



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Réseaux électriques
Réf. : ...

Présenté et soutenu par :

BOUHAMED Yousri
TALEB AHMED Mejdj

Le: juin 2022

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR LES RESSOURCES RENOUVELABLES (PHOTOVOLTAÏQUE)

Jury:

Dr.	SAADI Aicha	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Pr.	BENCHOUIA Mohamed Toufik	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	ZOUZOU Salah Eddine	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire: 2021/2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR LES
RESSOURCES RENOUVELABLES
(PHOTOVOLTAÏQUE)**

Présenté par :
BOUHAMED Yousri
TALEB AHMED Mejd

Avis favorable l'oncadreur

Dr. SAADI Aicha

Signature :

Avis favorable du Président du Jury

Pr. BENCHOUIA Mohamed Toufik

Cachet et signature :

Dédicaces

C'est avec une sincère fidélité et un profond amour que je vous dédie ce modeste travail :

*À ma mère toi qui m'as appris à prononcer et tracer mes premières lettres.
Toi qui as sacrifié sa vie et son temps pour faire de moi ce que je suis maintenant. À celle
qui a nourri le corps et le cœur d'un homme qui croie aux vertus.*

*À mon père Celui qui m'a inspiré courage et persévérance. En silence tu as su sillonné
mon chemin. Aucun mot ne saura exprimer ma gratitude.*

À mes frères et mes sœurs

À toute ma famille, et mes amis.

*Je n'oublierai pas des gens qui m'ont soutenu par leurs prières et encouragements. À tous
mes enseignants spécialement Dr. Mehdi Abdeddaim : C'est grâce à vous que j'ai réalisé
ce modeste travail.*

Remerciement

*Tout d'abord, nous devons remercier notre " **ALLAH** " pour son aide et de nous avoir aidés pour faire la réalisation de ce travail et pour nous avoir donné force et patience tout au long de notre cheminement d'étude.*

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre Dr. SAADI pour sa confiance et sa patience, alors qu'elle nous a accompagnés dans notre travail, à chaque instant, étape par étape, et n'a jamais tardé à enseigner, encourager et remonter notre moral.

Nous n'oublions pas non plus d'exprimer nos sincères remerciements et notre appréciation à notre encadreur Dr. SAADI Aicha

Nous remercions vivement Pr. BENCHOUIA Mohamed Toufik pour avoir accepté d'être le président du jury et Pr. ZOUZOU Salah Eddine pour son évaluation de notre mémoire.

Tout cela grâce à nos familles, amis et collègues qui nous ont encouragés et nous ont remonté le moral pour terminer ce travail de la meilleure façon.

Résumé

La production de l'hydrogène par les sources renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne connaissent un développement scientifique et industriel représente une grande solution. Ce qui nous motive pour faire ce travail qui étudié la production d'hydrogène par l'association d'un générateur photovoltaïque et d'un électrolyseur PEM coupler avec un convertisseur DC/DC (buck) et MPPT (PandO) pour mesurer le volume et le débit de produit et sa prèssion durant une journée typique dans la ville de OUREGLA pour effectuer ce travail et obtenez les meilleurs résultats possibles.

Mots clés :

Hydrogène- photovoltaïque- Électrolyseur PEM- hacheur buck- MPPT

ملخص

إنتاج الهيدروجين بمنابع الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية و طاقة الرياح عرفت تطورا علميا وصناعيا بحلول باهرة. مما حفزنا لإنجاز هذا العمل ودراسة انتاج الهيدروجين من خلال ربطه بمولد كهروضوئي و الكتروليزور PEM متصل بمحول جهد مستمر مستمر خافض متحكم فيه بتقنية تتبع نقاط الاستطاعة القصوى (PandQ) MPPT لقياس حجم وتدفق الهيدروجين المنتج بدقة، وذلك خلال يوم نموذجي في ولاية ورقلة لتنفيذ هذا العمل والحصول على أفضل نتائج ممكنة.

الكلمات المفتاحية :

الهيدروجين-كهروضوئي-PEM Electrolyseur-MPPT-محول جهد مستمر خافض

Summary

The production of hydrogen by the renewable sources of energy such as solar and wind energy is experiencing scientific and industrial development represents a great solution. What motivates us to do this work which involved the production of hydrogen by the association of a photovoltaic generator and a PEM electrolyser coupled with a DC/DC converter (buck) and MPPT (PandO) to measure the volume and the product flow and its pressure during a typical day in the city of OUREGLA to carry out this work and obtain the best possible results.

Keywords:

Hydrogen- PEM electrolyzer- step down chopper- MPPT

Tableau de matière

Table des matières.....	I
La liste des figures	V
La liste des tableaux	VI
Introduction général	-1-
Chapitre 1: Généralité sur le hydrogène.....	4
I.1 Introduction	4
I.2. Historique de l'hydrogène	3
I.3. Définition	5
I.4. Propriétés de l'hydrogène	5
I.4.1. Propriétés chimique	5
I.4.2. Propriétés physiques	7
I.5. Les utilisations de l'hydrogène	7
I.6. La production de l'hydrogène	8
I.7. Différents procédés de production	9
I.7.1. Reformage des combustibles fossiles à la vapeur d'eau	9
I.7.2. L'oxydation partielle	10
I.7.3. Le reformage aérotherme	10
I.7.4. Électrolyse de l'eau	10
I.7.4.1. Electrolyse basse température (< 200°C) alcaline	11
I.7.4.2. Electrolyse basse température (< 200°C)	11
I.7.4.3. Electrolyse à haute température (> 400°C)	11
I.7.4.4. Gazéification et pyrolyse de biomasse	11
I.7.5. Autres procédés à l'état de recherche.....	11
I.8. Les applications de l'hydrogène	12
I.8.1. Des applications stationnaires	12
I.8.2. Des applications mobiles	12
I.8.3. Des applications industrielles	13
I.9. Le stockage de l'hydrogène	13
I.9.1. Sous pression	13
I.9.2. Stockage solide	14

I.9.3. Stockage liquide	15
I.10. Transport de l'hydrogène	17
I.10.1. Transport par route	17
I.10.2. Transport par mer	17
I.10.3. Transport par gazoducs	17
I.11. Les avantages et les inconvénients de l'hydrogène	18
I.12. Conclusion	18
Chapitre 2 : étude sure les générateurs photovoltaïques	19
II.1. Introduction	20
II.2. Énergie du soleil	20
II.2.1. Rayonnement	20
II.2.1.1. Rayonnements direct	21
II.2.1.2. Rayonnements diffus	21
II.2.1.3. Rayonnement réfléchis	21
II.3. Cellule photovoltaïque	22
II.3.1. Différents types de cellules solaires	23
II.3.1.1. Cellules monocristallines	23
II.3.1.2. Cellules poly cristallines	24
II.3.1.3. Cellules amorphes	24
II.4. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque	25
II.5. Influence de l'éclairement et de température	26
II.5.1. Influence de la température	26
II.5.2. Influence de l'éclairement	27
II.6. Association des cellules photovoltaïques PV	29
II.6.1. Association en série	29
II.6.2. Association en parallèle	29
II.7. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque	30
II.7.1. Les avantages	30
II.7.2. Les inconvénients	30
II.8. Modélisation des cellules photovoltaïques	31
II.9. Conclusion	33
Chapitre 3: ÉTUDE ET MODÉLISATION D'UN ÉLECTROLYSEUR PEM	34
III.1. Introduction	35

III.2. Composition d'un électrolyseur	35
III.3. Les types d'électrolyseurs	35
III.3.1. Les électrolyseurs Alcalins	35
III.3.2. Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser) à oxyde solide	35
III.3.3. Les électrolyseurs de l'eau	35
III.3.4. Les électrolyseurs PEM	36
III.4. Principe de fonctionnement	36
III.5. Les Modèles utilisé pour l'électrolyseur PEM	37
III.5.1. Modèle thermique	37
III.5.2. Modèle thermodynamique	38
III.5.3. Modèle électrochimique	39
III.6. Avantages et inconvénients d'électrolyseur PEM	39
III.6.1. Les avantage	39
III.6.2. Les inconvénients	39
III.7. Conclusion	40
Chapitre IV : Résultats et simulation	41
IV.1. Introduction	42
IV.2. Modélisation du générateur photovoltaïque	42
IV.2.1. Modèles de simulation de la caractéristique I-V ET P-V	42
IV.2.2. Paramètres de champ photovoltaïque	43
IV.2.3. Les caractéristiques de module photovoltaïque	44
IV.3. Résultats pour une journée typique	44
IV.3.1. Température constante $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et éclairements variable	45
IV.3.2. Eclairément constant $E=1000\text{ W/m}^2$ et températures variable.....	47
IV.4. Modélisation d'un hacheur buck Avec MPPT	48
IV.4.1. Identification des paramètres	49
IV.4.2. Technique de MPPT	50
IV.4.3. Les types d'MPPT :.....	50
IV.4.3.1. Algorithme Incrément de la conductance "INC'44.....	50
IV.4.3.2. Algorithme à base d'une fraction de la tension V_{oc}	50
IV.4.3.3. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc}	51
IV.4.3.4. Algorithme à base de la logique floue.....	51
IV.4.3.5. Algorithme Perturber et observer 'P&O'.....	51
IV.4.4. Organigramme d'un MPPT PandO :	52

IV.5. Modélisation de l'électrolyseur PEM	55
IV.5.1. Modèle choisi	55
IV.6. Modélisation du système GPV avec électrolyseur	60
IV.7. Volume d'hydrogène Produite	61
IV.8. Débit d'hydrogène produite.....	62
IV.9. Pression d'Hydrogène	64
IV.10. Résultats totales de simulation	64
IV.10.1. Analyse et interprétation des résultats	65
IV.11. Conclusion	65
Conclusion générale	66
Bibliographie	67

LISTE DES FIGURES

Chapitre I: GÉNÉRALITÉ SUR L'HYDROGÈNE

Figure (I.1) : Production et consommation de l'hydrogène dans le monde.

Figure (I.2) : La filière hydrogène.

Figure (I.3) : La chaîne de production et applications de l'hydrogène.

Figure (I.4) : Famille pour le stockage solide.

Figure (I.5) : Réservoir pour l'hydrogène liquid.

Chapitre II : ÉTUDE SUR LES GÉNÉRATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

Figure (II.1) : Composantes du rayonnement solaire.

Figure (II.2) : Composition d'une cellule photovoltaïque.

Figure (II.3) : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

Figure (II.4) : Types de cellules photovoltaïques. Silicium mono cristallin, silicium poly cristallin, silicium amorphe.

Figure (II.5) : Le Principe de la cellule photovoltaïque.

Figure (II.6) : Caractéristiques Courant-Tension (I-V) à un éclairement 1000w/m^2 et différentes températures.

Figure (II.7) : Caractéristiques Puissance-Tension (P-V) à un éclairement 1000w/m^2 et différentes températures.

Figure (II.8) : Caractéristiques Courant-Tension (I-V) à une température de 25°C et différents niveaux d'éclairement.

Figure (II.9) : Caractéristiques Puissance-Tension (P-V) à une température de 25°C et différents niveaux d'éclairement.

Figure (II.10) : Caractéristique du groupement en série des cellules identiques.

Figure (II.11) : Caractéristique du groupement en parallèle de cellules identiques.

Figure (II.12) : Equivalent circuit of a photocell.

Chapitre III: ÉTUDE SUR LES ELECTROLYSEURS.

Figure (III.1): Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM.

Chapitre IV: SIMULATION ET RESULTATS.

Figure (IV.1) : Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque.

Figure. (IV.2) : Variation d'éclairement et température en fonction de temps.

Figure (IV.3) : Caractéristique (I-V) avec éclairements variable, pour $T=25^\circ\text{C}$.

Figure (IV.4) : Caractéristique (P-V) avec éclairements Variable, pour $T=25^\circ\text{C}$.

Figure (IV.5) : Les caractéristique (I-V) avec différentes températures, pour $E=1000W/m^2$.

Figure (IV.6) : Les caractéristique (P-V) avec différentes températures, pour $E=1000W/m^2$.

Figure (IV.7) : Hacheur Buck.

Figure (IV.8) : Schéma block d'un Hacheur Buck.

Figure (IV.9) : Schéma block d'un MPPT.

Figure (IV.10) : Organigramme d'un MPPT PandO.

Figure. (IV.11) : Couplage GPV & Hacheur Buck avec MPPT.

Figure (IV.12) : Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale pour $T_{el} = 80^{\circ}C$.

Figure (IV.13) : Modélisation d'un électrolyseur.

Figure. (IV.14) : Variation de courant d'électrolyseur en fonction de temps.

Figure. (IV.15) : Variation tension d'électrolyseur en fonction de temps.

Figure (IV.16) : Schéma Block d'un couplage GPV avec Hacheur Buck et MPPT & électrolyseur.

Figure. (IV.17) : Evolution de volume en fonction de temps.

Figure. (IV.18) : Evolution de débit en fonction de temps.

Figure. (IV.19) : Evolution de pression en fonction de temps.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I: GÉNÉRALITÉ SUR L'HYDROGÈNE

Tableau (I.1) : Propriétés chimique de L'hydrogène.

Tableau (I.2) : Consommation industrielle de l'hydrogène.

Tableau (I.3) : Origine de l'hydrogène produit (coproduction incluse).

Tableau (I.4) : Les différents types de réservoirs gazeux.

Chapitre II: ÉTUDE SUR LES GÉNÉRATEURS PHOTOVOLTAÏQUES.

Chapitre III: ÉTUDE SURE LES ELECTROLYSEURS.

Chapitre IV: SIMULATION ET RESULTATS.

Tableau (IV.1) : Plaque signalétique de panneau photovoltaïque.

Tableau (IV.2) : Les éclaircissements et les températures de la journée 04/04/2004 à Ouargla.

Tableau (IV.3) : Les caractéristiques d'Hacheur Buck.

Tableau (IV.4) : Les valeurs calculer avec Hacheur et l'MPPT.

Tableau (IV. 5) : Données expérimentales d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-V)

Tableau (IV.6) : Résultats de l'électrolyseurs.

Introduction générale

L'hydrogène, comme vecteur d'énergie, a occupé l'esprit de la nouvelle génération du génie énergétique, ainsi que des néo-environmentalistes. L'idée de l'hydrogène comme source d'énergie va encore plus loin : face à un souci mondial de rupture des gisements fossiles à moyen terme, face au souci de la quasi-dépendance de l'industrie et des foyers à l'électricité du fossile, l'hydrogène s'impose comme la source propre et inépuisable, et c'est ce qui nous motive au centre de développement des énergies renouvelables.

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 entre un générateur photovoltaïque et un électrolyseur de type PEM avec un convertisseur DC/DC et MPPT pour produire de l'hydrogène, cette étude 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. Donc pour produire l'hydrogène on utilisant des ressources renouvelables come l'énergie solaire avec un électrolyseur PEM.

On utilisant l'électrolyseur PEM car il a été développée pour surmonter les inconvénients de l'électrolyse (alcaline et l'eau) comme le rendement énergétique.

L'objectif de notre travail est de faire une étude par simulation de l'association d'un générateur photovoltaïque et d'un électrolyseur PEM coupler avec un convertisseur DC/DC afin de produire l'hydrogène, ce travail a été organisé en quatre chapitres :

CHAPITRE I:

On va présenter d'une façon générale l'hydrogène, ces caractéristiques et ces modes de production et les méthodes de stockages et la procédure de transport.

CHAPITRE II:

On va faire une étude sur les systèmes Photovoltaïques et leur modélisation

CHAPITRE III:

On va présenter les différents type d'électrolyseurs et leur mode de fonctionnement et avec précise l'électrolyseur de choix de type (PEM.)

et on va présenter les différents type d'électrolyseurs et leur mode de fonctionnement et avec précise l'électrolyseur de choix de type (PEM.)

CHAPITRE IV:

On va faire une étude de simulation par matlab par l'association d'un générateur photovoltaïque et d'un électrolyseur PEM coupler avec un convertisseur DC/DC (Buck) pour calculer le débit de l'hydrogène produit et son pression.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ SUR L'HYDROGÈNE

I.1 Introduction:

Les différentes sources d'énergie qui peuvent être utilisées pour répondre à nos besoins quotidiens se sont avérées sûres, fiables mais à moyen terme. Différentes préoccupations ont poussé des chercheurs et des organisations locales et du monde entier à proposer des alternatives aux autres sources d'énergie temporaires (pétrole, charbon, etc.).

L'hydrogène, comme vecteur d'énergie, est un moyen de stockage de l'énergie et peut faciliter l'intégration de sources d'énergie renouvelables produites par intermittence telles que l'énergie solaire ou éolienne. Il peut être utilisé pour générer la chaleur et l'électricité que nous consommons pour chauffer les bâtiments ou fournir de l'éclairage. Il peut être utilisé pour alimenter des véhicules électriques pour une mobilité propre.

L'hydrogène est également une matière première pour la production de carburants synthétiques ou de produits chimiques. Enfin, l'hydrogène peut agir comme un pont entre différents réseaux énergétiques (électricité, gaz naturel et chaleur), ouvrant la voie aux aspects économiques et environnementaux globaux technologiques des systèmes énergétiques régionaux en combinant différentes voies technologiques d'électrolyseurs, de piles à combustible, d'unités de méthanisation.

I.2. Historique de l'hydrogène:

L'histoire de l'hydrogène remonte au début du 16^{ème} siècle quand l'alchimiste suisse Paracelse étudia l'action du vitriol, en fait de l'acide sulfurique, sur des copeaux de fer.

Il nota seulement qu'il fut intrigué par ce gaz inodore qui s'en dégageait. Il faut ensuite

Attendre le milieu du 18^{ème} siècle pour que le chimiste britannique Henry Cavendish reprenne les travaux de Paracelse, et que le chimiste suisse Théodore Turquet de Mayerne, en 1703, mette en évidence l'inflammabilité de ce gaz baptisé « air inflammable ». Ces travaux furent ensuite poursuivis par de nombreux chimistes, dont le français Lavoisier. Il en résulta une communication à l'Académie des Sciences en 1783 ; c'est alors qu'il fut appelé gaz hydrogène, ce qui signifie ; gaz qui produit de l'eau [1].

Dès le début du 19^{ème} siècle, l'hydrogène pénétra de nombreux secteurs industriels, comme la chimie, la pétrochimie et la fabrication des engrais ... et même un peu plus tard, en 1874, dans la littérature avec Jules Verne qui fut très séduit par ses propriétés).

Dans le même temps, l'hydrogène commença à être utilisé dans le domaine énergétique pour l'éclairage public et les applications domestiques (le gaz de ville étant un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone dans des proportions voisines de 50-50%) dans de

nombreux pays, dont la France jusqu'en 1971, avant d'être progressivement remplacé par le gaz naturel

Depuis, l'hydrogène est de plus en plus utilisé dans divers secteurs industriels, tant pour ses propriétés chimiques que pour ses performances énergétiques [2].

I.3. Définition:

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple, son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron [3].

C'est l'élément le plus abondant de l'univers, le 9ème sur la Terre et le 2ème dans les océans. Son nom proposé en 1787 entre autres par Lavoisier et venant du Grec. La molécule de dihydrogène (H₂) est constituée de deux atomes d'hydrogène. On parle communément d'hydrogène pour désigner en fait le dihydrogène. La combustion d'1 kg d'hydrogène libère presque 4 fois plus d'énergie que celle d'1 kg d'essence et ne produit que de l'eau :



L'hydrogène est très abondant à la surface de la Terre mais n'existe pas à l'état pur. Il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau, les hydrocarbures, Les organismes vivants (animal ou végétal) sont également composés d'hydrogène, La biomasse constitue donc une autre source potentielle d'hydrogène.

Extraire l'hydrogène de ces ressources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie. Comme pour l'électricité, on considère ainsi que l'hydrogène est un « vecteur » énergétique.

L'hydrogène pourrait être quasi-inépuisable, à condition de savoir le produire en quantité suffisante à un coût compétitif et, idéalement, à partir d'énergie bas carbone (nucléaire et renouvelables).

On appelle « technologies de l'hydrogène » l'ensemble des technologies étudiées pour produire l'hydrogène, le stocker et le convertir à des fins énergétiques[4].

I.4. Propriétés de l'hydrogène :

I.4.1. Propriétés chimique :

L'hydrogène était déjà connu des alchimistes, qui le préparaient par action des acides sur les métaux sous le nom d'air inflammable. Cavendish fut le premier à le recueillir dans une cloche à mercure et c'est Lavoisier qui lui donna son nom.

La stabilité thermique de la molécule d'hydrogène explique sa faible réactivité à basse

température. Il faut amorcer les réactions à chaud ou utiliser un catalyseur qui favorise sa dissociation. La présence de l'unique électron sur un niveau de faible énergie (le niveau 1s à l'état fondamental) explique la valeur élevée du potentiel d'ionisation (13,6 eV) – du même ordre de grandeur que celle du krypton.

La conséquence en est l'absence de composés solides contenant l'hydrogène sous forme d'ions H⁺. L'affinité faible, mais positive (67 kJ. mole⁻¹), limite l'existence d'ions H⁻ aux combinaisons avec les éléments les plus électropositifs, donc les plus faciles à ioniser. Ces remarques expliquent que, dans la plupart de ses composés chimiques, l'hydrogène possède des liaisons fortement covalentes[5].

	Hydrogène H ₂	Méthane CH ₄	Vapeur d'essence
Masse volumique (Kg/m ³)	0.08	0.7	4.4
Coefficient de diffusion dans l'air (cm ² /s)	0.61	0.16	0.05
Température d'autoinflammation dans l'aire (°C)	585	537	228-501
Limites d'inflammabilité dans l'air (% voL) aux conditions normales de temperature et de pression	4-75	5.3-17	1.1-3.3
Limites dendétonation dans l'air (% vol)	13-65	6.3-13.7	1.1-3.3
Énergie minimale d'inflamation pour un mélange aircombustible dans les proportions stoechiométriques (ml)	0.02(29.5% H ₂ dans l'air)	0.29(9.5%CH ₄ dans l'air)	0.24(1.8% de vapeur d'essence dans l'air)
Énergie explosive (kg TNT/m ₃)	2.02	7.03	44.22
Vitesse de combustion dans l'air (m/s)	2.70	0.37	0.30
Vitesse de detonation (m/s)	1500-2100	1400-1800	1400-1700
Tempurature de flame°C	2045	1875	2200

Tableau (I.1): Propriétés chimique de L'hydrogène

I.4.2. Propriétés physiques:

La plupart des propriétés caractérisent la légèreté de l'hydrogène: densité très faible (l'air est 14,5 fois plus dense), facilité de diffusion à travers les parois métalliques, effusion à travers les pores. La faiblesse des forces de Van der Waals explique les bas points d'ébullition (20,4 K) et de fusion (14,1 K), et le comportement de gaz parfait.

