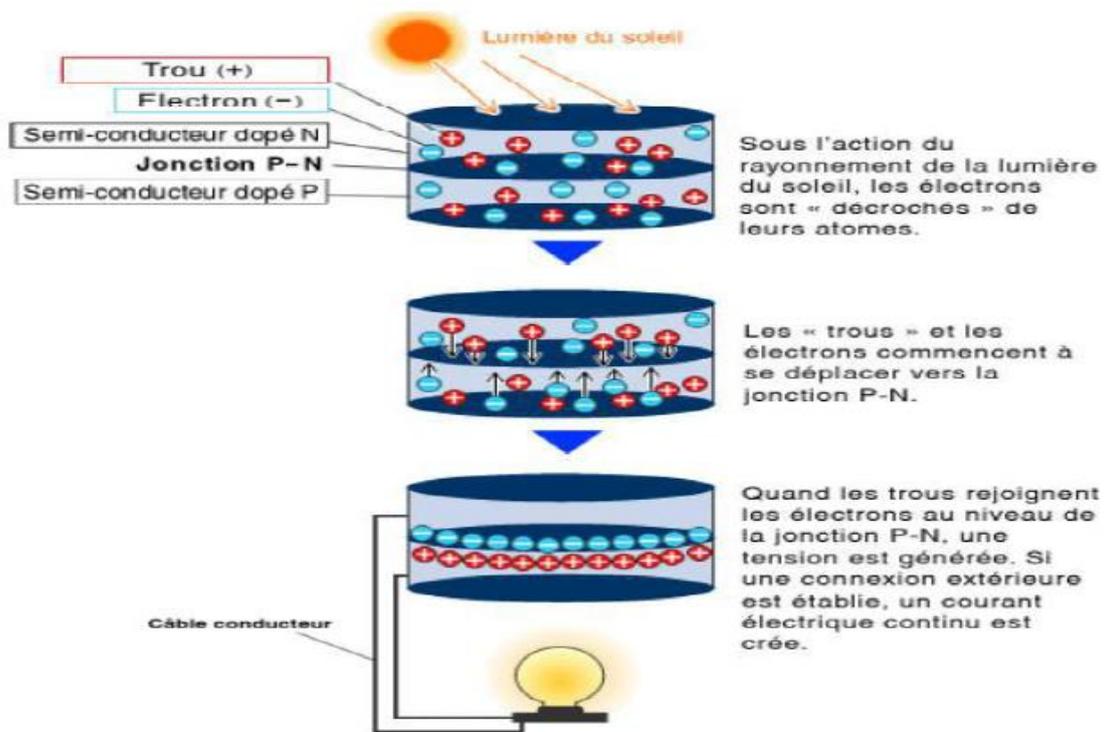


Figure II.4 : Principe de la conversion photovoltaïque

Cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) sont des Éléments électroniques à base de semi-conducteurs (construite de silicium). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse (le soleil) en électricité, c'est-à-dire des cellules solaires. Ils sont la base des installations photovoltaïques. Il y a deux types fréquents des

cellules photovoltaïques : **amorphe, cristallin** mais la majorité des cellules sont à base de silicium.

Depuis environ de 30 ans on utilise des cellules cristallines .mais actuellement on utilise les cellules amorphes sont nouvelle.

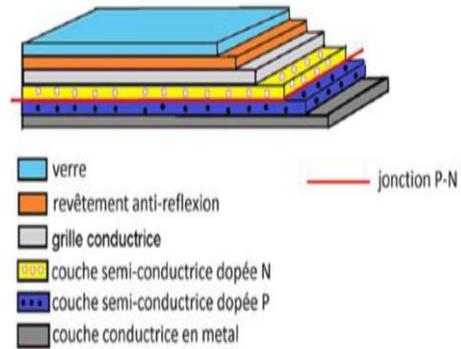
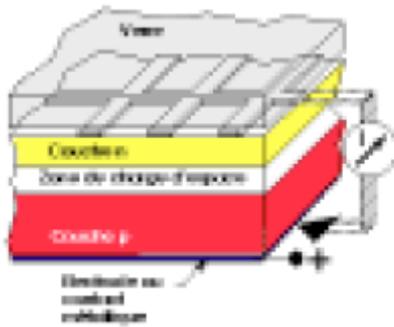


Figure II.5: Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Figure II.6 : structure d'une cellule

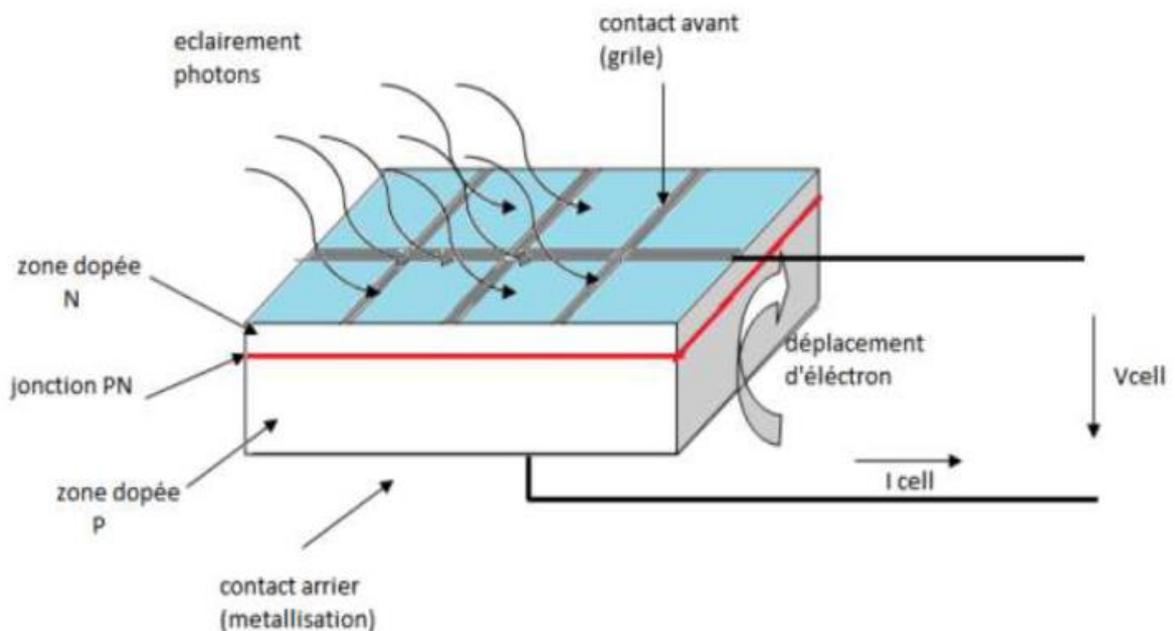


Figure II.7: Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

Une **cellule photovoltaïque (PV)** ou **photopile**, peut être assimilée à une photodiode en un engagement générateur dont les caractéristiques sont illustrées par les figures suivantes :

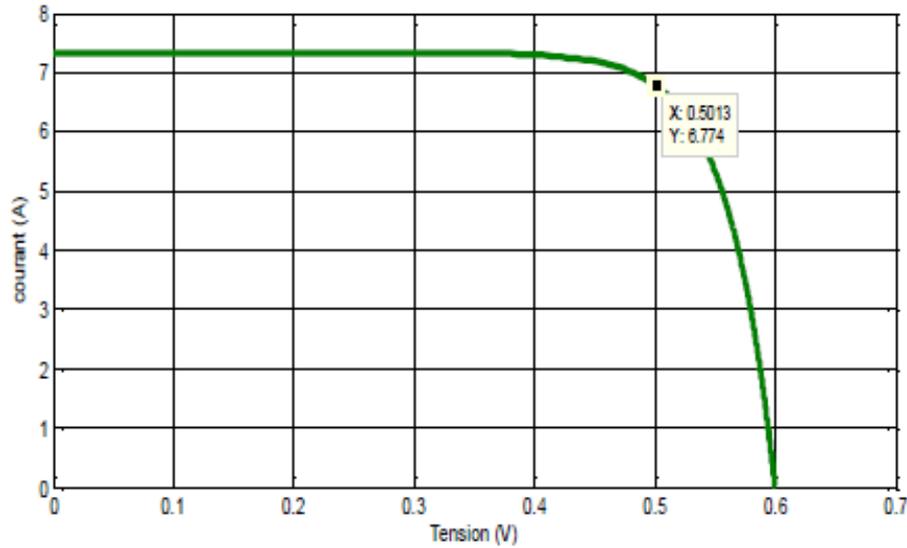


Figure II.8 : Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).

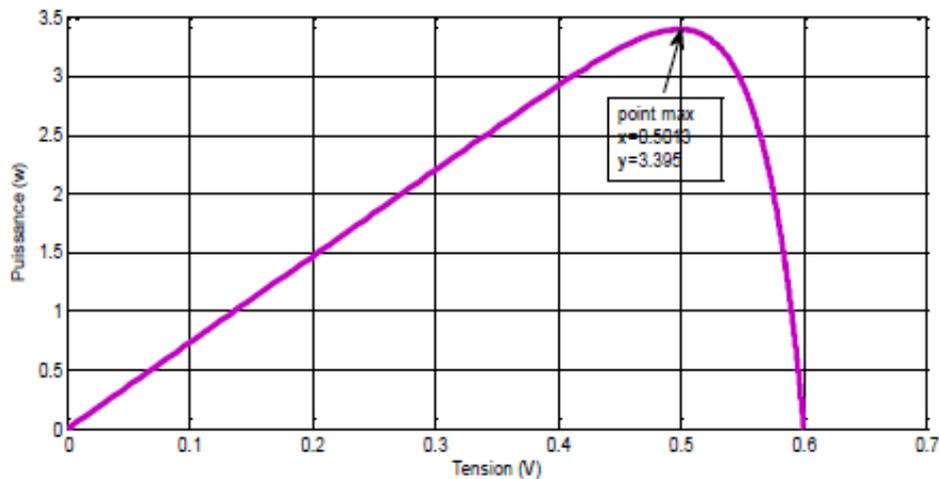


Figure II.9: Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).

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 obtient alors la caractéristique suivante :[1]

Eclairement standard	$G=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Facteur d'idéalité A	$A=1.6$
Energie de la bande interdite	$E_g \approx 1.1\text{eV}$
Courant de court-circuit I_{cc}	7.34 A
Tension a circuit ouvert V_{oc}	0.6V

Tableau2.1 : **Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards** <CST>
 $T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{W /m}^2$

b. Différents types de cellules solaires [11].

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propre. Parmi ces types de cellule on peut citer :

- **Cellules monocristallines :**

Elles ont un meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire).Elles sont composées d'un silicium cristallisé en un seul cristal c'est pourquoi sa couleur est uniforme.

- **Cellules poly cristallines**

Leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire),elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisée forme de cristaux multiples, on peut donc différencier les cristaux.

- **Cellules amorphes :**

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire) mais elles ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé [9].

- **Cellule Tandem**
- **Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%)**

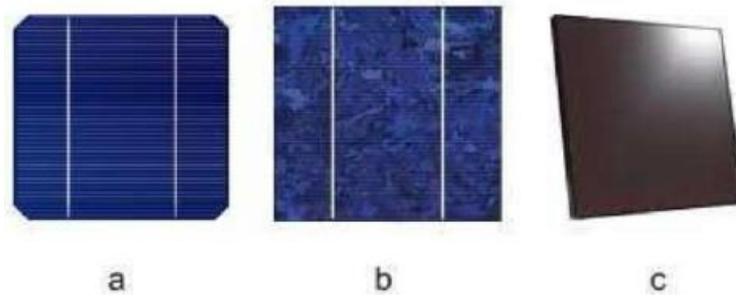


Figure II.10 : Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium mono cristallin, (b),silicium poly cristallin, (c) silicium amorphe

II.5 Modélisation des cellules photovoltaïques

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

On présentera deux modèles du GPV à savoir :

- **Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque**

- Modèle à une diode(ou exponentielle simple).
- Modèle à deux diodes(ou double exponentielle).

a. Le modèle idéal :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à jonction PN est parfaite comprend une source de courant I_{ph} modélisant le courant photoélectrique réuni à une diode en parallèle qui modélise la jonction PN duquel la polarisation détermine la tension , le schéma est représenté ci-dessous :

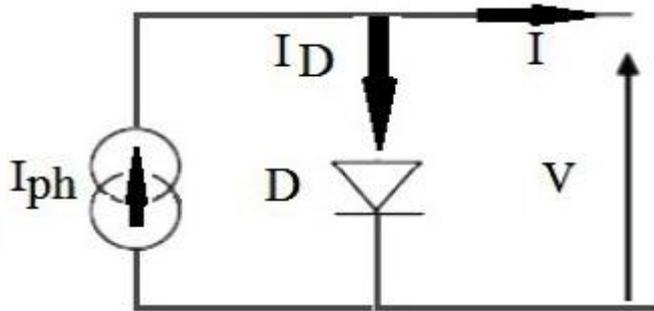


Figure II.11. : Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

Le modèle à une diode

Il est fondé sur l'hypothèse selon laquelle, les pertes par recombinaison des porteurs de charge dans la zone de déplétion sont absentes. Ce modèle consiste en un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode, une résistance R_s placée en série et R_{sh} en parallèle . Il est représenté par le circuit équivalent de la figure . Ce circuit peut être appliqué pour une seule cellule, ou pour un module (certains nombre de cellules) ou pour un champ (plusieurs modules).

La résistance série : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [13]

La résistance shunt : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [13]

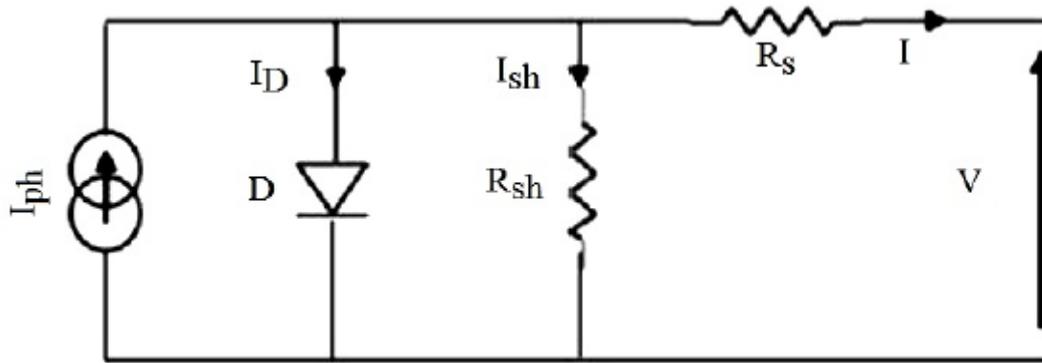


Figure II.12: Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque à une diode

I_D : le courant qui traverse la diode

I_o : courant de saturation de diode dépendant de la température

I_{ph} : photo-courant dépendant de l'intensité de l'irradiation

R_{sh} : représente l'admittance parallèle du générateur de courant

R_s : cette résistance modélise les pertes ohmiques (matériaux et contacts)

V : tension aux bornes de la cellule

I : courant produit par la cellule photovoltaïque

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

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{V+(I \cdot R_s)}{v_{th}}} - 1 \right] - \left(\frac{V+(I \cdot R_s)}{R_{sh}} \right) \quad (1.1)$$

Avec :

$$v_{th} = \frac{A * K * T}{q}$$

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

q: charge de l'électron

a. Rendement d'une cellule

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et E l'éclairement en W/m², ce rendement a pour formule.[13]

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (2)$$

Avec :

P_m : la puissance maximal produite

E : éclairement

S : la surface (m²)

Tel que :

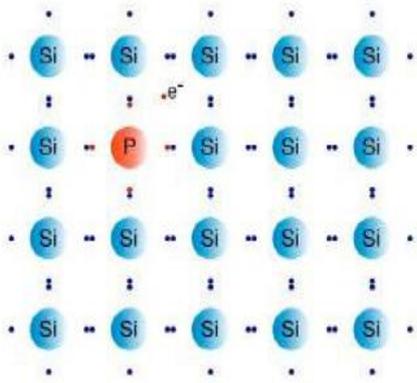
$$P \text{ reçue} = \text{surface} \times \text{éclairement}$$

b. Principe de fonctionnement :

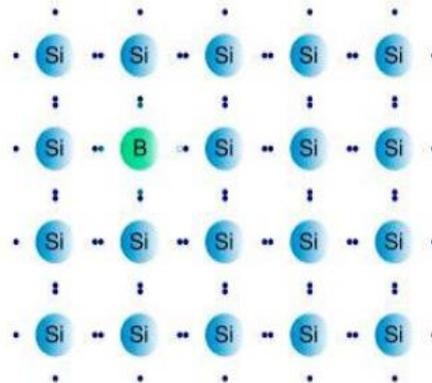
Une cellule photovoltaïque (PV), ou photopile, est la juxtaposition de deux semi-conducteurs, la 1ère couche dopé P et l'autre dopé N. À l'intérieur de la jonction (l'intersection des deux couches P et N) se forme un champ électrique. Sous un éclairement à différent intensité, les photons ou les grains de lumière, venant avec une énergie suffisante entrent en accident avec les atomes du Cristal. Ils arrivent à faire circuler les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, formant des paires d'électrons-trous. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N [11]

et donc la création d'une différence de potentiel entre les deux faces de la cellule .Les grilles métalliques au niveau de la cellule photovoltaïque (PV) réunissent les électrons et les trous qui vont produire le courant électrique .il ya une grande perte énergie sous forme de chaleur.

