

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

جامعة كاسدي مرباح ورقلة



Université Kasdi Merbah Ouargla

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Eélectrotechnique Industrielle

Présenté par :

DOKKAR Riadh

GHERIBI Mohammed yacine

Thème:

**Amélioration des performances d'un système
de production d'hydrogène solaire**

Devant le jury :

M^{me} BENBOUZA Naima

MCB

Président

UKM Ouargla

M^r DJAFOUR Ahmed

Professeur

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r BENMIR Abdelkader

MCB

Examineur

UKM Ouargla

M^{me} RAMDANI Madjeda

Doctorant

Co-encadreur

UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents Fatiha et Boubaker pour leur sacrifices, sans lesquels je ne serais jamais arrivée là où j'en suis. A mes chères sœurs Nouha et Mariem et Aya et mes chers frères Tarek et Farès et Wail. A toute ma famille pour leur soutien et leur encouragement.

Je dédie ce modeste travail à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Que ce travail soit pour vous le gage de notre profond amour, A tous nos amis, A tous ceux que nous aimons.

Riadh

Dédicace

A mon très cher père Musa et à ma chère mère Fatima pour leur sacrifice, qui ne cesse de m'encourager afin que Dieu me les garde mes sœurs, mes amis et tous ceux qui m'ont soutenu et m'ont aidé dans tout ce qu'ils avaient et de tant de façons. Je vous présente cette recherche et j'espère que vous serez satisfait de moi

Yassine

Remerciement

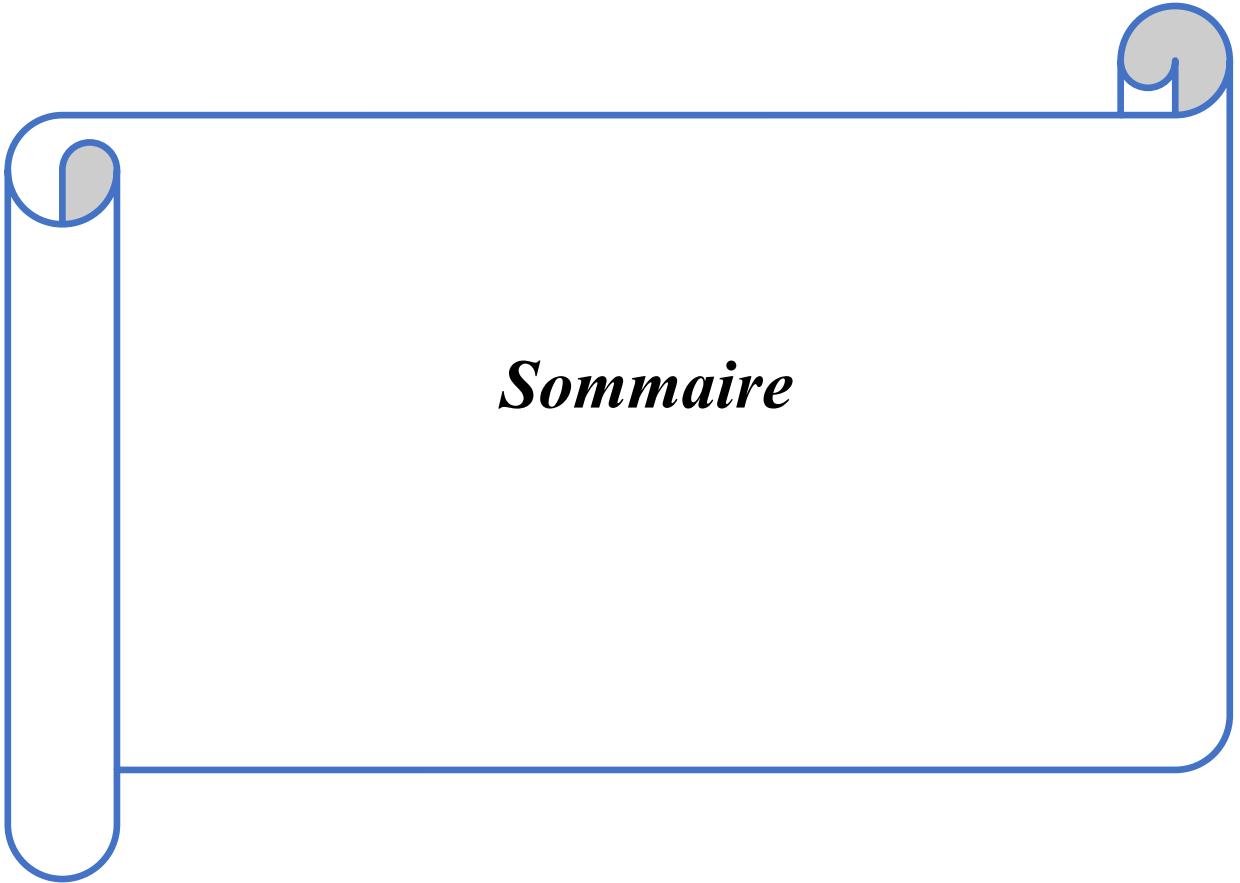
Avant tout nous tenons à remercier ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage de finir le mémoire.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur le Professeur **DJAFOUR Ahmed** qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.

Nous voudrions remercier spécialement notre co-encadrante Mme **Ramdani Madjeda** chercheuse à l'Université de Ouargla, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité et sa qualité humaine.

Et tous les professeurs de département de Génie électrique.

Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.



Sommaire

Sommaire

Dédicace.....	I
Remerciement	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures	IV
Introduction générale.....	V

Chapitre I : Système PV Et Son Environnement

I.1 Introduction.....	2
I.2 Soleil et gisement solaire	2
I.3 Rayonnement solaire.....	3
I. 4 Panneau photovoltaïque	5
I.5 Principe de fonctionnement	6
I.6 Différents technologies de cellules photovoltaïques	7
I.7 Modélisation de panneau solaire	8
I.7.1 Modèle idéal	8
I.7.2 Modèle réel à une diode	9
I.7.3 Modèle réel à une diode	10
I.8 Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un module photovoltaïque.....	11
I.9 Les caractéristiques courant– tension (I-V)	12
I.10 Paramètres de fonctionnement d'une cellule PV	13
I.10.2 La puissance maximale	13
I.10.3 Le rendement η	13
I.10.4 La réponse spectrale de la cellule PV.....	14
I.10.5 Le facteur de forme	14
I.11 L'influence des paramètres extérieurs	15
I.11.1 Paramètres climatiques	15
I.12 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V	15
I.13 Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V	17
I.14 Conclusion	18

Chapitre II : Technologies d'Hydrogène

II.1 Introduction	20
II.2 Généralités sur l'hydrogène.....	20
II.3 Méthodes de production d'hydrogène	21
II.4 Les avantages et les inconvénients	22

II.5 Les applications d'hydrogène :	23
II.6 Stockage de l'hydrogène	23
II.7 Avantages et Inconvénients de chaque mode de stockage d'hydrogène.....	25
II.8 Définition d'électrolyseur.....	25
II.9 Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau.....	26
II.10 Principe de fonctionnement	26
II.11 Technologies des électrolyseurs d'eau.....	27
II.12 Conclusion.....	29

Chapitre III : Analyse Et Expérimentation

III.1 Introduction.....	32
III.2 Description de système.....	32
III.3 Panneaux solaires.....	33
III.4 L'unité de gestion de l'alimentation PMU :.....	36
III.5 Electrolyseurs PEM.....	36
III.6 Expérimentation de système de production d'hydrogène	36
III.7 Améliore de volume d'hydrogène produit.....	40
III.6 Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	42
Références	44
Résumé.....	48

Liste des figures

Figure I.1 : Coupe schématique du Soleil	4
Figure I.2 : composants du rayonnement solaire	5
Figure I.3 : panneau photovoltaïque	7
Figure I.4 : Principe de conversion photovoltaïque	8
Figure I.5 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal	10
Figure I.6 : Circuit équivalent d'une cellule PV Modèle une diode	11
Figure I.7: Circuit équivalent d'une module PV avec $R_{sh} = \infty$	12
Figure I.8: Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un module photovoltaïque.....	13
Figure I.9: Caractéristiques électrique courant– tension I-V.....	14
Figure I.10 : Facteur de forme pour une cellule PV	16
Figure I.11 : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25C^{\circ}$ pour un panneau (150w)	17
Figure I.12 : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25C^{\circ}$ pour un panneau (150w)	17
Figure I.13: Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V	18
Figure I.14: La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température avec $G=1000$	19
Figure II.1 : Liaisons hydrogène dans l' eau	22
Figure II.2 : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde.....	22
Figure II. 3 Méthodes de production d'hydrogène	23

Figure II. 4 Schéma de principe de l'électrolyse	27
Figure II.5: Electrolyseur Alcalin	28
Figure II.6 : Principe schématique de l' l'électrolyse PEM.....	29
Figure III.1: Système de production d'hydrogène solaire	33
Figure III. 2 : Organigramme de la méthode des essais particuliers (PSO)	33
Figure III. 3: Le prototype de configuration expérimentale	34
Figure III. 4 : Caractéristique I-V expérimentale et simulé de module PV	35
Figure III. 5 : Caractéristique P-V expérimentale et simulé de module PV	36
Figure III.6 : Irradiation solaire en fonction du temps	37
Figure III.7 : Courant du module en fonction du temps	38
Figure III.8: La température ambiante et la module PV en fonction du temps	38
Figure III.9: Puissance et panneau solaires et de la charge en fonction du temps.....	39
Figure III.10 : tension de batteries en fonction du temps	39
Figure III.11 : Courant de batteries en fonction du temps	40
Figure III.12 : puissance de batteries en fonction du temps	40
Figure III.13: Puissance de convertisseur en fonction du temps	41
Figure III.14: la débit d'hydrogène en fonction du temps.....	42
Figure III.15: Volume de l'hydrogène en fonction du temps.....	42

Figure III.16 : Rayonnement solaire à un angle de 0° et optimal 17° en fonction du temps.....44

Figure III.17: Comparaison la quantité d'énergie en fonction du temps.....44

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques principal du soleil	3
Tableau II.1: Avantages et inconvénients de chaque mode de stockage d'hydrogène	25
Tableau III. 1: Les cinq paramètres du module photovoltaïque à l'aide de la méthode PSO	35
Tableau III.2 : Les angles optimaux mensuels pour une surface orientée vers le sud.....	43



Introduction Générale

En réponse à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission de gaz à effet de serre, des sources d'énergie alternatives ont été imaginées et doivent continuer à être utilisées. L'énergie renouvelable est une énergie qui utilise des éléments naturels qui se reconstituent plus rapidement qu'ils ne sont consommés. Ainsi, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie éolienne sont des énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement. Les énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement semblent être l'une des meilleures alternatives aux énergies fossiles. Alors qu'il existe déjà de nombreuses applications. Les efforts de recherche ont été intensifiés afin que l'énergie future soit aussi respectueuse de l'environnement et verte que possible.

L'extraction des ressources renouvelables est florissante dans les pays riches comme dans les pays en développement. L'Algérie, un grand pays avec un climat diversifié et deux régions géographiques distinctes, le nord de la Méditerranée et le sud du Sahara, pourrait être un concurrent sérieux dans la compétition pour utiliser les énergies renouvelables.

La conversion photovoltaïque du rayonnement solaire en électricité est une méthode d'utilisation des ressources solaires. Il est dérivé de cellules solaires. Le système qui couple le champ photoélectrique à l'électrolyseur permet le stockage de l'électricité sous forme de gaz hydrogène.

L'hydrogène est une alternative viable aux combustibles fossiles en raison de ses propriétés physico-chimiques et thermiques supérieures, qui en font un combustible universel. Ce vecteur énergétique est le seul qui puisse être produit à partir d'eau et d'une variété de sources d'énergie renouvelables, puis utilisé sans dommage pour l'environnement.

L'objectif de notre mémoire est d'améliorer la compréhension des nouvelles technologies de production et de stockage des énergies renouvelables. Cette recherche vise à faire avancer les efforts futurs dans ce domaine.

Dans cette recherche, nous simulons le système photovoltaïque dans le but d'améliorer la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. A partir des données climatiques de la région de Ouargla, des panneaux photovoltaïques sont utilisés pour produire de l'électricité.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre fournit des informations générales sur les systèmes photovoltaïques et traite de leur environnement, de leurs caractéristiques et de leur modèle.
- Dans le deuxième chapitre, nous introduisons l'hydrogène en général, ses propriétés et ses méthodes de production, en particulier la production d'hydrogène par électrolyseur.
- Enfin le troisième chapitre est consacré à la technologie de production d'hydrogène solaire, simulation et démonstration et Interpréter les résultats obtenus après étude des performances de ce système.



Chapitre I

Systeme PV Et Son Environnement

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont la reconfiguration est suffisamment rapide pour être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'énergie solaire est un type d'énergie renouvelable car c'est l'énergie qui provient du soleil et est considérée comme l'une des sources d'énergie les plus importantes dans notre vie quotidienne. Dans ce chapitre, nous parlerons du système de rayonnement solaire en plus du principe de ce système en identifiant ses propriétés électriques à partir de la modélisation photovoltaïque.

I.2 Soleil et gisement solaire

- **Le soleil**

Le soleil est une étoile formée de gaz extrêmement chauds, il est constitué de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et 2% d'autres molécules. Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergies selon la formule d'Einstein ($E=mc^2$). Cette réaction maintient la surface du soleil à une température approximative de 5800 °K. L'énergie du soleil est transformée sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a parcouru 150 millions de kilomètres du soleil vers la terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m². Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire. En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil (1,2.1017 W) pour combler ses besoins pour presque une année [1] [2].

- **Gisement solaire**

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [3]. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances.