Le spectre d'émission de l'hydrogène a fourni la première illustration de la théorie de Bohr, les fréquences correspondant à la formule:

$$V=Rc*(1/m^2-1/n^2) \quad \text{eq.I.2}$$

Dans laquelle R est la constante de Rydberg, c la vitesse de la lumière, et m et n des nombres entiers.

Distance interatomique au sein de la molécule H₂ est de 0,074 nm. L'enthalpie de dissociation (431,9 kJ (mole⁻¹)) est relativement élevée : la stabilité thermique explique qu'à une pression d'un bar, un dix-millionième seulement des molécules soient dissociées à 1 000 K et 62bar. 100 à 4 000 K.

Cette stabilité thermique permet de comprendre inversement le fonctionnement du chalumeau à hydrogène atomique de Langmuir : l'hydrogène dissocié à haute température par passage dans un arc électrique se recombine en entraînant une forte élévation de température. Le procédé est utilisé commodément pour effectuer des fusions nécessitant un milieu réducteur, celles de métaux réfractaires comme le tungstène et le molybdène [5].

I.5. Les utilisations de l'hydrogène :

Deux grandes familles d'usages doivent être distinguées ; l'hydrogène énergie et l'hydrogène pour l'industrie. Même si la recherche actuelle porte principalement sur la première utilisation, avec comme objectif d'obtenir un nouveau vecteur énergétique[6] pour le stockage d'électricité, le *power-to-gas* [7] ou la mobilité, les applications pratiques dans l'industrie restent majoritaires. Au sein de ces dernières, l'hydrogène est principalement valorisé en tant que matière première.

Il constitue ainsi un élément essentiel dans différents procédés chimiques (**Tableau I.2**). Le premier poste de consommation est la fabrication d'ammoniac, composant de base dans l'industrie des engrais[6]. Si, en comparaison avec cet usage, la fabrication d'autres produits chimiques est minoritaire (amines, méthanol, eau oxygénée), son utilisation dans l'élaboration de matériaux (métaux, verres), la soudure ou l'industrie alimentaire tend à augmenter [8].

En outre, près de 44% de la consommation mondiale d'hydrogène (**Tableau I.2**) est le fait de l'industrie pétrolière. Le respect des normes environnementales y requiert de

grandes quantités d'hydrogène, notamment lors du procédé de désulfuration. Contenu dans les combustibles fossiles, le soufre se transforme en oxyde de soufre lors de leur combustion [9]. Il appartient donc aux acteurs du raffinage de retirer ce soufre en amont de la combustion. L'extraction et le raffinage d'hydrocarbures fournissent ainsi l'énergie nécessaire à la production d'hydrogène, permettant finalement un meilleur raffinage d'hydrocarbures.

	Monde (2013)	Union européenne (2006)	France (2008)
Raffinage du pétrole	44%	47%	59%
Ammoniac, engrais	38%	39%	26%
Chimie de base (don't méthanol)	8%	8%	10%
Métallurgie	-	6%	1%
Divers	10%	-	4%
Total (en milliers de tonnes par an)	60000	8250	922

Tableau (I.2): Consommation industrielle de l'hydrogène

I.6. La production de l'hydrogène:

L'hydrogène produit au cours de l'année 2014 provient à 96% de procédés utilisant des hydrocarbures et à 4% de l'électrolyse (**Tableau I.3**). Cependant, ces données considèrent aussi la coproduction; l'émission d'hydrogène non volontaire lors du raffinage (via les hydrocarbures liquides), la production de coke (via le charbon dans la sidérurgie), la production de dichlore et d'hydroxyde de sodium (via l'électrolyse). Finalement, seul 10% de l'utilisation de l'électrolyse de l'eau a pour objectif la production d'hydrogène [8].

Dans ce tableau on va présenter les sources les plus utilisé dans la production de l'hydrogène [8].

Origine de l'hydrogène	Pourcentage
Gaz naturel	49%
Hydrocarbures liquides	29%
Charbon	18%
Électrolyse	4%

Tableau (I.3): Origine de l'hydrogène produit (coproduction incluse)

I.7. Différents procédés de production:

Plus de 96% de la production d'hydrogène est encore issue d'énergies fossiles (gaz naturel, Hydrocarbures liquides, Charbon) (**Tableau I.3**). On appelle « hydrogène bas carbone » l'hydrogène produit grâce à une source d'énergie renouvelable ou nucléaire (ou par vaporeformage de gaz naturel si le procédé est associé à une unité de captage, stockage et valorisation du CO₂) [9].

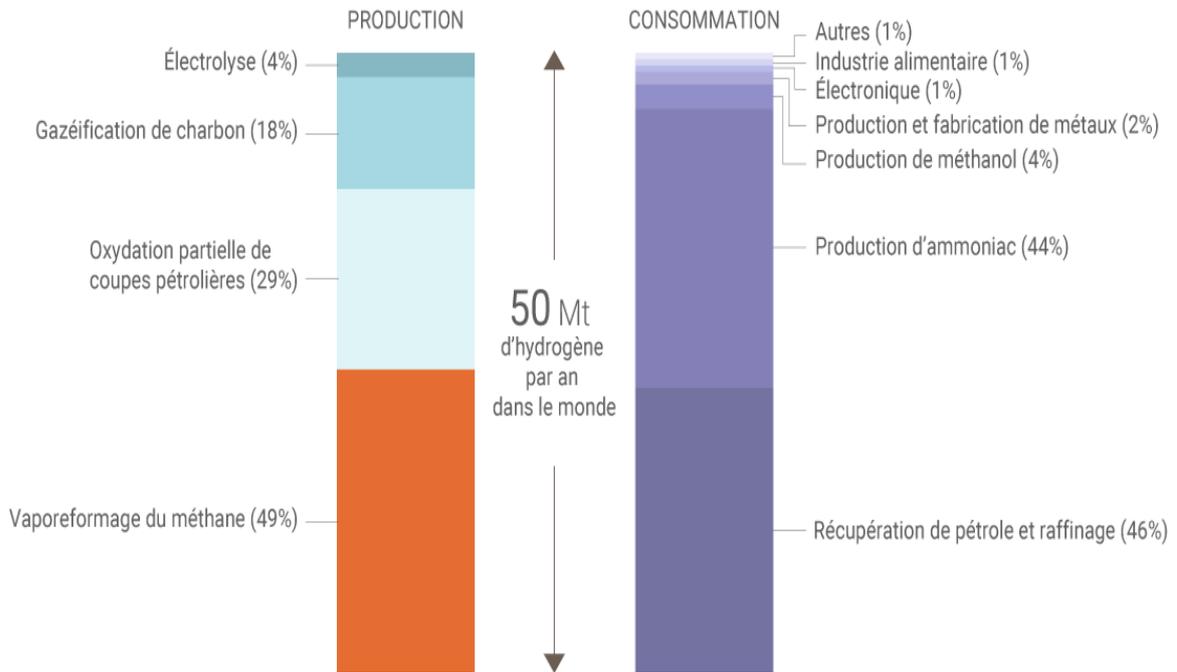


Figure (I.1): Production et consommation de l'hydrogène dans le monde

L'hydrogène est produit par la séparation d'éléments chimiques dont l'atome H est un composant et par la mobilisation d'une source d'énergie.

Donc les différents procédés de la production de l'hydrogène sont:

I.7.1. Reformage des combustibles fossiles à la vapeur d'eau (ou vaporeformage):

Procédé de référence, le plus économique (mais son prix de revient reste bien plus élevé que celui du gaz naturel).

Le vaporeformage du gaz naturel est la méthode la plus courante. Elle casse la molécule de méthane (CH₄), principal composant du gaz naturel, qui possède 4 atomes d'hydrogène, avec de la vapeur d'eau à 900°C. Deux réactions successives permettent de produire de l'hydrogène (H₂) et du dioxyde de carbone (CO₂):



Ce procédé génère du dioxyde de carbone qui pourrait être capté et stocké dans le futur. Le vaporeformage du biogaz est également possible[9].

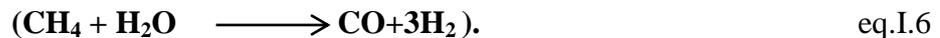
I.7.2. L'oxydation partielle:

L'hydrogène peut être synthétisé par l'oxydation des hydrocarbures en présence d'air ou d'oxygène pur, un processus appelé oxydation partielle, qui est également un processus de production majeur. Dans le cas du méthane, l'oxydation partielle de ce dernier peut être décrite par l'équation suivante[9]:



I.7.3. Le reformage aérotherme:

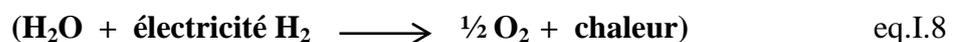
Le reformage auto thermique est une combinaison d'oxydation partielle et de reformage à la vapeur, comme le montre l'équation suivante:



Ce procédé sert à compenser la réaction endothermique de formation de vapeur par une réaction exothermique d'oxydation partielle. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle avec de la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. Ils sont ensuite envoyés dans des réacteurs (catalyseurs à base de nickel à une pression de 20 à 60 bars et à une température de 900 à 1100°C) pour la production de gaz de synthèse. La composition typique du gaz résultant est : 68 % H₂, 20 % CO, 10 % CO₂, de petites quantités de CH₄ et N₂ (Nitrogen)[9].

I.7.4. Électrolyse de l'eau:

Procédé qui nécessite de l'électricité (rentable si la production d'électricité présente elle-même un coût peu élevé). Le courant électrique décompose la molécule d'eau en hydrogène et en dioxygène (O₂) [9].



Ce procédé correspond à la réaction inverse de celle se produisant dans une pile à combustible. Il permet de produire un hydrogène très « propre » (si l'électricité est produite en utilisant des sources renouvelables) mais n'est pas encore viable économiquement (2 à 3 fois plus coûteux que le procédé de vaporeformage).

Le rendement de cette technique est de 40% sur toute la chaîne mais peut atteindre 80% en récupérant la chaleur.

Cette électrolyse possède différentes variantes, à différentes températures :

I.7.4.1. Electrolyse basse température (< 200°C) alcaline:

Utilisant une solution aqueuse d'acide sulfurique (H₂SO₄) ou d'hydroxyde de potassium (KOH).

I.7.4.2. Electrolyse basse température (< 200°C) utilisant un électrolyte solide:

Membrane polymère PEMFC conductrice de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

I.7.4.3. Electrolyse à haute température (> 400°C):

Utilisant une membrane céramique conductrice d'ions oxygène (Solid Oxide Fuel Cell), qui doit être couplée à un système solaire à concentration à un réacteur nucléaire à haute température pour profiter d'une source de vapeur bas coût.

I.7.4.4. Gazéification et pyrolyse de biomasse (en particulier de charbon de bois):

Procédé en cours de recherche et développement qui permet par exemple d'obtenir de l'hydrogène par transformation chimique du bois à très haute température (entre 1 200°C et 1 500°C). On obtient un mélange de gaz contenant de l'hydrogène (H₂) et du monoxyde de carbone (CO). Après purification de ce mélange, on obtient de l'hydrogène.

I.7.5. Autres procédés à l'état de recherche:

D'autres techniques de production d'hydrogène sont actuellement à l'étude comme la photoélectrolyse (cellule photoélectrochimique décomposant l'eau sous l'effet de la lumière), la décomposition thermochimique de l'eau (l'eau est chauffé à 800/1 000°C grâce à l'énergie nucléaire) ou encore des microorganismes (production d'hydrogène par des bactéries modifiées sous l'effet de la lumière du soleil) [9]. Dans cette figure on va présenter la filière de l'hydrogène .

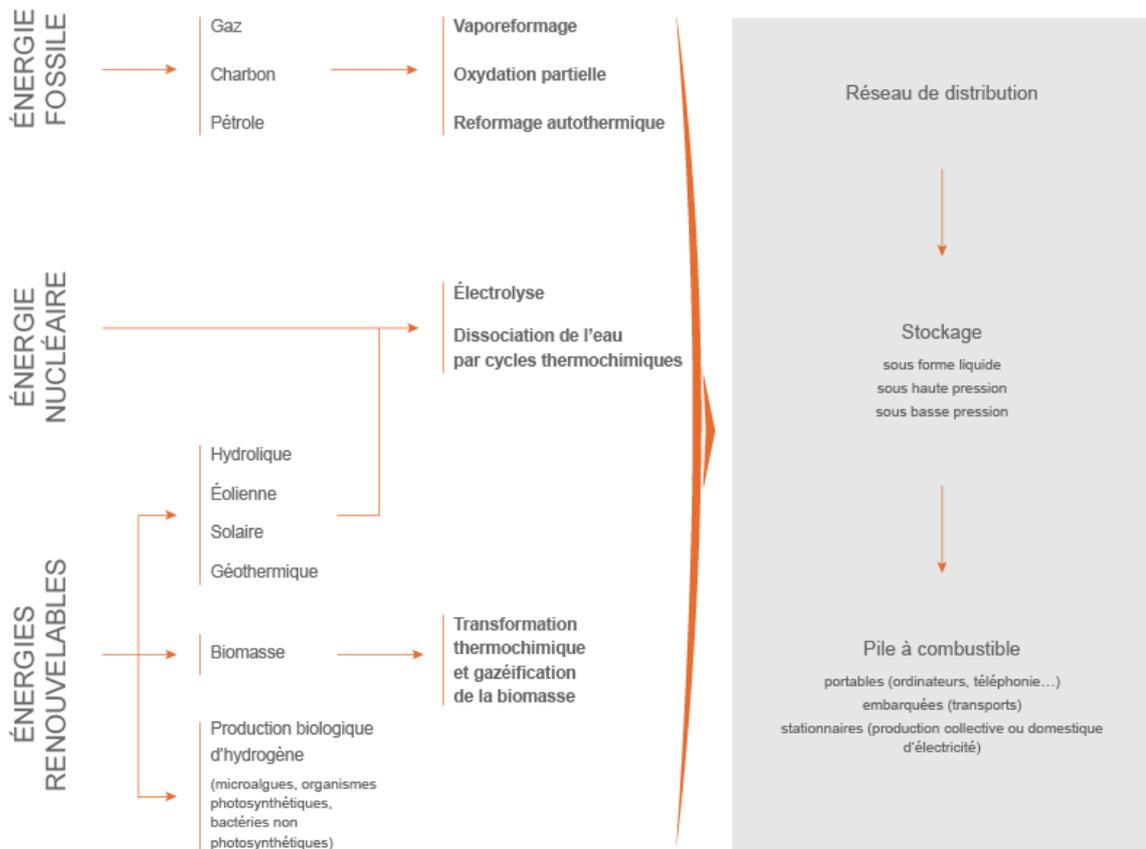


Figure (I.2) : La filière hydrogène

I.8. Les application de l'hydrogène:

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Il a l'avantage de présenter une capacité de stockage (problématique avec l'électricité) et de pouvoir être produit sans émission de CO₂. En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi [9]:

I.8.1. Des applications stationnaires:

Stockage d'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur grâce à la cogénération, ce qui permettrait le développement des bâtiments à énergie positive.

I.8.2. Des applications mobiles:

L'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques (électromobilité de 2^{ème} génération, dite 2G, la première correspondant aux véhicules électriques).

I.8.3. Des applications industrielles:

L'hydrogène est un composant chimique très employé dans l'industrie. Notons que l'hydrogène est déjà largement utilisé dans le domaine de l'aérospatial comme combustible pour la propulsion des fusées.

Dans ce figure on va présenter les différents procédés de production et les applications de l'hydrogène

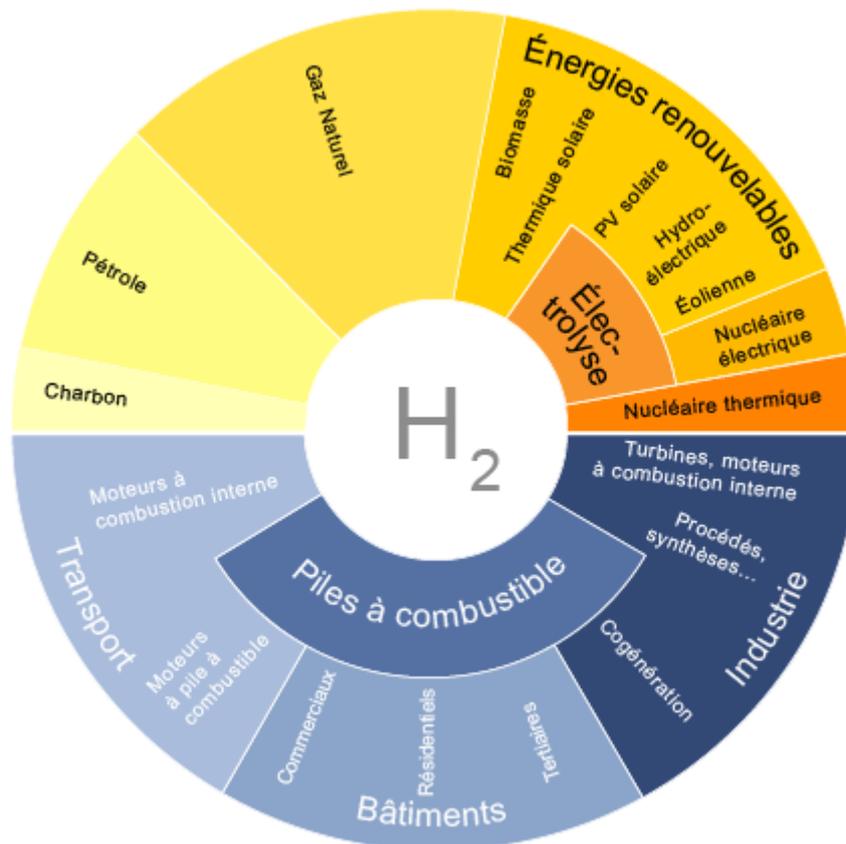


Figure (I.3) : La chaîne de production et applications de l'hydrogène

I.9. Le stockage de l'hydrogène:

Trois grandes familles se distinguent pour le stockage de l'hydrogène: les voies solides, liquides et gazeuses [10].

I.9.1. Sous pression:

La voie gazeuse est la plus simple et la plus répandue des technologies de stockage [11]. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs sous pression. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'hydrogène stocké est grande. Les réservoirs actuellement développés fonctionnent avec des pressions maximales aux alentours de 300-350 bar (30-35 MPA)

voir 480 bar. Le travail actuel consiste à créer des réservoirs gazeux sous 700 bar afin d'améliorer la capacité volumique, principal défaut de cette technologie. Pour leur conception, les réservoirs gazeux sont regroupés sous 4 types:

Type I:

Réservoir cylindrique en métal

Type II:

Réservoir contenant une enveloppe de métal pour la tenue mécanique, frettée par des fibres continues imprégnées de résine.

Type III:

Réservoir constitué d'une enveloppe de métal pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.

Type IV:

Réservoir constitué d'une enveloppe non métallique pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.

Type	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Tableau (I.4): Les différents types de réservoirs gazeux

I.9.2. Stockage solide:

Le stockage solide fonctionne dans la condition standard de température et de pression. Le stockage solide se présente sous plusieurs formes. (**Tableau I.4**), [11]

Le stockage de l'hydrogène sous une forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est aussi une piste de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau.

Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates.

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et de décharge de l'hydrogène dans ces matériaux.

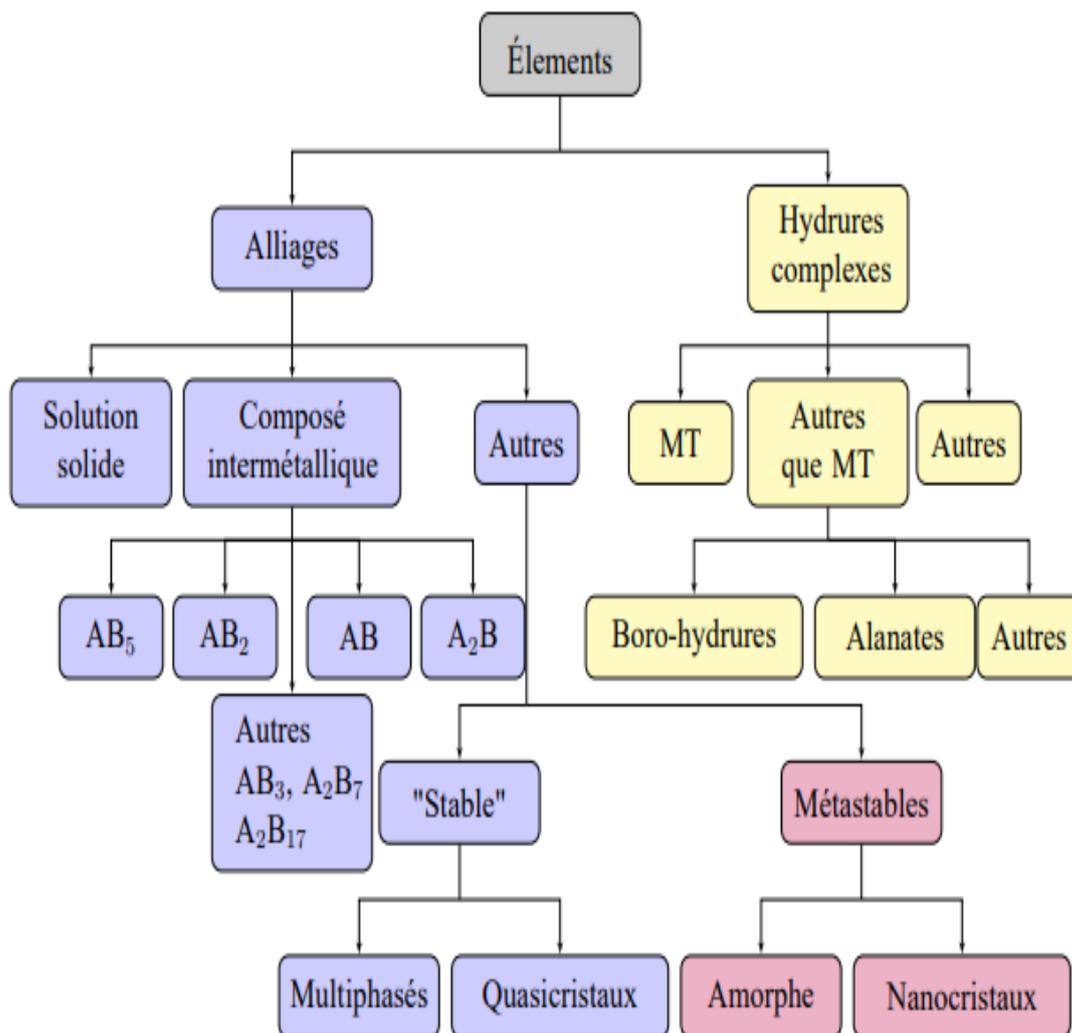


Figure (I.4): Famille pour le stockage solide

I.9.3. Stockage liquide:

Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à transformer de l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à très basse température.