La zone N est protégée par une grille métallique qui renfort de cathode, pendant qu'une plaque métallique recouvre l'autre face du cristal et elle joue le rôle d'anode. L'épaisseur du cristal est moins d'1mm.



FigureII.13 : Dopage de type N



FigureII.14: Dopage de type P

c. Les paramètres des cellules photovoltaïques [12]

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul.

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se

confond avec le photo-courant I_{ph} .

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (1.1)$$

Tension à circuit ouvert V_{co}

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$V_{co} = V * T * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) + 1 \quad (1.2)$$

Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule

$P_{max}(I_{opt}; V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{P_{inc}} \quad (1.3)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Facteur de forme ff :

C'est le rapport entre la puissance maximale P_{max} fournie par la cellule ou générateur et la puissance optimale. Il représente la mesure de la qualité de la cellule ou d'un générateur, il est défini par la relation :

$$ff = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (1.4)$$

II.6 Générateur photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire est un petit générateur de très faibles puissances utilisées généralement pour des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque.[12].ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation

dans un polymère EVA(éthylène-vyiril-accétate) et protégé sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène.[12]

En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série.[12]

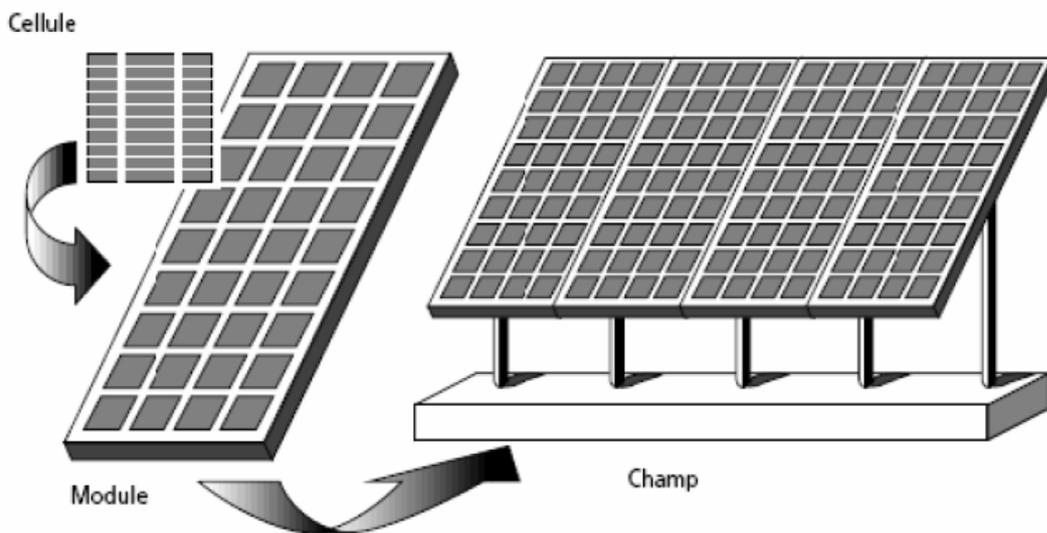


Figure II.15 : la cellule au champ PV

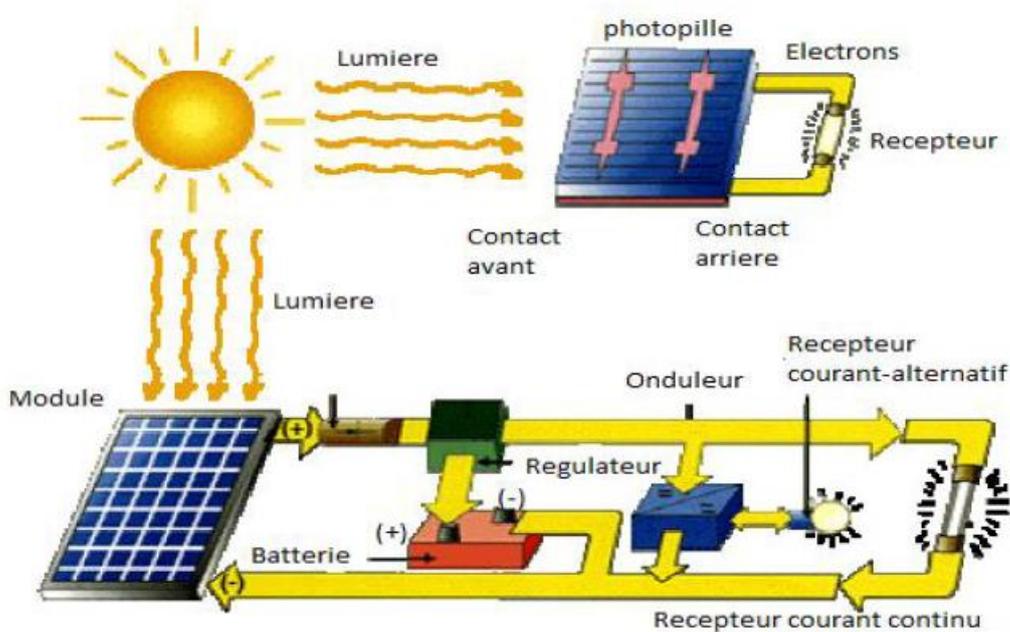


Figure II.16: Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes : [12]

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur

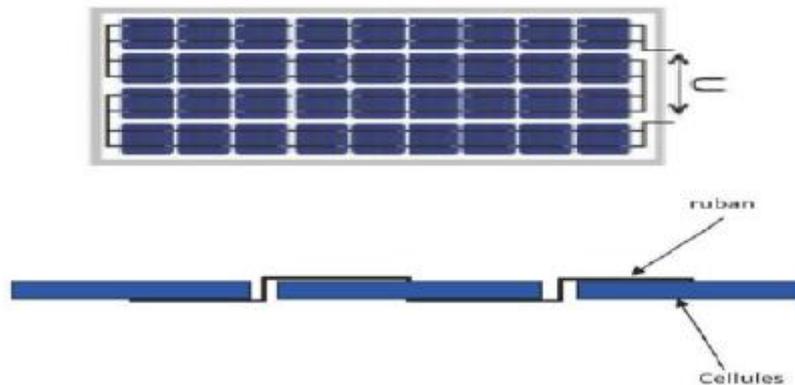


Figure II. 17: Câblage des cellules dans un module.

Zones de fonctionnement du module solaire [13]

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure représente trois zones essentielles :

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension

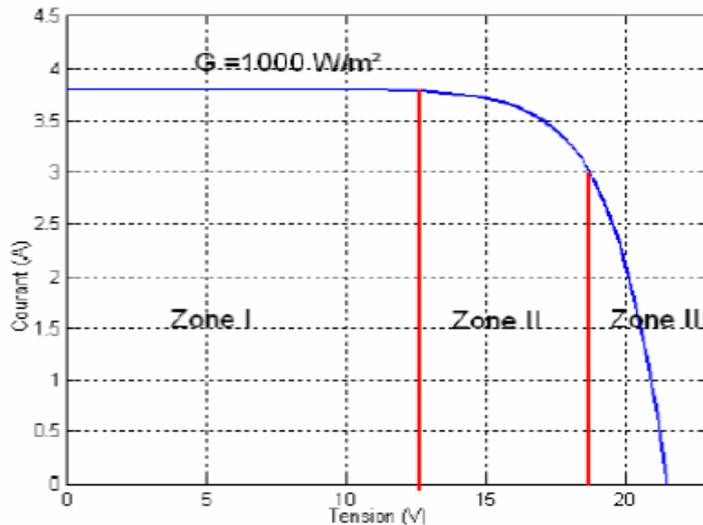


Figure II.18 : Les différentes zones de la caractéristique I (V), $T=25^\circ\text{C}$.

II.7–Le panneau photovoltaïque :

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.



Figure II.19 : Panneau photovoltaïque.

a. Association des cellules photovoltaïques PV :[12]

Une association de cellules en série N_s permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et donc accroître la puissance. Les cellules sont alors traversées pour le même courant et la caractéristique résultant du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

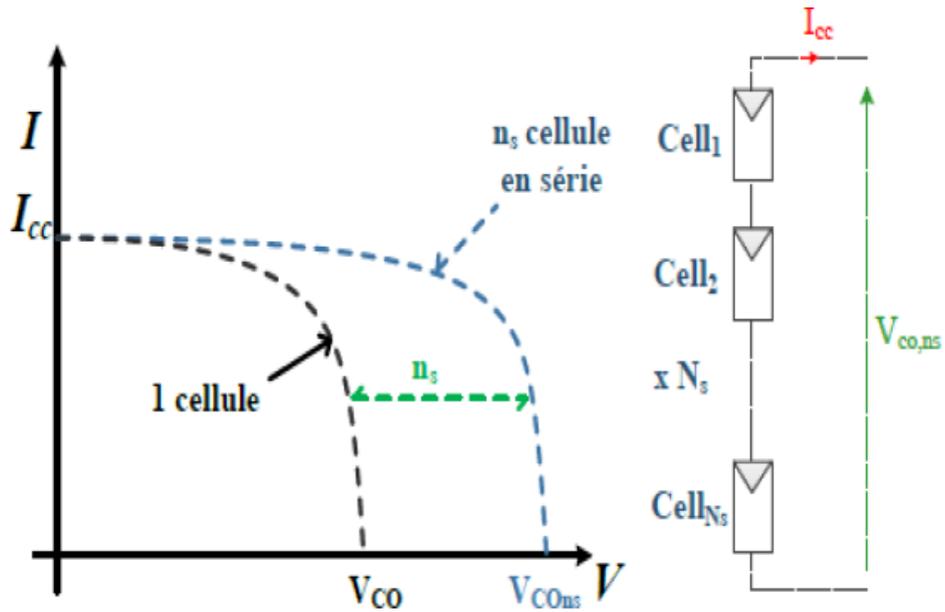


Figure II.20: caractéristique du groupement en série des cellules identiques.

Association en parallèle :

Une association de cellules en parallèle N_p permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectés en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

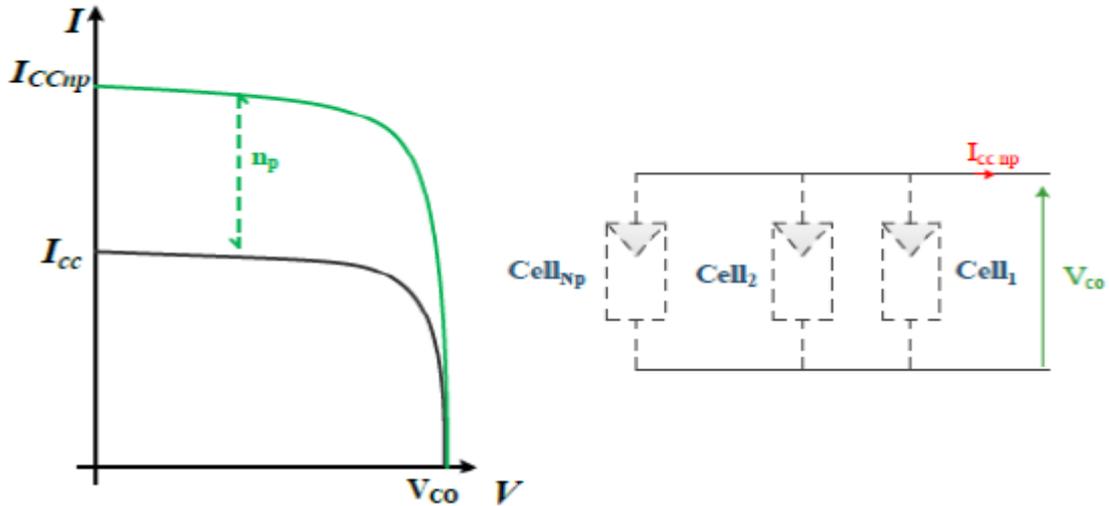


Figure II.21:Caractéristique du groupement en parallèle de cellules identiques.

Association hybride (série/parallèle)

L'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{0cc} = N_p * I_{cc}$$

$$V_{0co} = N_s * V_{co}$$

La figure 1.9 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p des cellules identiques.