L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

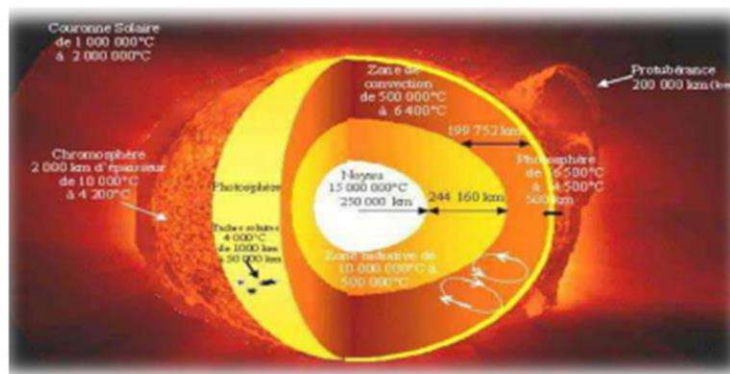


Figure I.1 : Coupe schématique du Soleil

- Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous [4]

Tableau I.1 : Caractéristiques principales du soleil

Caractéristique	Valeur
Masse	$1.989.10^3 \text{Kg}$
Diamètre	$1.392.10^9 \text{m}$
Masse volumique moyenne	1410Kg/m^3
Puissance rayonnée	$3.83.10^{26} \text{W}$
Température superficielle	5770°K
Vitesse de déplacement	216Kms^{-1}

I.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une propagation d'ondes de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10^{-6} [m]. Il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité. Il existe plusieurs types de rayonnement [5] :

- **Le rayonnement direct**

Le rayonnement direct est un rayonnement qui est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux et peuvent être mesurés par un pyromètre.

- **Le rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus est constitué d'une lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa diffusion engendre un phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

- **Le rayonnement réfléchi**

Le rayonnement réfléchi ou « l'albédo » du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement réfléchi peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

- **Le rayonnement global**

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un « Solari mètre » sans écran. Ainsi :

Le rayonnement global = Le rayonnement direct + Le rayonnement diffus + Le rayonnement réfléchi.

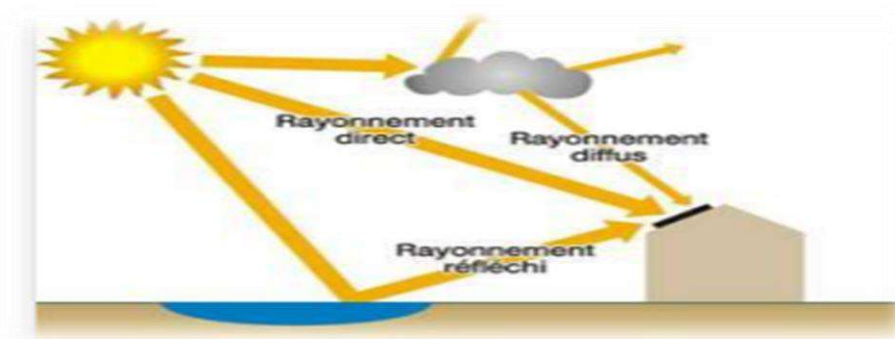


Figure I.2 : composants du rayonnement solaire

I. 4 Panneau photovoltaïque

Un panneau solaire ou (champ solaire) est constitué de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces unités sont installées sur une ossature métallique qui permet et supporte le champ solaire selon un angle d'inclinaison spécifique.

Pour chaque panneau, vous pouvez avoir autant de sorties que de modules, ce qui signifie que vous aurez besoin d'une boîte de jonction qui les rassemble. Cette boîte de jonction montée sur la structure d'assemblage a alors pour rôle de réaliser les connexions entre les modules pour obtenir une puissance de sortie optimale [6]. La cellule photovoltaïque ou cellule solaire est le plus petit composant d'une installation photovoltaïque. Il est composé de matériaux semi-conducteurs et convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de :

- Une fine couche de semi-conducteur (un matériau à bande interdite, qui agit comme une barrière énergétique que les électrons ne peuvent pas franchir sans excitation externe, et dont les propriétés électroniques peuvent varier) comme le silicium, qui est un matériau à relativement bonne conductivité électrique,
- Une couche antireflet permettant une pénétration maximale de la lumière solaire, une grille conductrice en haut ou cathode et un métal conducteur en bas ou anode,
- Les plus récents ont également un nouvel ensemble de couches multi-réfléchissantes sous le semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps pour des performances améliorées.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [7].



Figure I.3 : panneau photovoltaïque

I.5 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction.

Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron-trou ». Les électrons (charges négative) et les trous (charges positive), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant ainsi naissance à une différence de potentiel et un courant électrique qui circule (voir figure I.4) [8].

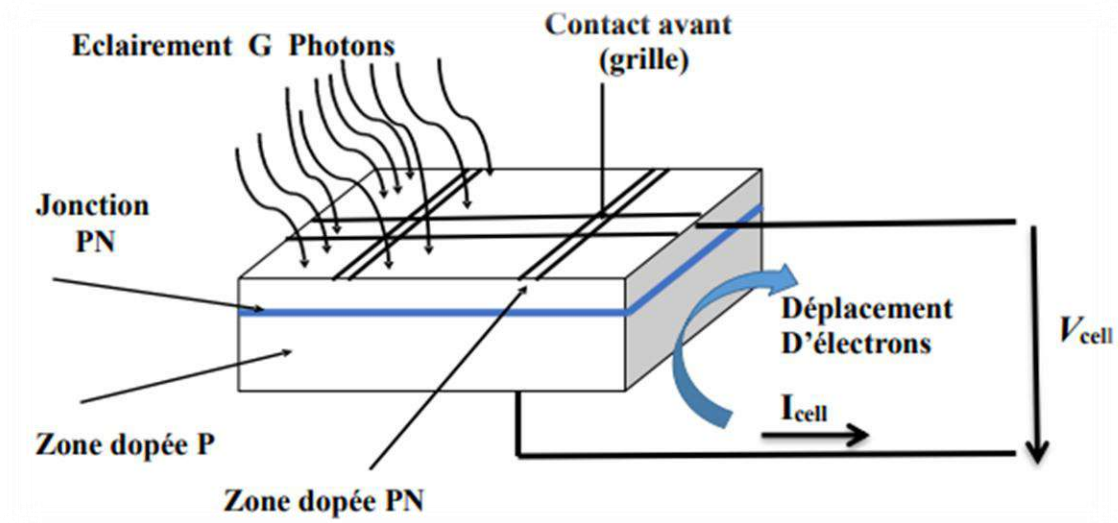


Figure I.4 : Principe de conversion photovoltaïque

I.6 Différents technologies de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux semi-conducteurs. Le matériau semi-conducteur utilisé presque universellement aujourd'hui est le silicium, cela est principalement dû à sa disponibilité illimitée sur terre. C'est un matériau extrêmement abondant, non toxique et stable, il y a plusieurs technologies distinctes de la part de la nature du silicium employé et sa méthode de fabrication. Il existe différentes technologies de cellules solaires. Chaque technologie est caractérisée par un rendement et un coût qui lui sont propres. Actuellement, il existe trois principales technologies de cellules, à savoir [9]

- **Les cellules au silicium monocristallin**

Ces cellules offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m^2 pour obtenir 1 kilowatt-crête (kWc).

- **Les cellules au silicium poly cristallin (ou multi cristallin)**

Ces cellules ont en général un rendement compris entre 12 et 14%. Il faut environ 8m^2 de cellules pour obtenir 1 kWc. Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin. Les cellules poly cristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu.

- **Les cellules au silicium amorphe**

Ces cellules sont à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou poly cristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium.

Cette technologie de cellule est donc moins chère et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet de les utiliser pour créer des panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15 m² pour obtenir 1KWc) et sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance. Les cellules au silicium amorphes sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice, ...) [10].

I.7 Modélisation de panneau solaire

La modélisation des modules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, 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 :

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

I.7.1 Modèle idéal

La réflexion précédente nous permet d'aboutir au modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source de courant produit le photon courant ***I_{ph}*** qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire G. [11]

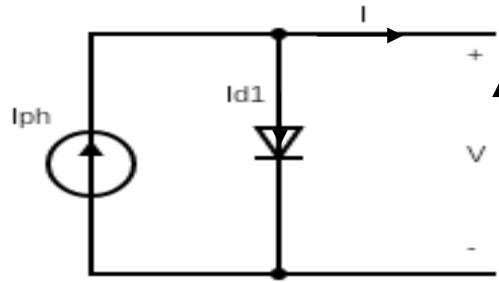


Figure I.5 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal.

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit :

$$I_{d1} = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (I.1)$$

Où

V_d : Différence du potentiel électrique entre les deux extrémités de la diode.

I_s : Courant de saturation inverse de la diode.

n : Facteur d'idéalité de la diode.

V_t : Tension thermique en fonction de la température.

$$V_t = \frac{K.T}{q} \quad (I.2)$$

K : la constante de Boltzmann ($1.3806503 * 10^{-23}$ J /K).

q : la charge d'électrons ($1,602176 * 10^{-19}$ C)

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{d1}}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (I.3)$$

I.7.2 Modèle réel à une diode

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data Sheet).il est aussi considéré satisfaisant et même une

référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. [12]

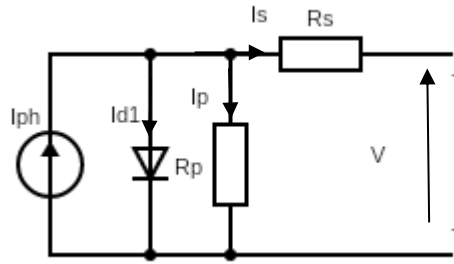


Figure I.6 : Circuit équivalent d'une cellule PV Modèle une diode

I et V sont respectivement le courant et la tension de sortie de la cellule. En appliquant la loi du courant de Kirchhoff, on obtient le courant de sortie de la cellule :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_p \quad (I.4)$$

À partir de (I.4)

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

Avec :

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température.

I_s : courant de saturation inverse de la diode.

n : facteur d'idéalité de la diode.

I.7.3 Modèle réel à une diode

Modèle réel à une diode pour les modules dépourvus de fuite R_{sh} infini, ($R_{sh} = \infty$) on peut représenter le module par le schéma suivant :

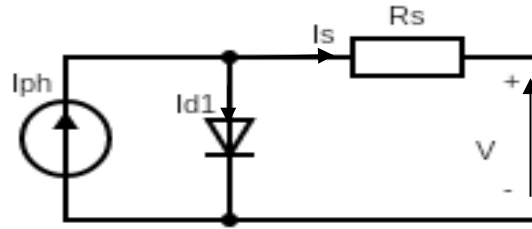


Figure I.7: Circuit équivalent d'une module PV avec $R_{sh} = \infty$.

L'équation courant- tension est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_t}} - 1 \right) \quad (I.6)$$

I.8 Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un module photovoltaïque

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre le module. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [13] :

- Sa tension à vide : V_{CO} . Cette valeur représenterait la tension générée par un module ~~qui~~ non raccordé.
- Courant court-circuit : I_{CC} cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal : M_{pp} (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

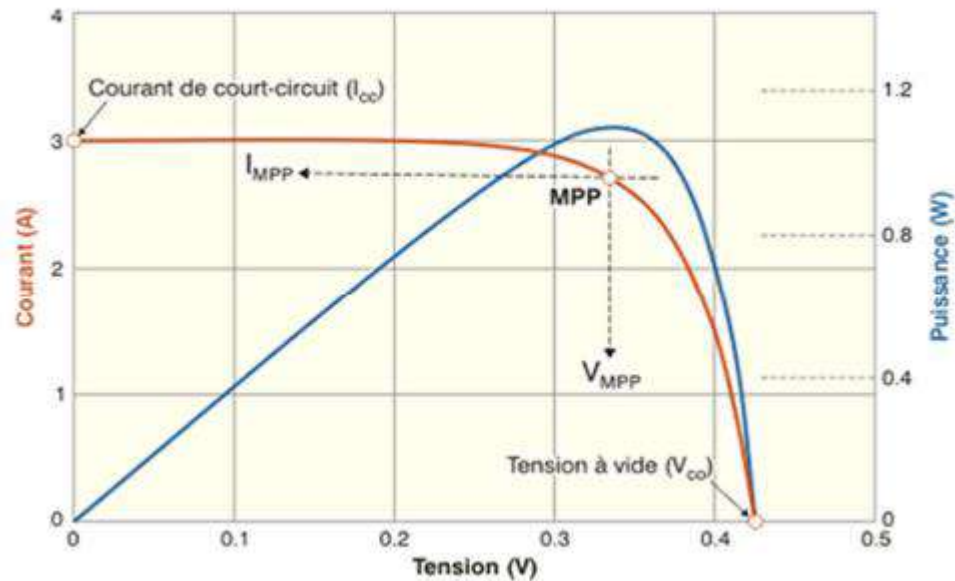


Figure I.8: Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un module photovoltaïque.

I.9 Les caractéristiques courant– tension (I-V)

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre [14].

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous :

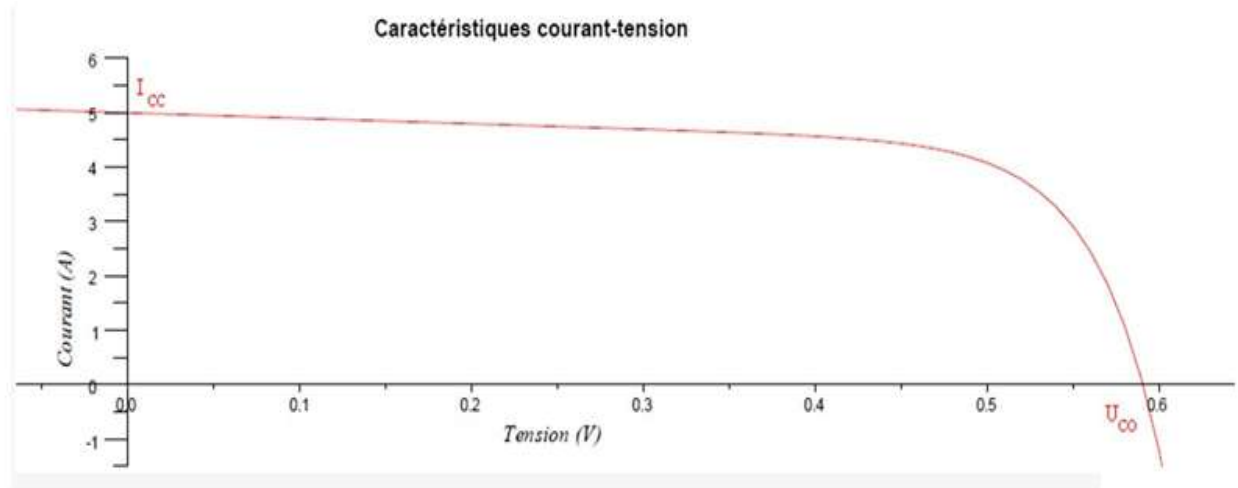


Figure I.9: Caractéristiques électrique courant– tension I-V.