L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de -252,87°C.

Ainsi, à -252,87°C et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m³. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres.

Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés.

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide est pour l'instant réservé à certaines applications particulières de très hautes technologies comme la propulsion spatiale. Par exemple, les réservoirs de la fusée Ariane, conçus et fabriqués par Air Liquide, contiennent les 28 tonnes d'hydrogène liquide qui vont alimenter son moteur central. Ces réservoirs sont une véritable prouesse technologique : ils ne pèsent que 5,5 tonnes à vide et leur paroi ne dépasse pas 1,3 mm d'épaisseur[11].

(La Figure I.5) présente Réservoir d'hydrogène liquide susceptible d'être placé à bord d'une série 750 hl

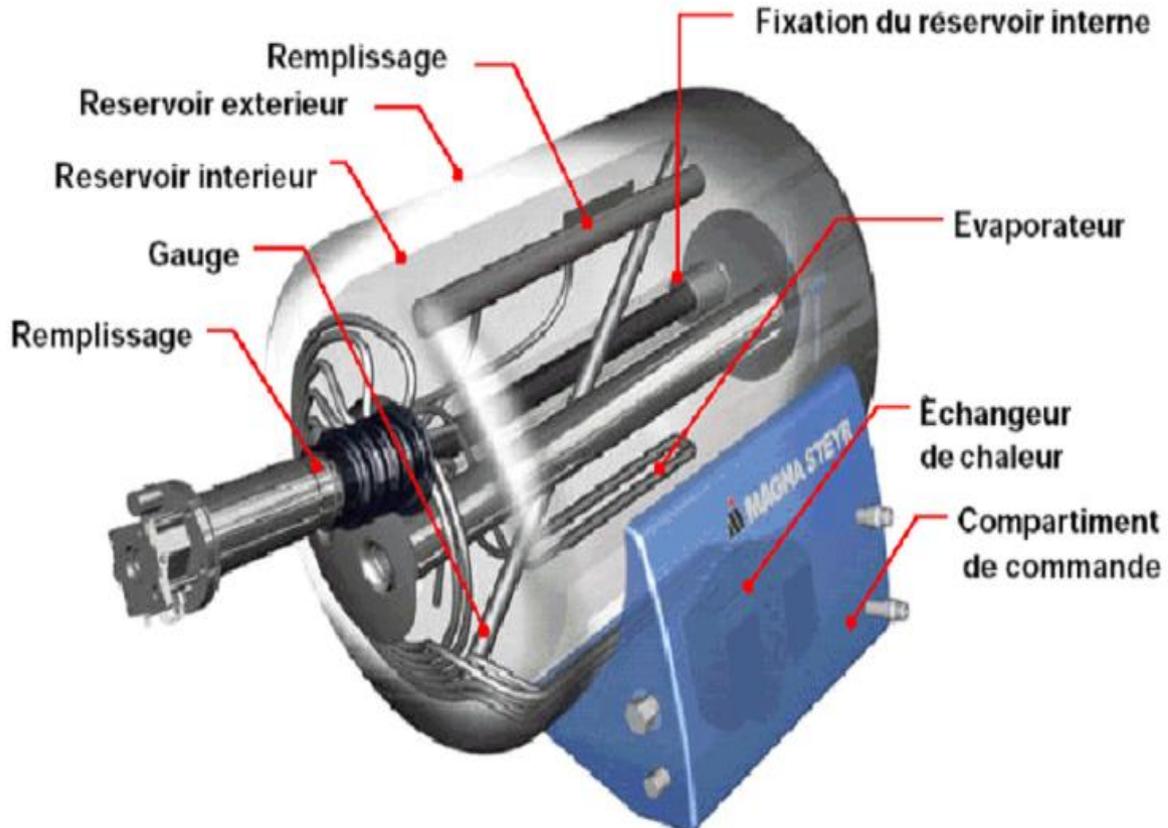


Figure (I.5): Réservoir pour l'hydrogène liquide

I.10. Transport de l'hydrogène:**I.10.1. Transport par route:**

Le transport de l'hydrogène liquide par camion est le plus courant pour l'alimentation des stations-services à hydrogène comme cela est le cas pour les stations de démonstration mises en œuvre dans de nombreux pays. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs cryogéniques cylindriques à l'image des camions citernes transportant des liquides. Ces véhicules peuvent transporter jusqu'à 3.5 T d'hydrogène liquide pour un poids total de 40 T. Quand il est utilisé en grande quantité comme substance chimique de base (industrie pétrolière, synthèse de l'ammoniac) l'hydrogène est en général acheminé par gazoduc, le transport sous forme liquide par camion étant plutôt réservé à des applications nécessitant des quantités moindres, comme l'industrie électronique [12].

I.10.2. Transport par mer:

Le fait que l'hydrogène liquide soit dense et que les réservoirs cryogéniques le contenant puissent avoir de très importantes capacités suggère assez naturellement le transport par mer depuis les lieux pouvant avoir une grande capacité de production à ceux de forte consommation. L'hydrogène liquide aurait été contenu dans de grands réservoirs cryogéniques sphériques à double paroi de 3000 m³ [12].

I.10.3. transport 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 [12].

I.11. Les avantages et les inconvénients de l'hydrogène: [13]

Les avantages de l'hydrogène sont nombreux: c'est une réelle solution pour remplacer les énergies fossiles (notamment pour les transports car l'autonomie est grande).

On consomme de l'énergie sans directement émettre de gaz à effet de serre.

Mais cette technologie doit aussi s'améliorer pour :

- être uniquement produite à partir de sources renouvelables, ce qui n'est pas du tout le cas aujourd'hui.

- durer plus longtemps et être moins chère.
- améliorer l'efficacité car toutes ces conversions, ça entraîne des pertes !
- recycler tous les matériaux utilisés.

I.12. Conclusion:

Dans ce chapitre on a conclu l'hydrogène peut être produit n'importe où avec n'importe quelle source d'énergie, et il peut aider à protéger l'environnement et compenser l'épuisement des ressources fossiles. Cependant, force est d'admettre que son (émergence) a été retardée par plusieurs points de résistance sur les plans technique et économique.

Dans le prochain chapitre on va faire un coup d'œil sur les panneaux photovoltaïque

CHAPITRE II

ÉTUDE SUR LES GÉNÉRATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

II.1 Introduction:

Les énergies renouvelables (ou ER) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine[14].

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe de rayonnement solaire. Produite par le soleil sous forme des photons en énergie électrique à l'aide des méthodes de conversion nommées 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[15].

II.2. Énergie du soleil:

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques): la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité [14].

II.2.1. Rayonnement:

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques.

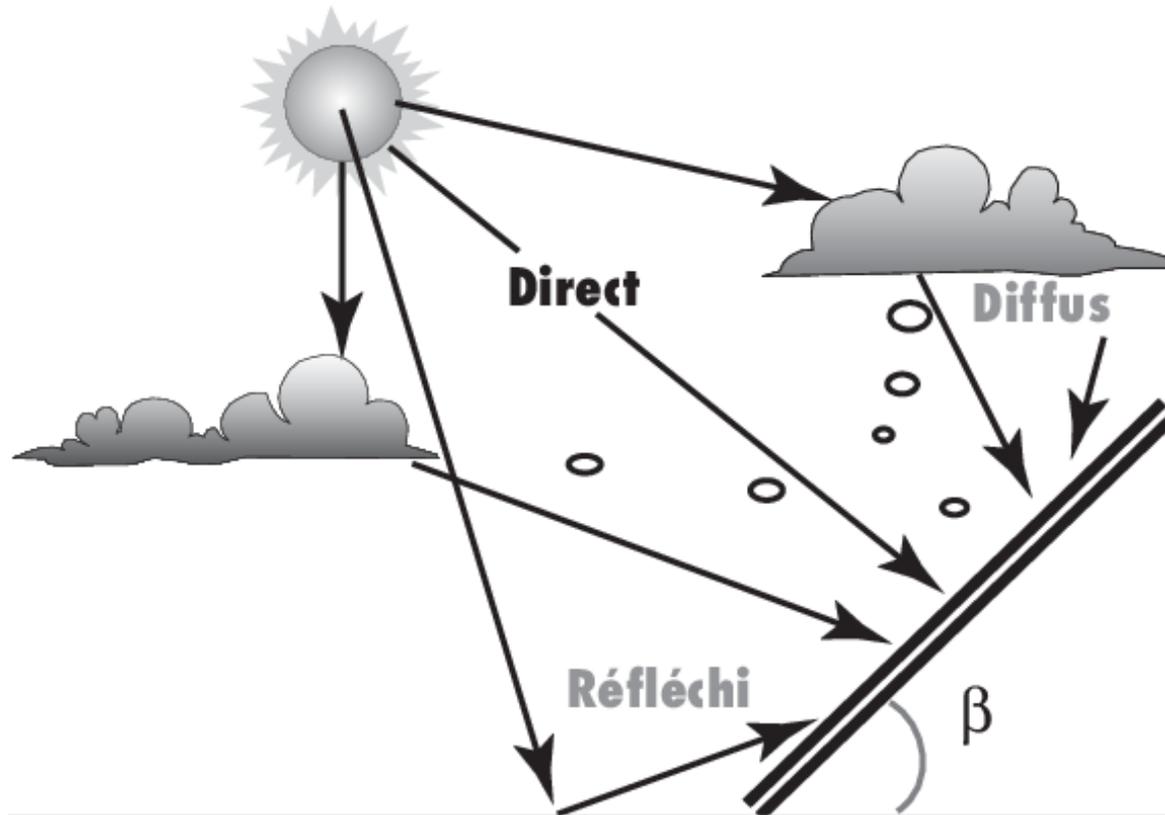


Figure (II.1): Composantes du rayonnement solaire

II.2.1.1. Rayonnements direct:

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs [16].

II.2.1.2. Rayonnements diffus:

Le rayonnement diffus se produit lorsque le rayonnement solaire direct est diffusé par les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et diverses molécules en suspension dans l'atmosphère, ainsi que de la réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas la direction définie par le soleil vers un point d'observation à la surface de la Terre [17].

II.2.1.3. Rayonnement réfléchi:

L'albédo (réfléchi) est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [18].

II.3. Cellule photovoltaïque:

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques à base de semi-conducteurs. Ils convertissent directement l'énergie solaire en électricité, appelés cellules solaires, et sont à la base des installations photovoltaïques. Il existe deux types courants de cellules photovoltaïques: amorphe et cristalline, mais la plupart des cellules sont à base de silicium.

Les piles cristallines sont utilisées depuis environ 30 ans. Mais actuellement les cellules amorphes que nous utilisons sont nouvelles [19].

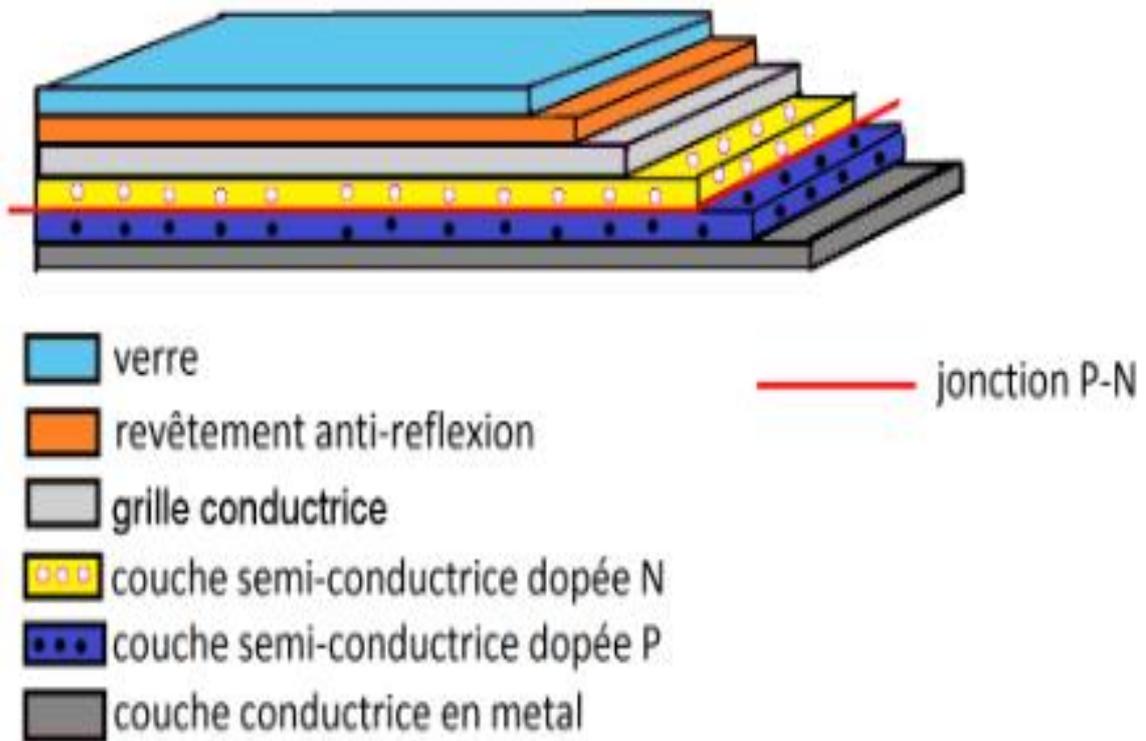


Figure (II.2): Composition d'une cellule photovoltaïque

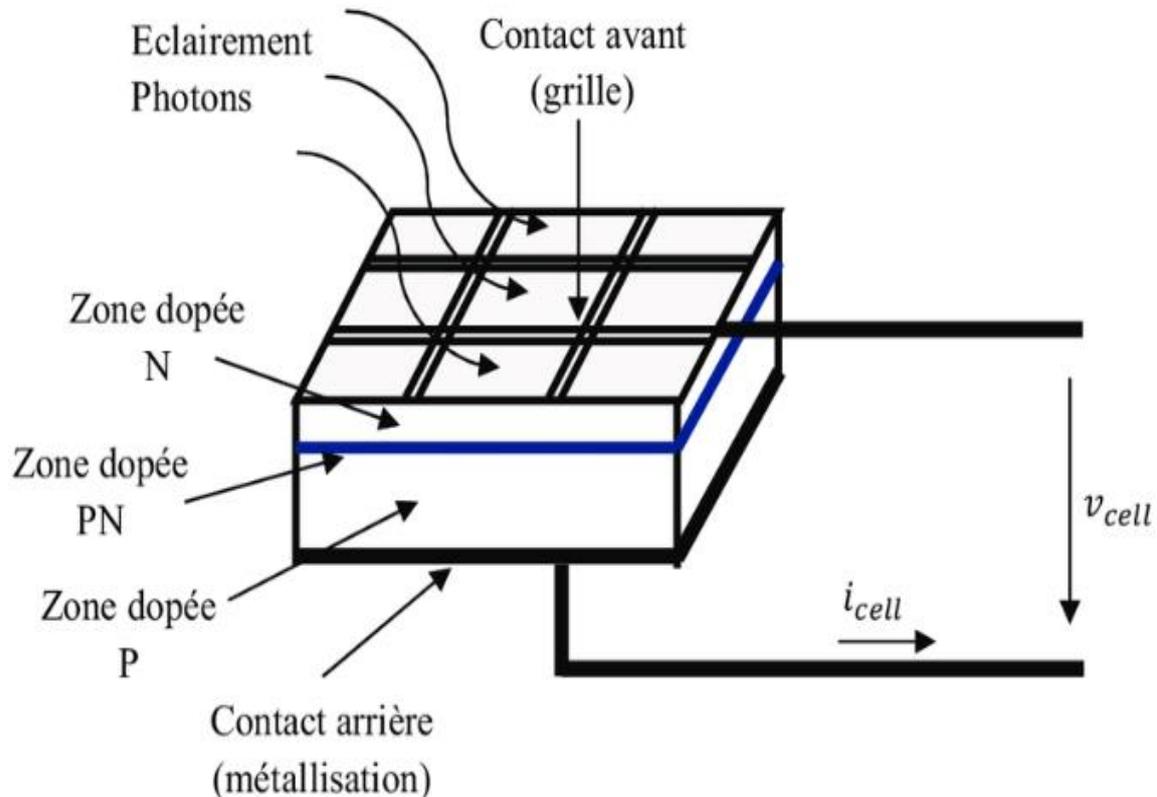


Figure (II.3): Schéma d'une cellule photovoltaïque

II.3.1 Différents types de cellules solaires:

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

II.3.1.1. Cellules monocristallines:

Panneaux photovoltaïques et les cellules monocristallines sont première cellule solaire génération, ils ont développé d'un morceau de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et nécessite de l'énergie ; plus cher, mais plus cher L'efficacité est supérieure à celle du poly silicium. Silicium brut est fondu pour former des marches.

En refroidissant Le silicium est lent et contrôlé, nous Obtenir un monocristal. Puis défile de silicone. Retour divers traitements (traitement Surface acide, dopée et Créer une jonction P-N, déposer couche antireflet, constitue collecteur), la plaquette devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carré, vu de près, Ils ont une couleur uniforme. Leurs rendements varient de 12 à 18% mais méthode La fabrication est dure[20].

II.3.1.2. Cellules poly cristallines:

Panneaux photovoltaïques avec batteries poly cristallin d'un morceau de silicium cristallisé sous forme de cristaux de nombreux. En y regardant de plus près, on peut voir différentes directions cristal différent). Leurs rendements varient de 11 à 15% mais ils coûtent la production est inférieure à cellules monocristallines. Ces cellules, en raison de leur potentielle augmentation de la productivité, imposée aujourd'hui. Avantage par rapport à ces cellules Le silicium monocristallin est ils ont besoin de 2 à 3 fois ils ont moins d'énergie fabrication. Les plaquettes sont sciées une tige de silicone, son Le refroidissement forcé crée un structure poly cristalline[20].

II.3.1.3. Cellules amorphes:

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

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[21].

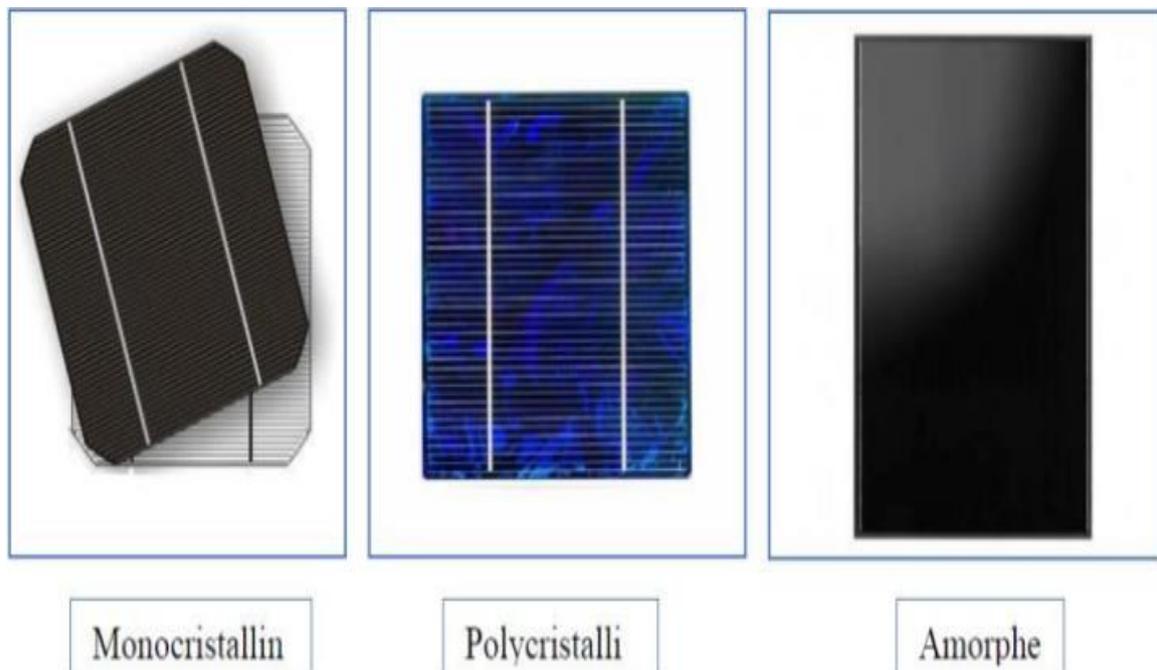


Figure (II.4) : Types de cellules photovoltaïques. Silicium mono cristallin, siliium poly cristallin, silicium amorphe

II.4.Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque:

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique

L'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés[21].

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [21].

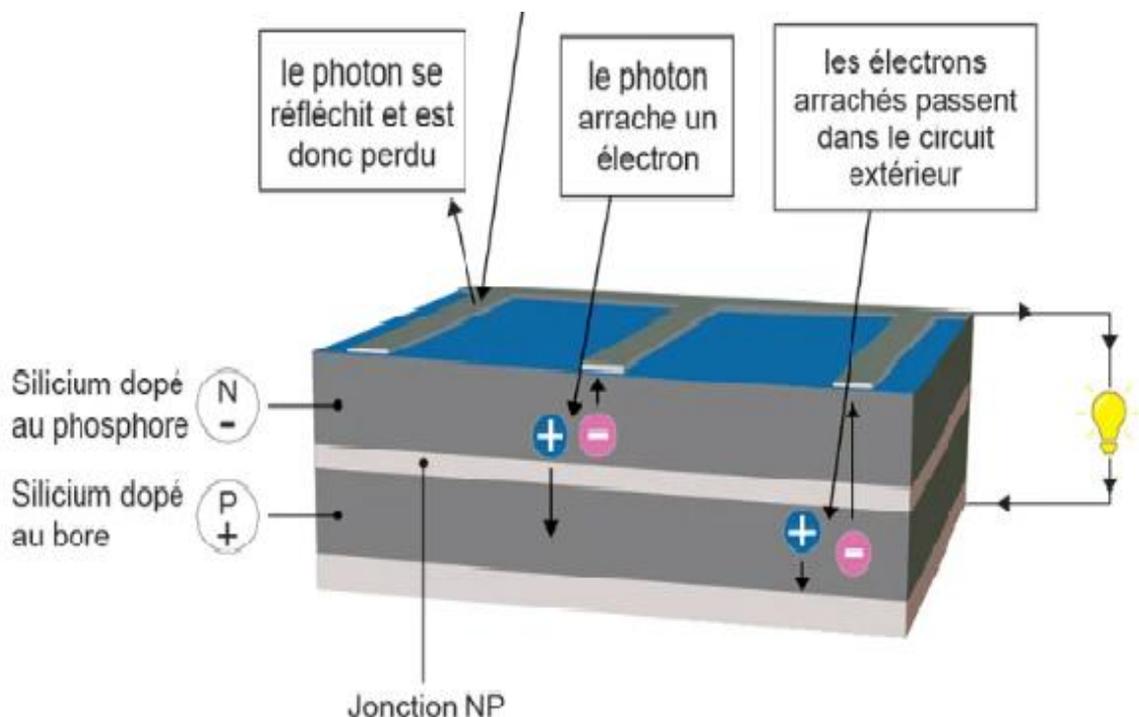


Figure (II.5) Le principe de la cellule photovoltaïque

II.5. Influence de l'éclairement et de température: [22].

