

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Installations Energétiques et turbomachines

Simulation d'un système de production d'hydrogène solaire Photovoltaïque

Proposé et encadré par :
Dr. Lilia Aiche HAMANE
Mr. Tali MOHAMED

Réalisé par :
Sardi kheireddine
Touati Hichem

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

En premier lieu nous remercions Dieu qui nous a procuré ce succès

Nous remercions Docteur AICHE HAMANE Lilia et monsieur TALI Mohamed pour avoir accepté de diriger cette thèse, et dont l'aide précieuse nous a été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nos remerciements vont à Monsieur le président et Messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts fournis tout au long de notre formation

Nous remercions profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réaliser du présent travail

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents surtout ma mère, toujours elle m'a encouragé, et elle m'a tout donné pour réussir

Je dédie ce travail a mes sœurs et toute ma famille surtout l'écrivain et l'auteur

TOUATI ABDERRAHMANE

Je dédie ce travail à mes collègues et tous mes amis

SEDDIK et ses enfant AMINE ET MELLISSA

BILLEL et ses enfants HOUSSEM et Riad

Hichem

Je dédie ce modeste travail à mes parents surtout ma mère, toujours elle m'a encouragé, et elle m'a tout donné pour réussir

Je dédie ce travail a ma sœur et mon frère toute ma famille

Je dédie ce travail à mes collègues et tous mes amis

MOUMEN ;IMRANE ;YASSER ; MOHAMED;ABEDRAUF; HAMID; ABDOU; JILALAI;
SOFIAN; KHALED; et surtout TAHAR

KHIRO

SOMMAIRE

<i>Résumé</i>	
Introduction Générale	2
Chapitre1: Contexte et Problématique énergétique	3
Introduction	4
1.1.Contexte énergétique mondiale.....	4
1.1.1.production d'hydrogène dans le monde:	4
1.1.1.a Les principaux usages chimiques et pétroliers de l'hydrogène	4
a- L'hydrogène dans l'industrie chimique	4
b - L'hydrogène dans l'industrie pétrolière	5
c - Répartition de la consommation industrielle de l'hydrogène.....	5
1.1.1.b L'hydrogène et la demande mondiale d'énergie	6
1.1.2 Production d'hydrogène dans l'Algérie	6
1.1.2.1. POTENTIALITES DU SAHARA ALGERIEN.....	6
1.1.2.2. Potentiel Solaire.....	7
1.1.2.3 Potentiel éolien	7
1.1.2.4 Potentiel hydrique.....	7
1.1.2. 5 Gaz naturel	7
1.1.2.6 Estimation de la production d'hydrogène	8
1.1.3 Les propriétés de l'hydrogène.....	10
1.2.LES TECHNIQUES DE PRODUCTION D'HYDROGENE:.....	12
1.2.1. La décomposition catalytique du gaz naturel.....	12
1.2.2. Oxydation partielle	13
1.2.3. Oxydation partiel (Non catalytique)	13
1.2.3.1. Les Réactions chimiques mise en jeux	14
1.2.3.2.Évolution de l'équilibre	14
1.2.4. Gazéification du charbon	16
1.2.4.1Principe	16
1.2.5. L'électrolyse.....	16
1.2.5.1Principe général de l'électrolyse de l'eau:	17
1.3.Technique De Production De L'hydrogène	20
1.3.1 Procédés biologiques	20