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque.

I.10 Paramètres de fonctionnement d'une cellule PV

I.10.1 Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit. Le courant de court-circuit est très proche du photo-courant I_{pv} .

I.10.2 La puissance maximale P_{max}

La puissance maximale **Pmax** délivrée par une cellule photovoltaïque correspond au maximum du produit de la tension maximale appliquée par le courant maximale mesuré aux bornes de la cellule.

La puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000 W/m^2 et à la température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$

I.10.3 Le rendement η

Le rendement énergétique η d'une cellule est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale générée **Pmax** et la puissance du rayonnement solaire, qui arrive sur la cellule

photovoltaïque [15].

$$\eta = \frac{P_{max}}{E.S} \quad (I.7)$$

Où

η : Rendement énergétique.

E : Éclairement (W/m^2).

S : Surface active de la cellule (m^2).

P_{max} : Puissance maximale(W).

I.10.4 La réponse spectrale de la cellule PV

La réponse spectrale est l'une des méthodes de caractérisation utilisée pour la détermination des paramètres du dispositif durant l'étape recherche et développement et durant la production des cellules solaires. La distribution spectrale du courant est sensible à la variation des Spectres solaires.

I.10.5 Le facteur de forme

Il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$ comme le montre la figure (I.10). Ce facteur est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}.V_{co}} \quad (I.8)$$

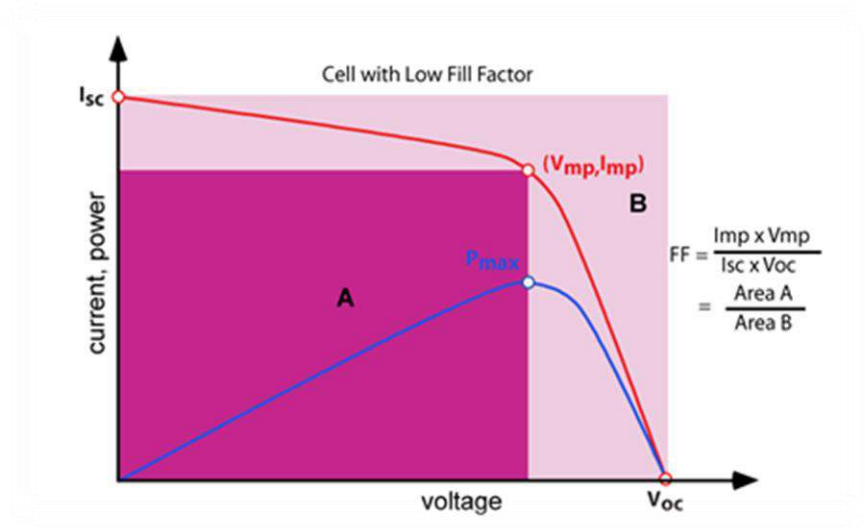


Figure I.10 : Facteur de forme pour une cellule PV.

I.11 L'influence des paramètres extérieurs

I.11.1 Paramètres climatiques

- **Effet d'humidité**

Au brouillard, à la rosée ou simplement à l'air ambiant, l'humidité est facteur de stress déterminant dans les mécanismes de corrosion et de délamination. Ainsi la présence d'eau dans les boîtes de jonctions des modules PV classiques peut entraîner des court-circuits.

- **Effet poussière**

La poussière est une poudre très fine composée de particules de diamètre inférieur à 500 µm et qui varie d'une localité à une autre en fonction de la nature du sol et de l'activité humaine. On distingue les poussières artificielles et les poussières naturelles. Les poussières artificielles sont d'origines non atmosphériques causées par l'activité de l'être humain tels que la construction des routes, la circulation des véhicules et les poussières naturelles sont d'origine atmosphériques et liées au climat. Les expériences ont montré que, la poussière a un effet négatif sur la puissance maximale et le courant de court-circuit de module photovoltaïque.

I.12 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

Les figures (I.11) et (I.12) présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de

rayonnement :

- Pour la figure (I.11) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=4.8\text{A}$ et pour $G=800\text{w/m}^2$ le courant $I_{sc}=3.84\text{A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant augmente, mais par contre la tension varie légèrement. Nous avons fixé la température pour différents éclairements.

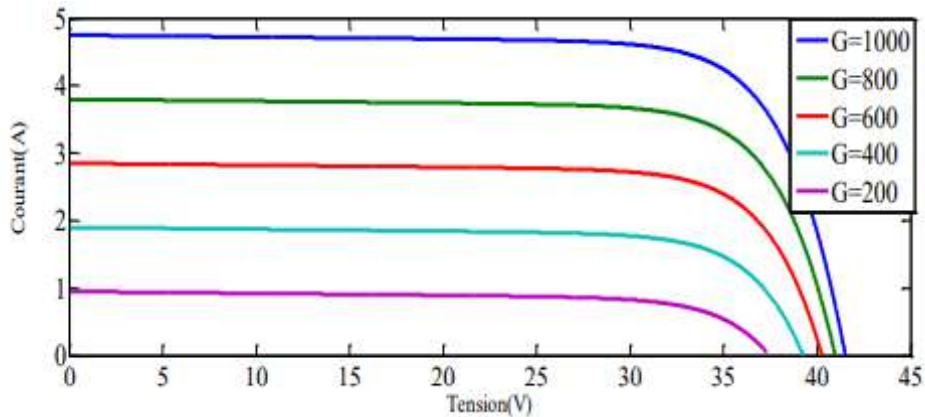


Figure I.11 : La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25\text{C}^\circ$ pour un panneau (150w).

- Pour la figure (I.12) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ la puissance $P=149.8\text{W}$ et pour $G=800\text{w/m}^2$ la puissance $P=122.3\text{W}$ on peut voir que la puissance subit une variation importante, quand l'éclairement augmente la puissance augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

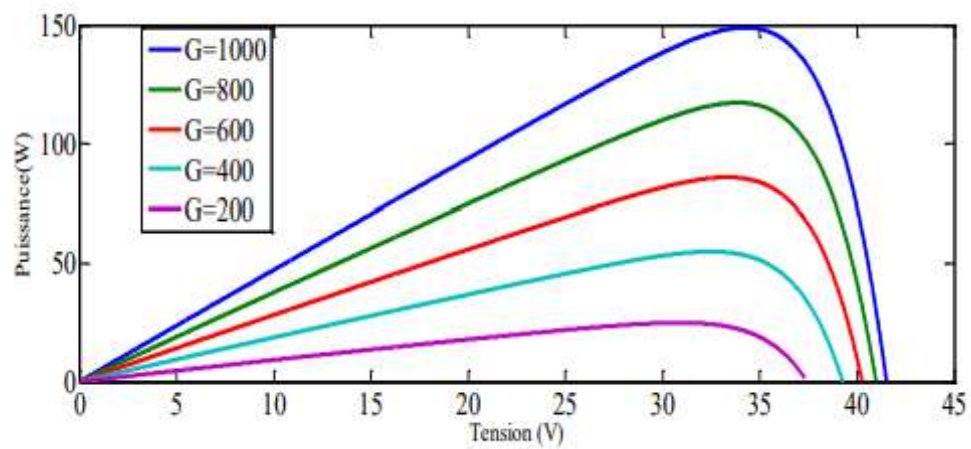


Figure I.12 : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement avec $T=25C^{\circ}$ pour un panneau (150w)

I.13 Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V figure (I.13) et (I.14) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

- Pour les figures (I.13) et (I.14) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la Température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente [16].

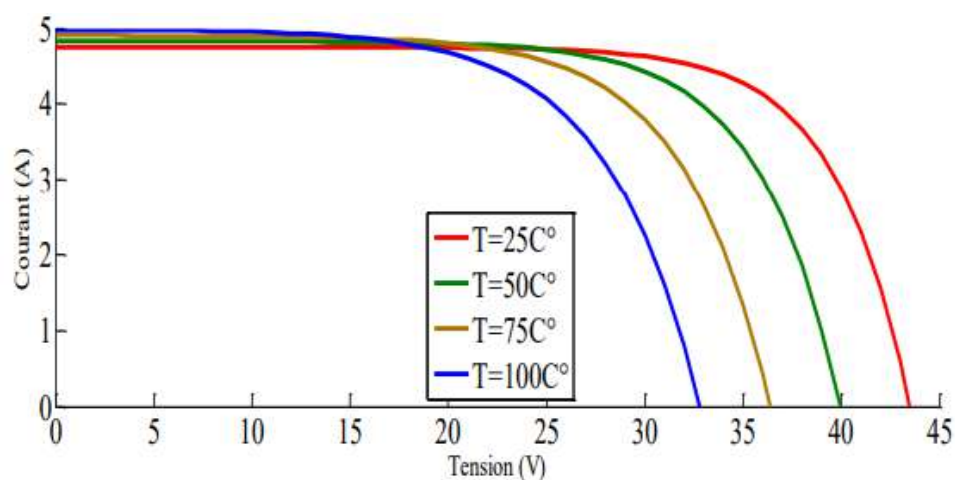


Figure I.13: Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V.

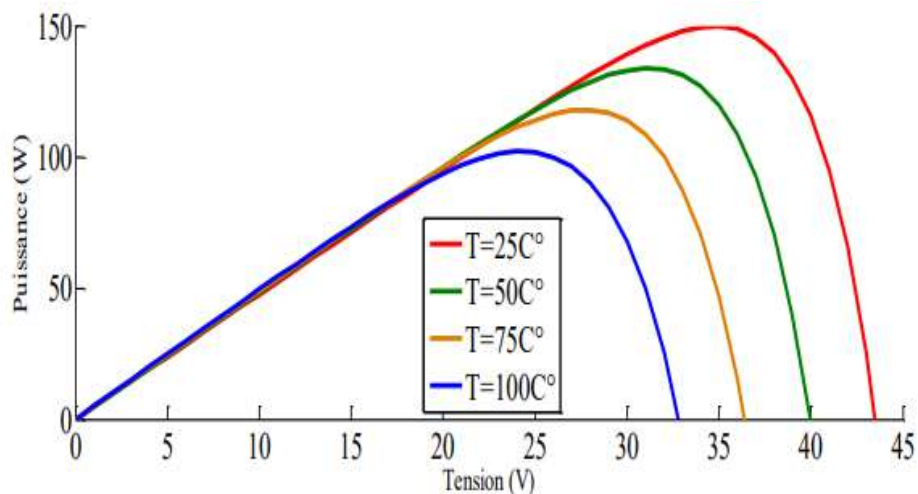


Figure I.14: La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température avec $G=1000$.

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques concepts de base du champ photoélectrique. Ensuite, nous avons expliqué leurs principales caractéristiques ainsi que les paramètres de la cellule solaire et fourni une modélisation de la cellule photovoltaïque en formulant la relation non linéaire entre le courant et la tension (I-V) pour déterminer le module unitaire. Dans le chapitre suivant, nous discuterons de l'aspect technologique de la production d'hydrogène solaire.



Chapitre II

Technologies d'Hydrogène

II.1 Introduction

L'hydrogène durable représente une solution complémentaire à la production et au stockage des énergies renouvelables. Il peut être une alternative énergétique plus appropriée d'un point de vue économique et environnemental. Dans ce chapitre, nous donnerons des informations générales sur l'hydrogène en termes de modes de production en évoquant les différentes techniques de production de ce gaz (électrolyse de l'eau), son stockage, et certaines de ses utilisations, ainsi que certains de ses avantages et inconvénients.

II.2 Généralités sur l'hydrogène

Hydrogène (du grec « qui produit de l'eau »), élément de symbole 'H', incolore, inodore et insipide, de numéro atomique '1'. On confondait l'hydrogène avec d'autres gaz, jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontra en 1766 que l'hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Le chimiste montra plus tard que l'hydrogène était une substance indépendante, qui se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau (voir Figure I.1). En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma hydrogène, comme la plupart des éléments gazeux, l'hydrogène est diatomique (ses molécules sont constituées de deux atomes). Aux températures élevées, il se décompose en atomes libres. L'hydrogène a les plus bas points d'ébullition et de fusion de tous les éléments hormis l'hélium : l'hydrogène fond à $-259,2^{\circ}\text{C}$ et bout à $-252,77^{\circ}\text{C}$. À 0°C et sous une pression de 1 ATM l'hydrogène est un gaz de densité 0,089. Sa masse atomique est de 1,007. L'hydrogène liquide fut obtenu pour la première fois, en 1898, par le chimiste britannique sir James Dewar. Il est incolore (bleu clair en couches épaisses), avec une densité de 0,070. Évaporé sous pression réduite à grande vitesse, il se transforme en un solide incolore.

On trouve l'hydrogène libre uniquement à l'état de traces infimes dans l'atmosphère. Cependant, les spectres solaire et stellaire montrent que le gaz est abondant dans le soleil et dans les autres étoiles. C'est en fait l'élément le plus répandu dans l'Univers. L'hydrogène combiné avec d'autres éléments est largement répandu sur Terre, où le composé de l'hydrogène le plus important et le plus abondant est l'eau H_2O . Tous les constituants de la matière vivante, comme de nombreux minéraux, contiennent de l'hydrogène. C'est un constituant essentiel des hydrocarbures et d'une

Large variété d'autres composés organiques. Tout acide contient de l'hydrogène ; on différencie les acides par leur facilité à libérer des ions hydrogène en solution [17-18].