II.5.1. Influence de la température:

Le premier paramètre qui affecte la courbe caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque est la température. Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie radiante (rayonnement) en énergie électrique avec un rendement compris entre 5% et 20%, selon la technologie.

Nous avons observé que la température de la cellule photovoltaïque a un effet significatif sur sa tension. Par contre, nous remarquons que l'impact de la température sur le courant délivré par une cellule photovoltaïque est très petit. Il semble que plus la température de la batterie augmente, plus la tension à vide de cette dernière diminue.

La puissance d'une batterie étant égale au produit du courant et de la tension, les mêmes règles s'appliquent à la puissance : Plus la température de la batterie augmente, plus la puissance de cette batterie diminue.

Étant donné que les cellules photovoltaïques sont destinées à être utilisées à l'extérieur, elles résisteront au froid intense des premiers matins d'hiver et aux étés chauds.

Par conséquent, il est important de comprendre leurs caractéristiques électriques sur une large plage de températures. Nous obtenons les caractéristiques courant-tension et puissance-tension comme indiqué ci-dessous:

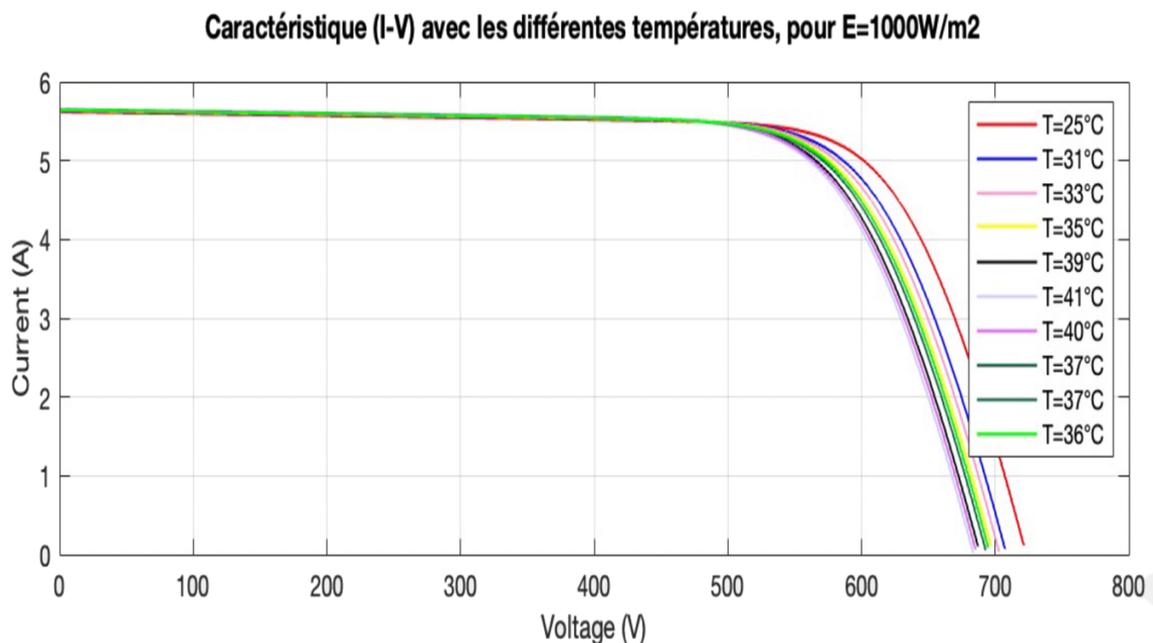


Figure (II.6) Caractéristiques Courant-Tension (I-V) à un éclairement $1000w/m^2$ et différentes températures

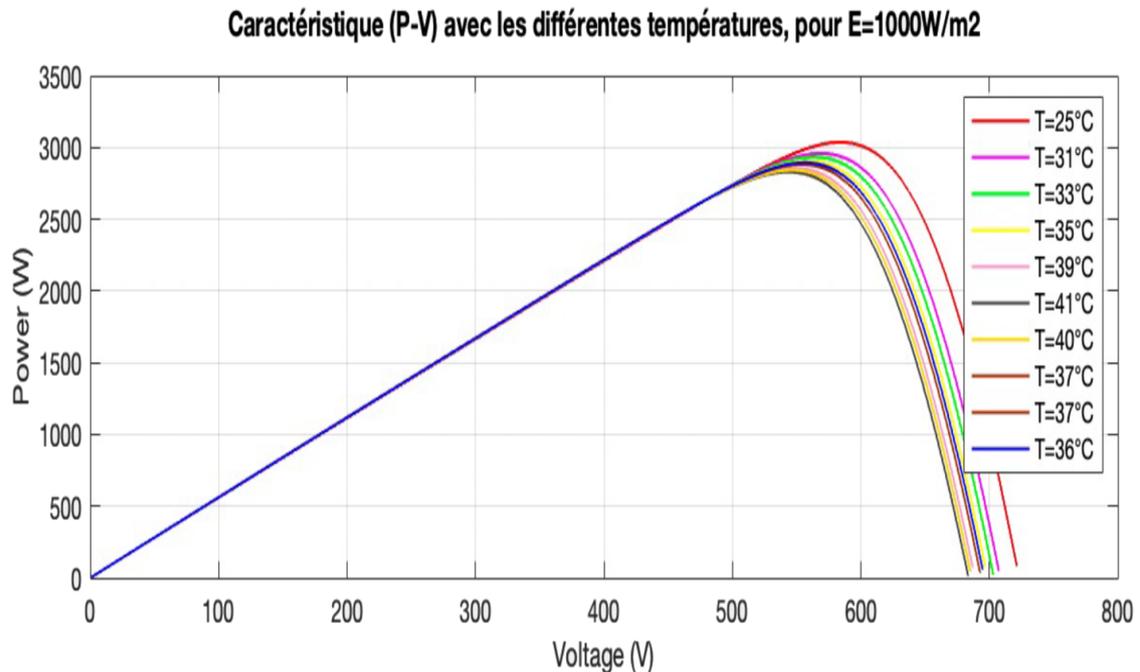


Figure (II.7) Caractéristiques Puissance-Tension (P-V) à un éclairage 1000w/m^2 et différentes températures

II.5.2. Influence de l'éclairage:

Le niveau d'éclairage correspond à l'intensité de la lumière incidente perpendiculairement à la surface de la cellule photovoltaïque. C'est la puissance, mesurée en W/m^2 (watts par mètre carré). Nous utiliserons G pour représenter le niveau d'éclairage de la batterie (ou module).

Le courant électrique délivré par la cellule dépend en grande partie du niveau de luminosité. Nous avons découvert par des expériences que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairage. Quant à la tension, ce niveau de contraste est peu sensible.

Dans l'exemple ci-contre, lorsque nous divisons le niveau de l'éclairage par 2 (de 800 W/m^2 à 400 W/m^2), on remarque que le courant de court-circuit I_{sc} est également divisé par 2 (de $6,5\text{ A}$ à $3,25\text{ A}$). La tension du circuit U_{co} chute de 4 %. Au cours de la journée, l'intensité lumineuse dans la batterie variera entre 0 W/m^2 et 1000 W/m^2 . Il est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant tension et puissance-tension en fonction du niveau d'éclairage, ainsi qu'illustré sur le graphe ci-dessous:

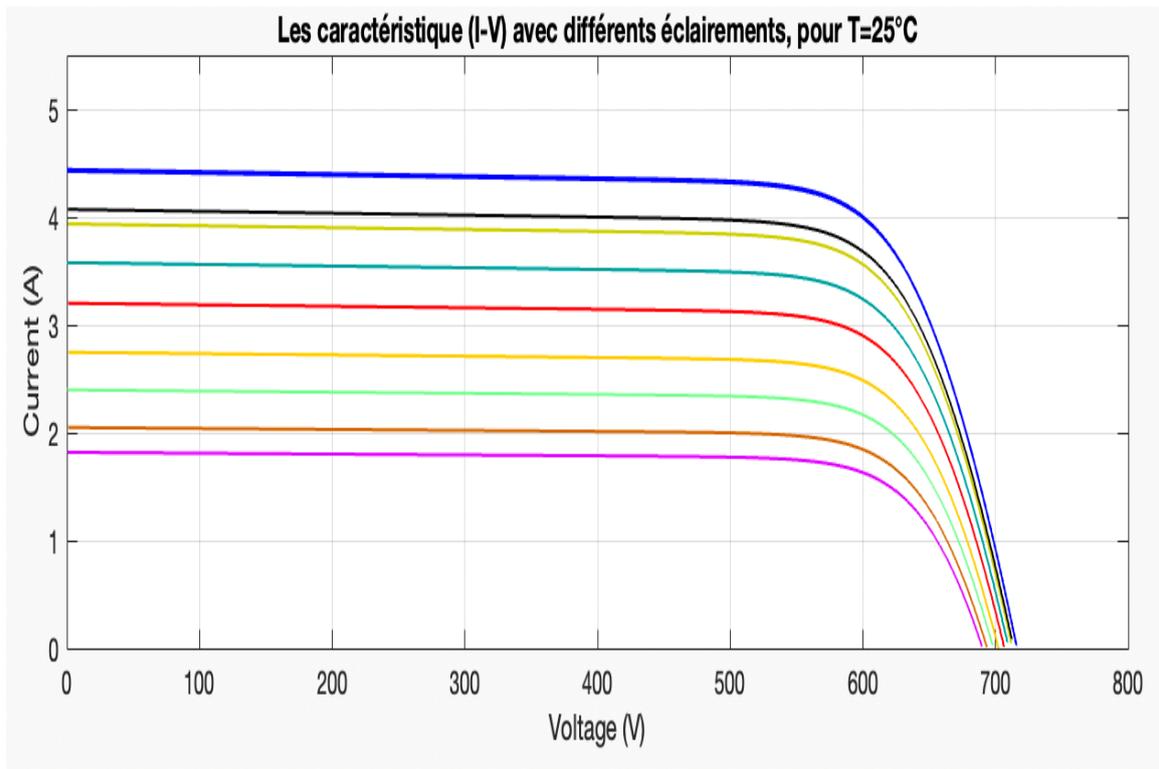


Figure (II.8) Caractéristiques Courant-Tension (I-V) à une température de 25 Co et différents niveaux d'éclairément.

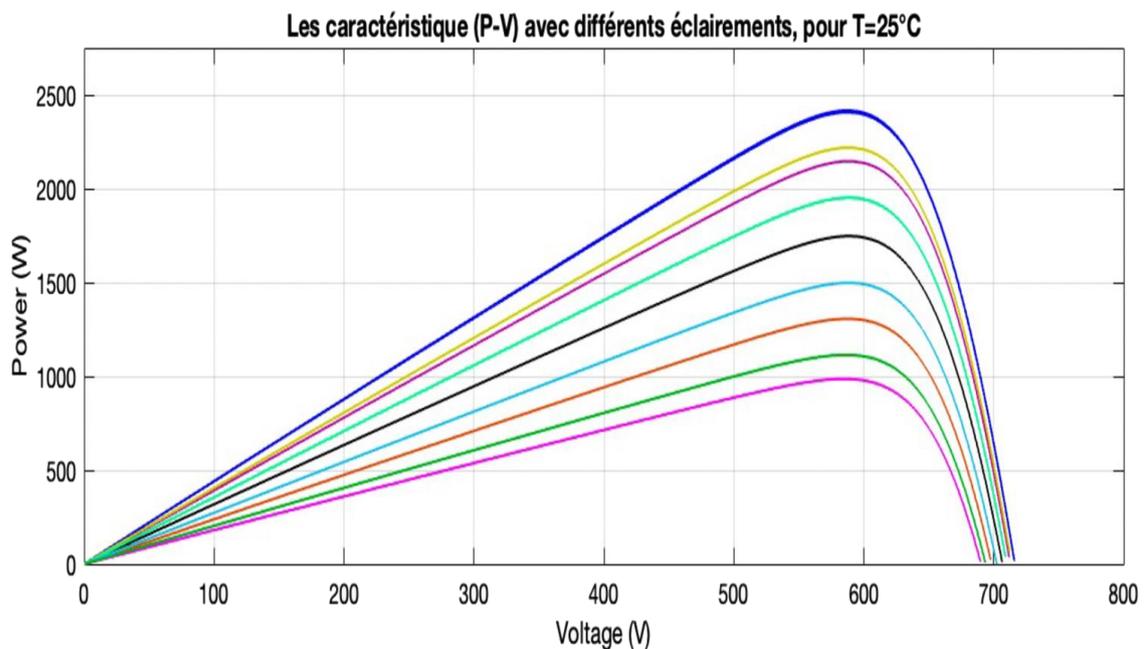


Figure (II.9) Caractéristiques Puissance-Tension (P-V) à une température de 25 Co et différents niveaux d'éclairément.

II.6.Association des cellules photovoltaïques PV:

II.6.1. Association en série:

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 série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule[23].

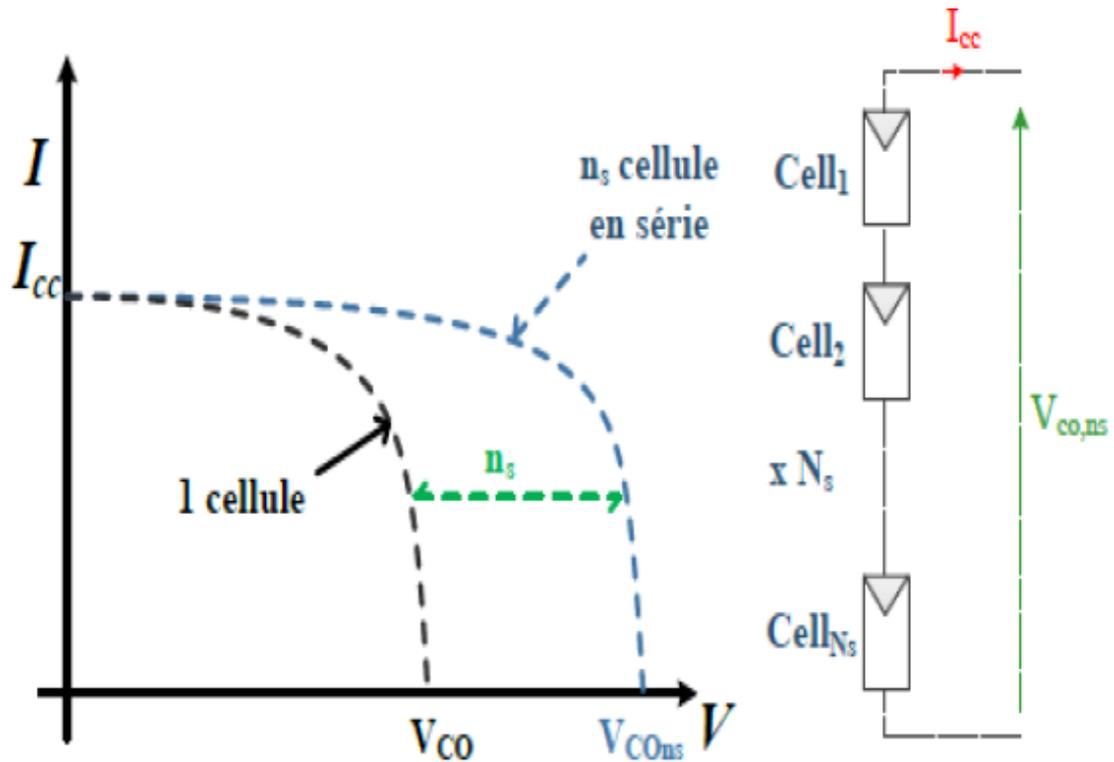


Figure (II.10) : caractéristique du groupement en série des cellules identiques

II.6.2.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 [24].

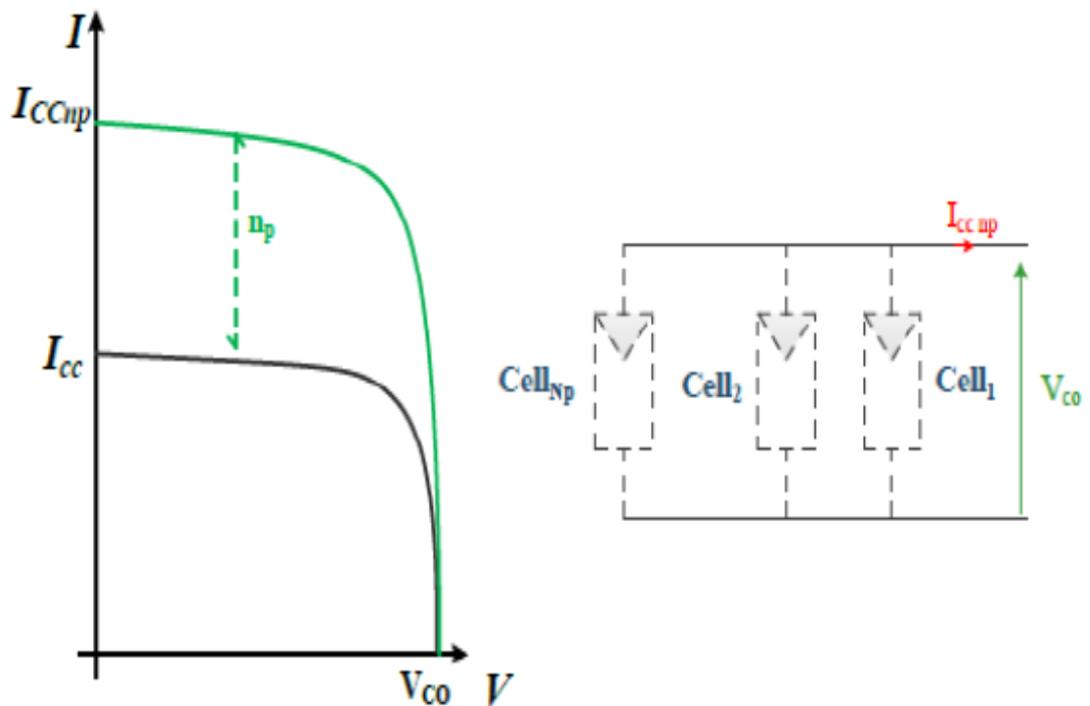


Figure (II.11) : Caractéristique du roupeement en parallèle de cellules identiques

II.7. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque:

II.7.1. Les avantages : [25]

- Pas de pollution.
- Sa longue durée de vie d'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coût d'entretien est faible.
- Sa flexibilité (taille au besoin, Modulaire).
- L'installation ne fait aucun bruit
- Son potentiel est illimité. 5% de la surface du désert est édulcoré pour nourrir la planète entière.

II.7.2 Les inconvénients: [25]

- 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.

II.8.Modélisation des cellules photovoltaïques:

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux de circuits équivalents. Afin de développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de connaître plus ou moins la configuration physique des éléments de la cellule et les propriétés électriques de chaque élément. Sur la base de cette idée, plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement fortement non linéaire dérivé du comportement des jonctions semi-conductrices à l'origine de sa réalisation. Ces modèles diffèrent par le nombre de procédures mathématiques et de paramètres impliqués dans le calcul des tensions et courants des modules PV [20].

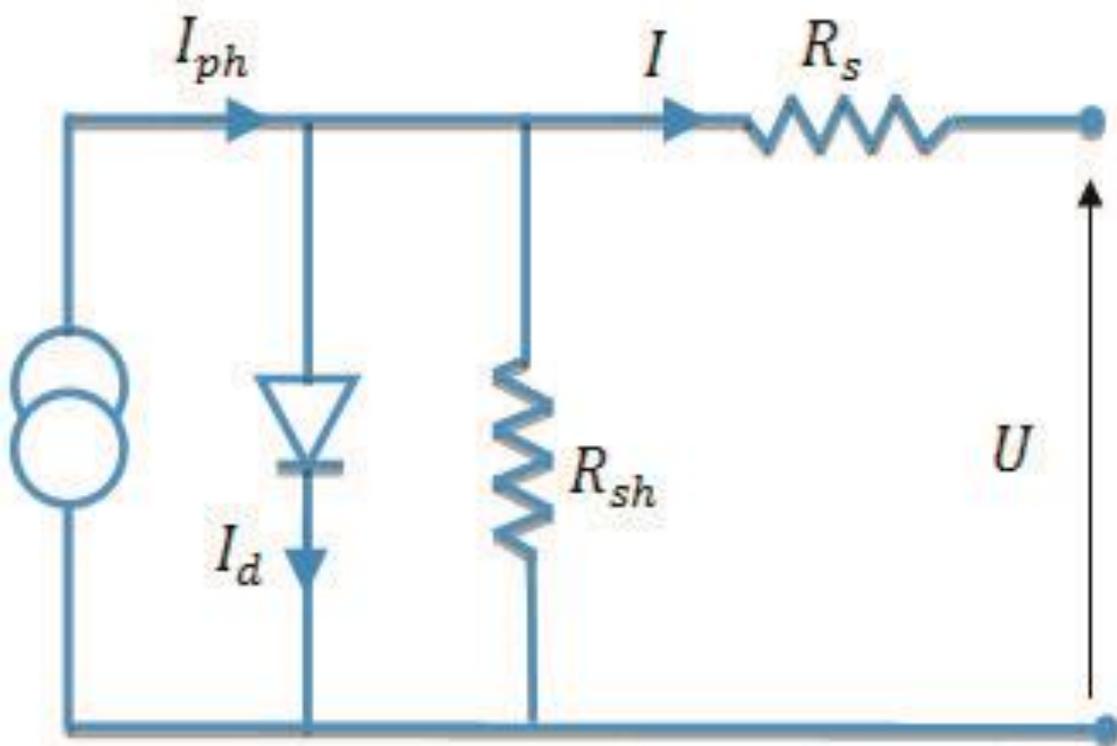


Figure (II.12): Equivalent circuit of a photovoltaic cell.

$$I_{pVM} = I_{PHM} - I_{0m} - \left(\exp \left(\frac{V_{pvm} + (I_{pvm} \cdot R_{sm})}{n \times V_t} \right) - 1 \right) \frac{V_{pvm} + I_{pvm} \times R_{sm}}{R_{sh}} \quad \text{eq II.1}$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + (I \cdot R_s)}{A \times T_c \times K} \right) - 1 \right] \quad \text{eq II.2}$$

A partir de cette équation il y a quatre paramètres inconnus: (photo-courant), (courant de saturation), A (facteur d'idéalité) et Rs (résistance série)

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

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

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{I_{cc} \cdot R_s}{A \times T_c \times K} \right) - 1 \right] \quad \text{eq II.3}$$

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

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{co}}{A \times T_c \times K} \right) - 1 \right] \quad \text{eq II.4}$$

- Dans le point de puissance maximale:

$$I_m = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V_m + (I_m \cdot R_s))}{A \times T_c \times K} \right) - 1 \right] \quad \text{eq II.5}$$

Pour déterminer les paramètres inconnus on utilise la méthode explicite simplifiée

On suppose que:

$$I_{cc} = I_L \quad \text{eq II.6}$$

$$0 = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{co}}{A \times T_c \times K} \right) - 1 \right] \quad \text{eq II.7}$$

$$I_m = I_L - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V_m + (I_m \cdot R_s))}{A \times T_c \times K} \right) - 1 \right] \quad \text{eq II.8}$$

$$I_0 = I_{cc} \left[\exp \left(-q \frac{V_{co}}{A \times T_c \times K} \right) - 1 \right] \quad \text{eq II.9}$$

$$I = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \frac{(V - V_{co} + (I \cdot R_s))}{A \times T_c \times K} \right) \right] \quad \text{eq II.10}$$

$$I_m = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \frac{(V_m - V_{co} + (I_m \cdot R_s))}{A \times T_c \times K} \right) \right] \quad \text{eq II.11}$$

$$R_s = \left(\left(\frac{A \times T_c \times K}{q} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) + V_{co} - V_m \right) \right) \frac{1}{I_m} \quad \text{eq II.12}$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 = \frac{dI}{dv} V + I \frac{dv}{dI} \quad \text{eq II.13}$$

$$A = \left(\frac{q(2V_m - V_{co})}{n_s K T \left[\frac{I_{sc}}{I_{cc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]} \right) \quad \text{eq II.14}$$

n_s : Le nombre de cellule sérié

I_D : le courant qui traverse la diode

I_0 : 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

II.9. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons défini des généralités sur les systèmes photovoltaïques en expliquant le fonctionnement des cellules photovoltaïques au silicium et des générateurs photovoltaïques (GPV), puis nous avons visité différentes combinaisons de cellules (série, parallèle) et la modélisation ...