1.3.2. La gazéification de la biomasse	20
1.4.SYSTEME DE CAPTAGE	21
1.4.1. RAYONNEMENT SOLAIRE	21
1.4.2 Types de rayonnement solaire:	22
1.4.2.1. Le rayonnement direct:	22
1.4.2.2. Le rayonnement diffus:	22
1.4.2.3. Le rayonnement réfléchi:	22
1.4.3 Générateur Photovoltaïque	23
1.4.4 La cellule photovoltaïque.....	24
1.4.5 Batterie	24
1.4.6 Onduleur	25
1.4.7 Système de régulation.....	25
1.4.7.1 Principe de fonctionnement.....	25
1.4.8.Définition Du Système Photovoltaïque :	26
1.4.9 CONCLUSION	27
1.5-Les différentes technologies d'électrolyseurs.....	27
1.5.1 Introduction.....	27
1.5.2.Électrolyseurs.....	27
1.5.3.Électrolyseur solide à membrane polymère	28
1.5-3-1.Principe de fonctionnement	28
1.5.3.2.Électrodes.....	29
1.5.3.3.Electrode positive	30
1.5.3.4.Électrode négative	30
1.5.3.5.Dégradation des électrodes	30
1.5.3.6Caractéristique.....	31
1.5.3.7.Avantages Electrolyseur PEM.....	31
1.5.4.Electrolyseurs alcalins	31
1.5.4.1 Principe de fonctionnement.....	31
1.5. 5 électrolyseurs à haute température	32
1.5.5.1 Principe de fonctionnement.....	32
1.6. Stockage d'hydrogène	33
1.6.1 Stockage sous forme liquide à basse pression.....	33
1.6.2 Stockage gazeux sous basse pression	34
1.6.3 Stockage gazeux sous haute pression	34

1.6.4 Stockage solide	34
Chapitre2:Modélisation de système PV	36
Hydrogène	36
2.1. INTRODUCTION	37
2. 2 Modélisation D'un Panneau Photovoltaïque	37
2.2.2. Cellule PV idéale:	38
2.2.3. Modélisation du réseau PV	39
2.3 Le panneau solaire	42
2.3.1.Montage en série	42
2.3.2.Montage en parallèle	42
2.3.3. Le champ Photovoltaïque pour les calcul	43
2.4.Modélisation D'un Electrolyseur PEM	43
2.4.1. Mode de fonctionnement de l'électrolyseur (PEM) système	43
2.4.1.1 Tension de la cellule de fonctionnement:	44
2.4.1.2.Tension thermo neutre	45
2.4.1.3 Surtension d'activation :	45
2.4.1.4 Surtension	46
a. Sur potentielle ohmique	46
b. Surtension inter faciale	47
4.1.5. Surtension de diffusion	47
2.5.L'organigramme pour tracer la caractéristique (I-V) et la production d'hydrogène:.....	48
2.6.CONCLUSION.....	49
Chapitre3:Résultats et Discussion	51
3.1.INTRODUCTION	52
3.2. Le model et les caractéristiques de le Panneau Photovoltaïque:	53
3.2.1. Modèles de simulation de la caractéristique I-V :	53
3.3. Résultats et discussion des graphe	Error! Bookmark not defined.
3.3.1 Variation de température de l'année	54
3.2.Variation de l'irradiation et les températures mensuel.....	55
3.3.La puissance électrique annuel et pour chaque mois.....	56
3.4.Caractéristiques de Electrolyseur PEM	63
3.5. la Quantité d'Hydrogène produise de le champ Photovoltaïque	63
3.6.Conclusion.....	72
Références:.....	75