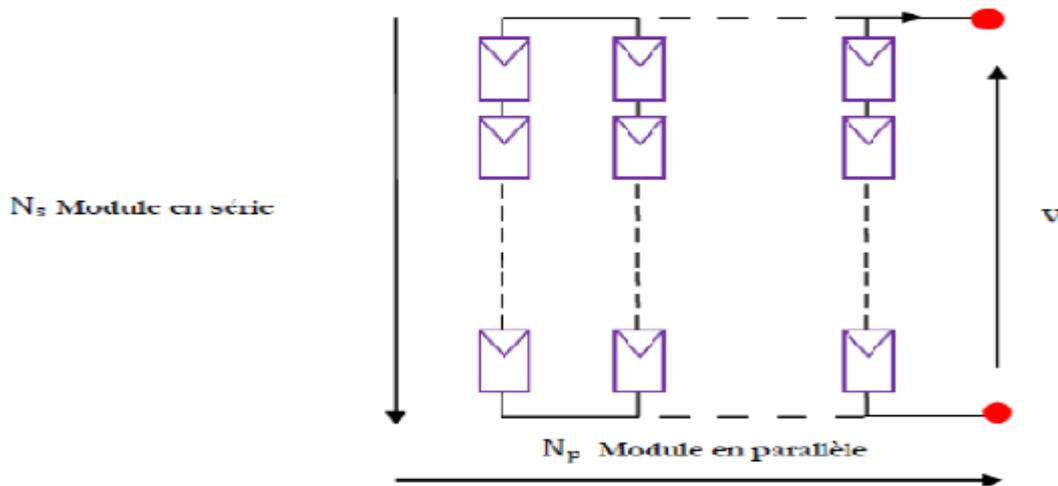


Figure II.22 : Caractéristique du groupement hybride des cellules identiques.

b. L'influence de l'éclairement et de la température:[15]

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La figure représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes : le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

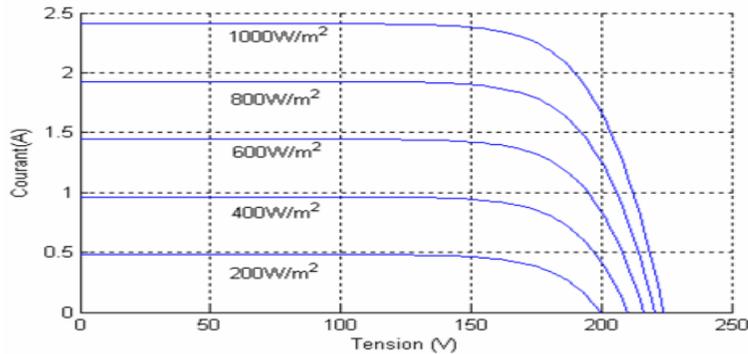


Figure II.23:caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement

l'influence de la température est importante et a des conséquences sur la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques c'est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires susceptibles de les échauffer de plus une partie de rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique mais se dissipe sous forme de chaleur :c'est pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a) :

$$T_c = T_a + \frac{Em}{800}(TUC - 20)$$

Avec :

T_c : température de la cellule (°C)

T_a : température ambiante (°C)

Em : éclairement moyen (W/m²)

TUC : température d'utilisation de la cellule (°C)

La figure montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température, plus la température augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale.

Le comportement global de la cellule en température est une perte de 0.4 à 0.5%/°C

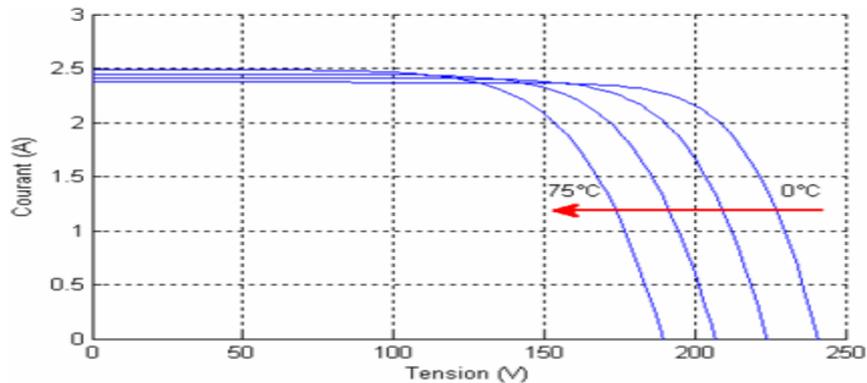


Figure II.24 : caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température

II.8 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques [13]

- **Avantage :**
 - Sa gratuité.
 - Pas de pollution.
 - Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
 - Sa structure fixe.
 - Son coup de maintenance bas.
 - Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
 - L'installation ne produit aucun bruit
 - Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucrerait pour alimenter la planète entière.

- **Inconvénients**

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons défini des généralités sur le système photovoltaïque en, expliquant le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur photovoltaïque(GPV), Ensuite, nous avons accédé les différents associations des cellules(en série ,en parallèle et hybride) et défini son rendement et le Facteur de forme, on a fait aussi la modélisation de la cellule photovoltaïque, en étudiant aussi l'influence de la température, l'éclairement.

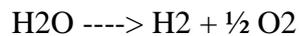
Dans ce contexte, nous allons présenterons dans le chapitre suivant :
Etude bibliographique sur la production de l'hydrogène et surtout les électrolyseurs PEM (à membrane échangeuse de protons).

CHAPITRE III

III.1. Introduction :

William Nicholson, un chimiste britannique du XVIII^e siècle (1753-1815), qu'est fournie la paternité de l'électrolyse de l'eau, au tout début du XIX^e siècle[30]. Volta a travaillé sur les batteries. Il a construit une batterie lui-même et a découvert qu'en immergeant l'extrémité du conducteur dans l'eau, il était décomposée en hydrogène moléculaire (H₂) et en oxygène (O₂).

Avec cette découverte, Nicholson est devenu la première personne de l'histoire à être préservée. Il a utilisé avec succès l'électricité pour effectuer une réaction chimique:



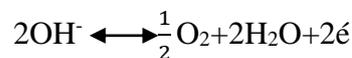
Cette découverte est aussi un acte de naissance pour préparer l'électrochimie.

Le processus d'électrolyse de l'eau comprend la séparation de l'eau H₂O en hydrogène H₂ et oxygène O₂ pendant la réaction. Réactions redox. Les processus actuellement disponibles dans l'industrie comprennent l'électricité qui est utilisée pour cette électrolyse.

Actuellement seulement 4% de l'hydrogène est produit par électrolyse. Lorsque l'électricité est bon marché ou de l'hydrogène de haute pureté est nécessaire.

III.2 Principe de fonctionnement d'électrolyse d'eau :

L'électrolyse de l'eau consiste en deux réactions chimiques qui se produisent séparément électrode. À la cathode, la réduction de l'eau se produit selon l'équation, et à l'anode Selon l'équation, l'oxydation des ions hydroxyde



Les électrons (e⁻) ingérant dans les réactions qui sont transportés par le circuit électrique. Le schéma classique d'une cellule d'électrolyse est donné par la Fig. (I.3) Ci-Dessous :

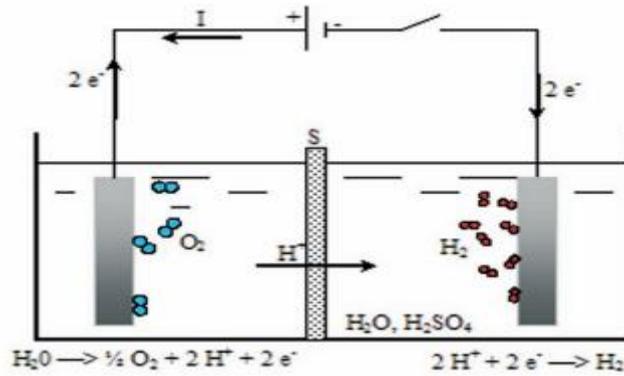


Figure III.1 : Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse de l'eau.

L'eau ne se divise pas normalement en hydrogène et en oxygène. Vous devez fournir de l'énergie pour cela. Par conséquent, l'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique «forcée», qui a lieu dans un dispositif spécial appelé électrolyseur.

III.3 Les types d'électrolyseurs [17] :

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

a. 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.

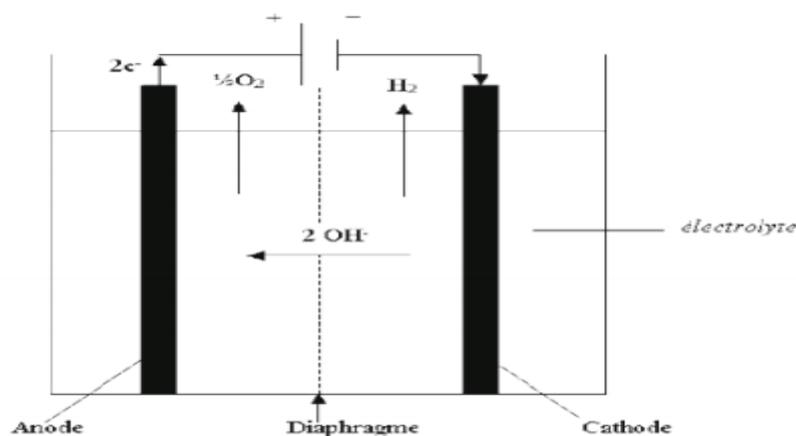


Figure III.2 : électrolyseur Alcalin

❖ 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 .

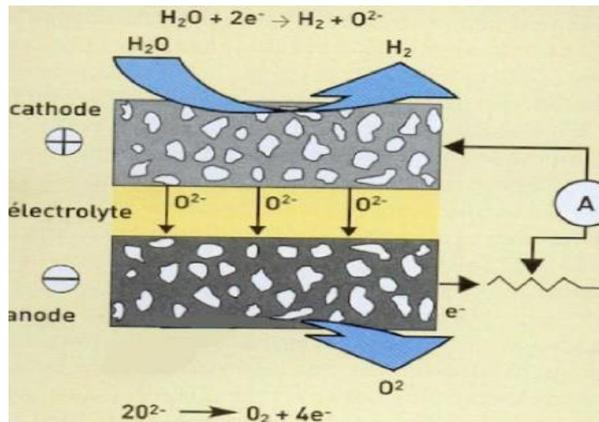


Figure III.3 :L'électrolyse SOEC5

b. Les électrolyseurs PEM :

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 .

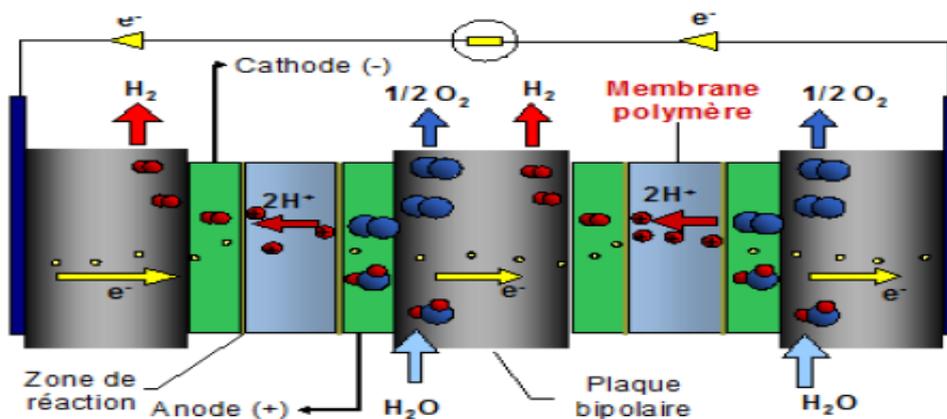


Figure III.4 : Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane)

Type	Température de fonctionnement C°	Pression de fonctionnement Bars	Consommation électrique (H2) KWh/Nm	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

Tableau III.1 : Données techniques actuelles(2008) des électrolyseurs

b.1 Principe de fonctionnement :

a. Electrolyseurs alcalins :

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus populaire pour la production d'hydrogène Electrolysé et peut également être utilisé pour produire de nombreux composés, y compris Chlore. Par conséquent, il bénéficie d'une industrie très mature.

Dans un électrolyseur alcalin, l'électrolyte est une solution aqueuse Hydroxyde de potassium (KOH).[32] Puis à travers les ions pour assurer la conduction ionique Hydroxyde (OH-) Et le potassium (K +). Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites comme suit:

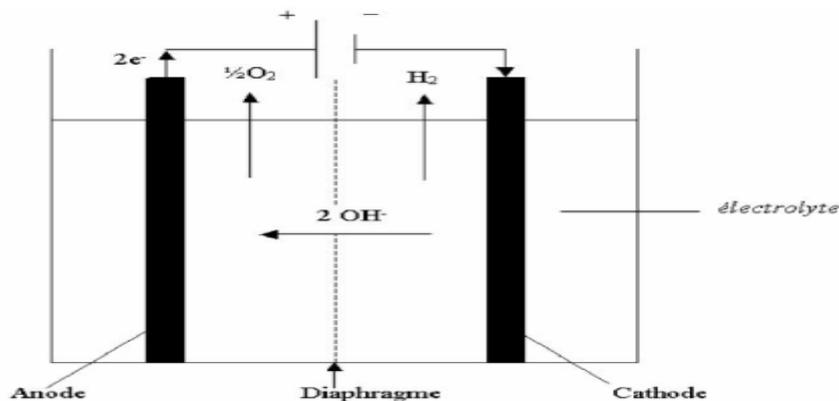
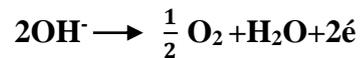


Figure III.5 :L'électrolyse alcaline

Au niveau de l'anode :



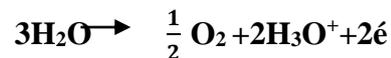
Au niveau de cathode :



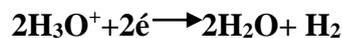
b. Electrolyseurs PEM :

Le principe de fonctionnement de l'électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est basé sur le même concept que la pile à combustible PEM. La caractéristique principale de la cellule électrolytique PEM est son électrolyte solide, qui est composé de membranes polymères. Il se situe par conséquent, l'ion hydronium (H_3O^+). Le produit agréé à séparer les gaz (H_2 et O_2) produits selon les réactions suivantes:

à l'anode :



A cathode :



Les performances de l'électrolyseur PEM appartiennent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM.

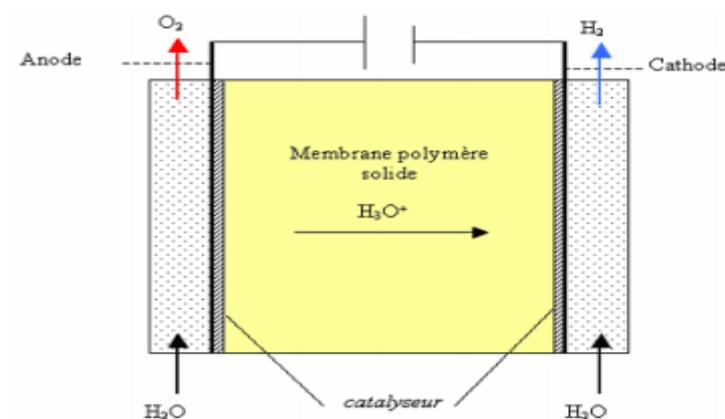


Figure III.6 : principe schématique de l'électrolyse PEM.

c. Electrolyseurs à haute température :

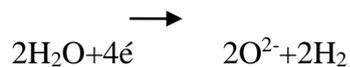
Le principe de l'électrolyse à haute température est basé sur la décomposition des molécules Eau sous forme de vapeur à la cathode. Ensuite, cette décomposition dépend de La nature de l'électrolyte. Cela peut fournir la conduction protonique ou Conduction de l'ion super oxyde O^{2-} . La réaction impliquée dans l'électrode est Comme décrit ci-dessous, selon le type d'électrolyte:

❖ Electrolyte à conduction d'ions super oxydes :

à l'anode :



A la cathode:



❖ Electrolyte à conduction protonique :

à l'anode :



à la cathode :

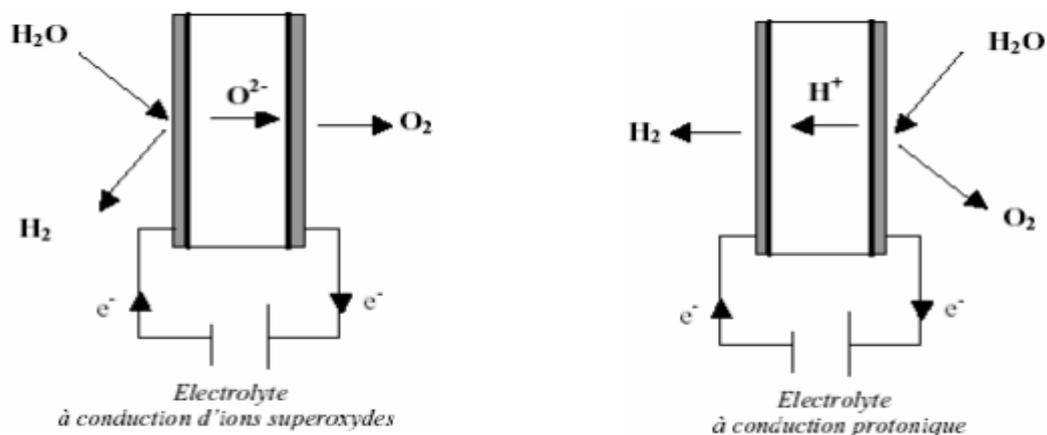
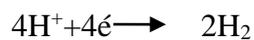


Figure III.7 : principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

D'un point de vue thermodynamique, l'électrolyse de l'eau à haute température est plus intéressante, l'énergie d'électrolyse est fournie par la chaleur et l'électricité. Le principal avantage de cette électrolyse est la majeure partie de l'énergie d'électrolyse fournie par la chaleur qui est beaucoup moins chère que l'électricité. Du point de vue cinétique, l'augmentation de la température réduit toutes les fluctuations aux électrodes, réduisant ainsi la consommation d'énergie électrique.

b.2 Modélisation de l'électrolyseur :

L'électrolyseur est une sorte d'équipement qui utilise l'énergie électrique pour faire des réactions chimiques. Dans le cadre de nos recherches, la cellule électrolytique utilisée pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau produit mène à l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène.