Dans ce cas, nous aborderons dans le chapitre suivant: les différents types des électrolyseurs et spécifiquement l'électrolyseur de choix le PEM

CHAPITRE III

ÉTUDE ET MODÉLISATION D'UN ÉLECTROLYSEUR PEM

III.1. Introduction

L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Elle permet par ailleurs, dans l'industrie chimique, la séparation d'éléments ou la synthèse de composés chimiques. Elle intervient aussi dans la classification des corps purs [26].

III.2. Composition d'un électrolyseur :

Un électrolyseur est composé de 2 éléments [27]:

- Le coffret de commande : il permet la mise sous tension du système et le contrôle des paramètres.
- La cellule : c'est dans ce composant que se réalise l'électrolyse. Celui-ci se présente sous la forme d'un manchon qui se fixe sur le circuit de refoulement. La cellule est reliée au coffret de commande.

III.3. Les types d'électrolyseurs :

Il existe actuellement trois types d'électrolyseur d'eau classes selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement [28]:

III.3.1. Les électrolyseurs Alcalins:

Commercialise 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.

III.3.2. Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser) à oxyde solide :

Un électrolyte en céramique, conducteur à haute température sont encore au stade de la recherche [23]. 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.

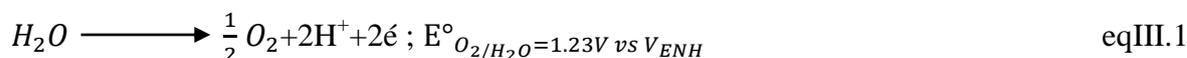
III.3.3. Les électrolyseurs de l'eau :

L'électrolyse de l'eau permet d'obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène de grande pureté. Mais le contexte énergétique actuel provoque un regain d'intérêt pour la production électrolytique d'hydrogène à partir de sources d'énergies renouvelables. La technologie à membrane acide, appelée PEM, présente des avantages certains par rapport à la technologie alcaline. En particulier, l'absence

d'électrolyte liquide corrosif permet de concevoir des électrolyseurs fiables, fonctionnant à haute pression, sous forte densité de courant avec des rendements énergétiques supérieurs à 80 % [29].

III.3.4. Les électrolyseurs PEM:

Une cellule élémentaire d'électrolyse de l'eau PEM comporte plusieurs éléments. Le composant central, l'Assemblage-Membrane-Électrode (AME), est, comme son nom l'indique, constitué de deux couches actives de part et d'autre de l'électrolyte polymère. La membrane joue le rôle d'électrolyte conducteur de protons, de séparateur électronique, et de séparateur des gaz. Les couches catalytiques sont le siège des réactions d'oxydo-réduction. L'électrode positive, l'anode, est le lieu d'oxydation de l'eau en oxygène et protons suivant la demi-réaction suivante (à pH = 0) :



III.4. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM consiste à séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau par apport d'énergie électrique, à des températures relativement basses, typiquement inférieure à 100°C.

Dans une cellule d'électrolyse de l'eau, le courant électrique est utilisé pour effectuer la dissociation de l'eau en ses constituants élémentaires que sont l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂) moléculaires. En milieu acide, cette réaction se décompose en deux demi-réactions [30] :

Anode:



Cathode:



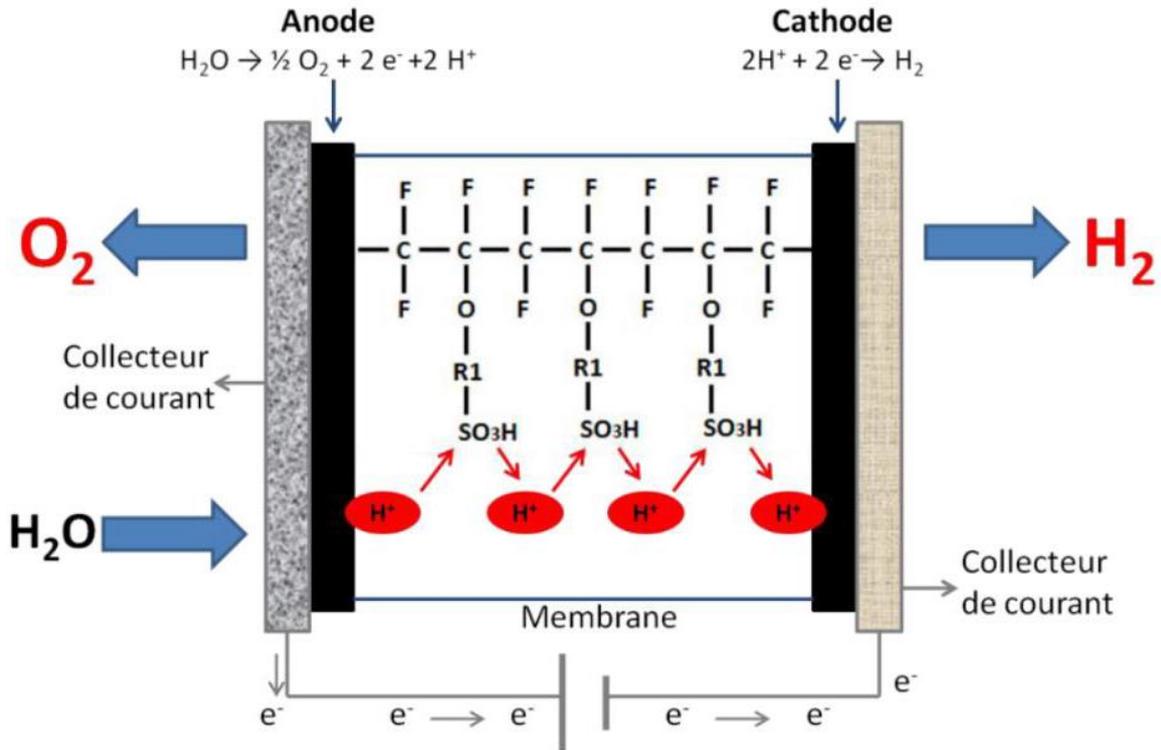


Figure (III.1) : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM.

III.5. Les Modèles utilisé pour l'électrolyseur PEM:

Il y a certains modelés pour faire la modélisation :

III.5.1. Modèle thermique:

La plupart des modèles proposés conviennent à l'électrolyse PEM. Nous avons utilisé un modèle basé sur le bilan énergétique total de l'électrolyseur exprimé par: [31]

$$C_t * \left(\frac{dT}{dt}\right) dt = Q_{th} - Q_{loss} - Q_{eau} \quad \text{eq III.4}$$

Avec:

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

$$Q_{th} = N_s * (U_{cell} - U_{th}) * I \quad \text{eq III.5}$$

Q_{loss} : Flux échangé avec l'extérieur, (W)

$$Q_{loss} = \left(\frac{1}{R_t}\right) * (T - T_a) \quad \text{eq III.6}$$

Q_{eau} = Flux échangé avec l'eau d'alimentation, (W)

$$Q_{eau} = h_e * (T - T_{eau}) \quad \text{eq III.7}$$

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 :

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{ini} + \frac{\Delta t}{C_t} * (U_{th} - \mathbf{Q}_{loss} - \mathbf{Q}_{eau}) \quad \text{eq III.8}$$

T_{ini} : Température initiale (K),

C_t : Capacité thermique de l'appareil,

Δt : Intervalle de temps (s).

III.5.2. Modèle thermodynamique :

Ce modèle sert à calculer deux variables :

La tension de décomposition réversible, définie par l'équation de Nernst, est exprimée sous la forme : [32]

$$U_{rev} = U_0 + \frac{R.T}{2.F} \times \ln \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \quad \text{eq III.9}$$

Lorsque :

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

T (K): Température de la cellule.

F: Constante de Faraday (96 487 °C.mol⁻¹).

U₀ (V): Tension de décomposition réversible dans les conditions normales (25°C, Pression atmosphérique)

P_{H₂}, P_{O₂} et P_{H₂O} (Pa): Pressions de fonctionnement de l'électrolyseur.

Un accroissement de la température entraîne une diminution d'UREV qui se répercute alors aux bornes de l'électrolyseur.

Cette tension de décomposition réversible s'établit à 0,229 V dans les conditions Normales.

Le fonctionnement irréversible des électrolyseurs industriels a pour effet de réduire la tension effective de cellule à densité de courant et température constantes lorsque la pression augmente.

On définit également la tension thermo-neutre qui correspond à un

Fonctionnement isotherme d'un électrolyseur par:

$$U_{th} = \frac{\Delta H}{\nu_e F} \quad \text{eq III.10}$$

Quand :

F : Constante de Faraday (96 487 °C.mol⁻¹)

ν_e : Coefficient stœchiométrique

ΔH : Enthalpie de réaction

$$\Delta H = \Delta H_{H_2} + 0.5 * \Delta H_{O_2} - \Delta H_{H_2O} \quad \text{eq III.11}$$

II.5.3. Modèle électrochimique :

La tension de cellule d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes : **[32]**

$$U_c = U_{rev} + \eta_a - \eta_c + R_{SPE} \quad \text{eq III.12}$$

Quand:

η_a : Surtension anodique (V),

η_c : Surtension cathodique (V).

R_{SPE} : Résistance globale (cm²Ω).

III.6. Avantages et inconvénients d'électrolyseur PEM :

III.6.1. Les avantage : [33]

- Rendement électrique élevé (80 – 90%).
- Électrolyte solide (pas de pièces mobiles, pas de liquide corrosif).
- Compacité du système, Fortes densités de courant.
- Conception compacte (bipolaire).
- Grande production de gaz sous pression.
- Fonctionnement à haut pression.
- Réponse rapide aux variations de charge.
- Haute pureté des gaz produits.
- Durabilité.

II.6.2. Les inconvénients : [33]

- Le coût élevé des membranes polymères.
- Des catalyseurs en métal noble.
- Le coût élevé des catalyseurs.
- Stack inférieur au MW.

III.7. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons défini d'électrolyseur PEM ce que nous utilisons pour produire de l'hydrogène et expliqué ses composants et son principe de fonctionnement en détail et les modèles utilisés dans sa conception avec mention des types utilisés de les électrolyseurs dans la production d'hydrogène.

Après notre étude sur les électrolyseurs, nous verrons dans le chapitre suivant les résultats de la simulation en interprétant et commentant les résultats de l'évolution du débit, du courant et de la tension en fonction du temps grâce à l'évolution de la température et du rayonnement durant la journée.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET SIMULATION

IV.1. Introduction

Nous avons donné un aperçu sur les générateurs photovoltaïques et sur les électrolyseurs dans le deuxième et troisième chapitre.

Donc, dans ce chapitre, nous présentons l'étude d'un système de production d'hydrogène par l'étude du couplage générateurs photovoltaïques et hacheur Buck avec MPPT et électrolyseur PEM. Pour ce faire, nous procédons à des simulations sur MATLAB dans le but d'approcher le mieux un couplage optimal.

IV.2. Modélisation du générateur photovoltaïque :

Les modules photovoltaïques convertissent directement la lumière du soleil en électricité, ce qui Le courant et sa tension de sortie dépendent principalement de l'éclairement et de la température. Pour cela, prédire les performances des cellules/modules/générateurs photovoltaïques nécessite Développer un modèle mathématique permettant d'étudier son fonctionnement Différentes conditions météorologiques (éclairage, température, etc.). De nombreux travaux Implique le développement de modèles mathématiques pour la simulation Caractéristiques (I, P-V) des cellules/modules/générateurs PV, d'autres sont Modélisation des performances des modules photovoltaïques en termes de puissance l'électricité produite.

IV.2.1. Modèles de simulation de la caractéristique (I-V) ET (P-V) :

Avec ce module photovoltaïque on va utiliser la loi de nœud pour trouver la relation entre la tentions et la tension

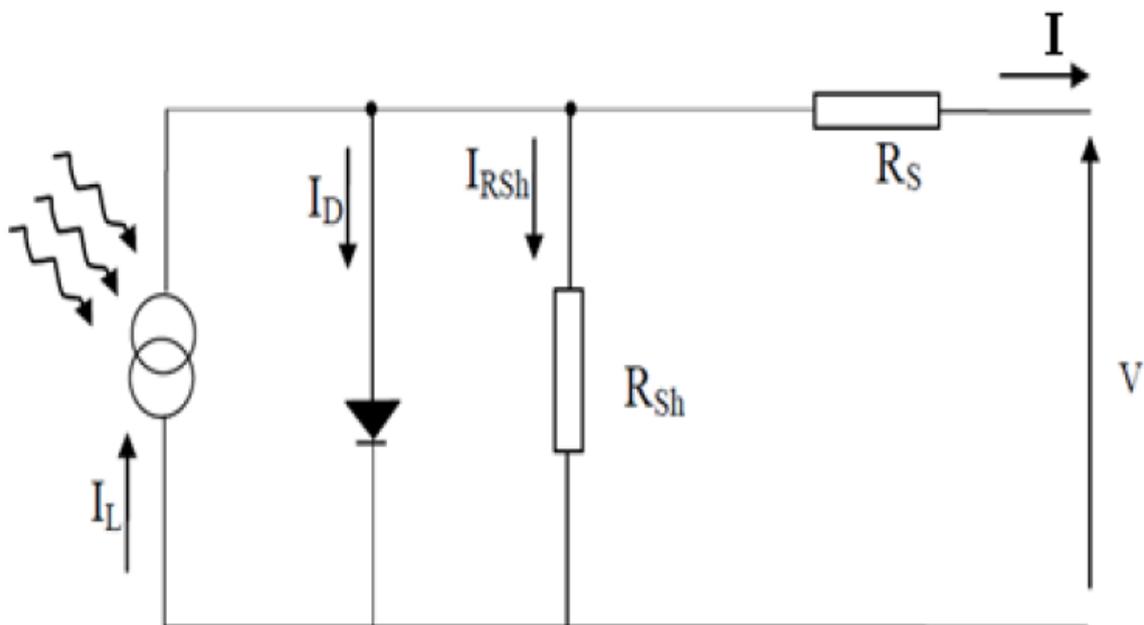


Figure (IV.1): Schéma électrique équivalent d'un module photovoltaïque

$$I = I_L - I_D - I_{RSH} \quad \text{eq IV.1}$$

$$\text{Tell que : } V_{th} = \frac{A*TC*k}{q} \quad \text{eq IV.2}$$

A : Facteur d'idéalité

$$I_{RSH} = \frac{V+(RS*I)}{Rsh} \quad \text{eq IV.3}$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+(I.Rs)}{Vth}\right) - 1 \right] \frac{V+(Rs*I)}{Rsh} \quad \text{eq IV.4}$$

Pour des modules supposés dépourvus de fuites (R_{SH} infinie et $I_{RSH} = 0$) cette relation est comme suite :

$$I = I_L - I_D \quad \text{eq IV.5}$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+(I.Rs)}{Vth}\right) - 1 \right] \quad \text{eq IV.6}$$

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

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(q \frac{V+(I.Rs)}{A*TC*K}\right) - 1 \right] \quad \text{eq IV.7}$$

IV.2.2. Paramètres de champ photovoltaïque :

$$I_{0(gen)} = N_p * I_{0(mod)} \quad \text{eq IV.8}$$

$$V_{r(gen)} = N_s * V_{r(mod)} \quad \text{eq IV.9}$$

$$R_{s(gen)} = \frac{Ns}{Np} * R_{s(mod)} \quad \text{eq IV.10}$$

Donc l'équation de générateur est de la forme :

$$I_{gen} = I_{cc} - I_0 \left[\exp\left(q \frac{V_{gen} + (I_{gen} * R_{s(gen)})}{A * T_c * K}\right) - 1 \right] \quad \text{eq IV.11}$$

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 :

$$I_{gen * R_{s(gen)} + V_{th} * \log\left(\frac{-I_{gen} + I_{cc} + I_0}{I_0}\right)} \quad \text{eq IV.12}$$

IV.2.3. Les caractéristiques de module photovoltaïque :

Nous avons choisi le module photovoltaïque de notre choix pour trouver les caractéristiques (I-V, P-V) dans les conditions standards ($E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$) sont montées sur le tableau suivant :

Paramètre	Unité	Valeur
Puissance max	P_m (W)	189.8
Tension de circuit ouvert	V_{co} (V)	45.2
Courant court-circuit	I_{CC} (A)	5.62
Tension maximal	V_m (V)	36.5
Courant maximal	I_{mp} (A)	5.2
Nombre de cellules	N_{cell}	72
Nombre de cellules	$N_{cellule\ serie}$	16
Nombre de cellules	$N_{cellule\ parallele}$	1

Tableau (IV.1) : Plaque signalétique de panneau photovoltaïque

IV.3. Résultats pour une journée typique :

Dans l'objectif de tester le module pour des données réelles, on a utilisé les données trouvées à Ouargla (journée du 04/04/2004 à Ouargla) [34] ; Ces données sont visibles dans le tableau suivant :

Heure	8 :	9 :	10 :	11 :	12 :	13 :	14 :	15 :	16 :	17 :
	00	00	00	00	00	00	00	00	00	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

Tableau (IV.2): Les éclairagements et les températures de la journée 04/04/2004 à Ouargla

D'après la figure (IV.2) la variation d'éclairément et température est passée par deux étapes :

[8h00 à 13h00]:

L'éclairément et température augmente jusqu'à (790 W/m^2) (41°C) parce que dans cette intervalle on a un rayonnement direct appliqué sur les panneaux.

[13h00à17h00]:

L'abaissement d'éclairément jusqu'à environ (364 W/m^2) et la température jusqu'à (36°C) car la diminution d'angle inclinaison du rayonnement solaire.