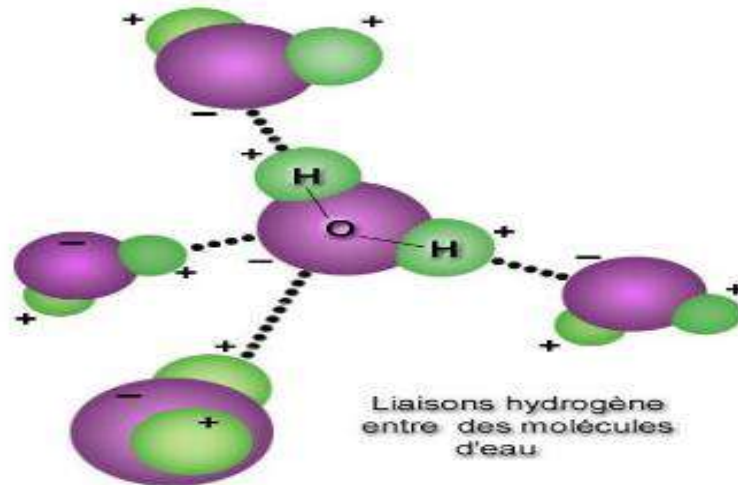


Figure II.1 : Liaisons hydrogène dans l'eau

II.3 Méthodes de production d'hydrogène

Les principales approches utilisées dans l'industrie pour produire l'hydrogène sont résumées sur la Figure (II.2).

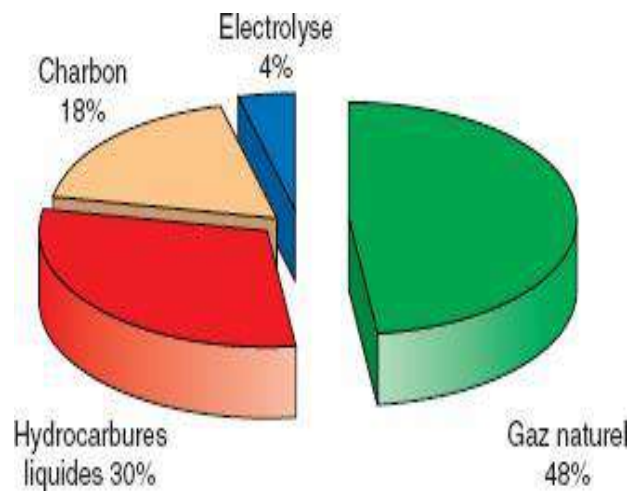


Figure II.2 : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde

Les processus prédominants dans ce contexte sont celles basées sur les combustibles fossiles. Environ 98 % de l'hydrogène provient des combustibles fossiles. Globalement, 40 % de l'hydrogène est produit à partir du gaz naturel ou du reformage à la vapeur d'hydrocarbures, 30% à partir du pétrole, 18 % à partir du charbon et 4 % partir d'électrolyse de l'eau (des sources renouvelables) [19].

- Méthodes de production d'hydrogène

Il existe de nombreuses technologies conçues pour produire de l'hydrogène. Certaines de ces méthodes ont atteint la maturité de la production commerciale, tandis que d'autres sont encore à grande échelle expérimentale.

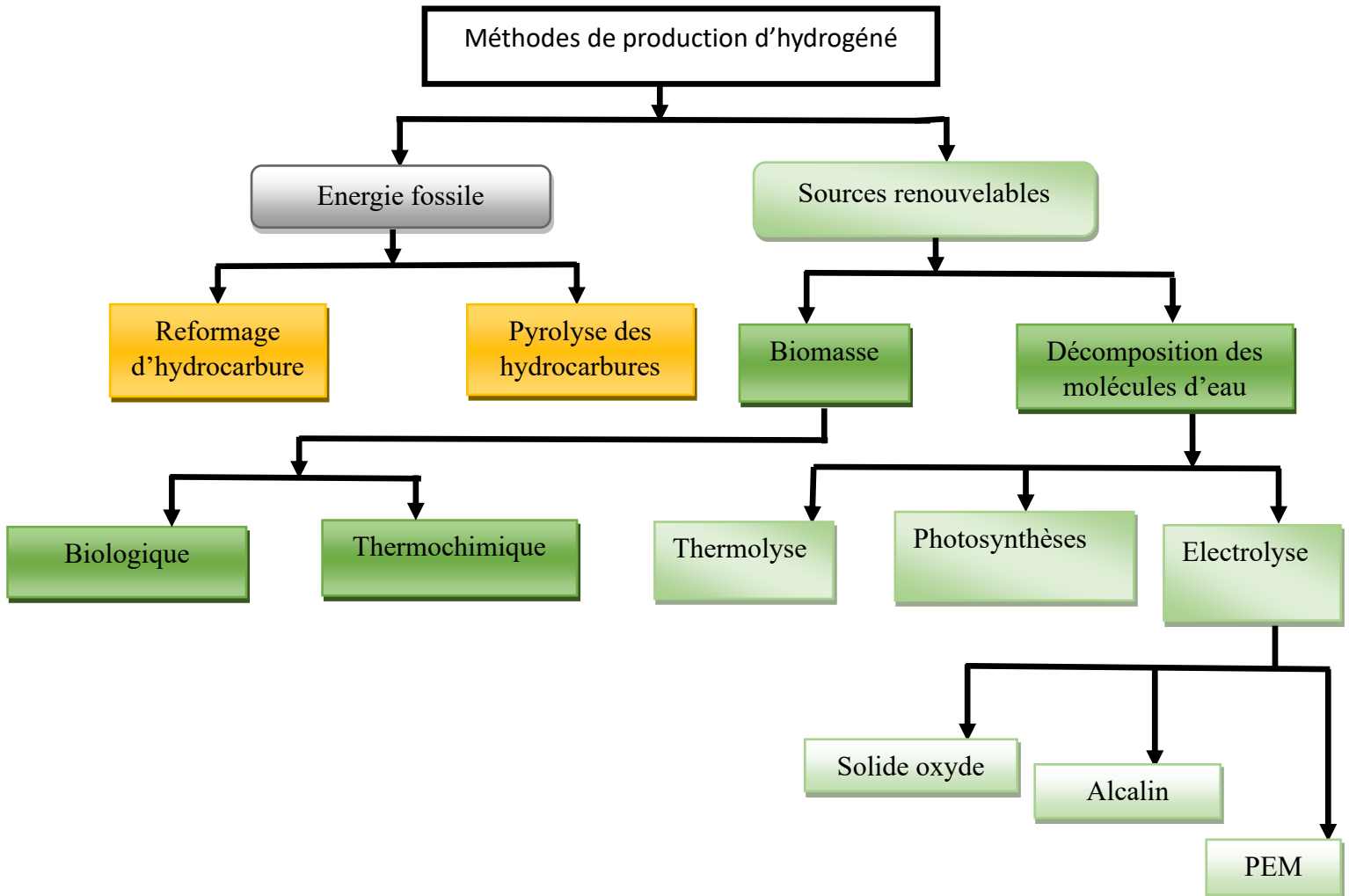


Figure II. 3 Méthodes de production d'hydrogène [20]

Bien que le pourcentage de production d'hydrogène par la technique d'électrolyse de l'eau soit encore faible, cette technologie, est envisagée comme le meilleur outil de production d'hydrogène de l'avenir.

II.4 Les avantages et les inconvénients [21] :

- En effet, les avantages de l'hydrogène sont nombreux :
- ✓ C'est un atome très abondant sur Terre (sous forme d'eau).
- ✓ C'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel.
- ✓ Il n'est ni polluant, ni toxique.

- ✓ Sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau.
- ✓ C'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air).
- ✓ Son transport est aisé (en particulier par pipes).
- ✓ Ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à combustible (le moyen le plus efficace pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique).
- Il convient aussi de mentionner ses inconvénients :
 - × Sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple).
 - × Ses limites d'inflammabilité et de détonation avec de l'air sont plus larges que pour le gaz naturel (d'un facteur 5 environ), mais, de fait, seule compte la limite inférieure : 4% en volume dans l'air au lieu de 5,3% pour la limite inférieure d'inflammabilité et 13% au lieu de 6,3% en limite inférieure de détonation. En dehors d'une situation dite « confinée » (c'est-à-dire emprisonné avec de l'air dans un volume fermé), l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. En situation confinée, l'énergie explosive théorique par m³ de gaz est 3,5 fois plus faible pour l'hydrogène et la surpression de détonation légèrement plus faible (14,7 bars contre 16,8).
 - × L'énergie minimale à fournir pour l'enflammer est 10 fois inférieure à celles d'hydrocarbures classiques (20 J pour l'hydrogène, contre 260 J pour le propane).

II.5 Les applications d'hydrogène :

Les domaines d'application potentiels de l'hydrogène énergie sont nombreux et très divers, à commencer par tous ceux couverts par le pétrole (et ses dérivés) et le gaz. Dont :

- Utilisations chimiques.
- Utilisations énergétiques.
- Utilisation des transports (Bateaux, avions, voitures...).
- Utilisations industrielles (Domestique, commercial...).

II.6 Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est un produit très volatil et inflammable, ce qui explique les difficultés rencontrées pour son stockage. En effet, il doit offrir un haut degré de sécurité et d'autre part des

facilités d'usage en termes de densité d'énergie et de dynamique du stockage/déstockage pour permettre aux différentes applications de fonctionner dans des conditions techniques acceptables. Aujourd'hui, il existe principalement trois modes du stockage. Ces différentes modes présentent chacun leurs avantages et leurs inconvénients selon des critères économiques, énergétiques, de capacité massique et volumique, de sécurité du stockage/déstockage. L'hydrogène peut être stocké sous forme :

Sous forme gazeuse

Le stockage sous pression est une technique très éprouvée, ce qui n'empêche pas l'hydrogène d'être léger et volumineux, il convient donc le compresser au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. La pression de stockage est de l'ordre de 200 à 250 bars, elle peut dépasser 350 bars. Les développements concernent désormais des réservoirs capables de résister à une pression de 700 bars [22].

Sous forme liquide

Le stockage d'hydrogène sous cette forme nécessite une énergie considérable et une basse température (-253°C) pour le refroidissement de ce dernier, à -252.87°C et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3 . L'hydrogène stocké perd de 3 à 4% de son volume en vapeur par jour. Cette technologie est très chère et énergivore [22].

Sous forme solide (hydrure métallique)

L'hydrogène forme des hydrures avec certains métaux et alliages métalliques, et les conditions de formation d'hydrures sont modérées en termes de pression et de température, et ces conditions de fonctionnement offrent un avantage de sécurité et de simplicité par rapport à celles requises pour les opérations de pression et de liquéfaction, les capacités volumiques sont très intéressantes puisque supérieures à celles du stockage liquide [23]. Dans ce contexte, certains matériaux ont en effet pour propriété d'absorber (fixer en profondeur) ou d'absorber (fixer en surface) l'hydrogène de façon réversible, par changement des conditions de température ou de pression. Il s'agit de métaux appelés hydrures et, potentiellement, de nanostructures, telles que les nanotubes de carbone. Certains métaux, lorsqu'ils sont placés dans une atmosphère d'hydrogène gazeux, ont la particularité de réagir de façon spontanée avec ce dernier et de former de nouveaux composés hydrures métalliques. L'atome d'hydrogène vient s'insérer dans la structure métallique partageant son électron au nuage électronique du sous-réseau métallique. La liaison intervenant

entre le proton et le métal n'est ni ionique ni covalente, impliquant ainsi la conservation du caractère métallique du composé formé.

II.7 Avantages et Inconvénients de chaque mode de stockage d'hydrogène

Les principaux avantages et les inconvénients de différent mode de stockage qui ont été largement évoqués sont récapitulés dans le tableau suivant [24].

Tableau II.1: Avantages et inconvénients de chaque mode de stockage d'hydrogène.

Mode de stockage	Solide	Liquide	Gazeux
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Il est possible de stocker une grande quantité d'hydrogène dans un volume relativement faible. - Sécurité (basse pression) - Capacité volumique - Géométrie flexible - Pas de pertes 	<ul style="list-style-type: none"> - Le réservoir nécessite moins de place. - Commercial - Capacité volumique - Infrastructure existante - Cinétique 	<ul style="list-style-type: none"> - La plus simple, la plus utilisée et la plus efficace. - commerciale à moyenne pression - Cinétiques - Coût
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - la capacité qui est encore limitée. - le coût est élevé pour certains métaux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sécurité - Pertes - La nécessité d'utiliser des cryostats à forte isolation thermique. - La très grande consommation d'énergie liée à la liquéfaction 	<ul style="list-style-type: none"> - La faible densité volumétrique. - La consommation d'énergie liée à la compression. - Sécurité (haute pression) - Capacité volumique - Compression

II.8 Définition d'électrolyseur

L'électrolyse de l'eau est un processus électrochimique dans lequel l'électricité est appliquée pour séparer les atomes d'hydrogène et oxygène à partir de l'eau. Il représente l'une des approches les plus simples et efficaces pour produire de l'hydrogène. Cette procédure est totalement propre et elle produise un hydrogène de haute pureté [25].

II.9 Production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. Les technologies en concurrence sont de deux natures, l'une porte sur le type d'électrolyte et l'autre sur le type de structure (monopolaire ou bipolaire). [26 - 27].

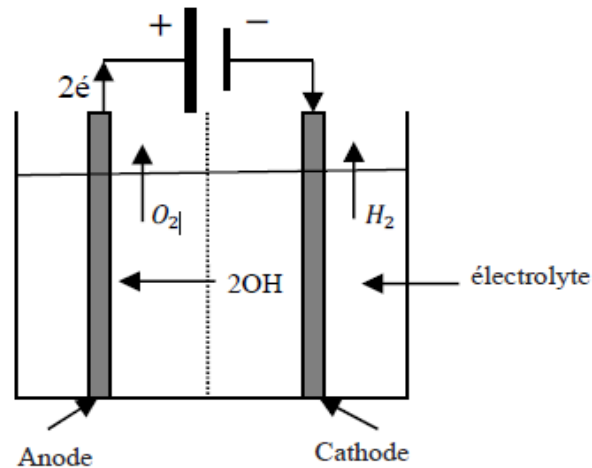


Figure II. 4 Schéma de principe de l'électrolyse

Les électrolyseurs à eau (alcaline en particulier) sont utilisés depuis plus de 100 ans dans des applications industrielles. Cependant, et à cause de ses nombreux avantages, d'autres types comme l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) sont devenus une technologie avec une part de marché croissante. Le développement des électrolyseurs d'eau de type PEM est historiquement lié, comme pour les piles de même technologie PEM, au développement des membranes électrolytiques par la firme américaine Dupont. Le premier électrolyseur utilisant cette technologie a été fabriqué en 1966 par la compagnie General Electric [28]. Dans un premier temps, ces électrolyseurs ont été utilisés pour des applications spécifiques (domaine spatial), puis pour des applications industrielles tels que les véhicules à hydrogène.