Le PEM est constitué d'une membrane ou d'une membrane en polymère pur, le matériau forme un matériau composite à matrice polymère. Un des plus... Les fabricants de membranes échangeuses de protons utilisent généralement Nafion, la figure III.7 montre la structure de l'électrolyseur PEM.

Modèle d'électrolyseur :

L'électrolyseur que nous utilisons est de type PEM (Proton Exchange Membrane). De manière générale, l'opération d'électrolyse consiste à diviser une molécule en ses éléments simples sous l'action d'un courant électrique. Dans le cas présent, l'eau est divisée en hydrogène et oxygène gazeux. Au niveau d'un électrolyseur PEM, il y a la membrane qui porte les électrolytes (proton) et non le milieu aqueux. Avec cette manière l'électrolyse de l'eau concentrée ou par vapeur d'eau est possible.

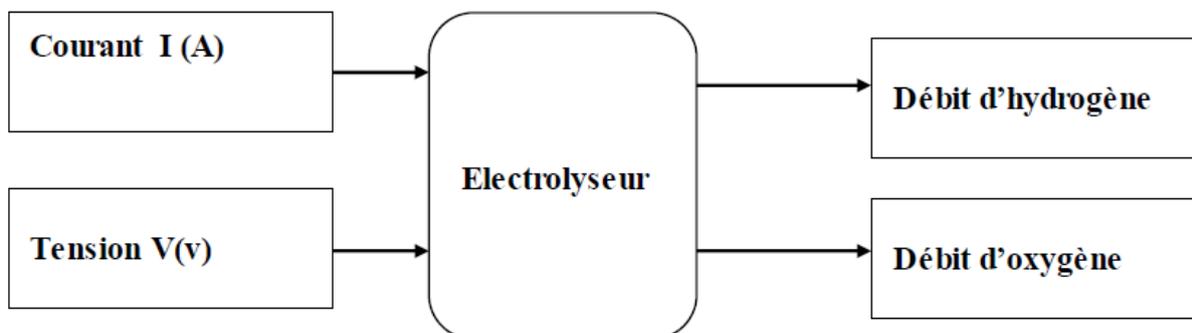


Figure III.8 : Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur

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

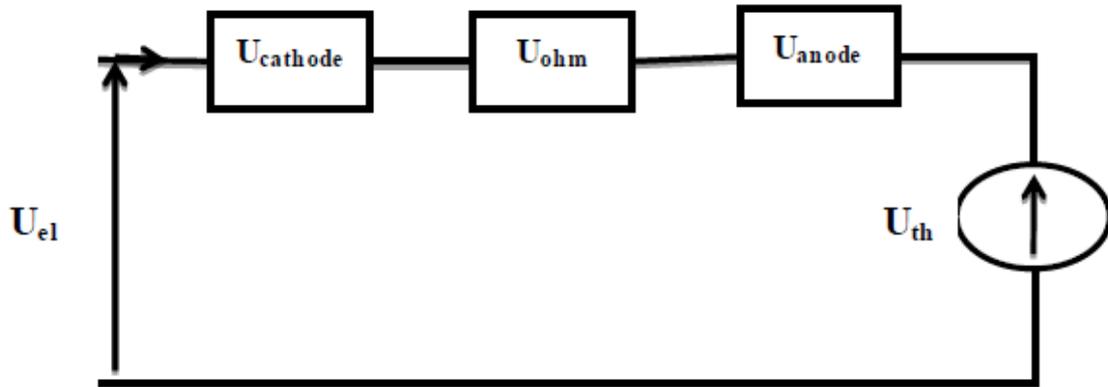


Figure III.9 : Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique

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

$$U_{el} = U_{th} + U_{anode} + U_{cathode} + U_{ohm}$$

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

Les Modèles utilisé pour l'électrolyseur PEM : [19]

Il y a certains modèles pour faire en marches l'électrolyse de l'eau :

➤ Modèle thermique :

La plupart des modèles proposés sont adaptés pour l'électrolyse PEM. Nous avons utilisé un modèle qui se base sur le bilan énergétique total d'un électrolyseur et qui s'exprime par l'équation :

$$C_t * \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{th} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{ea}$$

Avec \dot{Q}_{th} : Puissance thermique dégagée par la réaction, (W)

$$Q_{th} = N_s * (U_{cell} - U_{th}) * I$$

\dot{Q}_{loss} : Flux échangé avec l'extérieur, (W)

$$Q_{loss} = \frac{1}{R_t} * (T - T_a)$$

\dot{Q}_{eau} : Flux échangé avec l'eau d'alimentation, (W)

$$Q_{eau} = h_e * (T - T_{eau})$$

D'où :

T (J.K-1) : Température de l'électrolyse,

T_a (°C) : Température ambiante,

T_{eau} (°C) : Température de l'eau,

N_s (°C) : Nombre des cellules,

U_{cell} (V): Tension d'une cellule,

U_{th} (V): Tension thermo-neutre d'une cellule,

I : Intensité (A),

R_t : Résistance thermique,

h_e : Coefficient d'échange .

Calcul de la température avec le modèle thermique statique :

$$T = T_{ini} + \frac{\Delta t}{C_t} * (Q_{th} - Q_{loss} - Q_{eau})$$

T_{ini} : Température initiale (K),

C_t : Capacité thermique de l'appareil,

Δt : Intervalle de temps (s).

Les trois paramètres mentionnés ci-après doivent être déterminé expérimentalement. Il s'agit de la capacité thermique de l'appareil, de la résistance thermique et du coefficient d'échange

➤ **Modèle électrochimique :**

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

$$U_c = U_{rev} + \eta - \eta_c + RSP$$

Où :

η_a : Surtension anodique (V),

η_c : Surtension cathodique (V).

RSPE : Résistance globale ($cm^2\Omega$).

Le schéma électrique équivalent de l'électrolyseur utilisé pour le modèle électrochimique se représente sous la forme suivante :

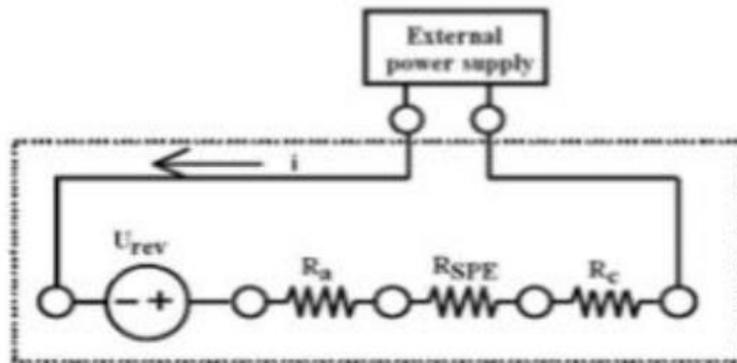
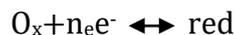


Figure III.10: Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimique.

La densité de courant traversant une électrode se superpose au courant dû à la réaction :



Que l'on peut calculer par la relation de relation de Butler-Vollmer. Alors, on aura l'intensité en fonction de la surtension et l'intensité à l'anode:

$$I = I_0 * \left[\exp \left(\frac{a_v e F \eta}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-(1 - a_a) e F \eta}{RT} \right) \right]$$

Où :

I_0 : Intensité aux électrodes (A),

I : Intensité (A).

α : Coefficient de transfert de charge 0,5

ν_e : Coefficient stœchiométrique à l'anode $\nu = 2$ et à la cathode $\nu = -2$ [12].

η : Surtension (V).

Alors les surtensions à l'anode et à la cathode s'expriment :

Anode :

$$\eta_a = \frac{RT}{F} \mathbf{F} \sinh^{-1} \left(\frac{I}{2I_0a} \right)$$

Cathode :

$$\eta_c = \frac{RT}{F} \mathbf{F} \sinh^{-1} \left(\frac{I}{2I_0c} \right)$$

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

$$\mathbf{E} = \mathbf{a} + \mathbf{b} * \log(\mathbf{I}) + \mathbf{c} * \mathbf{I}$$

Trois (3) paramètres sont à déterminer On peut déterminer les paramètres a, b et c pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression) par une régression linéaire portant sur la variable I. Les 3 paramètres a, b et c sont déterminés à partir de résultats expérimentaux et un sous programme que nous avons développé. Ces paramètres dépendent de la température T et de la pression partielle en oxygène PO₂. Dans notre cas, le prototype fonctionne à pression atmosphérique que l'on ne peut pas faire varier. Les paramètres ne sont donc déterminés qu'en fonction de la température.

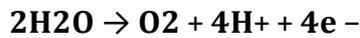
➤ **Modèle thermodynamique :**

Pour quantifier clairement les interactions dynamiques, l'électrolyseur PEM est considéré comme ayant quatre auxiliaires: anode, cathode, membrane et accessoire de tension. Chaque auxiliaire la dynamique et l'interaction entre eux sont envisagées. La tension auxiliaire calcule la tension appliquée à l'électrolyseur niveau en utilisant l'équation de Nernst,

la polarisation ohmique et polarisation d'activation. Calculs auxiliaires de la membrane teneur en eau, traînée électroosmotique, diffusion d'eau et conductivité de la membrane. L'anode auxiliaire dynamiquement calcule les débits d'oxygène et d'eau et partiels pressions. De même, les pressions partielles d'hydrogène et d'eau et leurs flux sont obtenus dans le sous-système cathodique. L'accessoire de stockage montre la dynamique de stockage dès l'hydrogène dans une bouteille en tenant compte de l'hydrogène initial niveau et compressibilité de l'hydrogène.

➤ **Modèle d'anode :**

Le craquage à l'eau et la réaction de dégagement d'oxygène ont lieu dans le compartiment anodique. La réaction demi-cellule est donnée comme :



L'oxygène évolue sous forme de gaz, les ions hydrogène se déplacent vers la cathode à travers la membrane, tandis que les électrons sont entraînés par l'alimentation électrique du circuit extérieur. Le débit total d'oxygène est égal à l'oxygène généré soustrait du débit d'oxygène de sortie, l'entrée d'oxygène est supposée égale à zéro. De l'eau est fournie en continu au compartiment anodique, tandis qu'une petite quantité d'eau est entraînée vers la cathode par les ions hydrogène (traînée électroosmotique $\dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{eod}}}$ et diffusion $\dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{diff}}}$). Le mécanisme de transport de l'eau est décrit en détail plus loin dans la section membrane. Le taux de génération d'oxygène et le taux de consommation d'eau peuvent être écrit comme suit :

$$\dot{N}_{\text{O}_2} \rightarrow \dot{N}_{\text{O}_2\text{ai}} - \dot{N}_{\text{O}_2\text{ao}} + \dot{N}_{\text{O}_2\text{g}}$$

$$\dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{an}}} \rightarrow \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{ai}}} - \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{ao}}} - \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{eod}}} - \dot{N}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{diff}}}$$

Les vitesses molaires des espèces peuvent être calculées à partir du rapport des pressions partielles à la pression anodique :

$$y_{\text{O}_2} = P_{\text{O}_2} \div P_{\text{an}}$$

La quantité d'oxygène générée dans l'anode peut être calculée en temps réel à partir de l'équation de Faraday :

$$\dot{N}_{\text{O}_2\text{g}} = (n * I) \div (4 * F)$$

$$N_{O_{2ao}} = y_{O_2} * N_{ao}$$

$$N_{H_2O_{ao}} = (1 - y_{O_2}) * N_{ao}$$

$$N_{ao} = N_{O_{2ao}} + N_{H_2O_{ao}}$$

Où le débit total de sortie de l'anode N_{ao} , est obtenu par :

$$N_{ao} = K_{ao} * (P_{an} - P_{an0})$$

La pression totale de l'anode est la somme des pressions partielles de l'oxygène et de l'eau, qui sont dérivées de la loi des gaz parfaits :

$$P_{O_2} = (N_{O_2} * R_u * T_{el}) \div V_{an}$$

$$P_{H_2O_{an}} = (N_{H_2O_{an}} * R_u * T_{el}) \div V_{an}$$

$$P_{an} = P_{O_2} + P_{H_2O_{an}}$$

$$P_{cat} = P_{O_2} + P_{H_2O_{cat}}$$

La pression de saturation doit être définie pour les calculs d'humidité relative dans le module de membrane. Cependant, cela ne dépend que de la température :

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24 * T - 10.554 * T^2 + 0.16636 * T^3$$

A est l'activité de la vapeur d'eau et est calculée comme suit: $a = P_{cat}/P$

➤ **Modèle de membrane :**

La membrane est considérée là où les ions hydrogène et l'eau peuvent être transportés dans le module. Deux événements essentiels liés à l'eau sont disponibles dans le module membrane. Ce sont la diffusion et la traînée électroosmotique de l'eau. L'acontie et suette ont rapporté que $3.5e4$ molécules d'eau sont transportées avec chaque proton vers la cathode, tandis que les ions hydrogène traversent la membrane. a proposé un modèle pour le transport de l'eau à travers la membrane :

$$N_{H_2O_{eod}} = \frac{nd * i * A * M_{H_2O}}{F}$$

$$nd = 0.016 * T - 2.8955$$

Un autre problème avec la membrane est l'absorption d'eau, qui joue un rôle vital pour la mobilité ionique. L'absorption d'eau de la membrane (y) est définie:

$$y = 0.043 + 17.81 * a - 39.85 * a^2 + 36 * a^3 \quad 0 < a \leq 1$$

$$y = 14 + 1.4 * (a - 1) \quad 1 < a \leq 3$$

$$y_m = \frac{y_{cat} + y_{an}}{2}$$

Un autre mécanisme important dans la membrane est le transport de l'eau par diffusion. $N_{H_2O_{diff}}$ est la diffusion de l'eau en moles peut être exprimée comme:

$$N_{H_2O_{diff}} = D_w * \left(\frac{C_{wc} - C_{wa}}{t_{me}} \right) * A * M_{H_2O}$$