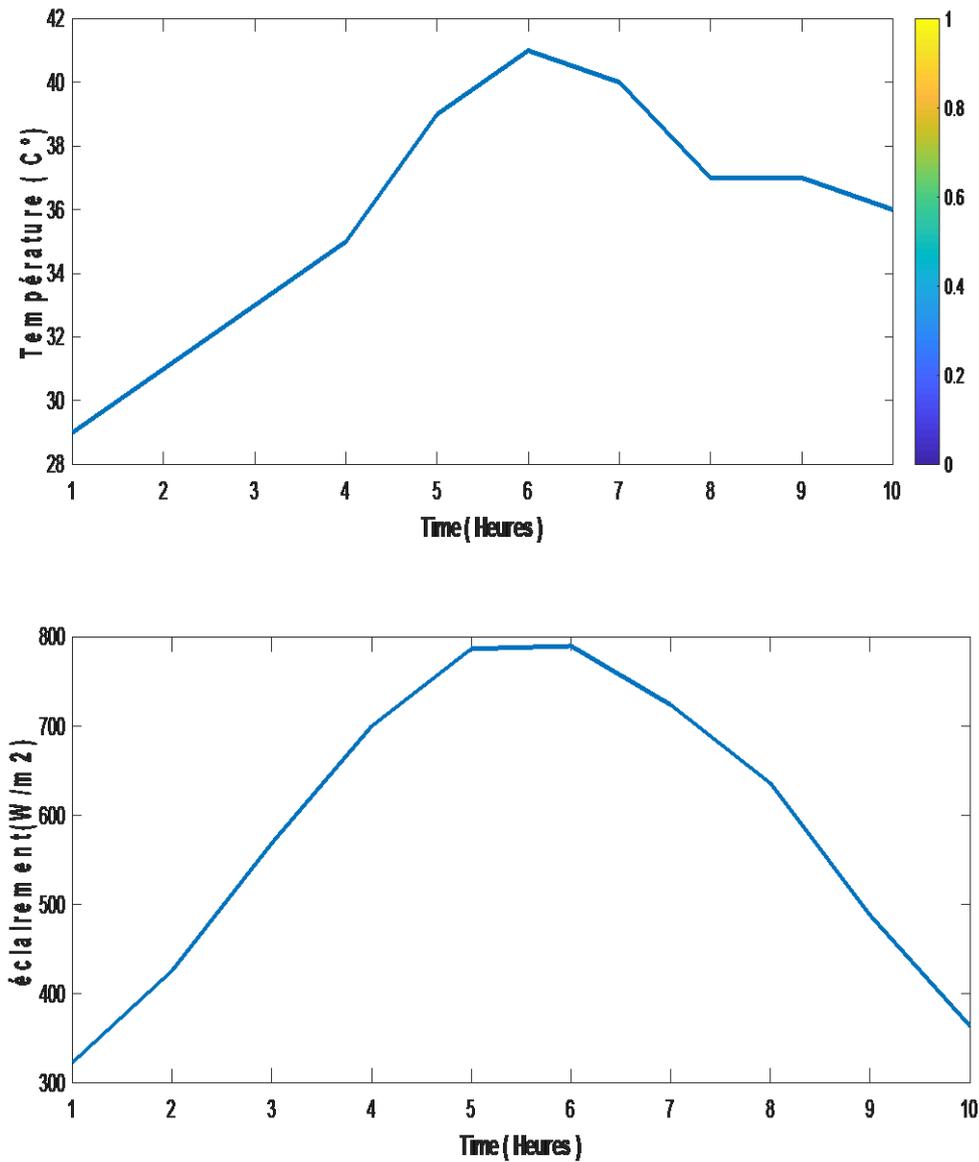


Figure. (IV.2) : Variation d'éclairement et température en fonction de temps

IV.3.1. Température constante $T=25^{\circ}\text{C}$ et éclairnements variable :

Pour étudier fonctionnement du générateur PV, nous avons varié l'éclairement avec une température fixe ($T=25^{\circ}\text{C}$). La figure montre la variation du courant I en fonction de la tension V :

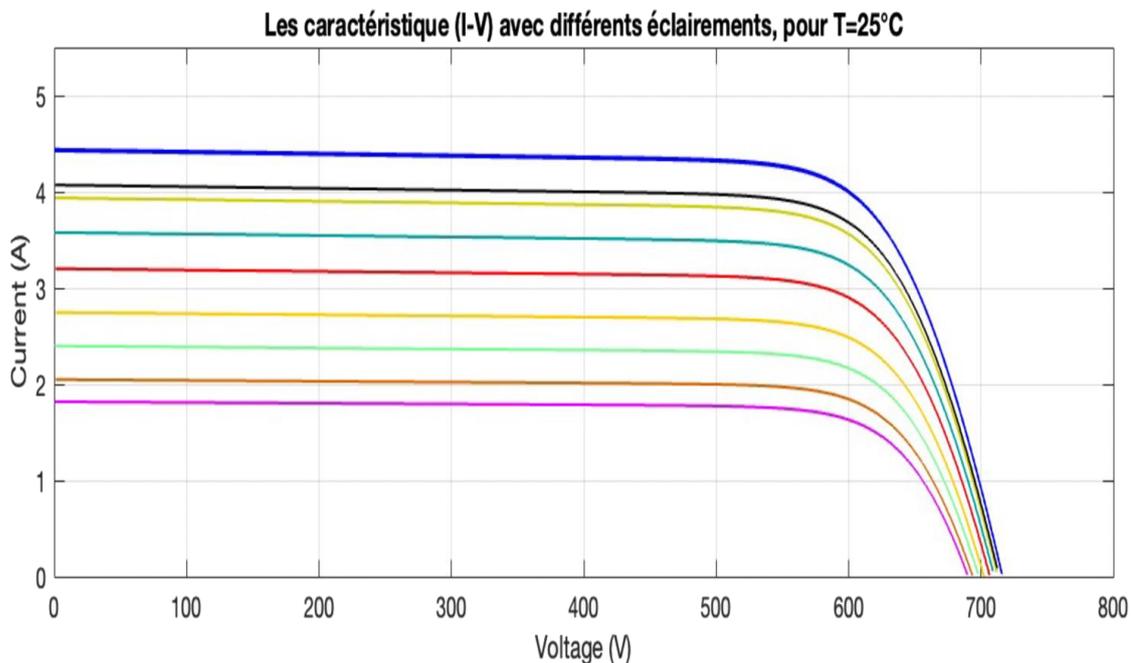


Figure (IV.3) : Les Caractéristiques (I-V) avec éclairements variable, pour T=25°C

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

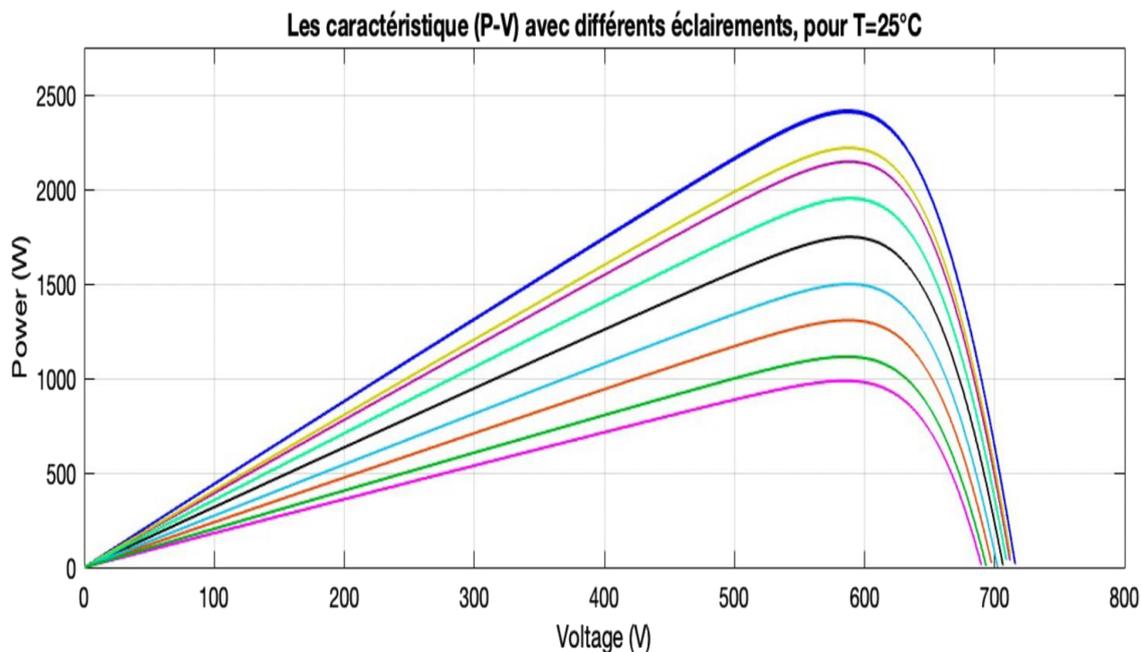


Figure (IV.4) : Les Caractéristiques (P-V) avec éclairements Variable, pour T=25°C

IV.3.2. éclairage constant $E=1000 \text{ W/m}^2$ et températures variables :

A partir des résultats de simulation, on a observé que la variation de la température et l'éclairage effet sur la tension et le courant avec la puissance, 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_{oc}) diminue avec l'augmentation de la température

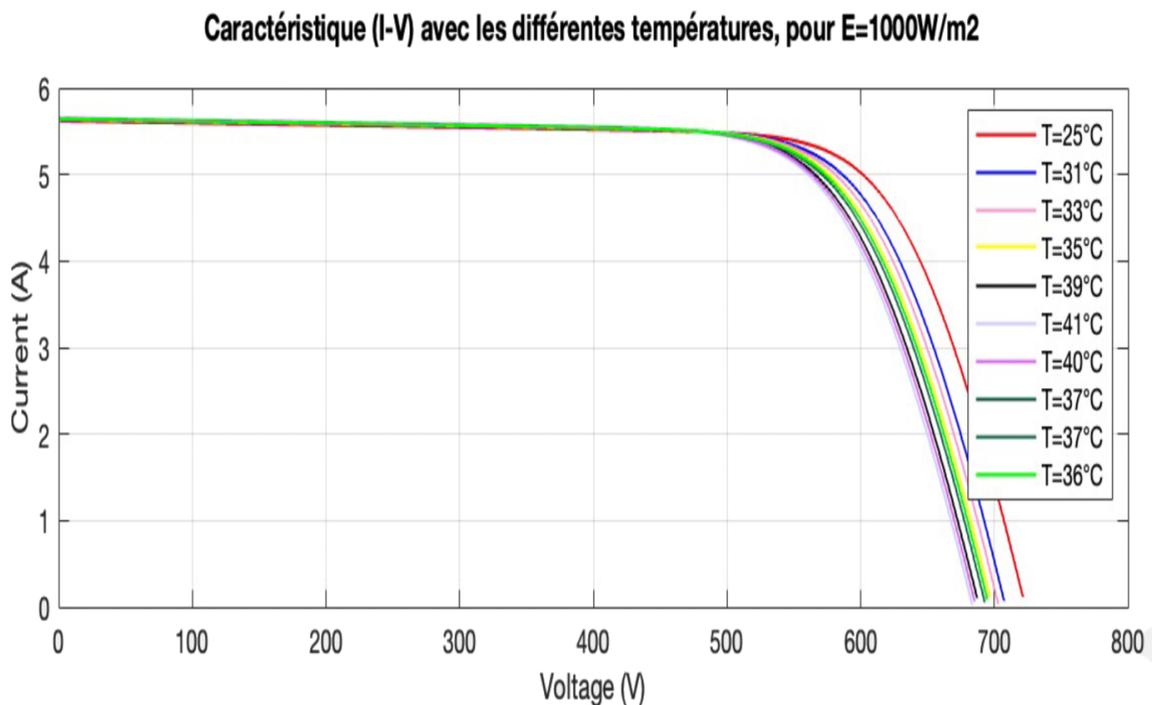


Figure (IV.5): Les caractéristiques (I-V) avec différentes températures, pour $E=1000\text{W/m}^2$

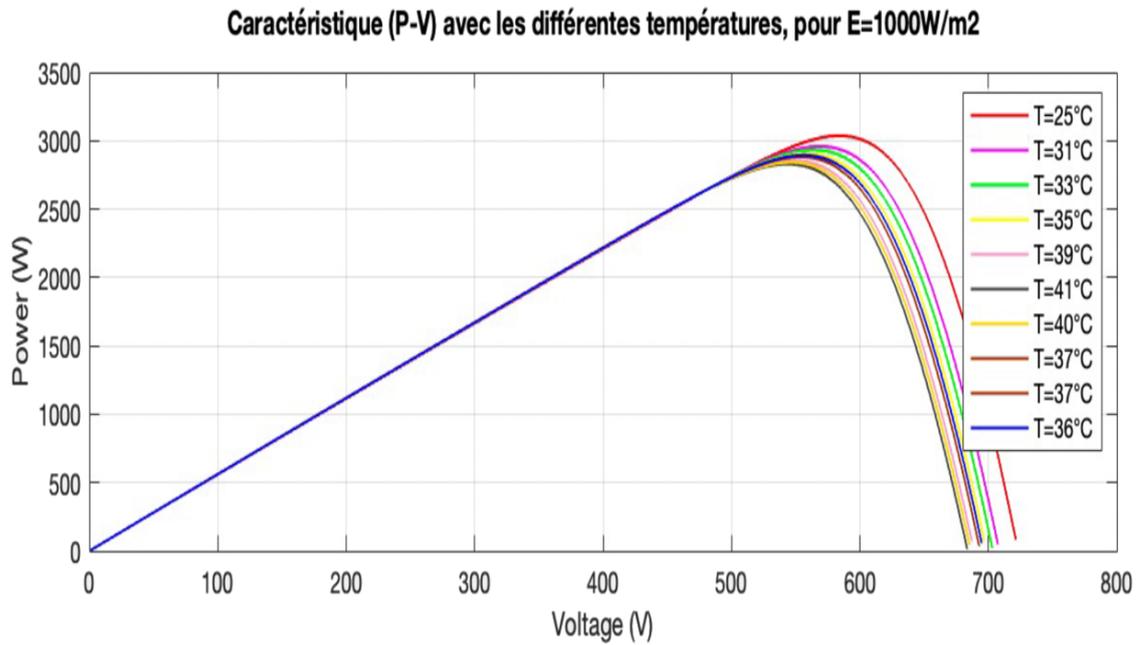


Figure (IV.6): Les caractéristiques (P-V) avec différentes températures, pour $E=1000W/m^2$

IV.4. Modélisation d'un hacheur buck Avec MPPT :

C'est adaptateur d'impédance d'assurer l'interconnexion d' entre un source de tension continue, et une charge de courant continu.

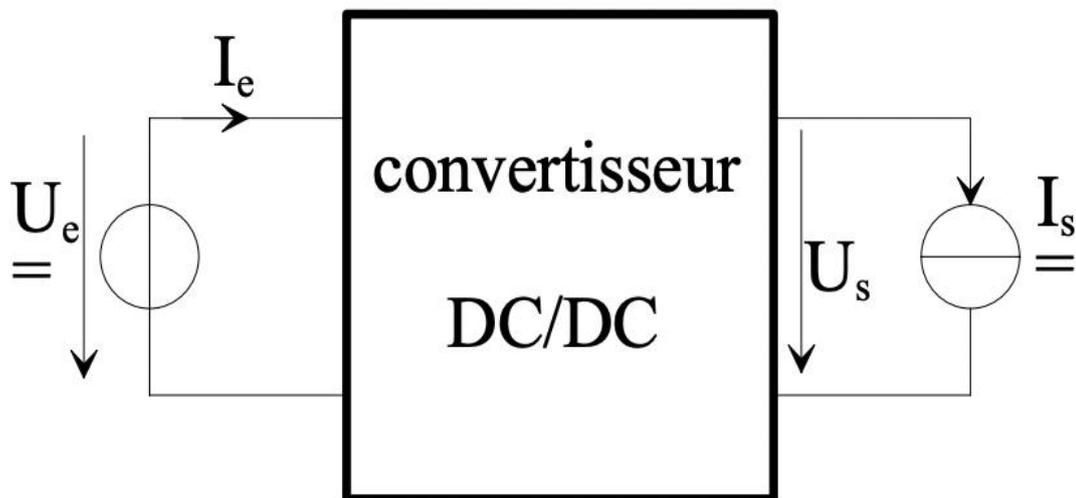


Figure (IV.7) : Hacheur Buck

On utilisé le Hacheur Buck pour élever le courant qui destiné pour l'électrolyseur.

La figure représente une modélisation d'un hacheur Buck par SIMULINK Matlab

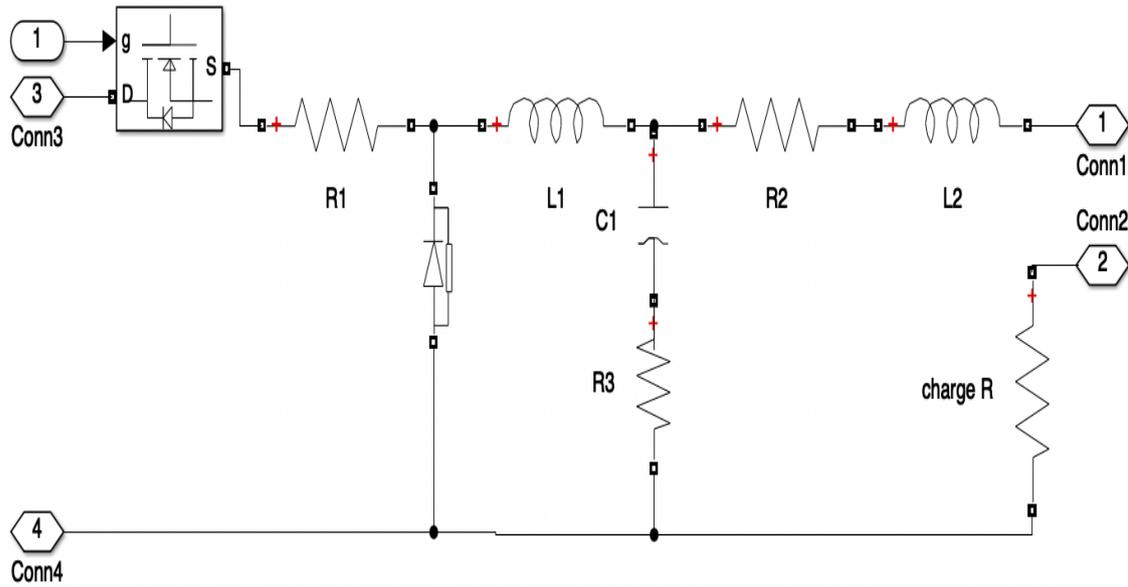


Figure (IV.8) : Schéma block d'un Hacheur Buck

IV.4.1. Identification des paramètres :

C_{pv}	100e-6 F
C_1	500e-6 F
R_1	50e-7 Ω
R_2	50e-7 Ω
R_3	2 Ω
R_{charge}	19 Ω
L_1	50e-3 H
L_2	200e-3 H

Tableau (IV.3) : Les caractéristiques d'Hacheur Buck

IV.4.2 Technique de MPPT :

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension courante. Mais, la détermination de la puissance de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des paramètres météorologiques (température et éclairage). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser [35].

Le principe du fonctionnement c'est la commande MPPT, allié à un étage intermédiaire d'adaptation, laisser de faire fonctionner un générateur PV de manière à produire en permanence le maximum de sa puissance. Aussi bien que, quels que soient les circonstances météorologiques, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [35].

IV.4.3. Les types d'MPPT :

IV.4.3.1. Algorithme Incrément de la conductance "INC":

Le Principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance

$G = I V$ et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, 'PMP'. Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, 'PMP' [37].

IV.4.3.2. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension Voc:

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante: $V_{mp} = k \times V_{oc}$

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{oc} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [38].

IV.4.3.3. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc} :

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante: $I_{mp} = k \times I_{cc}$ [39].

IV.4.3.4. Algorithme à base de la logique floue:

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système

IV.4.3.5. Algorithme Perturber et observer 'P&O':

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k - 1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, 'PMP' et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, 'PMP'. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique[40].

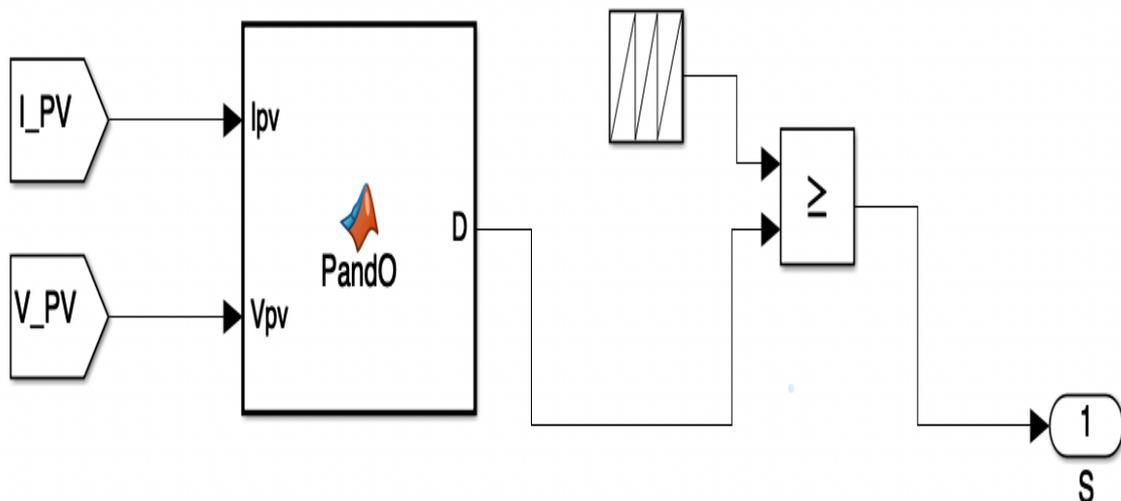


Figure (IV.9) : Schéma block d'un MPPT (PandO) :

IV.4.4. Organigramme d'un MPPT (PandO) :

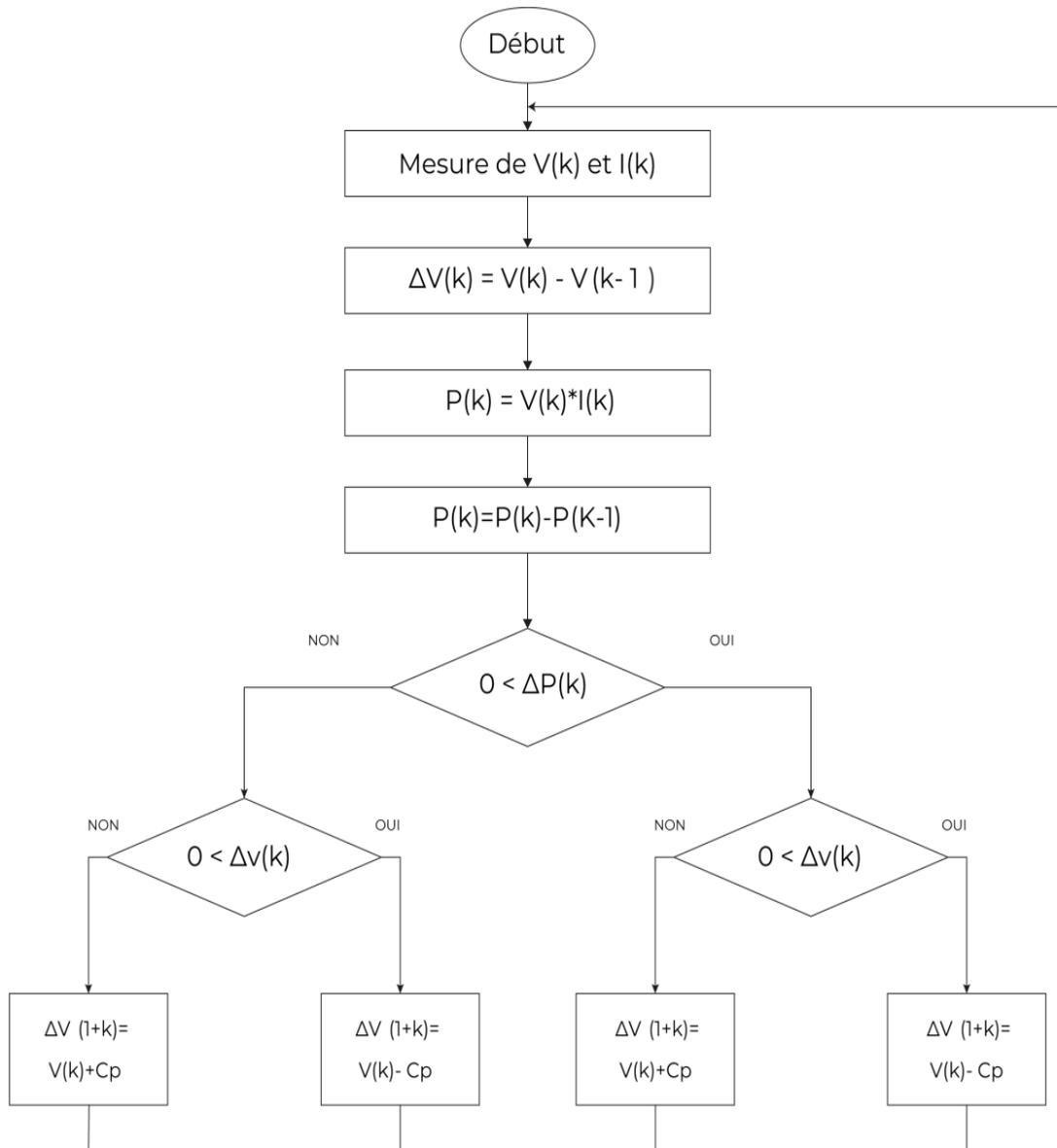


Figure (IV.10) : L'organigramme de MPPT (PandO)

L'implantation de programme d'MPPT motioné dans la figure (Figure. IV.9) avec un générateur pv connecté avec hacheur buck, (voir le figure (11)) la tension a été abaisé et le courant augmenter (I_{out}) donc notre but dans cette association c'est déterminé que le rapport cyclique $\alpha \cong 0.5$.