II.10 Principe de fonctionnement [29]

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

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

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

II.11 Technologies des électrolyseurs d'eau

Actuellement, nous distinguons trois types principaux d'électrolyseurs d'eau, classés selon leur type d'électrolyte employé :

- **Electrolyseurs Alcalins**

C'est la technologie leader du marché pour les électrolytes. À partir du tournant du XXe siècle, il a été utilisé pour produire de l'hydrogène à grande échelle. Typiquement, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) à 25-30 %. Après séchage, la qualité du gaz est généralement comprise entre 99,5 % et 99,9 % pour H₂ et 99–99,8 % pour O₂. La purification catalytique des gaz (c'est-à-dire un désoxydant) peut améliorer la pureté d'un gaz au-dessus de 99,999 % [30].

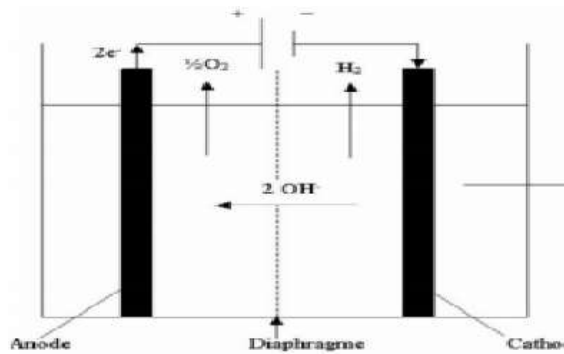


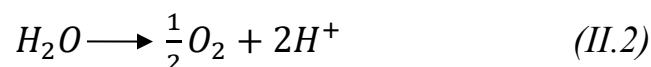
Figure II.5: Électrolyseur Alcalin

Les réactions qui prennent place sur les électrodes sont les suivantes :

À l'anode



À la cathode



- **Électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM)**

Cette technologie se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons (PEM) à basse température. General Electric c'est la compagnie qui a introduit un prototype fini de ce type des électrolyseurs dans les années 60s. Cette technologie a beaucoup d'avantages, mais elle est coûteuse et elle reste au stage de développement, spécialement ce qui concerne les matériaux utilisés comme le catalyseur [30].

Le principe de ce type d'électrolyse est représenté sur la figure suivante :

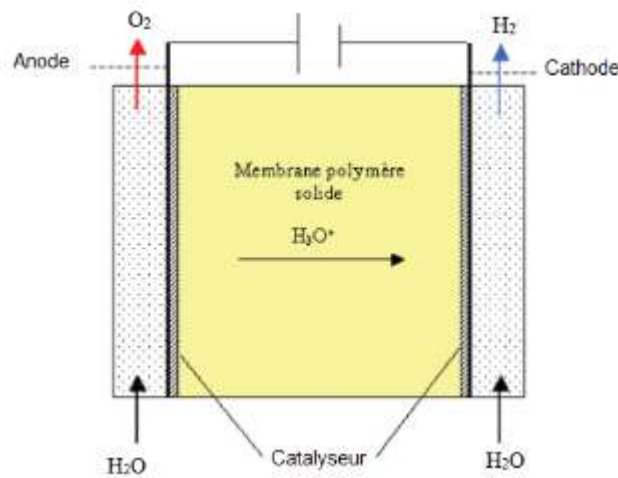
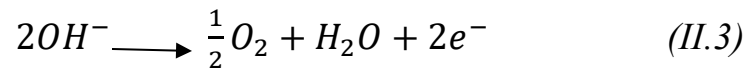


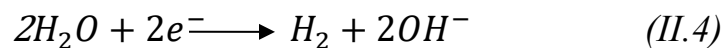
Figure II.6 : Principe schématique de l'électrolyse PEM.

Les réactions qui prennent place sur les électrodes sont les suivantes :

À l'anode



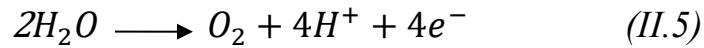
À la cathode



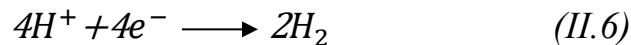
- **Électrolyseur à haute température (PCFC ou SOFC)**

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction des ions super oxydes O_2^- . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous :

À l'anode

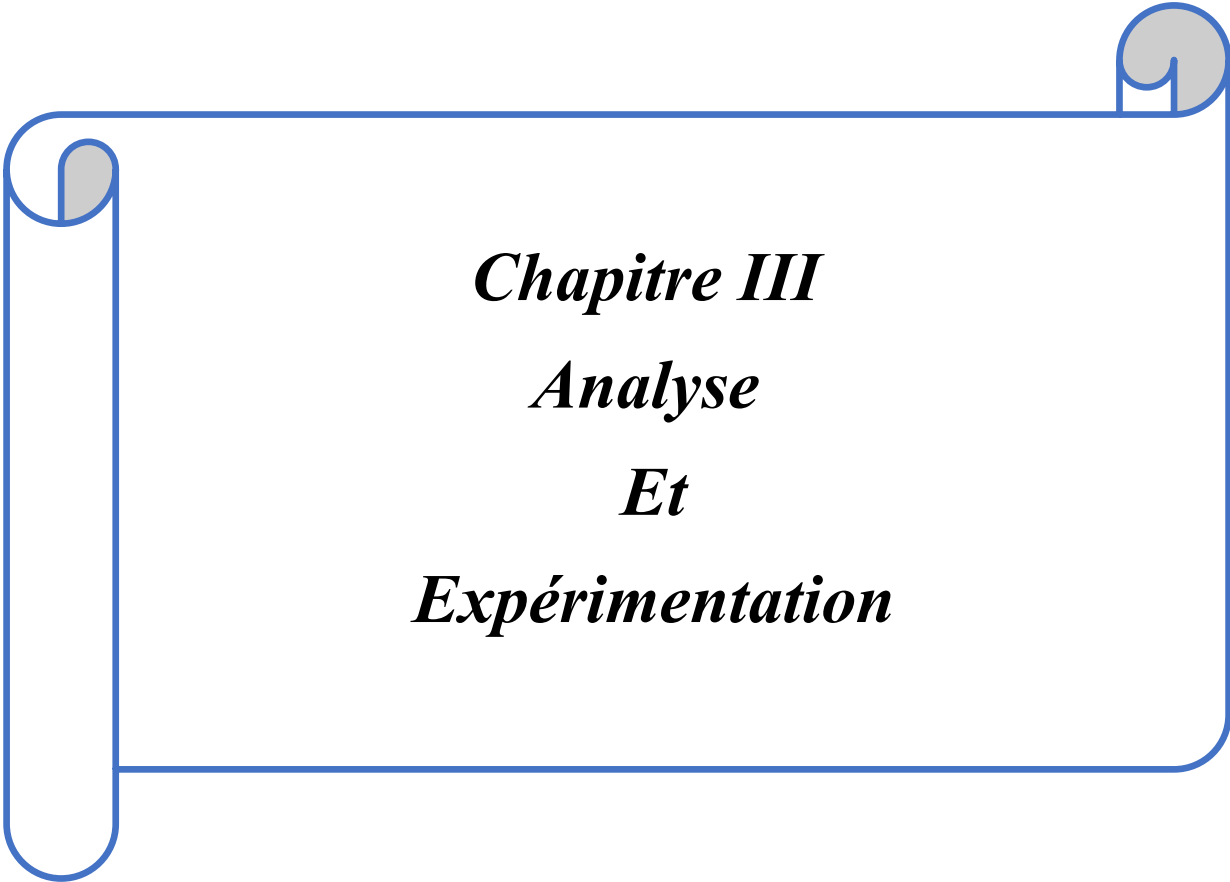


À la cathode



II.12 Conclusion

L'hydrogène est devenu l'un des acteurs clés sur lesquels nous pouvons compter pour façonner le paysage énergétique de demain, à mesure que les technologies de production d'hydrogène arrivent à maturité. Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques de l'hydrogène et les principaux procédés de sa production par les énergies fossiles et renouvelables, où nous nous sommes concentrés sur sa production à partir des énergies renouvelables, notamment la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, avec une explication du principe de ce processus. Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons à l'optimisation de la production d'hydrogène par la technologie d'électrolyse de l'eau basée sur les énergies renouvelables, plus précisément l'énergie solaire.



Chapitre III
Analyse
Et
Expérimentation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons mener des expériences pour faire fonctionner notre électrolyseur hors réseau en utilisant de l'électricité issue d'énergies renouvelables (énergie solaire), puis nous analyserons l'efficacité des composants du système. Au cours des expériences, la température ambiante, la température du panneau et le rayonnement solaire sont utilisés comme données d'entrée pour notre système ; En conclusion, après analyse des performances du système, nous proposons une modification pour augmenter la quantité d'hydrogène générée par le système.

III.2 Description de système

Le système expérimenté est composé de différents éléments qui sont regroupés ensemble pour constituer un prototype de production de l'Hydrogène, ces éléments sont :

- Deux Panneaux solaires.
- L'unité de gestion de l'alimentation PMU.
- Electrolyseur (PEM HG60).
- Bouteille de stockage d'Hydrogène.
- Microordinateur avec logicielle des acquisitions données.

L'objectif des tests expérimentaux est d'alimenter notre électrolyseur en électricité renouvelable sans utiliser l'électricité du réseau, puis d'évaluer l'efficacité des composants du système. Pendant les expériences, la température extérieure, la température du panneau et le rayonnement solaire sont pris comme données d'entrée pour l'unité de gestion de l'alimentation, l'hydrogène délivré au cours de notre expérience est recueilli dans les bouteilles d'hydrogène basse pression sous forme d'hydrure métallique, tandis que l'oxygène gazeux produit par l'électrolyseur est évacué dans la chambre d'atmosphère. Le système de production d'hydrogène solaire utilisé dans notre étude est décrit dans le figure. (III.1).

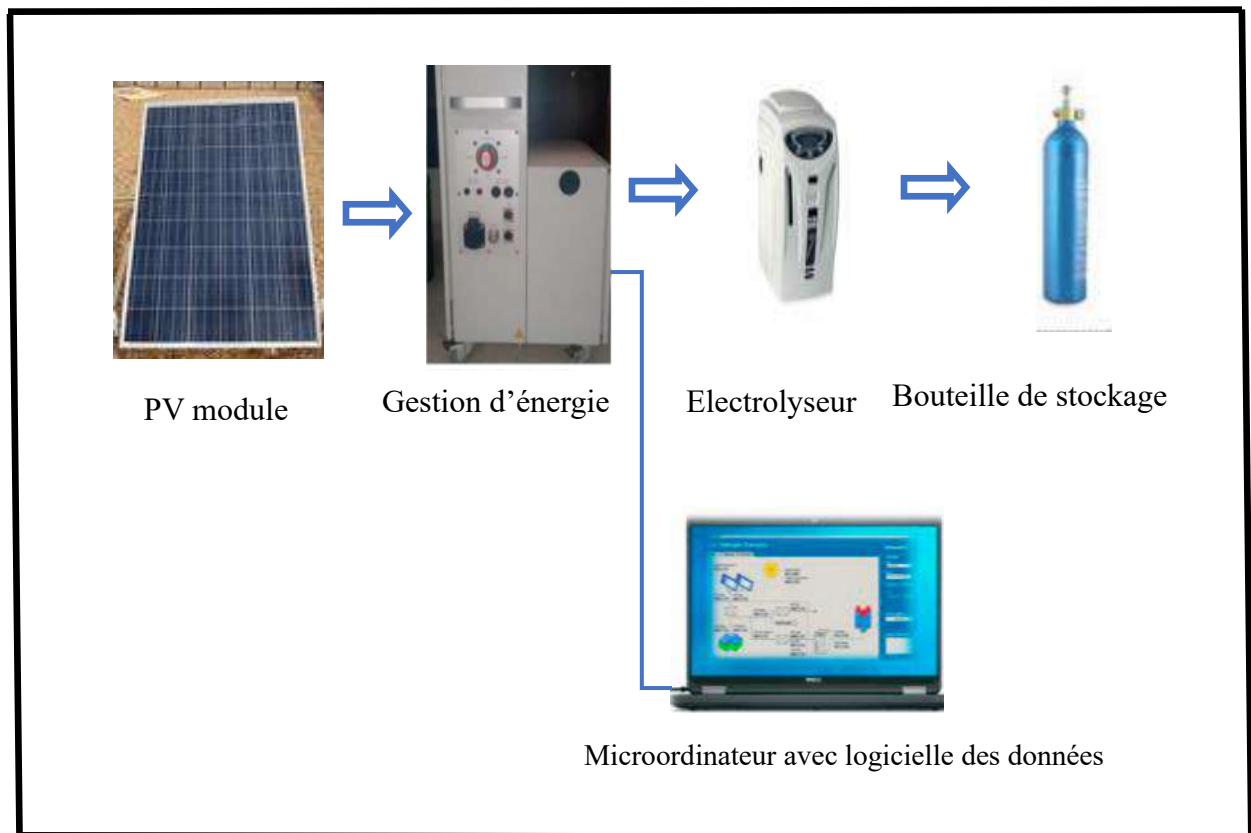


Figure III.1: Système de production d'hydrogène solaire

III.2 .1 Panneaux solaires.

- **Identification des paramètres d'un module photovoltaïque**

Type de module PV poly cristallin, d'autre part pour obtenir les caractéristiques du module photovoltaïque et connaître les performances du panneau dans les conditions extérieures de la zone. Pour cela, il est nécessaire de connaître certains paramètres spécifiques. L'algorithme PSO est utilisé pour déterminer les cinq paramètres du module photovoltaïque à une seule diode.