Le coefficient de diffusion de l'eau peut être calculé comme suit:

$$D_w = D_y * \exp \left[2416 * \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

$$D_y = 10^{-10} \quad y_m < 2$$

$$D_y = 10^{-10} [1 + 2 * (y_m - 2)] \quad 2 \leq y_m \leq 3$$

$$D_y = 10^{-10} [3 - 1.67 * (y_m - 3)] \quad 3 \leq y_m \leq 4.5$$

$$D_y = 1.25 * 10^{-10} \quad y_m \geq 4.$$

La concentration en eau C_w est définie par:

$$C_{wa} = \frac{\delta_{me.dry}}{M_{me.dry}} * y_{an}$$

$$C_{wc} = \frac{\delta_{me.dry}}{M_{me.dry}} * y_{cat}$$

La densité de l'eau dans cette équation est calculée comme suit:

$$M_{me.dry} = \frac{0.14395}{0.0112^{+1+(1-\frac{T}{649.727})^{0.0510}}$$

La quantité totale d'eau transportée de l'anode à la cathode est la somme du transport par traînée électroosmotique et diffusion:

$$N_{H_2O_m} = N_{H_2O_{diff}} + N_{H_2O_{eod}}$$

➤ **Modèle de Tension :**

Les électrolyseurs fonctionnent en mode courant ou en tension mode. Lorsqu'ils fonctionnent en mode tension, la tension est appliquée à l'électrolyseur et en fonction des conditions de fonctionnement l'électrolyseur tire le courant de la source et après quelques cycles transitoires, il a sa valeur de régime permanent. Ce le mode convient lorsque la source photovoltaïque est utilisée pour un électrolyseur. Cependant, la plupart des produits disponibles dans le commerce les électrolyseurs fonctionnent en mode courant et sous une tension de un électrolyseur est donné comme:

$$V_{el} = E + V_{act} + V_{ohm}$$

Où E est la tension en circuit ouvert, V_{act} est la polarisation d'activation, V_{ohm} est la polarisation ohmique. La tension de circuit ouvert, E, est définie comme l'équation de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} * \left[\ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}}{a_{H_2O}}\right) \right]$$

Où E_0 est le potentiel standard, R est le gaz universel constante, T_{el} est la température de la cellule et a_{H_2O} est l'activité de l'eau entre l'anode et l'électrolyte pour plus de simplicité, on suppose ici pour être 1. La tension standard E_0 est :

$$E_0 = \frac{\Delta G}{2 \cdot F}$$

Où ΔG est l'énergie libre de formation de Gibbs.

La polarisation d'activation est obtenue par :

$$V_{act} = \frac{R \cdot T}{2 \cdot a \cdot F} * \ln\left(\frac{i}{i_0}\right)$$

a est le coefficient de transfert de charge, i est la densité de courant et i_0 est la densité de courant d'échange. La polarisation ohmique est calculée par :

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm}$$

Où la résistance de membrane R_{ohm} , est :

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m}$$

σ_m est la conductivité de la membrane qui est calculé à partir de la teneur en eau de la membrane t_m , la température de l'électrolyseur T_{el} , comme suit :

$$\sigma_m = (0.00154 * \gamma_m - 0.00326) * \exp \left(1268 * \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right)$$

➤ **Modèle de stockage :**

Le H2 produit par l'électrolyseur est stocké dans une bouteille. Constant débit H2 remplit la bouteille jusqu'à ce que sa pression atteigne la pression cathodique de l'électrolyseur. La dynamique de stockage est obtenue comme suit :

$$P_b - P_{bi} = \frac{z * n_{H2} * R * T}{M_{H2} * V_b}$$

Pb est la pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal), Pbi est la pression initiale du réservoir de stockage en (Pascal), R est la constante de gaz universelle (J / kmol · K), T est la température de fonctionnement (K), Vb est le volume du réservoir (m3), Z est le facteur de compressibilité en fonction de la pression :

$$Z = \frac{P * V_m}{R * T}$$

Où, P et Vm sont la pression et le volume molaire respectivement.

b.3 Avantages et inconvénients d'électrolyseur PEM :

Les avantages : [20]

- Densités de courant élevées (> 2 A/cm2) .
- Efficacité énergétique élevée.
- Autorise des pressions élevées et fonctionne entre 20 et 80° C .
- Une perméabilité aux gaz plus faible et production d'hydrogène ultra pur .
- Les catalyseurs en métaux nobles augmentent le coût .
- Utilisation spatiale et dans des laboratoires .
- Temps de réponse rapide et faible encombrement.

Les inconvénients : [19]

- Le coût élevé des membranes polymères.
- Des catalyseurs en métal noble.

- Processus de fabrication compliqués et coûteux.
- Le coût élevé des catalyseurs.
- Stock inférieur au MW.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons généralement vu que l'électrolyse de l'eau est un procédé technique utilisé pour produire l'hydrogène. Il est toujours un vecteur d'énergie très important, et très approprié dans la production d'électricité, nous avons donc détaillé l'électrolyseur PEM en expliquant leur principe de fonctionnement et on a cité aussi les différents modèles et à la fin les avantages et les inconvénients.

CHAPITRE IV

1. Introduction :

Nous avons donné un aperçu sur les générateurs photovoltaïques (chapitre2) et sur les électrolyseurs (chapitre3). Nous nous intéressons maintenant à l'étude du couplage direct des deux éléments. Pour ce faire, nous procédons à des simulations sur MATLAB dans le but d'approcher le mieux un couplage optimal.

2. Modélisation du générateur photovoltaïque :

Un panneau photovoltaïque a une courbe caractéristique très différente des autres types de générateurs électriques. Des courbes typiques I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque sont montrés sur la Figure 30, On peut observer que la courbe P-V a un extremum, appelé point de puissance maximale (MPP, Maximum power point) pour lequel la puissance de sortie est maximale à irradiation et température fixes. Pour optimiser le fonctionnement du générateur photovoltaïque, ce dernier doit fonctionné le plus proche possible de ce point. Le voltage doit correspondre au V_{mp} en tout temps. Toutefois, ce point de puissance maximal dépend étroitement du rayonnement solaire et la température ambiante, qui varient selon les conditions climatiques locales.

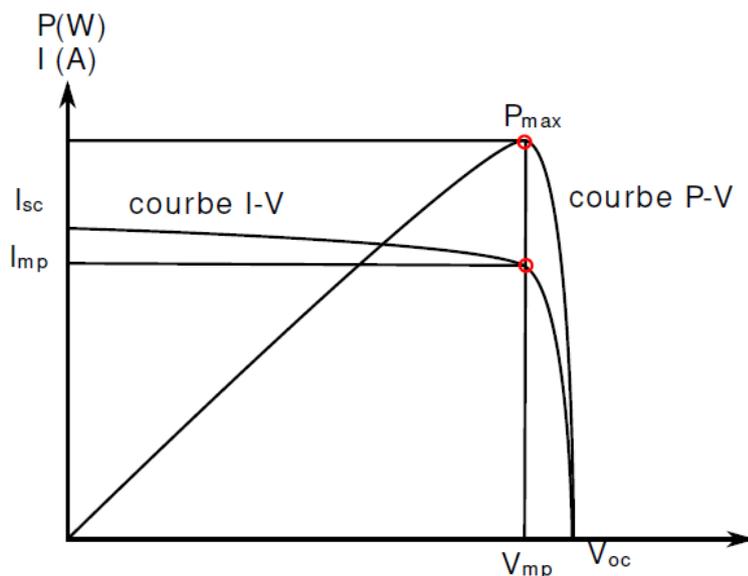


Figure IV.1: Courbes du panneau photovoltaïque montrant le point de puissance maximale P_{max} sur la courbe I-V et la courbe P-V

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.

a. Modèle choisi :

a.1. Modèle de simulation de la caractéristique I-V :

Parmi les modèles trouvés dans la littérature, nous avons choisi le modèle à une diode pour la

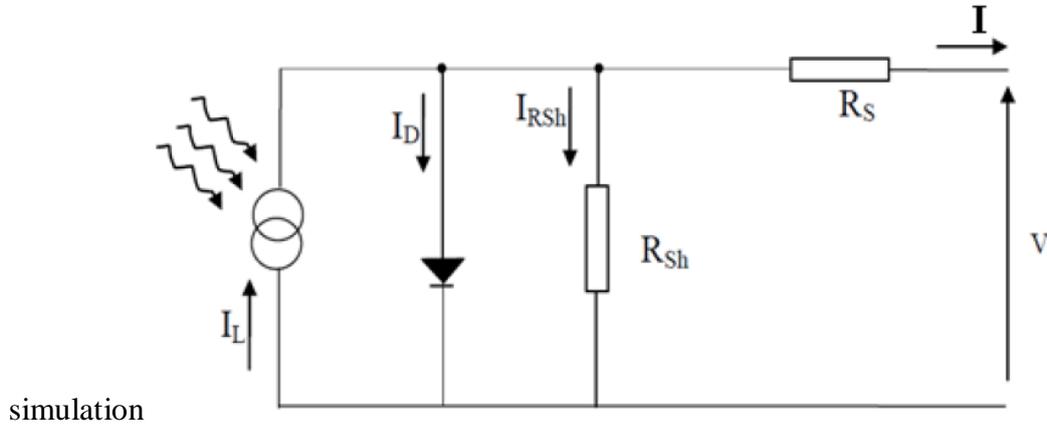


Figure IV.2: Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque

D'après le circuit du module photovoltaïque et en appliquant la loi des nœuds, on trouve la relation entre le courant et la tension :

$$I = I_L - I_D - I_{RSH}$$

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

Tel que :

$$V_{th} = \frac{A \cdot T_c \cdot K}{q}$$

A : facteur d'idéalité.

$$I_{RSH} = \left(\frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \right)$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + (I \cdot R_s)}{V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}}$$

Pour des modules supposés dépourvus de fuites (R_{sh} infinie et $I_{RSH} \sim 0$), cette relation devient comme suit :

$$I = I_L - I_D$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + (I \cdot R_s)}{V_{th}} \right) - 1 \right]$$

On remplace V_{th} dans l'équation de courant et on obtient :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V + (I.R_s))}{A.T_c.K} \right) - 1 \right]$$

Cette équation montre qu'il y a quatre paramètres inconnus : I_L (photo-courant), I_0 (courant de saturation), A (facteur d'idéalité) et R_s (résistance série)

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

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

$$I_{CC} = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(I_{CC} . R_s)}{A.T_c.K} \right) - 1 \right]$$

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

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{CO}}{A.T_c.K} \right) - 1 \right]$$

- Pour le point de puissance maximale :

$$I_m = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V_m + (I_m . R_s))}{A.T_c.K} \right) - 1 \right]$$

Pour déterminer les paramètres inconnus, on utilise la méthode explicite simplifiée :
On suppose que :

$$I_{CC} = I_L$$

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{CO}}{A.T_c.K} \right) \right]$$

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

$$I_0 = I_{CC} \left[\exp \left(- q \frac{V_{CO}}{A.T_c.K} \right) \right]$$

$$I = I_{CC} \left[1 - \exp \left(q \frac{(V - V_{CO} + (I.R_s))}{A.T_c.K} \right) \right]$$

$$I_m = I_{CC} \left[1 - \exp \left(q \frac{(V_m - V_{CO} + (I_m . R_s))}{A.T_c.K} \right) \right]$$

$$R_s = \frac{\frac{A . T_c . K}{q} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{CC}} \right) + V_{CO} - V_m}{I_m}$$

Pour déterminer le facteur d'idéalité A :

$$\frac{dP}{dV} = 0 = \frac{dI}{dV} V + I \frac{dV}{dI}$$

$$A = \frac{q (2 V_m - V_{c0})}{KT \left[-\frac{I_{sc}}{I_{cc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]}$$

a.2- Paramètres de champ photovoltaïque :

$$I_{0 (gen)} = N_p * I_{0 (mod)}$$

$$V_r (gen) = N_s * V_r (mod)$$

$$R_s (gen) = \frac{N_s}{N_p} * R_s (mod)$$

Donc l'équation de générateur est de la forme :

$$I_{gen} = I_{cc} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V_{gen} + (I_{gen} * R_{s gen}))}{A * T_c * K} \right) - 1 \right]$$

N_p : nombre de module parallèle dans le champ photovoltaïque

N_s : nombre de module série dans le champ photovoltaïque

I_{gen} : le courant délivré par le générateur

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

$$V_{gen} = - I_{gen} \cdot R_{s(gen)} + V_{th} * \log \left(\frac{-I_{gen} + I_{cc} + I_0}{I_0} \right)$$

b- Simulation de la caractéristique I=f(V) :

Nous avons choisi le module photovoltaïque du type **BP 585F dont** les caractéristiques dans les conditions standards ($E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$) sont montées sur le tableau suivant :

Pm(w)	85
Vco(v)	22.03
Icc(A)	5
Vm(v)	18
Im (A)	4.72
α(mA/C°)	3.2
β(mV/C°)	-80
Ns	36
NOCT (C°)	47

Tab IV.1 : les caractéristiques de PV type **BP 585F dont** dans les conditions standards ($E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$)

Nous avons utilisé Matlab pour faire les simulations du GPV et de l'électrolyseur

b.1- résultats pour une température constante $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et différents éclairagements :

Pour étudier les performances du module, nous avons varié l'éclairage avec une température fixe ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$). La figure montre la variation du courant en fonction de la tension.

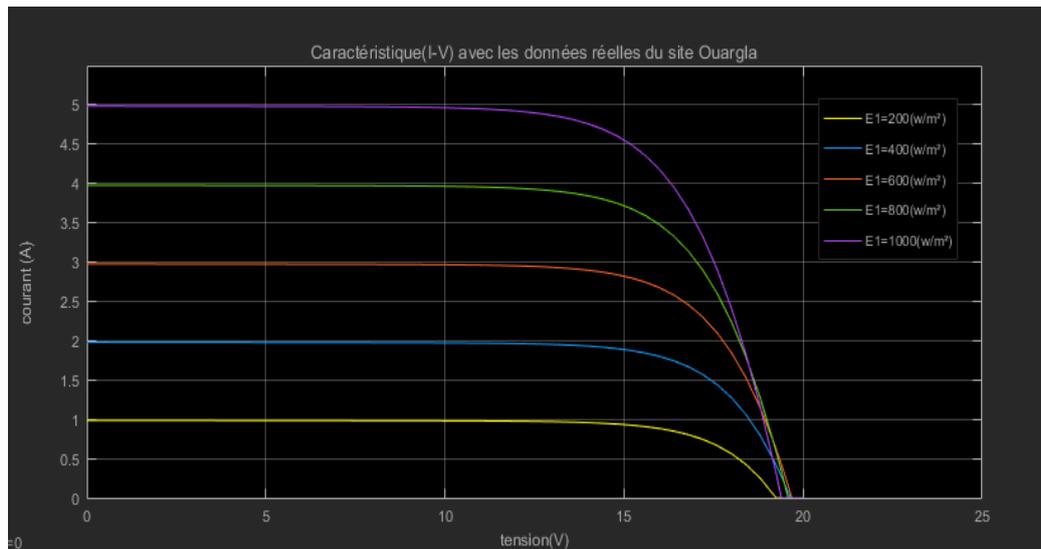


Figure IV.3 :Simulation de la caractéristique (I-V) avec différents éclairagements, pour $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

La figure ci-dessous (Figure IV.4) représente la puissance électrique délivrée par le module en fonction de la tension.