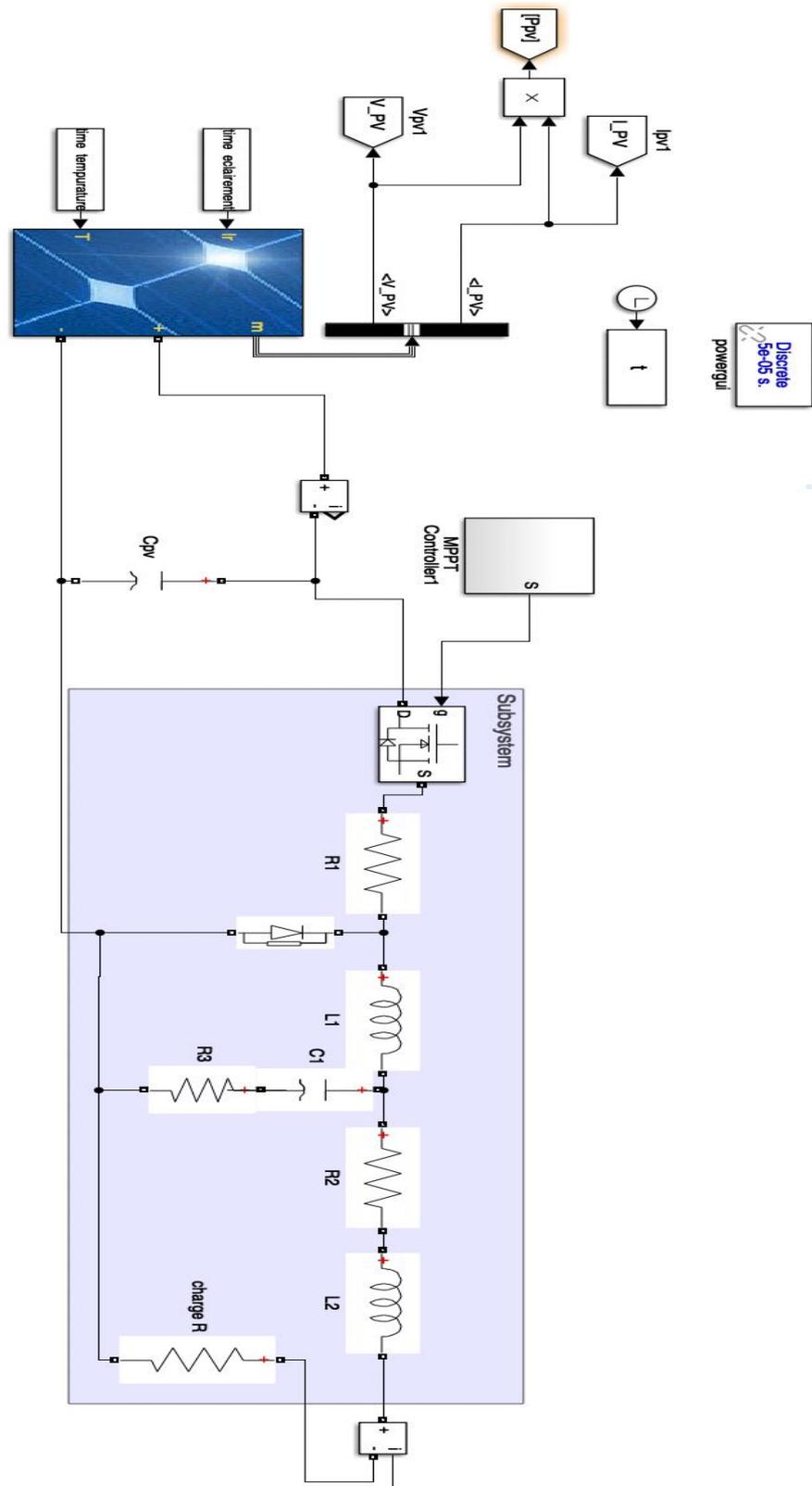


Figure. (IV.11) : Couplage GPV & Hacheur Buck avec MPPT

On a varié l'éclairage et la température selon le tableau (**Tableau IV.4**) pour calculer par simulation les valeurs d'entrees et sorties d'Hacheur Buck, le résultat obtenu prouve le bon fonctionnement d'algorithme MPPT quel que soit les conditions climatiques : éclairage ; température et la variation de temps alors, on a assuré une puissance maximale délivré aux électrolyseurs.

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°)	25	31	33	35	39	41	40	37	37	36
I_{entrer} (A)	1.808	2.384	3.178	3.902	4.366	4.405	4.041	3.552	2.734	2.044
I_{sortie} (A)	3.477	4.587	6.113	7.507	8.437	8.475	7.775	6.834	5.259	3.931
V_{entrer} (V)	133	175.3	233.4	266.4	321.8	323.2	296.5	260.8	200.9	150.3
V_{sortie} (V)	66.06	87.14	116.2	142.6	160.3	161	147.7	129.9	99.93	74.69
P_{entrer}(w)	240.5	417.9	741.6	1117	1411	1424	1198	926.4	549.2	307.2
P_{sortie}(w)	229.7	399.7	710.1	1071	1353	1365	1148	887.4	525.5	293.6
α_i(Rapport cyclique) $\frac{I_{entrer}}{I_{sortie}}$	0.51	0.519	0.519	0.51	0.515	0.519	0.5197	0.519	0.5198	0.519
α_v(Rapport cyclique) $\frac{V_{sortie}}{V_{entrer}}$	0.4966	0.497	0.497	0.535	0.498	0.498	0.498	0.498	0.497	0.496
α_p(Rendement électrique) $\frac{P_{sortie}}{P_{entrer}} \times 100$	95%	95,6%	95,7%	95,8%	95,8%	95,8%	95,8%	95,7%	95,6%	95,57%

Tableau (IV.4) : Les valeurs calculé avec Hacheur et l'MPPT

Le courant d'sortie est supérieur que la valeur d'enter en double et la tension de sortie et inférieur que la valeur d'entrer jusqu'à la moitié.

Par contre que la puissance de la sortie d'hacheur est égale presque la puissance d'entrer.

L'augmentation en double de courant de sortie et la diminution de la moitié de tension de sortie à cause d'Hacheur Buck depuis le principe de fonctionnement donc il implique que le rapport cyclique $\alpha \cong 0.5$.

L'égalité de la puissance d'enter et la sortie car les valeurs de courant et la tension de la sortie et l'enter d'Hacheur selon l'équation $P = I \times V$ il implique le rendement $\alpha_p \cong 1$.

IV.5. Modélisation de l'électrolyseur PEM :

Souvent, les fabricants fournissent les caractéristiques de leurs produits. Dans notre cas, nous avons choisi un électrolyseur de laboratoire, et les caractéristiques expérimentales de ses cellules [36].

IV.5.1. Modèle choisi :

On a choisi le modèle électrochimique suivant la loi de Tafel, la tension de cellule s'exprime en fonction de la densité de courant par :

$$E = b \times \text{Log}(I) + a + c \times I. \quad \text{eq IV.26}$$

Les paramètres (a) et (b) et (c) peuvent être déterminés par régression linéaire avec la variable **I** pour déterminer la cellule définie (géométrie, membrane, débit, matériau, température, pression). Les 3 paramètres (a), (b) et (c) sont déterminés par des résultats expérimentaux et un sous-programme développé [36]:

Ces paramètres dépendent de la température **T** et de la pression partielle d'oxygène **P_{O2}**. Dans notre cas, le prototype fonctionne à une pression atmosphérique constante. Ces paramètres ne sont pas déterminés qu'en Fonction de la température.

A partir des courbes expérimentales (Tableau IV.5) le document utilisé [34] les différentes constantes seront déterminées [34].

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

Tableau (IV. 5) : Données expérimentales d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-V)

Le courant varie d'une façon croissante en fonction de la tension avec une forme parabolique et il est divisé en deux parties non linéaire et linéaire : le changement de tension produit un certain courant et on remarque quand le courant et la tension est faible on a un changement non linéaire par contre quand la variation dans des grandes valeurs de tension nous trouvons que le courant est très élevé avec un changement linéaire.

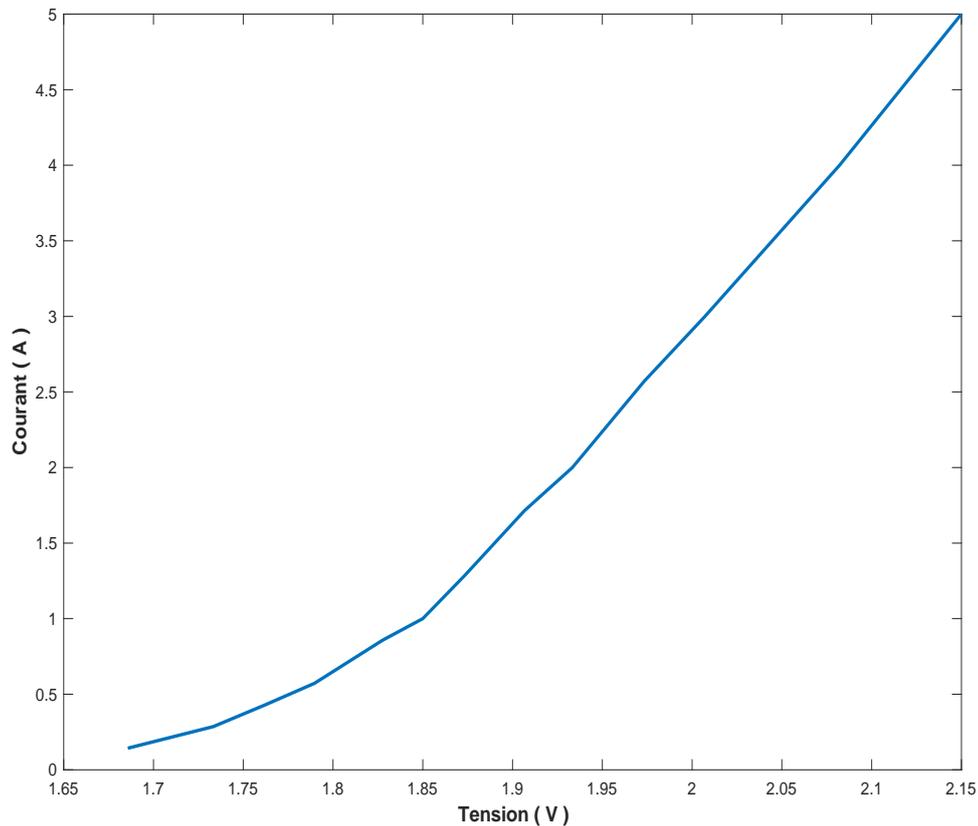


Figure (IV.12) : Les courbes (I-V) d'électrolyseur expérimentale pour $T_{el} = 80^{\circ}C$

Il faut déterminer les facteurs a, b et c. Nous choisissons 3 points de la courbe expérimentale ($T=80^{\circ}C$ par exemple) et par identification avec l'équation de Tafel, on obtient [36] :

$$1.6857143 = a + b \times \log (1/7) + c \times (1/7). \tag{eq IV.27}$$

$$1.85 = a + b \times \log (1) + c \times (1) \tag{eq IV.28}$$

$$2.15 = a + b \times \log (5) + c \times (5) \tag{eq IV.29}$$

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

$$\begin{cases} a = 1.8018 \\ b = 0.0632 \\ c = 0.0482 \end{cases} \quad \text{eq IV.30}$$

Donc cet électrolyseur, peut être modélisé par :

$$V = 1.8018 + 0.0632 \times \log(I) + 0.0482 \times I \quad \text{eq IV.31}$$

Ces équations modaliser sous Matlab SIMULINK 2016 présenté sur la figure (IV.12) donne le modèle d'un électrolyseur utilisé :

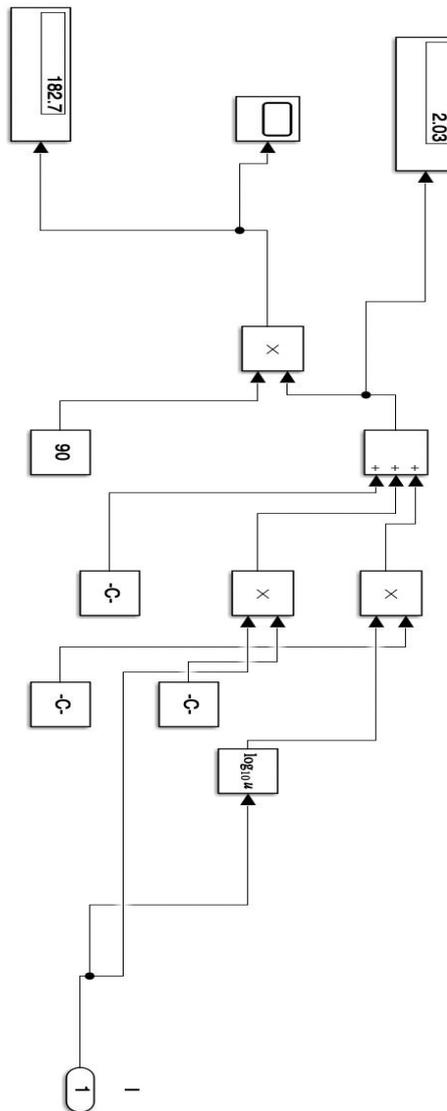


Figure (IV.13): Modélisation d'un électrolyseur

D'après la figure IV.14 de variation de courant a entré d'électrolyseur en fonction de temps passée par deux étapes :

[8h00 à 13h00]:

Le courant est augmentés jusqu'a le pointe parce que dans cet intervalle on a une augmentation d'angle inclinaison du rayonnement solaire.

[13h00à17h00]:

Le courant est diminuer parce que dans cet intervalle on a une diminuation d'angle d'inclinaison du rayonnement solaire.

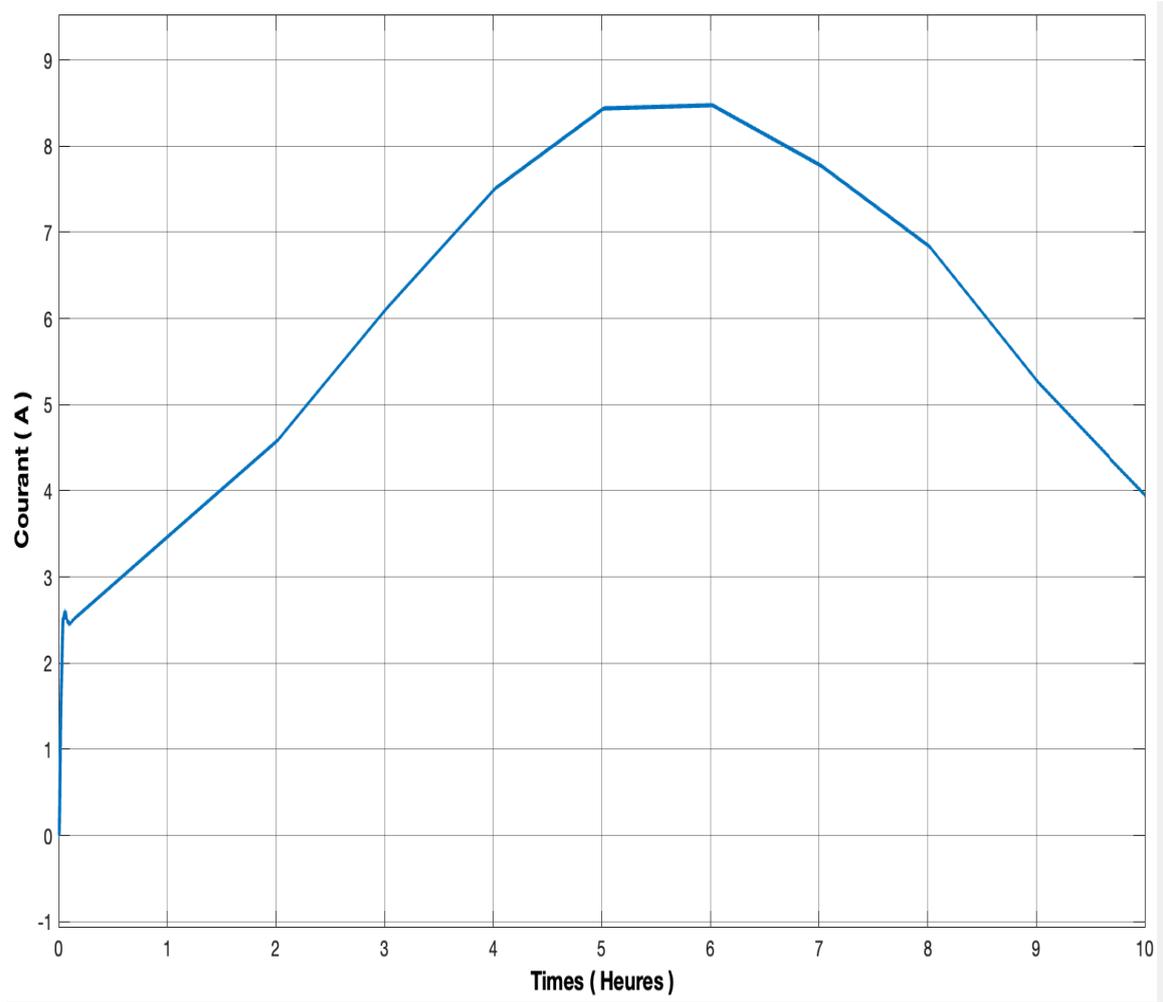


Figure. (IV.14) : Variation de courant d'électrolyseur en fonction de temps

D'après la figure IV.15 de la tension entré d'électrolyseur en fonction de temps passée par deux étapes :

[8h00 à 13h00]:

La tension sont augmentés jusqu'a le pointe parce que dans cet intervalle on a une augmentation d'angle inclinaison du rayonnement solaire.

[13h00à17h00]:

La tension sont diminuer parce que dans cet intervalle on a une diminuation d'angle d'inclinaison du rayonnement solaire.

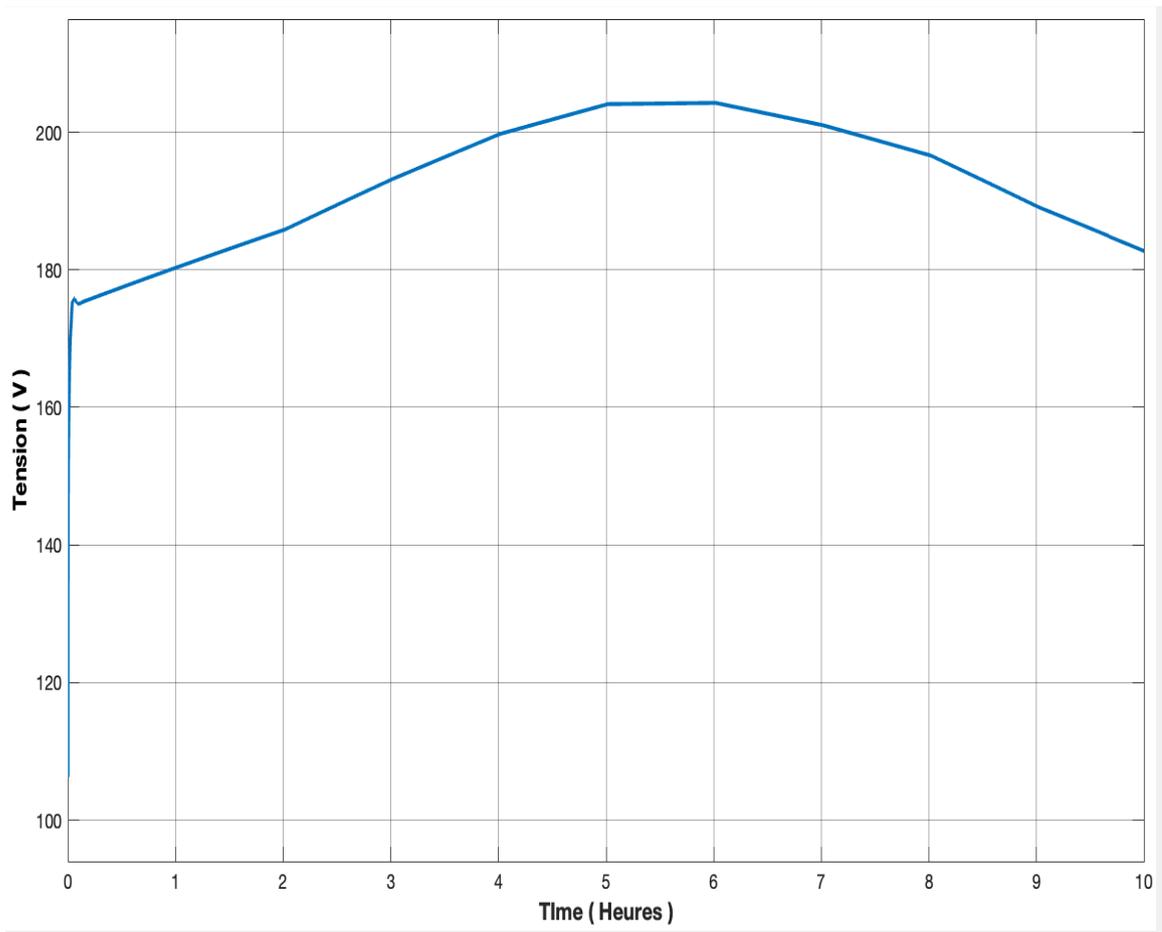


Figure. (IV.15) : Variation de tension d'électrolyseur en fonction de temps

IV.6. Modélisation du système GPV avec électrolyseur :

L'électrolyseur il a une puissance maximale par l'énergie renouvelable et besoin un courant et système complet modelées par programme Simulink MATLAB :