- **L'algorithme (PSO) :**

Le principe de l'algorithme de PSO Dans cette section, l'objectif recherché est l'amélioration de la précision de l'identification des paramètres de panneau photovoltaïque. Le but de l'algorithme de PSO est de trouver une solution pour la fonction à minimiser dite fonction objective, dont le but est de minimiser l'erreur quadratique entre le courant mesuré et celui calculé à partir du modèle

adopté du PV. Le principe de l'algorithme peut être plus facilement visualisé grâce à la figure suivante :

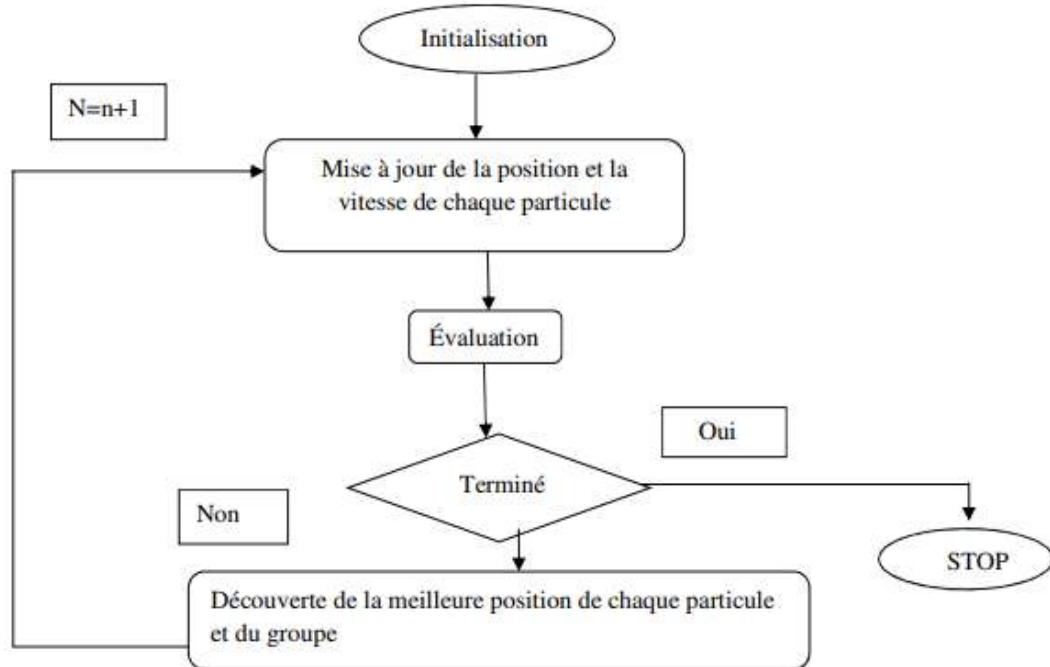


Figure III. 2 : Organigramme de la méthode des essais particulaires (PSO) [31].

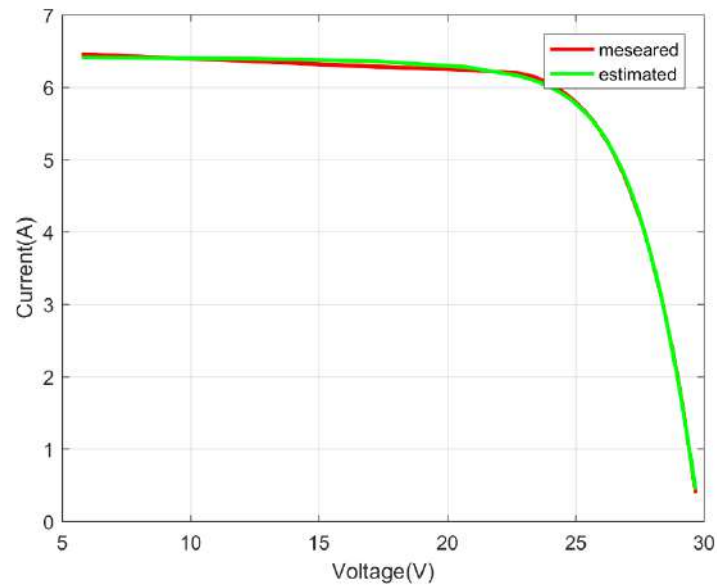
L'algorithme de PSO a été codé dans l'environnement MATLAB pour extraire les paramètres du module PV à l'aide de données réelles I-V. Afin de vérifier l'efficacité de l'extraction des paramètres obtenus par l'application de cet algorithme, les données de mesure collectées à partir du module ont été utilisées dans les conditions climatiques ($G = 653\text{W/m}^2$; $T = 40$).



Figure III. 3: Le prototype de configuration expérimentale.**Tableau III. 1:** Les cinq paramètres du module photovoltaïque à l'aide de la méthode PSO

Paramètre	valeur
I_{ph} (Courant de photons au modèle (A))	6.44913
I_s (Le courants de saturation (A))	3.78384e-06
R_s (Résistance série au modèle (Ω))	0.02729
R_{sh} (Résistance shunt au modèle (Ω))	9971.19
n (Facteur d'idéalité pour le diode)	1.06809

- **Les caractéristiques expérimentales et simulées de sortie PV**

**Figure III. 4 :** Caractéristique I-V expérimentale et simulé de module PV.

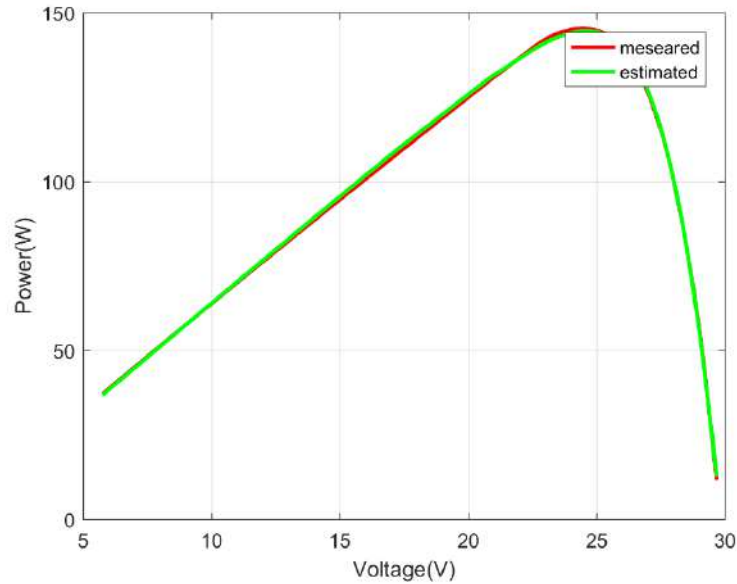


Figure III. 5 : Caractéristique P-V expérimentale et simulé de module PV

III.2.2 L'unité de gestion de l'alimentation PMU :

Le PMU en tant qu'armoire de la gestion, Assure que l'énergie circule entre les panneaux solaires et la charge, la charge délivrée par le système est la somme de la puissance demandée par l'utilisateur et de la consommation du système.

III.2.3 Électrolyseurs PEM

La technologie d'électrolyseur PEM est dotée d'une membrane polymère et d'électrodes poreuses, et elle repose sur l'utilisation d'une membrane d'échange de protons polymériques. Sa pile composait physiquement quelques cellules connectées en série. L'opération d'électrolyse de l'eau permet de produire de l'hydrogène H₂ et de l'oxygène O₂ grâce à une praticabilité électrolytique alimentée par panneau solaire (PV).

III.3 Expérimentation de système de production d'hydrogène

Les expériences ont été réalisées pendant un jour d'avril et les mesures ont été enregistrées de 10h30 à 15h30 par période de 30 min, en conditions réel au laboratoire LAGE de l'Université de Ouargla (latitude 32° 36E, longitude 5° 24N, altitude 0,14 KM). La technologie des panneaux solaires utilisé de type poly cristallins PV.

- La figure III.7 montre le rayonnement solaire pendant la durée de l'expérience de mesure (les 5 heures)

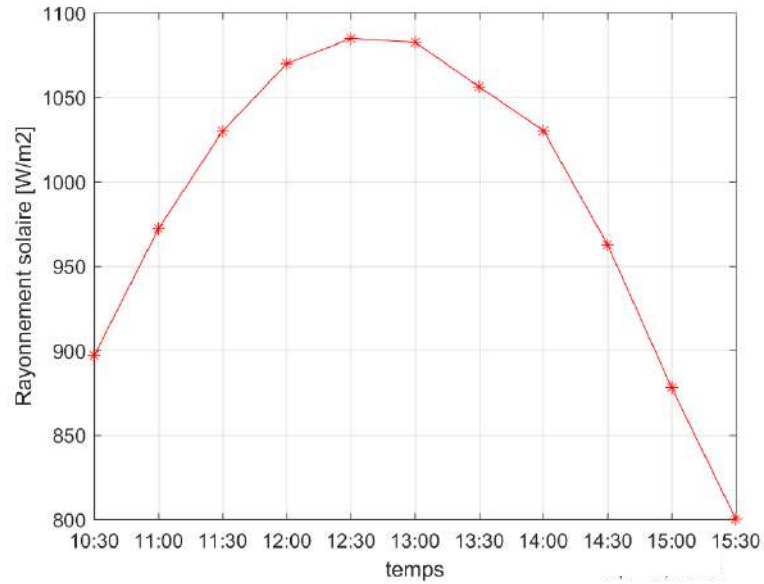


Figure III.6 : Irradiation solaire en fonction du temps

- Pendant les heures de mesure, nous avons enregistré la valeur maximale du rayonnement solaire de $1084.75W/m^2$, qui était à 12h30.
- Les valeurs du courant électrique mesuré pendant la durée de l'expérience sont indiquées sur la figure. III .8. On note que la valeur la plus élevée du Courant a été enregistrée à 14h00, tandis que la valeur la plus basse a été enregistrée vers 12h30 l'après-midi.

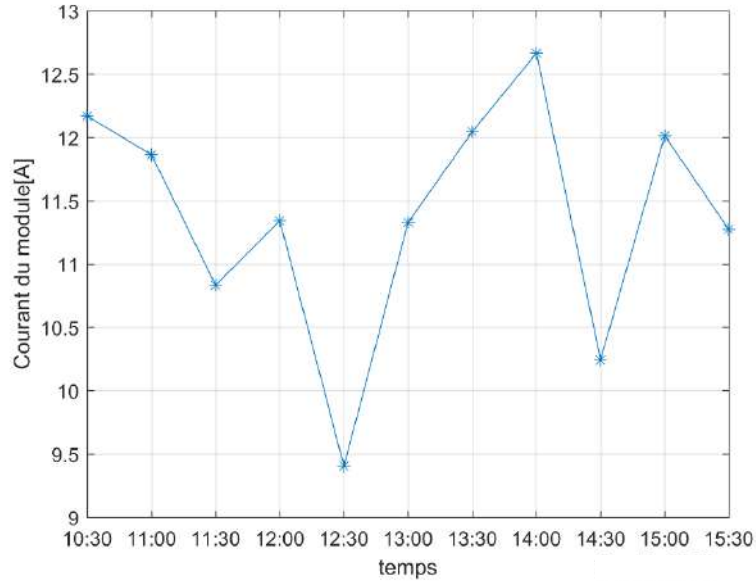


Figure III.7 : Courant du module en fonction du temps

- La température ambiante et la module PV sont déterminées pour la durée de l'expérience comme le montre la Figure III.9.

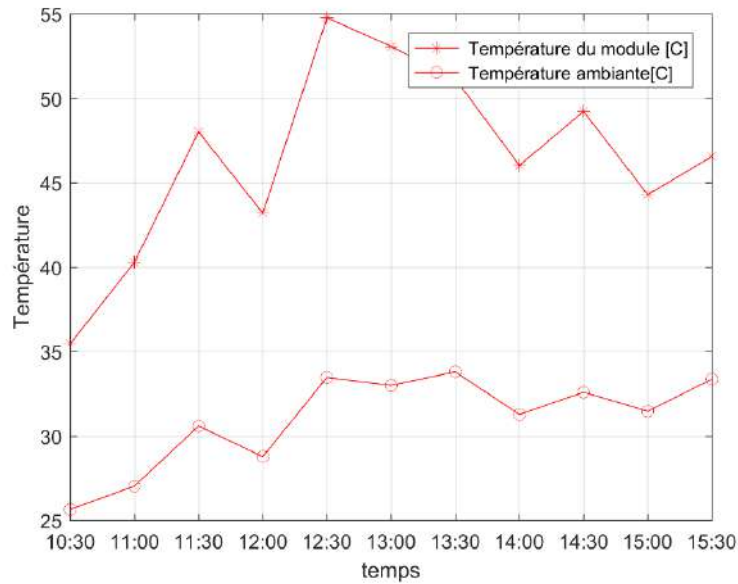


Figure III.8: La température ambiante et la module PV en fonction du temps

- Puissance au niveau des panneaux solaires et de la charge, On voit que la puissance de ces panneaux solaires est supérieure à la puissance de la charge.

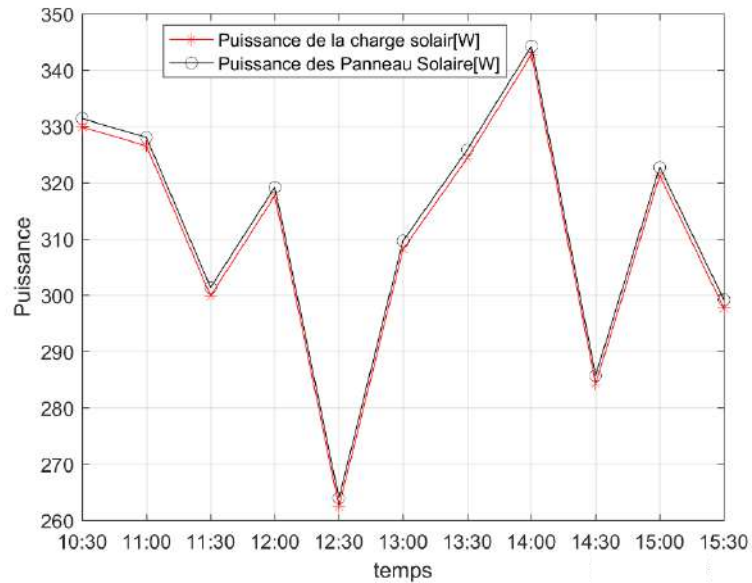


Figure III.9: Puissance des panneaux solaires et de la charge en fonction du temps

- D'après les courbes de la Figure (III.11 et III.13), la tension de la batterie prend une valeur supérieure à 28 V et après la tension chute à des valeurs inférieures à 26 V et le courant évolue entre -5.3 A à -0,67A respectivement, en fonction des besoins de la charge.