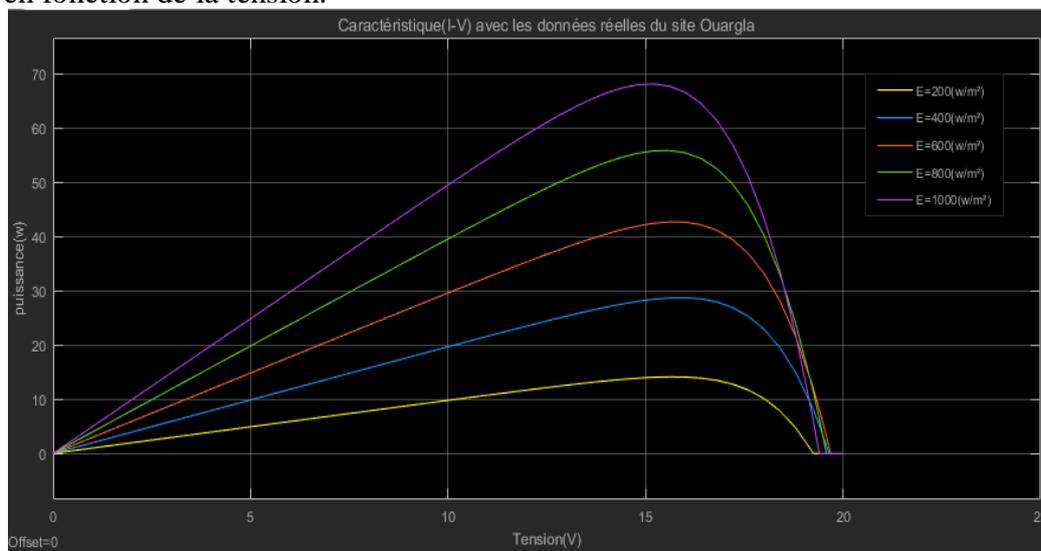


Figure IV.4 : Simulation de la caractéristique (P-V) avec différents éclairagements, pour $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

b.2- résultats pour un éclairement constant $E=1000 \text{ W/m}^2$ 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}) qui 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 indiqué sur la figure suivante (fig IV.5) :

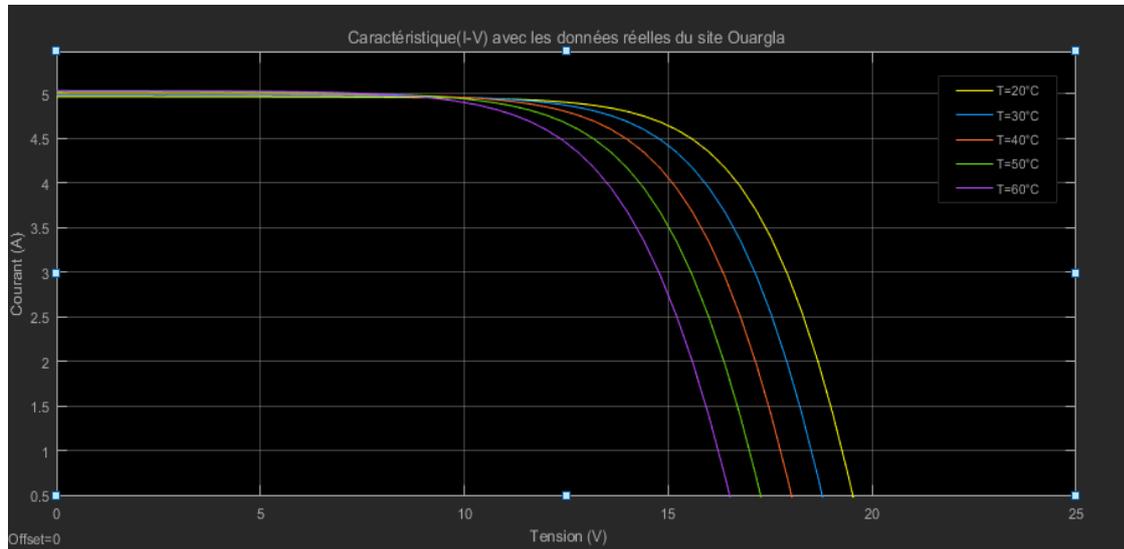


Figure IV.5: Simulation de la caractéristique (I-V) avec différentes températures, pour $E=1000 \text{ W/m}^2$

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 **Figure IV.5** montre que la variation de la puissance est opposée à celle de la température.

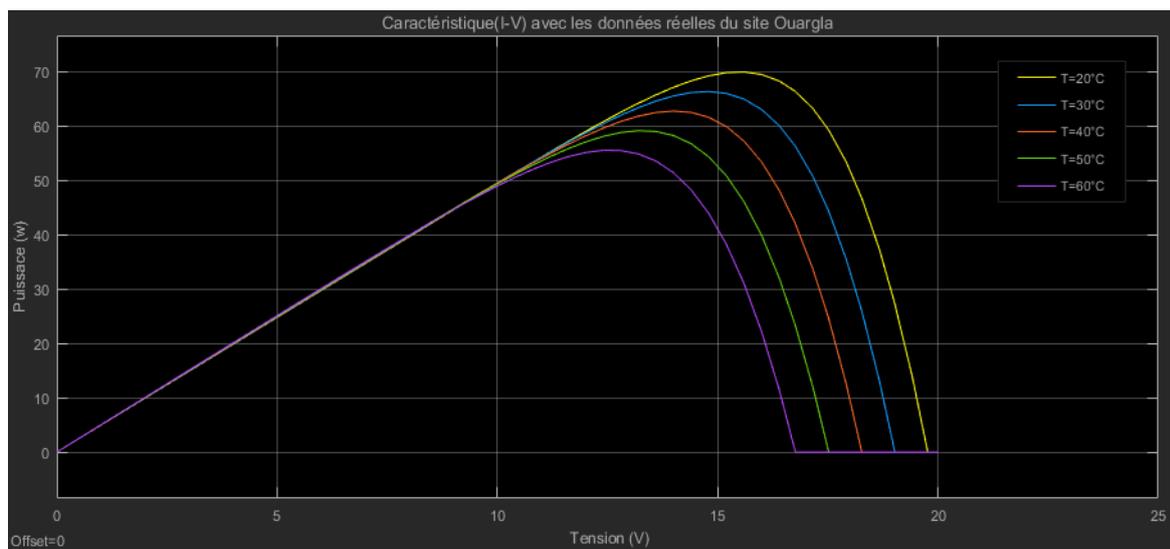


Figure IV.6 : Simulation de la caractéristique (P-V) avec les différentes températures, pour $E=1000 \text{ W/m}^2$

b.3- résultats pour une journée typique

Dans le but de tester le module pour des données réelles, on a utilisé les données trouvées dans la littérature (journée du 04/04/2004 à Ouargla)[35] ; Ces données sont visibles dans le tableau suivant :

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

Tab IV.2 : Les éclairagements et les températures de la journée 04/04/2004 à Ouargla[35]

La simulation pour cette journée donne les résultats montrés sur les figures suivantes :

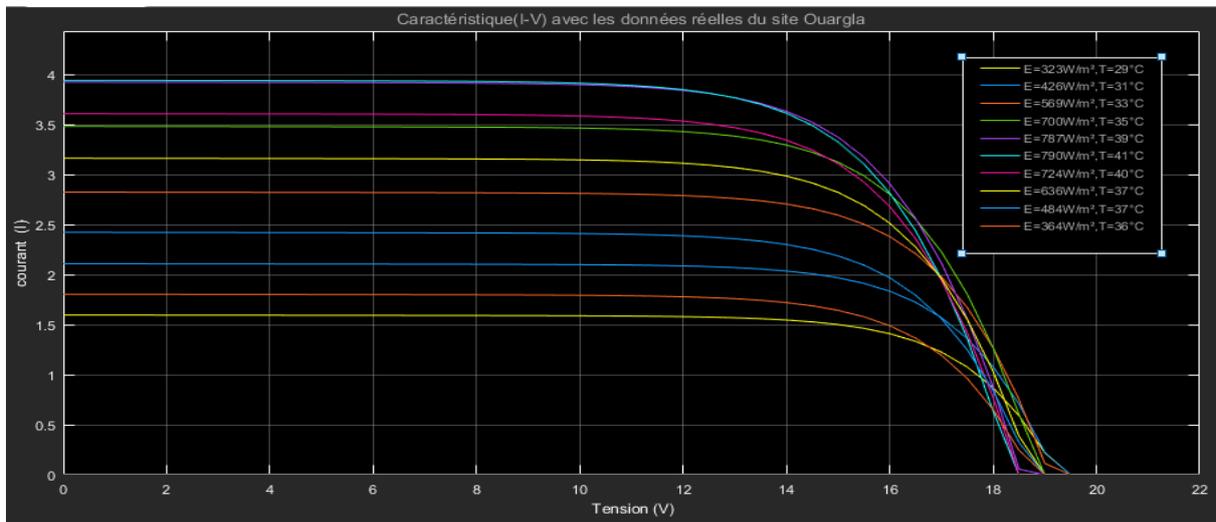


Figure IV.7 : Simulation de la caractéristique (I-V) avec des données réelles du site de Ouargla

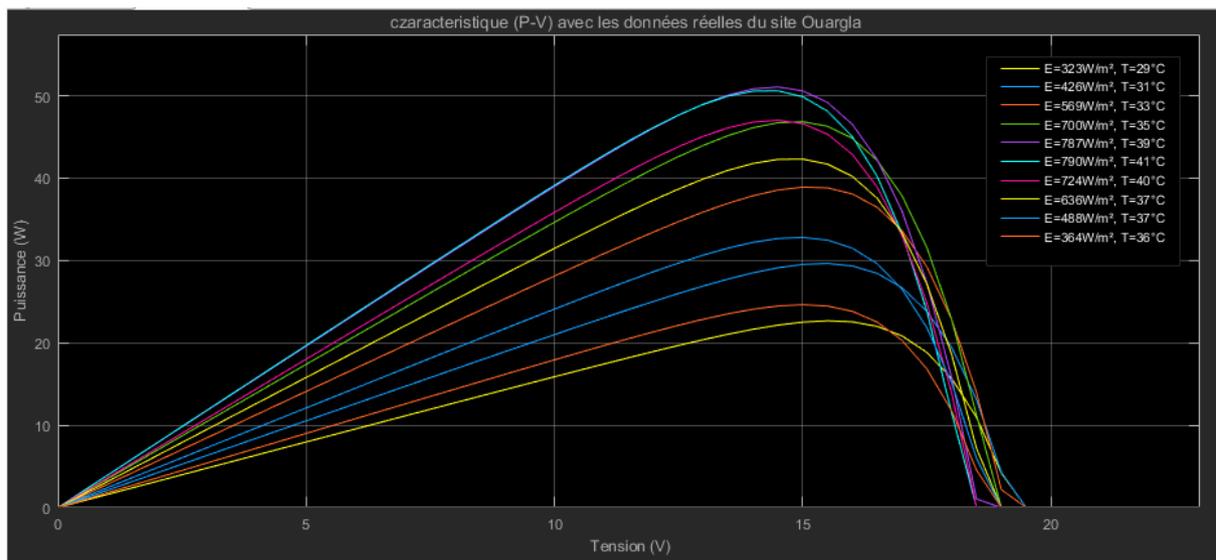


Figure IV.8 Simulation de la caractéristique (P-V) avec des données réelles du site de Ouargla

3. Modélisation de l'électrolyseur PEM :

Un électrolyseur est un dispositif électrochimique dont on a donné un aperçu dans le chapitre 3. Dans ce travail, on a considéré un électrolyseur de type PEM.

Généralement, les fabricants fournissent les caractéristiques de leur produit. Dans notre cas, on a choisi un électrolyseur de laboratoire dont la caractéristique expérimentale pour une cellule est donnée en Annexe.

a) Modèle choisi :

Pour faire nos simulations, nous avons choisi le modèle empirique de Tafel. Selon ce modèle, la relation entre le courant et la tension est donné par l'expression suivante :

$$V_e = a + b \cdot \log(I) + c \cdot I$$

A partir des courbes expérimentales (**Tab IV.3**), les différentes constantes seront déterminées.

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	1.8733333
1.7142857	1.9066667
2.000	1.9333333
2.5714286	1.9733333
3.000	2.0071429
4.000	2.0821429
5.000	2.15

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

Il faut donc déterminer les facteurs a, b et c. Nous choisissons 3 points de la courbe expérimentale (T=80 °C par exemple) et par identification avec l'équation de Tafel, on obtient :

$$1.6857143 = a + b \cdot \log(1/7) + c \cdot (1/7)$$

$$1.85 = a + b * \log (1) + c * (1)$$

$$2.15 = a + b * \log (5) + c * (5)$$

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

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

Donc cet électrolyseur, peut être modélisé par :

$$V = 1.8018 + 0.0632 * \log(I) + 0.0482 * I$$

b) Simulation de la caractéristique $I=f(V)$:

Il apparait clairement selon le résultat obtenu (figure IV.9) que le modèle choisi décrit bien le comportement de la cellule d'électrolyse.

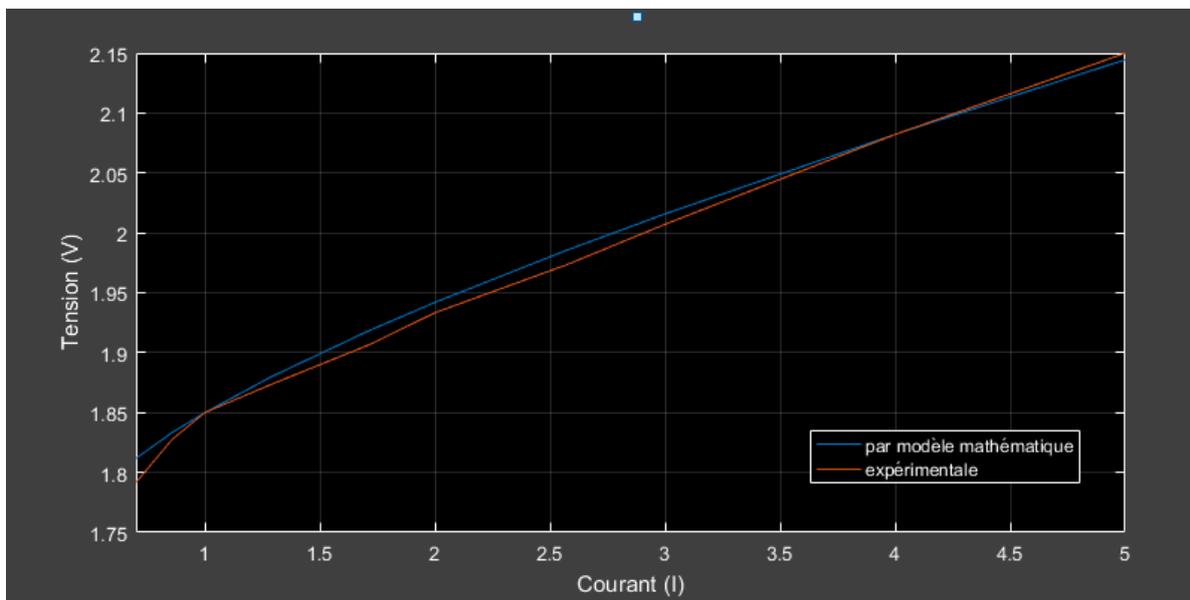


Figure IV.9 : Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale et simulé pour $T_{el} = 80^{\circ}\text{C}$

4. Modélisation du couplage PV/Ely :

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 en couplage direct), le point de fonctionnement représente l'intersection entre les deux courbes (courant-tension), celle du générateur et celle de la charge.