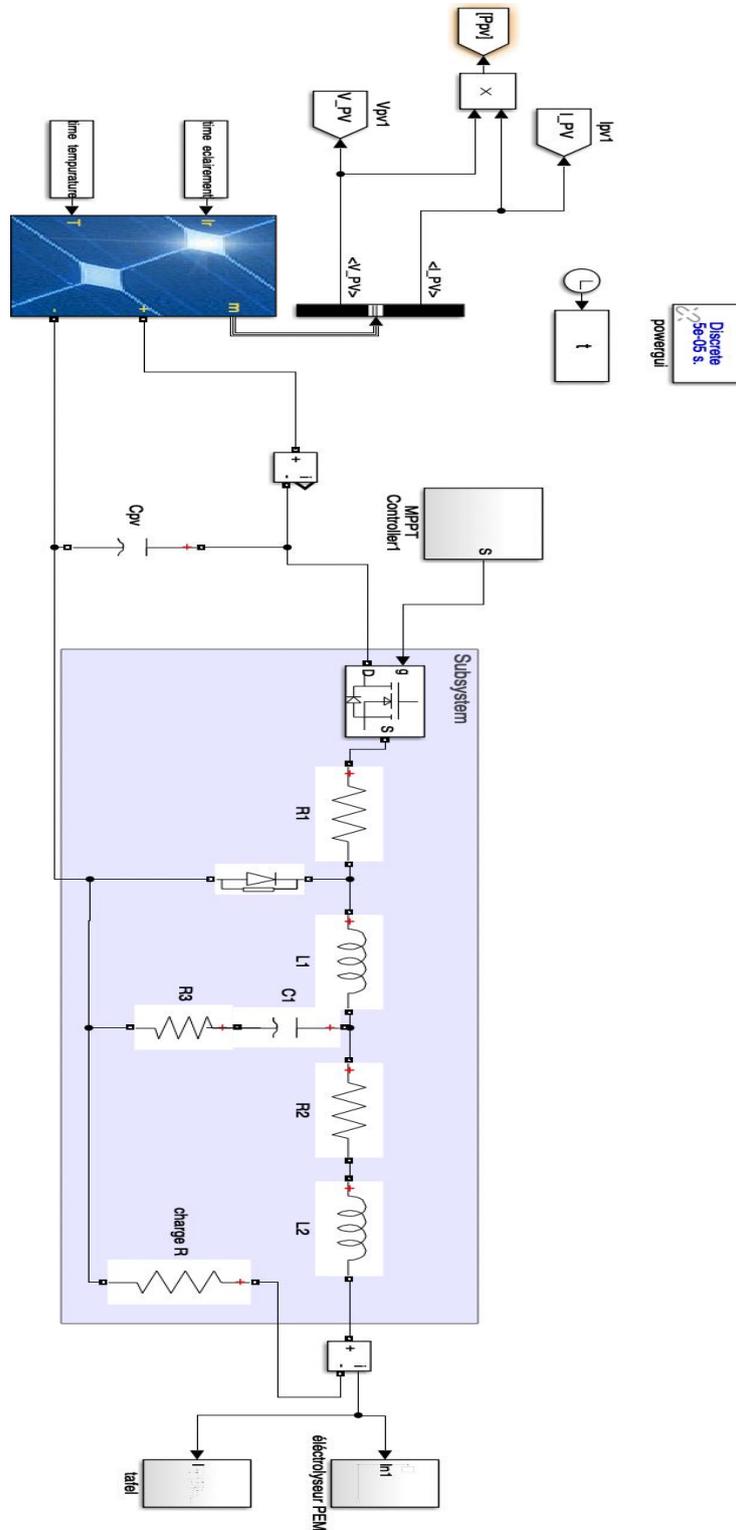


Figure (IV.16) : Schéma Block d'un couplage GPV avec Hacheur Buck et MPPT & électrolyseur

IV.7. Volume d'hydrogène Produite :

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

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{ItRT}{ZFP} = Q \times t \quad \text{eq IV.31}$$

Avec :

V : volume d'hydrogène produit (l)

R: Constante des gaz parfaits $\approx 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

t : Temps correspondant à la production de volume V = Variable (10 heures)

T : La température absolue C

P : Pression atmosphérique = 0.1013 bar

Z : Nombre d'électron requis pour libérer une molécule $N_{\text{cellules}} = 2$

F : Constante de Faraday = 96500

n : La quantité de matière (mol)

Tell que :

$$n = \frac{I \times t}{Z \times F} \quad \text{eq IV.32}$$

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

D'après la figure (IV.16) la variation de volume d'Hydrogène obtenu concorde avec les résultats expérimentaux est passée par deux étapes :

[8h00 à 13h00] :

On observe l'évolution de volume jusqu'à sa valeur maximale (80.10 L) à demi-journée grâce à la relation **V.32** et **IV.31**, donc quand le courant d'électrolyseur augmente le volume augmente aussi.

[13h00à17h00] :

On remarque que le volume est diminué environ (38 l) avec la diminution de courant d'électrolyseur.

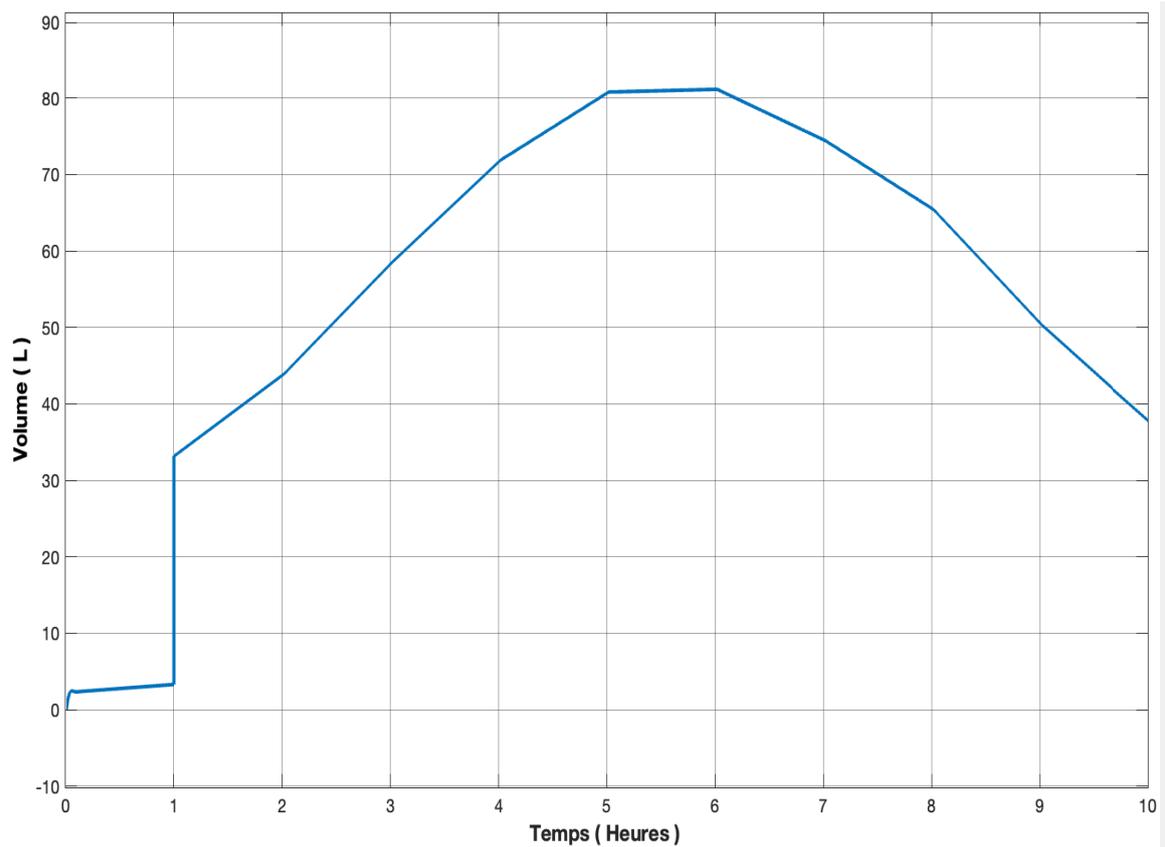


Figure. (IV.17) : Evolution de volume en fonction de temps

IV.8. Débit d'hydrogène produite :

$$Q = \frac{N_{cellule} \times R \times I_f \times T}{Z \times F \times P} \quad \text{eq IV.33}$$

$$Q = N_{cellule} \frac{V}{t} \quad \text{eq IV.34}$$

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

T: Température de l'électrolyte = 25°C

I_f: Le courant de fonctionnement d'électrolyseur = Variable

Z: Nombre d'électron requis pour libérer une molécule $N_{cellules} = 2$

F: Constante de Faraday = 96500

$N_{cellule} = 90$ [41]

D'après la figure (IV.17) d'évolution de débit en fonction de temps passée par deux étapes :

[8h00 à 13h00] :

On observe une augmentation de débit jusqu'à sa valeur maximale (8.11 l/h) à la mi-journée grâce à l'augmentation de courant d'électrolyseur, donc quand le courant d'électrolyseur augmente le débit augmente aussi.

[13h00 à 17h00] :

On observe que le débit est diminué environ (3.78 l/h) et cela car la diminution du courant d'électrolyseur.

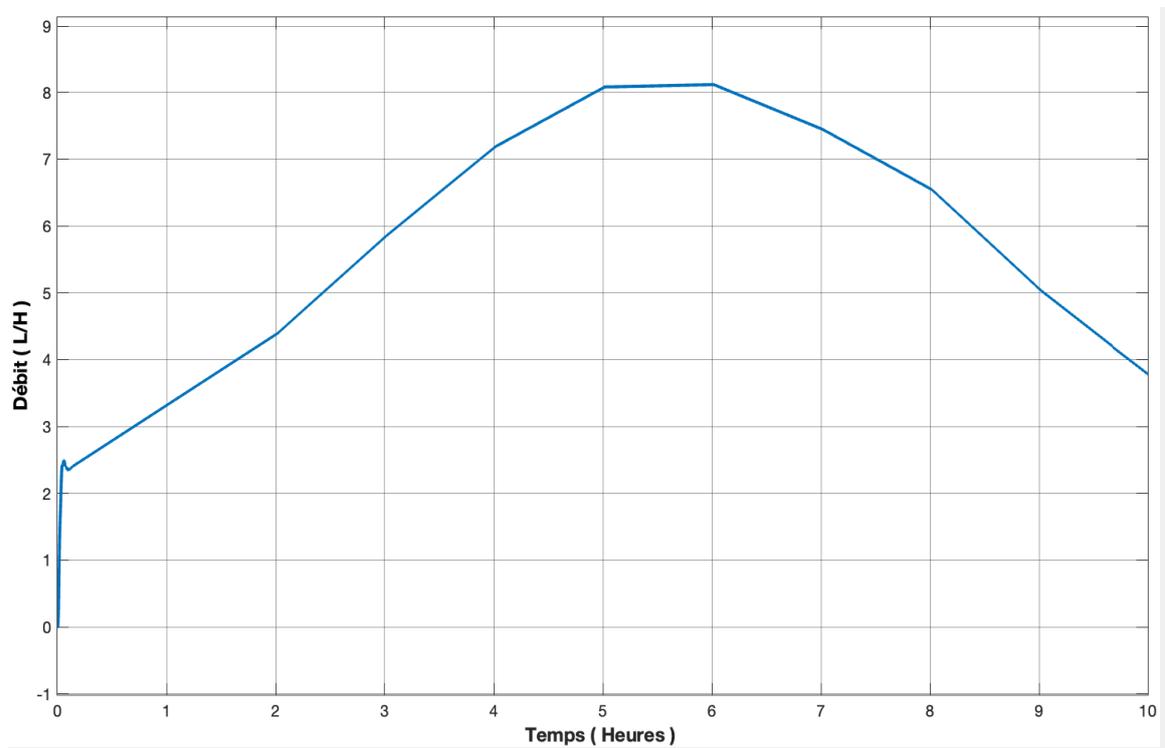


Figure. (IV.18) : Evolution de débit en fonction de temps

IV.9. Pression d'Hydrogène :

D'après la figure (IV.18) d'évolution de pression en fonction de temps on observe que la pression reste constante pendant les heures d'expérience car on ne pas modéliser le réservoir de stockage et le volume de réservoir lorsque y a plusieurs facteurs comme la section de réservoir

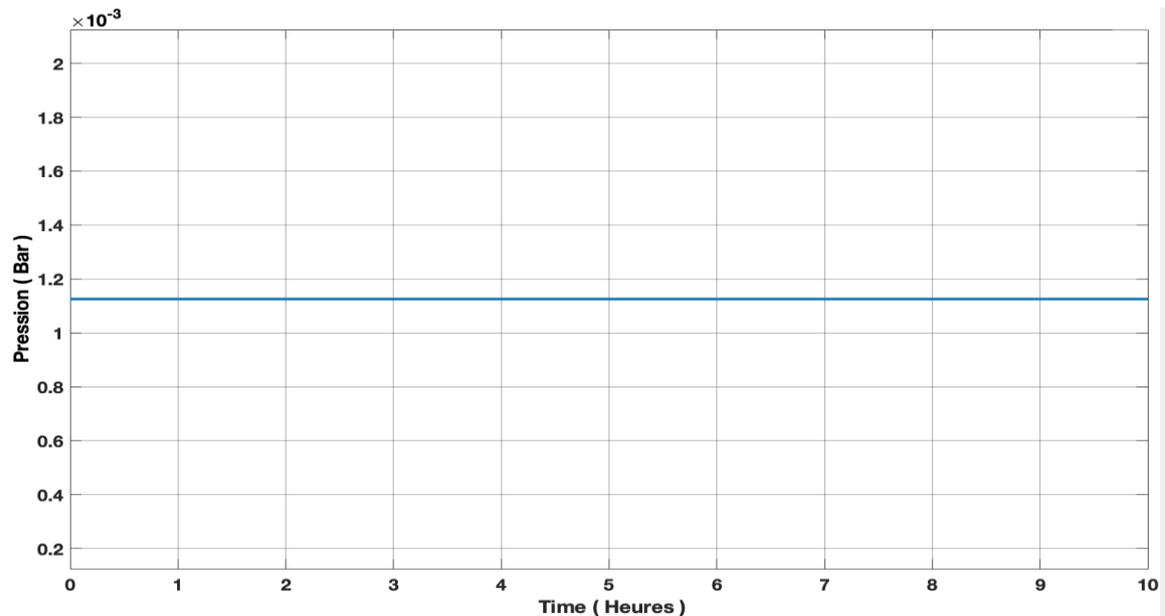


Figure. (IV.19) : Evolution de pression en fonction de temps

IV.10. Résultats totales de simulation :

Nous avons exécuté notre organigramme sous MATLAB. Les résultats de simulation pour la journée 04/04/2004 sont présentés dans le tableau suivant d'après les équations précédentes :

Temp	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 GPV	I _m (A)	3.46	4.56	6.08	7.48	8.42	8.47	7.78	6.85	5.28	3.95
Tension max de GPV	V _m (V)	65.8	86.7	115.7	142.2	160	161	147.9	130.2	100.4	75.12
Puissance max de GPV	P _m (w)	227.9	396.4	704.1	1064	1348	1365	1152	891.6	530.9	297
Débit de production d'hydrogène	Q(l/h)	3.16	4.37	5.82	7.16	8.06	8.11	7.45	6.55	5.06	3.78
Volume d'hydrogène	V(l)	33.16	43.7	58.2	71.6	80.64	81.14	74.56	65.59	50.61	37.86
Pression d'hydrogène	P (bar)	1.126 *10 ⁻³									
Volume totale produire : 531,47 L											
Débit totale produire : 59.52 L											

Tableau (IV.6): Résultats de l'électrolyseur

IV.10.1. Analyse et interprétation des résultats :

- Les résultats obtenus montrent que le débit d'hydrogène et son volume sont directement liés au courant et donc à l'éclairement et à la température.
- Le choix judicieux du nombre de cellules de l'électrolyseur améliore les résultats d'adaptation du système

IV.11. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons simulé la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque en partant d'un modèle à une diode, et la caractéristique de l'électrolyseur PEM et branché le GPV avec un hacheur Buck et le MPPT pour un meilleur résultat de courant après Nous avons pris comme données, celles d'une journée typique sur un site réel.

Ensuite, on a réalisé l'électrolyseur PEM d'après loi de Tafel avec des différentes valeurs de températures et éclairagements et faire notre mesure pour calculer le volume et le débit et la pression d'hydrogène selon ce branchement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

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

L'objectif majeur est de produire le maximum d'hydrogène, le branchement de l'électrolyseur avec le Générateur Photovoltaïque et hacheur Buck et MPPT donne les meilleurs résultats grâce à l'augmentation de courant de fonctionnement qui considéré comme le plus important facteur dans la production de l'hydrogène.

L'étude de ce couplage par simulation a été effectuée, nous avons simulé la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque, en partant d'un modèle à une diode, et la caractéristique de l'électrolyseur PEM. Ensuite, on a branché le GPV avec un hacheur Buck et le MPPT pour un meilleur résultat de courant après Nous avons pris comme données, celles d'une journée typique sur un site réel, en l'occurrence la ville de OUREGLA.

Un modèle a été simulé sur MATLAB de l'électrolyseur PEM d'après loi de Tafel, vérifier sous des différentes valeurs de températures et éclairagements et faire notre calcul. Pour savoir le volume et le débit et la pression d'hydrogène produite par un fil solaire.

Ce travail donne une idée nouvelle pour stocker l'énergie solaire, au lieu de stockage électrique sera remplacé par stockage fluide ce point est notre perspective proposée.

Bibliographie

- [1] ALLEAU Thierry L'HYDROGÈNE Nouvelles technologies 29 Octobre2015
- [2] DELESTRE Isabelle de Paris I Panthéon Sorbonne Histoire mondiale de l'énergie
Publié le 7 Septembre 2015
- [3] LAURIE Henry : Hydrogène une méthode inédite et propre décuple sa production à partir de l'eau Publié le 2 mars 2022
- [4] LE CEA : L'ESSENTIEL SUR L'HYDROGENE PUBLIE LE 10 MAI 2022
- [5] PAUL Hagenmullerest hydrogène publie dans encyclopædi auniversalis [en ligne],
consulte le 17 juin 2022
- [6] LE BOULZEC Hugo :LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE « VERT » Publié le 14
Juin 2016
- [7] McPhy A pioneer of hydrogen technologies a solution for the future Publié le 2019
- [8] France hydrogene fiche 1.3 : Production et consommation d'hydrogène aujourd'hui –
AFHYPAC, Publié le 2015
<https://www.encyclopedie-energie.org/la-production-dhydrogene-vert/>
- [9] connaissance des énergies Hydrogène énergie Publié le 09 avril 2015
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie#notes>
- [10] AndreasZüttel Materials for hydrogen storage Volume 6, Issue 9, Publié September
2003, Pages 24-33
- [11] Air Liquide : Stocker l'hydrogène publié en 2022

<https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene>

[12] Mémento de l'Hydrogène « liquéfaction, stockage et transport de l'hydrogène sous forme cryogénique » fiche 4.3 – révision de juillet 2011 source : afh2

[13] L'hydrogène, une énergie pas comme les autres. :

<https://www.mtaterre.fr/dossiers/quoi-ca-sert-lhydrogene/lhydrogene-une-energie-pas-comme-les-autres>

[14] L'hydrogène, une énergie pas comme les autres. Article de site web :

<https://www.mtaterre.fr/dossiers/quoi-ca-sert-lhydrogene/lhydrogene-une-energie-pas-comme-les-autres>

[15] Étude et Simulation D'un Circuit De Commande D'un Système PV avec Anti Islanding Soutenu le 15 juin 2015

[16] Mémoire : Etude d'un système photovoltaïque avec un hacheur SEPIC

[17] Mémoire Master 2 Par Ahmed Behalil Mohcène Bouakka Khayreddine à l'université de Annaba

[18] (N.d.-b). Retrieved June 2, 2022, from <https://www.edfenr.com/lexique/rayonnement-diffus/>

[19] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », Solar Energy, vol. 4, no. 3, p. 1–19, Jul. 1960.

[20] Mémoire Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque par MAMMAR Abla et SEBIANE Djihane

[21] Mémoire de Magister, Thème : MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES Présenté par : Mme MEZIANI Zahra

[22] Modélisation d'une cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink publié le 04 décembre 2012 : <https://gootrio.com/modelisation-dune-cellule-photovoltaique-sous-matlab-simulink/>

[23] Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, LE PHOTOVOLTAÏQUE –
MODULE 3 – FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES Page 1/10

[24] Étude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque soutenu publiquement le xx Juin 2017

[25] MEMOIRE Master Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque Présenté par : MAMMAR Abla et SEBIANE Djihane

[26] Étude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Énergétique page 27 UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

[27] Article Scientifique sur Wikipedia <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse>

[28] Article Scientifique Rédigé par des auteurs spécialisés Ooreka
<https://piscine.ooreka.fr/astuce/voir/396475/electrolyseur>

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

[30] Article scientifique rédigé par Pierre MILLET le : 10 sept. 2007
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/reacteurs-chimiques-42330210/electrolyseurs-de-l-eau-a-membrane-acide-j4810/>

[31] Procède de fonctionnement d'électrolyseur ou de pile à combustible pemfc pour augmenter la durée de vie, lien : <https://patents.google.com/patent/WO2016124625A1/fr>

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

- [33] Modélisation d'une électrolyse d'eau à membrane polymère pour la production d'hydrogène par B. Soldi, Gökalp, A. Zeroual et A. Aymard
- [34] L'hydrogène électrolytique renouvelable KABOUCHE Nourdine, Attaché de Recherche Division Hydrogène Energie Renouvelables page.2
- [35] Baouia. S « étude et analyse d'un système photovoltaïque » Mémoire d'ingénieur, univ. Ouargla 2004
- [36] Mémoire master 2 ' Modélisation et Simulation d'un système de production d'hydrogène par voie Photovoltaïque présenter par : Khineche Kaddour et Kheridla Youcef.
- [37] M.R. Sourov, U.T. Ahmed and M.G. Rabbani, 'A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter', IOSR Journal of Engineering, Vol. 2, N°12, pp. 12 – 20, 2012.
- [38] C. Cabal, 'Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique dédié à la Conversion Photovoltaïque', Thèse de Doctorat, LAAS, Université de Toulouse, 2008.
- [39] B. Ankaiah and J. Nageswararao, 'Enhancement of Solar Photovoltaic Cell by Using Short-Circuit Current MPPT Method', International Journal of Engineering Sciences Invention, Vol. 2, N°2, pp. 45 - 50, 2013.
- [40] A. Chermitti, O. Boukli-Hacene and S. Mouhadjer, 'Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink', International Journal of Computer Applications, Vol. 53, N°14, 2012.
- [41] Kréhi Serge AGBLI Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM–Pile à Combustible PEM en vue d'une application stationnaire.puiblié le 6 Mars 2012 dans l'Université de Franche-Comté