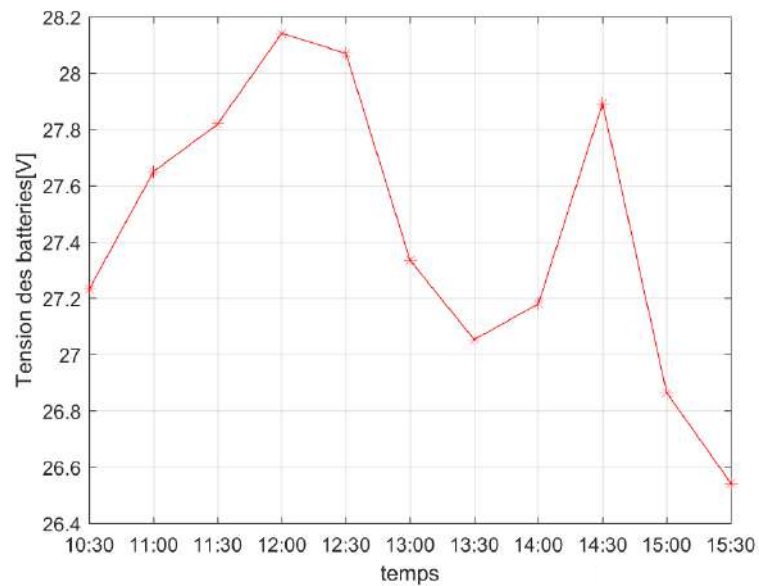


Figure III.10 : tension des batteries en fonction du temps

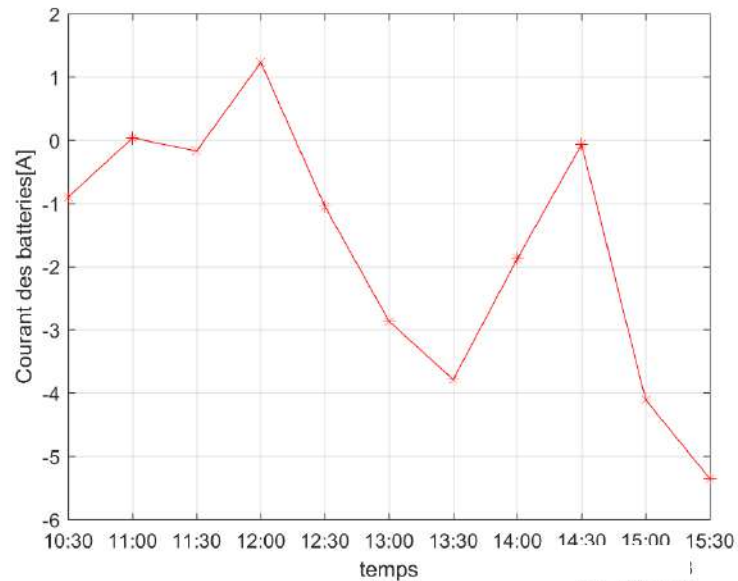


Figure III.11 : Courant de batteries en fonction du temps.

- La figure III.13 ci-dessous montre comment la puissance fluctue en fonction des besoins de charge et des conditions d'exposition au rayonnement solaire des panneaux.

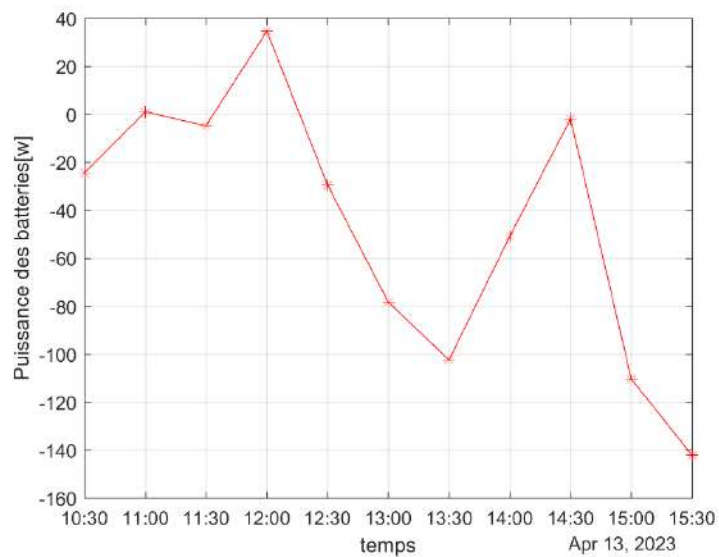


Figure III.12 : Puissance de batteries en fonction du temps.

- Puissance de convertisseur DC/AC

En raison des pertes dans l'onduleur, la puissance d'entrée est supérieure à la puissance de sortie du convertisseur DC/AC.

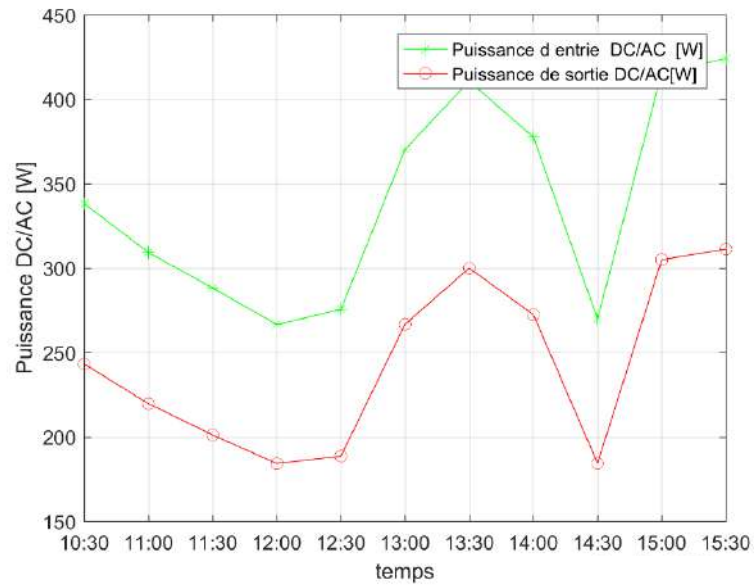


Figure III.13: Puissance de convertisseur en fonction du temps

- **Le rendement moyenne de convertisseur**

Le rendement peut être calculé par l'équation suivante :

$$\eta_{DC/AC} = \frac{\text{Puissance de sortie de convertisseur}}{\text{Puissance d'entrée de convertisseur}} \quad (\text{III.1})$$

Après avoir calculé le rendement du convertisseur qui était égal à 74%, on peut l'envisager dans le cas des normes, sachant que plus le rendement du convertisseur est élevé, l'efficacité du système était meilleure

- **Production d'hydrogène**

La figure III.15 montre la dédit d'hydrogène pendant la durée de l'expérience

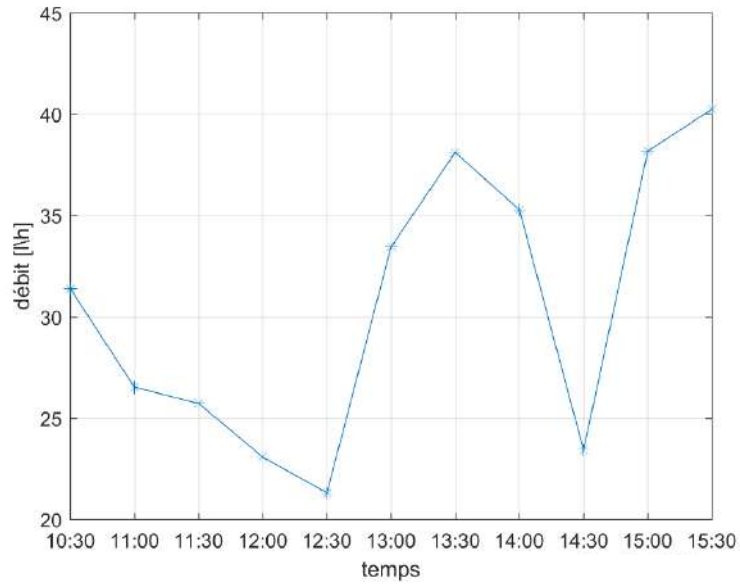


Figure III.14: la dédit d'hydrogène en fonction du temps

- Nous avons utilisé la méthode d'intégration de trapèze pour calculer le volume d'hydrogène pendant le temps d'exécution du système.

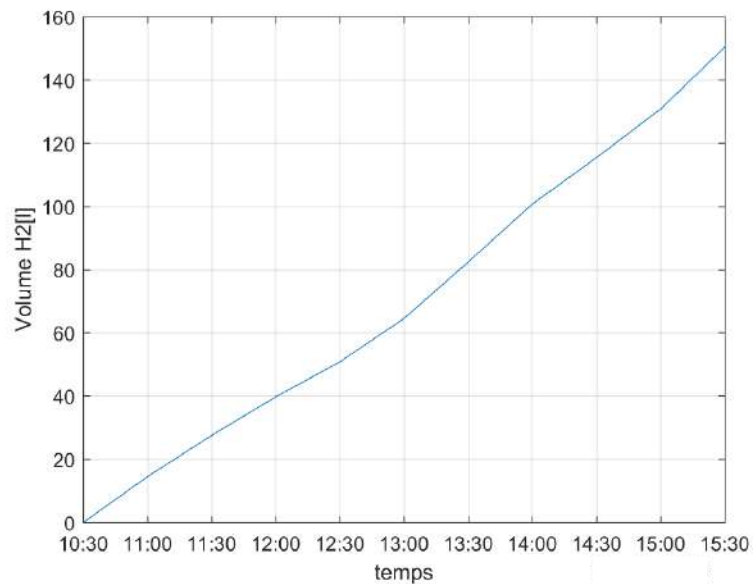


Figure III.15: Volume de l'hydrogène en fonction du temps

La quantité d'hydrogène produite pendant le temps de mesure est de 150.425 Litres

- **Le rendement de l'électrolyseur**

Le rendement de l'électrolyseur peut être calculé par l'équation suivante :

$$\eta_{\text{l'électrolyseur}} = \frac{\text{Puissance de sortie de l'électrolyseur}}{\text{Puissance d'entrée de l'électrolyseur}} \quad (\text{III.2})$$

- Puissance de sortie de l'électrolyseur sont calculées par l'équation suivante :

$$P_{\text{Sortie}} = \frac{Q * E * 1000}{3600} \quad (\text{III.3})$$

Q : Hydrogène débit (l/h).

E = 10.8 la valeur calorifique inférieur de l'hydrogène en (MJ/m³)

Après calcul numérique, le rendement de l'électrolyseur a été déterminées $\eta = 38\%$

III.4 Améliore de volume d'hydrogène produit

Pour augmenter la quantité d'hydrogène produite par le système, nous proposant la solution suivant :

➤ Amélioration les énergies reçut par les modules :

Les angles optimaux mensuels pour une surface orientée vers le sud varient en fonction des saisons et de la latitude géographique. Ces angles sont essentiels pour maximiser la capture de l'énergie solaire et l'efficacité des installations solaires photovoltaïques ou thermiques voir le tableau (III.2). En avril, nous avons étudié et choisi l'angle optimal de 17°.

Tableau III.2 : Les angles optimaux mensuels pour une surface orientée vers le sud

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
β_{opt}°	61	52	36	17	0	-7	-4	11	29	47	59	62

La courbe de rayonnement solaire est représentée dans la figure suivant pour deux l'angles différents, l'angle de l'expérimentation 0° et l'angle optimal de 17° pour le mois d'avril, calculé à l'aide de logiciel PVSYST.

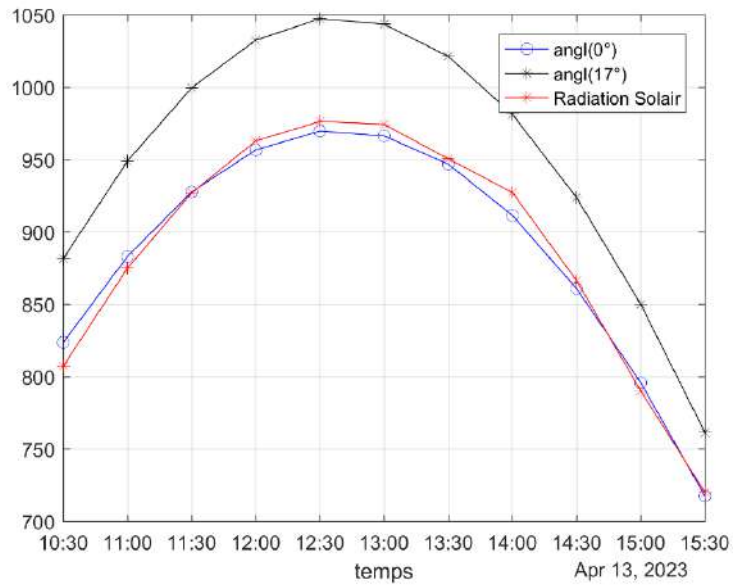


Figure III.16 : Rayonnement solaire à un angle de 0° et optimal 17° en fonction du temps

Nous avons utilisé la méthode intégrale de trapèze pour calculer l'énergie pendant le temps de fonctionnement du système avec les deux angles de 0° et optimal 17° .