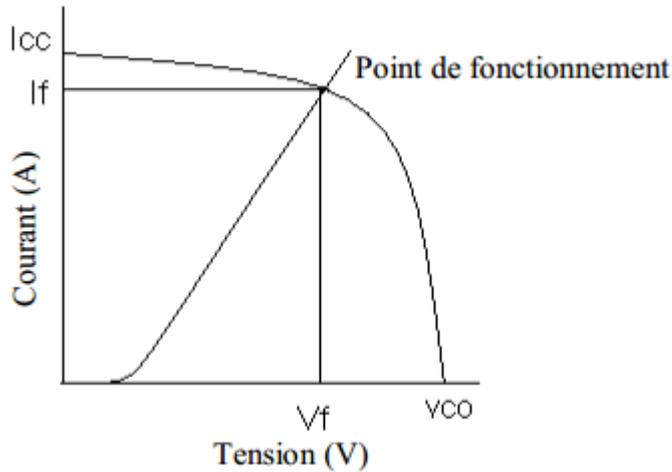


Figure IV.10 : point de fonctionnement du système.

a. Le point de fonctionnement du système :

Pour calculer le point de fonctionnement il faut avoir la condition de coupage :

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

$$1.8018 + 0.0632 * \log(I) + 0.0482 * I = - I_{\text{gen}} \cdot R_{s(\text{gen})} + V_{\text{th}} * \log \left(\frac{-I_{\text{gen}} + I_{\text{cc}} + I_0}{I_0} \right)$$

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

$$f(I) = -1.8018 - 0.0632 * \log(I) - 0.0482 * I - I_{\text{gen}} \cdot R_{s(\text{gen})} + V_{\text{th}} * \log \left(\frac{-I_{\text{gen}} + I_{\text{cc}} + I_0}{I_0} \right) = 0$$

Cette équation est une équation non linéaire. La résolution de cette équation se fera par la méthode de Newton-Raphson d'écrite par :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)}$$

$f'(x_n)$: La dérivée de la fonction $f(x_n)$.

x_n : La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante.

$$\varepsilon = X_{n+1} - X_n$$

Telle que ε est le critère d'arrêt.

b. Influence de dimensionnement de l'électrolyseur :

A l'aide de l'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 :

Les caractéristiques (I-V) du couplage

Nous présentons les résultats des mesures pour un panneau solaire **BP 585F** et l'électrolyseur avec une seule cellule. Les résultats obtenus sous MATLAB sont montrés sur la figure suivante :

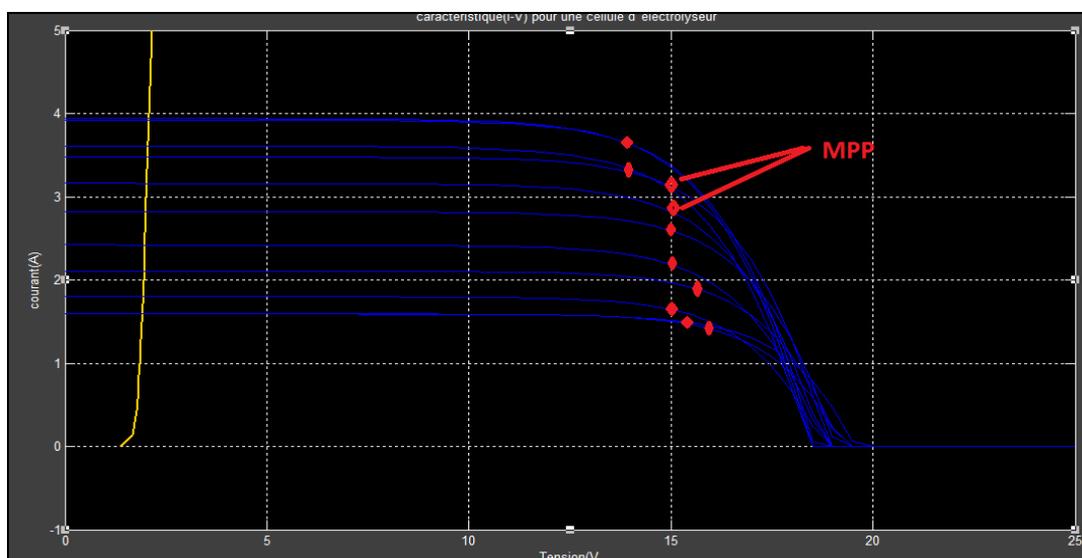


Figure IV.11 Caractéristiques (I-V) du couplage, une cellule d'électrolyseur- module PV

La figure IV.11 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.

- ❖ Pour assurer l'adaptation de l'électrolyseur au générateur PV avec l'éclairement de $E=569W/m^2$. 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 p et s d'électrolyseur

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_f = V_{\max} = s * (1.8018 + 0.0632 * \log(\frac{I_{\max}}{P}) + 0.0482 * (\frac{I_{\max}}{P})) \\ I_{\text{cellule}} = \frac{I_{\max}}{P} \end{array} \right.$$

La résolution de ce système donne: **S=8** **P=1**

La figure. IV.12 Représente la caractéristique (I-V) de générateur photovoltaïque et l'électrolyseur avec s = 8, p = 1 avec les différentes valeurs d'éclaircements 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 éclaircements.

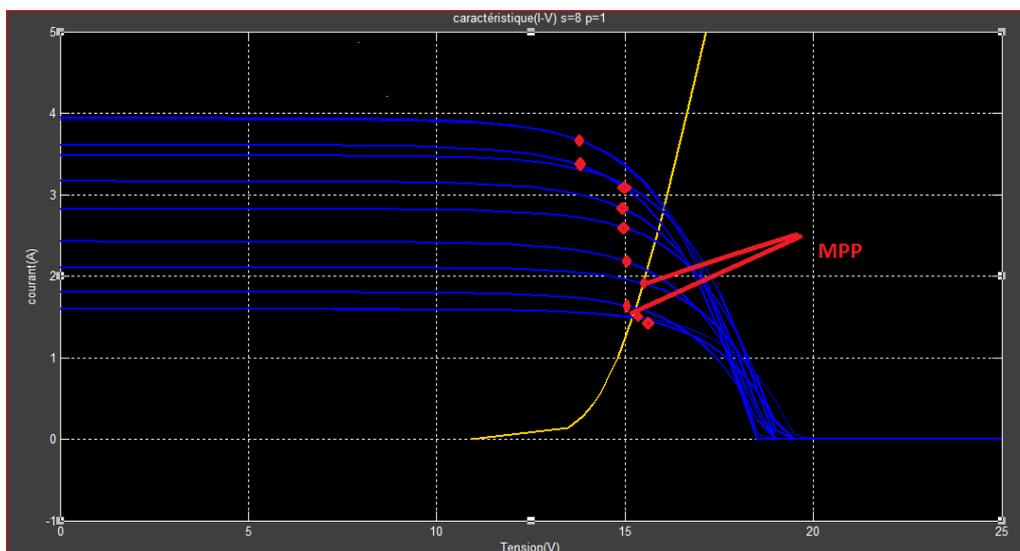


Fig. IV.12. Caractéristiques (I-V) de couplage avec s=8, p=1

c. Calcul du débit d'hydrogène :

$$Q = \frac{N_{\text{cellules}} * R * I_f * T}{Z * F * P} = \frac{N_{\text{cellules}} * 8.32 * I_f * T}{2 * 96500 * 0.1013}$$

V : volume d'hydrogène produit (ml)

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

T : Température de l'électrolyte

R : Constante des gaz parfaits

Z : Nombre d'électron requis pour libérer une molécule

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

F : Constante de Faraday

P : Pression atmosphérique

T : Temps correspondant à la production de volume V

I_f : Le courant de fonctionnement d'électrolyseur

d. Calcul du volume d'hydrogène :

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

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{I t RT}{ZFP} = Q * T$$

Tell 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.

e. Rendements :

➤ Rendement d'électrolyseur : Le rendement d'électrolyseur est donné par l'équation suivante:

$$\eta_{el} = \frac{1.23 * S}{V_f}$$

V_f : La tension du point de fonctionnement.

S : Nombre de cellules en série.

➤ Rendement d'adaptation :

$$\eta_u = \frac{I_f * V_f}{I_m * V_m}$$

➤ Rendement de générateur photovoltaïque :

$$\eta_s = \frac{I_f * V_f}{E * \delta}$$

δ : Surface de générateur.

Résultats de simulation :

Après le dimensionnement nous avons exécuté notre organigramme sous MATLAB

Les résultats de simulation pour la journée 04/04/2004 sont présentés dans le tableau suivant:

heure	Heure	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Eclairement	E(w/m ²)	323	426	569	700	787	790	724	636	488	364
température	T(°C)	29	31	33	35	39	41	40	37	37	36
courant max de module	Im(A)	1,572	2,076	2,773	3,412	3,844	3,865	3,543	3,109	2,394	1,706
tension max de module	Vm(v)	15,750	15,570	15,300	14,970	14,530	14,370	14,540	14,900	15,050	15,200
courant cc de cellule PV	Icc(A)	1,663	2,200	2,930	3,608	4,064	4,086	3,746	3,287	2,530	1,803
le courant du pf / de coulage	If(A)	1,662	2,195	2,932	3,607	4,065	4,086	3,746	3,287	2,531	1,803
La tension du pf / de coulage	Vf (v)	1,913	1,956	2,010	2,056	2,086	2,086	2,065	2,035	1,982	1,925
Tension à circuit ouvert	Vco(v)	19,78	19,60	19,32	19,00	18,56	18,39	18,57	18,93	19,08	19,22
puissance max de module	Pm(w)	24.75	32.32	42.42	51.07	55.85	55.54	51.51	46.32	36.02	25.93
	$P_m = I_m * V_m$										
Débit de production d'hydrogène	Q(ml/s)	0,0018	0,0024	0,0033	0,0040	0,0046	0,0047	0,0043	0,0037	0,0028	0,0020
	$Q = (n R I_f T) / Z F P$										
volume d'hydrogène	V(l)	6,555	8,714	11,716	14,508	16,562	16,755	15,312	13,307	10,246	7,276
	$V = (n R T) / P = (I_f t R T) / Z F P = Q * T$										
Rendement d'électrolyseur	η _{el} (%)	64,30	62,88	61,19	59,82	58,96	58,96	59,56	60,44	62,06	63,90
	$\eta_{el} = (1.23 * S) / V_f$										
Rendement d'adaptation/ utilisation	η _u (%)	12,84	13,28	13,89	14,52	15,18	15,35	15,02	14,44	13,92	13,38
	$\eta_u = (I_f * V_f) / (I_m * V_m)$										
Rendement de générateur PV	η _s (%)	21,00	21,50	22,10	22,60	22,99	23,02	22,79	22,44	21,93	20,34
	$\eta_s = (I_f * V_f) / (E * \delta)$										
rendement global maximal	η _m (%)	13,50	13,52	13,52	13,52	13,55	13,57	13,58	13,56	13,61	13,00
	$\eta_m = \eta_s * \eta_{el}$										

Tab IV.4 : Caractéristiques du couplage du GPV et d'électrolyseur

❖ Le rendement d'utilisation (adaptation) :

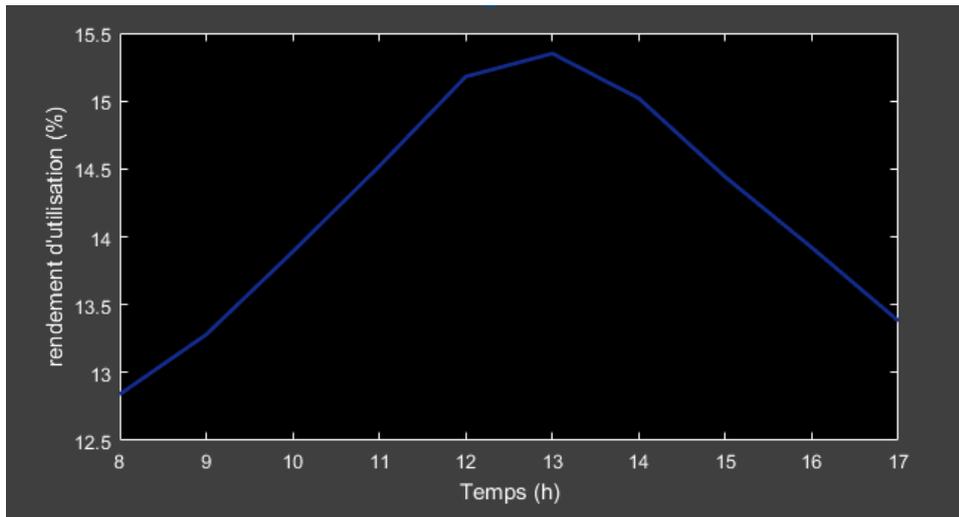


Fig. IV.13 La variation de rendement d'utilisation

D'après la figure III.13 la variation de rendement est passée par deux étapes :

- 1. [8h00 à 13h00]** le rendement d'utilisation augmente jusqu'à 15.3% (790 W/m² 41°C) 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 légère au niveau de courant ce qui signifie une progression de la puissance de couplage vers la puissance maximale du module PV.
- 2. [13h00 à 17h00]** : le rendement d'utilisation diminue jusqu'à environ 13% .

Notons que pour la journée choisie, les variations de l'éclairement et de la température sont données par les courbes suivantes (fig.IV.15) :

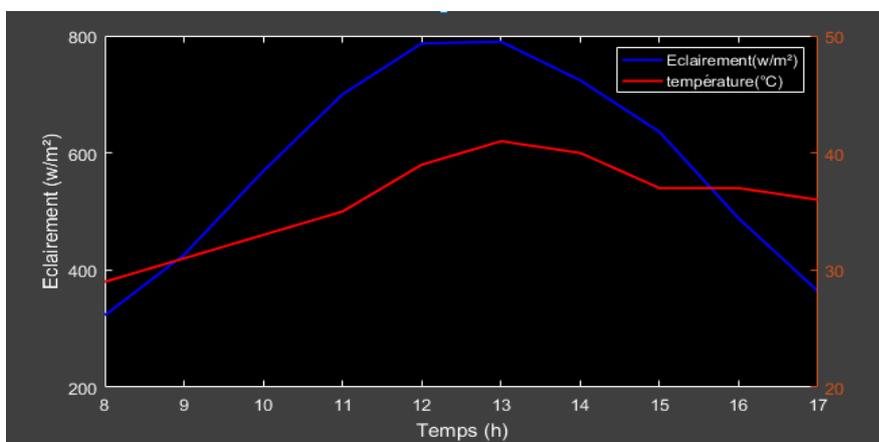


Fig. IV.15 Variation d'éclairement et température en fonction de temps

❖ courant d'électrolyseur :

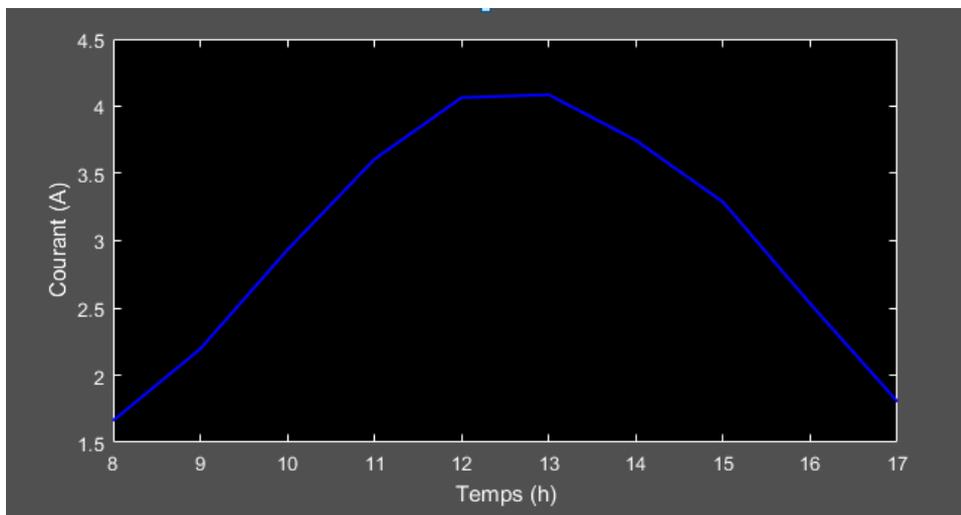


Fig. IV.16 Variation de courant en fonction de temps

❖ Débit d'hydrogène :

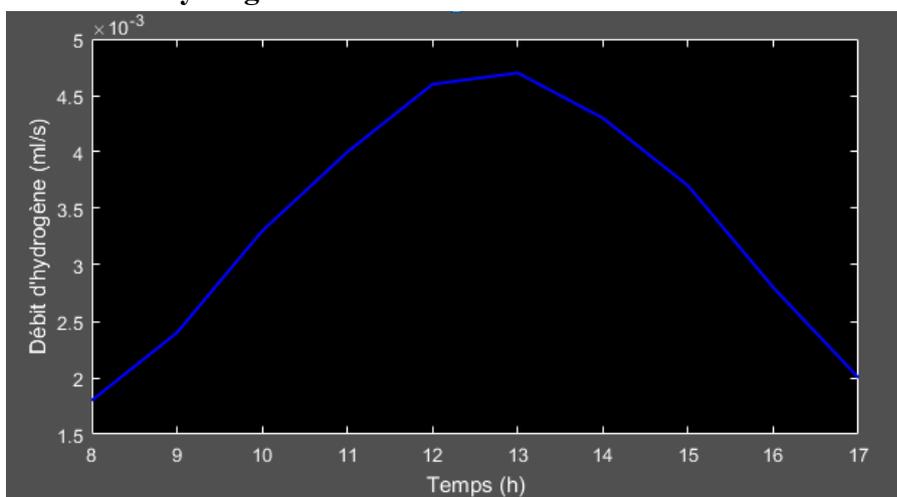


Fig. IV.17 Evolution de débit en fonction de temps

Le débit obtenu est maximal entre 12h et 13h.

❖ La puissance d'électrolyseur :

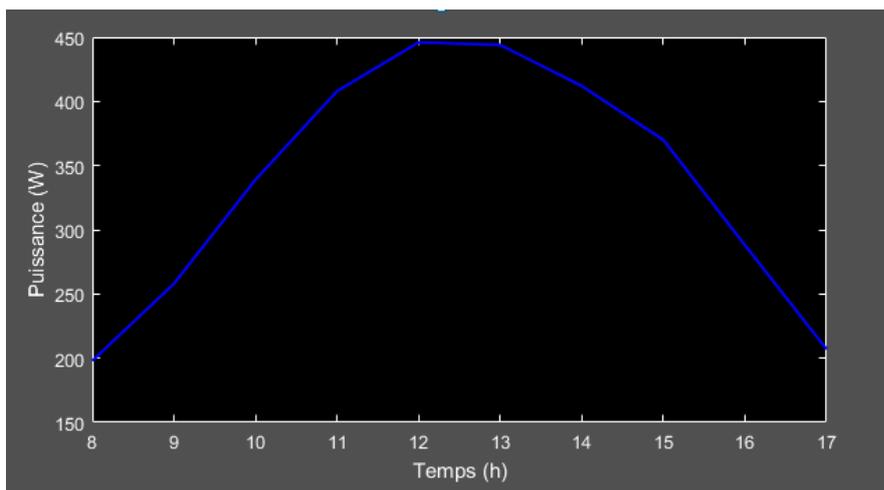


Fig. IV.18 Variation de puissance d'électrolyseur en fonction de temps

❖ **Volume d'hydrogène :**

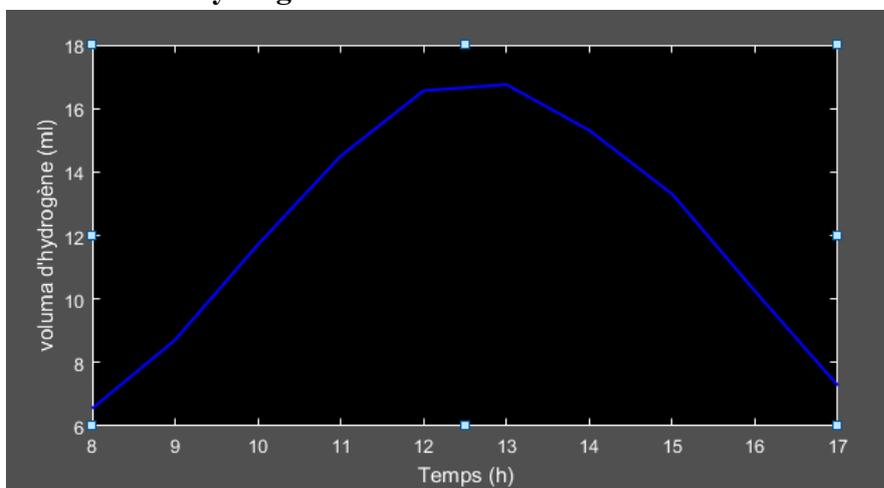


Fig. IV.19. Evolution de volume en fonction de temps

Le volume d'Hydrogène obtenu concorde avec les résultats expérimentaux trouvés dans la littérature. Il passe par sa valeur maximale (16.8 ml) à la mi-journée.

❖ **Rendement de l'électrolyseur :**

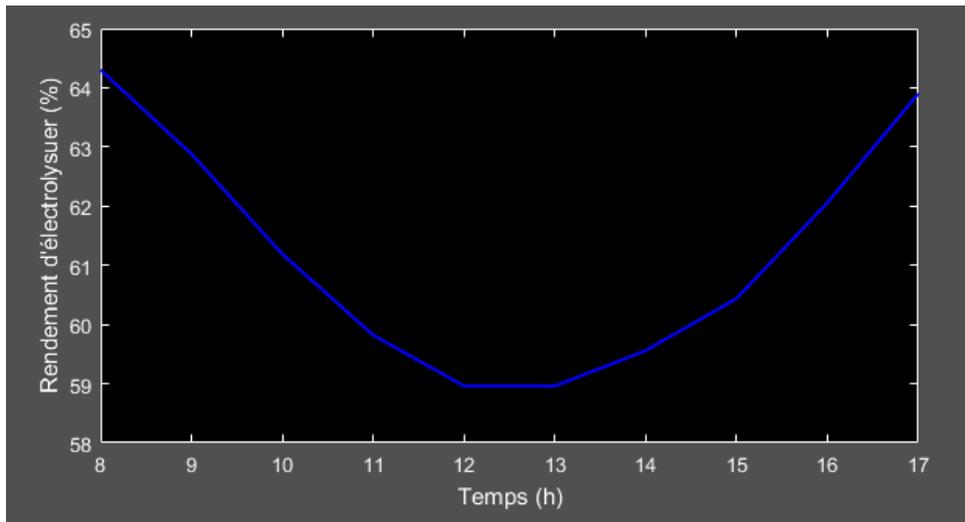


Fig. IV.20 Variation des rendements en fonction de temps

❖ **Rendement d'utilisation :**

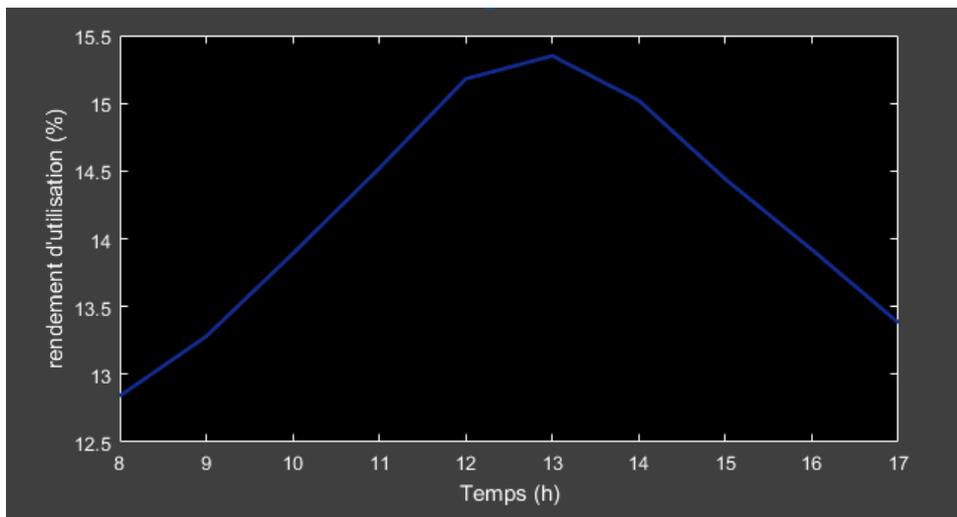


Fig. IV.21. Variation de rendement d'utilisation en fonction de temps

f. Analyse et interprétation des résultats :

Pour diminuer les pertes dues à la non adaptation du système en couplage direct, il fallait redimensionner l'électrolyseur.

Les résultats obtenus montrent que le débit d'hydrogène et son volume sont directement liés au courant et par conséquent à l'éclairement et la température

Le choix judicieux du nombre des cellules séries s et parallèles p d'électrolyseur améliore le résultat d'adaptation de système de telle sorte que les points de fonctionnement de système seront le plus proche possible des points de puissance maximale (MPP) de GPV.

Dans notre cas, l'adaptation n'a été faite que pour un point. Ceci améliore le fonctionnement du système (décalage de la caractéristique de l'électrolyseur vers la droite) mais sans optimiser le couplage. Pour ce faire, il faut changer le dimensionnement de l'électrolyseur chaque heure de la journée. Dans ce cas les points de fonctionnements correspondront à chaque heure aux points de puissance maximale ce qui augmentera le débit et le volume d'hydrogène produits.

Conclusion générale :

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

L'objectif majeur est de produire le maximum d'hydrogène à moindre coût. La presque totalité des travaux effectués sur le sujet montrent que le couplage direct sans intermédiaires (convertisseurs de puissances) est la solution adéquate.

Le but de notre travail est donc d'étudier ce couplage direct par simulation.

Dans les trois premiers chapitres (à caractère bibliographique), nous avons successivement donné :

- un aperçu sur l'hydrogène comme vecteur énergétique du futur (proche)
- un aperçu sur les générateurs photovoltaïques GPV
- un aperçu sur l'électrolyse de l'eau, sur les différents types d'électrolyseurs en mettant un accent sur la technologie PEM.

Dans le dernier chapitre, nous avons simulé la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque en partant d'un modèle à une diode. Dans ce chapitre, nous avons aussi simulé la même caractéristique pour un électrolyseur PEM. Nous avons ensuite, dimensionner l'électrolyseur afin que le point de fonctionnement du système soit le plus près possible du point correspondant au maximum de puissance délivrée par le GPV.

Nous avons pris comme données, celles d'une journée typique sur un site réel, en l'occurrence la ville de Ghardaïa.

Notons que pour trouver le nombre de cellules à mettre en série et/ou en parallèle n_s et n_p , le calcul ne peut se faire que pour un éclairement et une température fixes (c'est à dire pour une heure de la journée). L'idéal serait de changer n_s et n_p continuellement en fonction des données (éclairement et température). Est-ce possible ?

Répondre à cette question, rentre dans le cadre des perspectives possibles de ce travail.

Références :

- [1] S.Boucher, la révolution de l'hydrogène. Edition du Félin, 2006.
- [2] T.N Veziroglou,F.Brbir, International Association of Hydrogen <http://www.ihe.org>
- [3] AFH2. Les données de base physico -chimiques sur l'hydrogène. Mémento de l'hydrogène, fiche 1.2, Avril 2011, 3p.
- [4] S. Sharma et S. K. Ghoshal, << Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications >>, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 43, p. 1151–1158, 2015.
- [5] Th. Alleau, Les piles à combustible, Mémento de l'Hydrogène, FICHE 5.2.1, AFH2,2008.
- [6] thèse Présentée à : faculté des sciences – département de physique Pour l'obtention du diplôme de : doctorat en sciences-Mr M'RAOUI Abdelhamid 18 octobre 2018, à Tlemcen
- [7] S. Faivre *et al.*, << Part 2-Mobypost vehicle's power train design and experimental validation >>, in *International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDFC 2013)*, 2013, p. 8p.
- [8] Mémento de l'Hydrogène « liquéfaction, stockage et transport de l'hydrogene sous forme cryogénique »fiche 4.3 – révision de juillet 2011 source : afh2.
- [9] J.P. Jonchère « production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles » mémento de l'hydrogène 1ère émission : 2001 .
- [10] Mémento de l'Hydrogène « liquéfaction, stockage et transport de l'hydrogene sous forme cryogénique »fiche 4.3 – révision de juillet 2011 source : afh2.
- [11] Etude et Simulation D'un Circuit De Commande D'un Système PV avec Anti Islanding Soutenu le 15 juin 2015
- [12] Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque soutenu publiquement le xx Juin 2017
- [13] Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique page 27 UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [14] Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque:Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo) reçu le 20 Décembre 2016 - accepté le 25 Décembre 2016)
- [15] sylvain brigand installation solaire photovoltaïque EDITIONS LE MONTEUR.
- [16], Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau sur membrane acide PIERRE MILLET Ingénieur de l'École nationale supérieure d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble

[17] Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque Soutenu publiquement Le: 08/06/2014 par KHERIDLA Youcef KHINECHE Kaddour

[18] Julien Labbé. L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés. Sciences de l'ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006. Français. ffNNT : 2006ENMP1434ff. ffpastel-00002332f

[19] Modélisation D'électrolyseur Proton Exchange Membrane (PEM) Présenté par : BEN AMMAR Makhlouf EMBARKI Ala Eddine Soutenu le : 30 septembre 2020

[20] L'hydrogène électrolytique renouvelable KABOUCHE Nourdine, Attaché de Recherche Division Hydrogène Energie Renouvelables E-mail : n.kabouche@cder.dz

(21) Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque>> Présenté par : KHERIDLA Youcef KHINECHE Kaddour, 2014.

Annexes :

PANNEAU		
Caractéristiques générales d'un panneau		
Puissance nominale unitaire panneau	W	90
Module de base	type	SL 45
Nombre de modules par panneau	-	2
Nombre de cellules par panneau	-	36
Température utilisation et stockage	°C	- 10 / + 70
Humidité relative	%	0 à 100
Caractéristiques électriques d'un panneau		
Tension de circuit ouvert - Voc	V	22
Tension à puissance maxi - Vm	V	18
Intensité à puissance typique - Im	A	5
Intensité de court circuit - Isc	A	5,5

Fiche technique panneau photovoltaïque

[Générateurs PV intégrés au bâti BIPV fabricant et assembleur_www.sunland21.com]

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.

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/m ³)	2.02 (7.03)
Suppression 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 stoechiométrique 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)