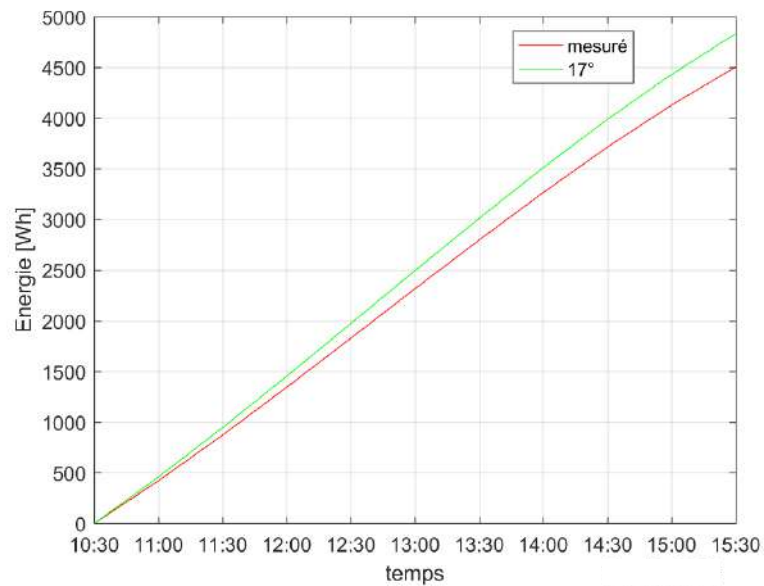


Figure III.17: Comparaison la quantité d'énergie en fonction du temps

Voir la quantité d'énergie produite grâce à l'amélioration proposée est 328.160 Wh. Cette énergie peut être utilisée pour augmenter la production d'hydrogène ; en la convertissant en énergie électrique par les modules PV ensuite a travers le système sera donnée à l'électrolyseur.

- **Le rendement moyenne des modules :**

$$\eta_{modules} = \frac{\text{Puissance du panneaux solaire}}{\text{radiation solaire*surface}} \quad (\text{III.4})$$

Après le calcul le rendement moyen des modèles $\eta_{modules} = 10\%$.

- Pour calculer l'énergie électrique ($E_{\text{électrique}}$) générée par les modules :

$$E_{\text{électrique}} = \eta_{modules} * 328.160 \quad (\text{III.5})$$

$$E_{\text{électrique}} = 32.816 \text{ Wh}$$

- **Le rendement moyenne de convertisseur DC/DC**

$$\eta_{DC/DC} = \frac{\text{Puissance de sortie de convertisseur}}{\text{Puissance d'entrée de convertisseur}} \quad (\text{III.6})$$

Après le calcul de rendement moyen de convertisseur $\eta_{DC/DC} = 99\%$.

- **Le rendement moyenne des convertisseurs**

Nous calculons Le rendement moyenne des convertisseurs comme suivent :

$$\eta_{\text{des convertisseurs}} = \eta_{DC/DC} * \eta_{DC/AC} \quad (\text{III.7})$$

$$\eta_{\text{des convertisseurs}} = 73\%.$$

- **L'Énergie reçue à l'entrée de l'électrolyseur**

$$E_{\text{électrique reçu par l'électrolyseur}} = \eta_{\text{des convertisseurs}} * E_{\text{électrique}} \quad (\text{III.8})$$

$$E_{\text{électrique à l'entrée du l'électrolyseur}} = 24 \text{ Wh.}$$

- **L'énergie reçu à la sortie de l'électrolyseur**

$$E_{\text{Sortie}} = E_{\text{électrique entrée du l'électrolyseur}} * \eta_{\text{l'électrolyseur}} \quad (\text{III.9})$$

$$E_{Sortie} = 9.10 \text{ Wh}$$

- **Le volume d'hydrogène produit par amélioration**

Grâce à cette formule, nous avons calculé le volume de l'hydrogène amélioré

$$E_{Sortie} = \frac{V_{H_2} * E * 1000}{3600} \quad (\text{III.10})$$

Après calcul et à la suite d'une amélioration en modifiant l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques, la quantité d'hydrogène qui a été extraite et augmentée en production pendant les 5 heures de fonctionnement est estimée à $V_{H_2} = 3.13 \text{ L}$. Cette quantité est de 5% de la quantité totale d'hydrogène produit.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude expérimentale a été menée au niveau du laboratoire pendant 5 heures consécutives pour examiner notre système production d'hydrogène est ensuite proposer des solutions d'amélioration pour augmenter la quantité d'hydrogène produit.



Conclusion Générale

Nos travaux portent sur la production d'hydrogène via un système photovoltaïque qui alimente un électrolyseur PEM (membrane échangeuse de protons).

Notre objectif est d'étudier et d'expérimenter le système photovoltaïque afin de proposer des solutions pour augmenter le volume d'hydrogène produit par l'électrolyseur.

Nous avons commencé notre travail en fournissant des informations générales sur le rayonnement solaire et les systèmes photovoltaïques. Nous avons ensuite réalisé des expérimentations sur notre système de production d'hydrogène par le procédé d'électrolyse (PEM) à partir de la source d'énergie du système photovoltaïque. Après avoir étudié et analysé les résultats des expériences, nous avons proposé une amélioration qui augmenterait les performances du système et augmenteraient la quantité d'hydrogène produite.



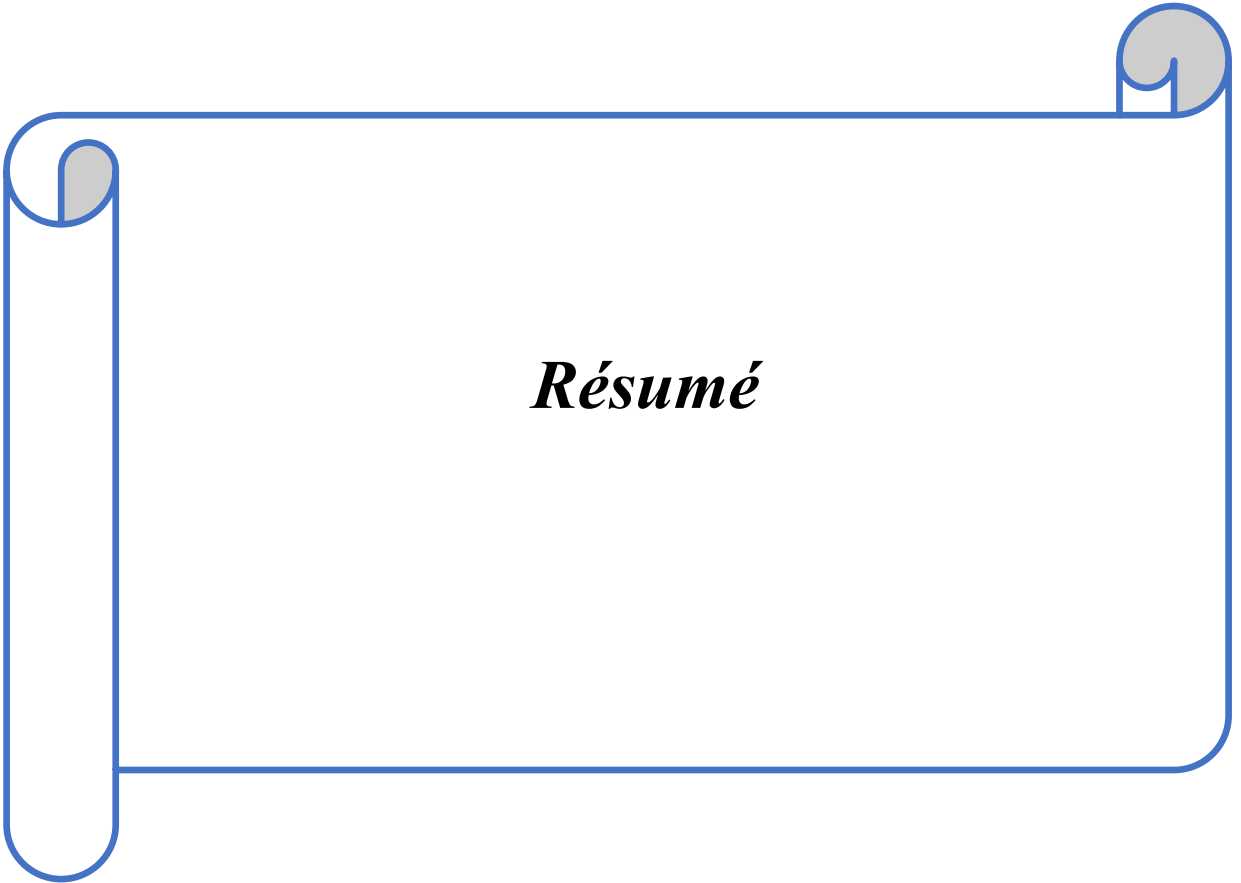
Références

Liste des Références

- [1] F. Kininger, "photovoltaic systems technology", university of kassel, 2003
- [2] Mr. Bensalah Belqassim et Mr. Filali Mohammed, étude et réalisation d'un circuit de commande avec MPPT d'un hacheur pour système photovoltaïque.
- [3] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [4] S.Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ,Mémoire de Magister en physique ;UMC, 2010.
- [5] B. Ramdane, b. Dabouz, contribution à l'étude et la commande d'un moteur asynchrone alimenté par un système solaire. Application au pompage photovoltaïque. Enp 203.
- [6] Belhadj Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome», Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008.
- [7] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [8] I. Bendjamaa, Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque.
- [9] M.L.Louazane, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque.
- [10] <http://energieveloppement.blogspot.com/2012/01/cellulesphotovoltaiquet>.
- [11] F. Lasnier, TC. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », Institute of Physics Publishing,1990.
- [12] F. Giamarchi. « Cellule Solaire : Modèle Spice », Fiche technique, I.U.T. de Nîmes, Départ GE2I, 2008.
- [13] MG. Villalva, JR. Gazoli, and ER. Filho ,« Comprehensive approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays », IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.Chapitre I Rayonnement solaire et système photovoltaïque 20
- [14] <https://energieplus-lesite.be.consulté> le 15/04/2022.
- [15] <http://www.photovoltaïque.guidenr.fr.consulté> le 15/04/2022.
- [16] H. Yatimi, E. Aroudam, et M. Louzazni, « Modeling and Simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK ». MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, pages 1-5, 2014
- [17] D. Sharad, M. Patil, M. Ram Gopal, « Analysis of a metal hydride reactor for hydrogen storage »,Int. J. Hydrogen Energy , vol. 38, (2013), pp. 942-951.<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.031>
- [18] B. Zahiri-Sabzevar, « Bi-metallic Catalyst for Hydrogen Sorption of Magnesium Hydride» ,Thèse de doctorat, université of Edmonton, 2012.

- [19] Menia Sabah, Ilyes Nouicer, Yasmina Bakouri, Abdelhamid M'raoui, HammouTebibel et, Abdallah Khellaf, 'Production d'hydrogène par procédés biologiques'. *Oil& Gas Science and Technology-Rev* 74:34 (2019).
- [20] Kumar S. Shiva, et Himabindu V, 'Hydrogen production by PEM water electrolysis–Areview' *Materials Science for Energy Technologies* 2:442–454 (2019).
- [21] Microsoft® Encarta® 2009, Hydrogène, Microsoft Corporation, 2008.
- [22] MM. Laurent KALINOWSKI, « L'hydrogène : vecteur de la transition énergétique ». Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, document scientifique université de paris, 2014.
- [23] G. Gondor, « Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir ». Thèse de doctorat université de paris, 2008.
- [24] A. AMAMOU, « Stratégie adaptative de démarrage à froid des véhicules à pile à combustible », Thèse de doctorat, université de QUBAC, Octobre 2018.
- [25] Bessarabov Dmitri, Haijiang Wang, Hui Li, et Nana Zhao, 'PEM Electrolysis for Hydrogen Production Principles and Applications' Taylor & Francis Group (2016).
- [26] J. Labbé , 'L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes
- [27] AFH2 Th. Alleau , 'Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau', Mémento de l'hydrogène, fiche 3.2.1. Révision mai 2011.
- [28] Davenport RJ, Schubert FH, 'Space water electrolysis: space station through advanced missions' *Journal of Power Sources* 36:235–50 (1991).
- [29] Bouziane khadidja , 'Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau'
- [30] Buttler Alexander, et Hartmut Spliethoff, 'Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: Areview' *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2017).

[31] : BOUZID Allal El Moubarek. « Optimisation par la méthode des essais particuliers d'une fonction trigonométrique ». Article universitaire, Ecole Normale Supérieurs d'Enseignement Technique -ORAN-, 2009.



Résumé

Dans cette mémoire, des travaux ont été menés pour améliorer la production d'hydrogène au moyen du rayonnement solaire reçu par des panneaux solaires, produisant ainsi de l'énergie électrique qui sert à faire fonctionner l'électrolyseur qui sépare l'eau en oxygène et hydrogène. L'hydrogène est stocké dans des bouteilles. Dans un souci d'optimisation, nous avons adopté la méthode de réglage de l'angle d'inclinaison des panneaux PV de 0° à 17°. Les résultats sont encourageants en termes d'énergie produite, qui s'est élevée par 328.16 Wh pendant un temps équivalent au temps d'expérimentations. En utilisant cette énergie, la production d'hydrogène peut être améliorée par une augmentation de 3,13 litres.

Mots clé : rayonnement solaire; hydrogène ; électrolyseur

ملخص:

في هذه الأطروحة تم العمل على تحسين إنتاج الهيدروجين عن طريق الإشعاع الشمسي الذي تتلقاه الألواح الشمسية، وبالتالي إنتاج الطاقة الكهربائية التي تستخدم لتشغيل المحلل الكهربائي الذي يفصل الماء إلى أكسجين. يتم تخزين الهيدروجين في اسطوانات. من أجل التحسين، اعتمدنا طريقة ضبط زاوية إمالة الألواح الكهروضوئية من 0° إلى 17°. نتائج التجربة العملية مشجعة من حيث الطاقة المنتجة والتي بلغت قرابة 328.160 واط ساعي خلال الفترات التجريبية. بالاستعانة بهذه الطاقة يمكن تحسين إنتاج الهيدروجين بزيادة 3.13 لتر.

الكلمات المفتاحية: إشعاع شمسي؛ هيدروجين؛ المحلل الكهربائي.

Abstract

In this memorandum, work has been carried out to improve the production of hydrogen by means of solar radiation received by solar panels, thus producing electrical energy which is used to operate the electrolyser which separates water into oxygen. Hydrogen is stored in cylinders. For the sake of optimization, we have adopted the method of adjusting the tilt angle of the PV panels from 0° to 17°. The results of the laboratory experiment are encouraging in terms of the energy produced, which amounted to approximately 328,160 Wh during the experimental periods. Using this energy, hydrogen production can be improved by an increase of 3.13 liters

Keywords: solar radiation; hydrogen; Electrolyze.