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Répartition française de la consommation d'hydrogène dans l'industrie chimique et le raffinage (Source : Alphéa Hydrogène, Actualité Chimique n°347, 2014)	19
Tableau 1.2 Répartition européenne de la consommation d'hydrogène dans l'industrie chimique et le raffinage (Source : Alphéa Hydrogène, Actualité Chimique n°347, 2014)	19
Tableau 1.3 Répartition mondiale de la consommation d'hydrogène dans l'industrie chimique et le raffinage (Source : Alphéa Hydrogène, Actualité Chimique n°347, 2014)	19
Tableau 1.4 Potentiel de Production annuelle d'hydrogène (l/m ² /j).....	23
Tableau 1.5 La valeur énergétique de certain combustible compare a l'hydrogène	25
Tableau 1.6 Quelques propriétés physiques de l'hydrogène	26
Tableau 1.7 Composition des gaz de synthèse issus de quelque procédés	27
Tableau 1.8 Les cycles thermochimiques peuvent être classés en deux catégories	33
Tableau 2.1 Paramètre du modèle pour l'électrolyse de l'eau basée sur Pt électrodes d'anode et de cathode sur l'électrolyte Nafion.....	60
Tableau 2.2 Sélection des paramètres en ohmique	61
Tableau 3.1 Données géométriques de Timimoune	66
Tableau 3.2: les caractéristiques de model aleo s_17 sol	67
Tableau 3.3:les caractéristiques de model aleo s_17 sol	67
Tableau 3.4: La moyen des valeurs des températures et irradiation pour chaque mois.....	70
Tableau 3.5: Volume d'hydrogène mensuellement.....	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Les sources d'hydrogène est son utilisation.....	10
Figure 1.2 four de chauffage.....	13
Figure 1.3 Déplacement de l'équilibre avec la température $CH_4/O_2 = 2/1$	15
Figure 1.4 Déplacement de l'équilibre en fonction de la température et de la Pression avec un rapport molaire $C/O_2/H_2O = 3/1/1$	16
Figure 1.5 Évolution des potentielle $\Delta H_{et} \Delta G$ en fonction de la température	18
Figure 1.6 Mécanismes et réactions mis en jeu lors du processus de Gazéficat	21
Figure 1.7 Distribution spatiale du rayonnement du corps noir et du Rayonnement solaire dans l'espace extraterrestre (AM0) et À la surface de la Terre (AM1.5) .	23
Figure 1.8 Différentes composante de rayonnements	24
Figure 1.9 cellules photovoltaïque	24
Figure 1.10 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	26
Figure 1.11 électrolyseurs.....	28
Figure 1.12 Électrolyte solide à membrane polymère.....	29
Figure 1.13 Courbe de polarisation typique d'une cellule d'électrolyse PEM, et Rendements associés	31
Figure 1.14 Principe de l'électrolyse alcaline	32
Figure 1.15 Principe de fonctionnement a haut température	33
Figure 1.16 Développement du stockage solide depuis 50 ans.....	35
Figure 2.1 Modèles de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque	38
Figure 2.2 Modèle de cellule simplifié	38
Figure 2.3 Courbe I-V caractéristique d'un dispositif PV pratique et les trois points : court-circuit (0, I_{sc}), MPP (V_{mp} , I_{mp}) et circuit ouvert (V_{oc} , 0).	38
Figure 2.4 Branchement des modules en séries	42
Figure 2.5 Branchement des modules en parallèles.	42
Figure 2.6 Schéma de montage de champ photovoltaïque	43
Figure 3.1 Données géométrique de Timimoune A partir d'un champ photovoltaïque qui permet d'alimenter.....	52
Figure 3.2: La courbe I-V de le panneau aleo S_17 180	54
Figure 3.3: La courbe P-V de panneau aleo S_17 180	54
Figure 3.4: Variation de Température et irradiation pour chaque Mois.....	56
Figure 3.5: Courbe de variation de Puissance en fonction de Temps	57

Figure 3.6: Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Janvier.....58

Figure 3.7 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Février.....58

Figure 3.8 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Mars59

Figure 3.9 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Avril.....59

Figure 3.10 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Mai.....60

Figure 3.11 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Juin.....60

Figure 3.12 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Juillet.....61

Figure 3.13 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Aout61

Figure 3.14 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Septembre62

Figure 3.15 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Octobre.....62

Figure 3.16 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Novembre.....63

Figure 3.17 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Décembre63

Figure 3.18 :Schéma de système de production d'hydrogène64

Figure 3.19 :Courbe de Quantité d'Hydrogène annuel en fonction de Temps.....64

Figure 3.20 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de janvier66

Figure 3.21:Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Février66

Figure 3.22:Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Mars67

Figure 3.23 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Avril67

Figure 3.24 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Mai.....67

Figure 3.25 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Juin.....67

Figure 3.26 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Juillet.....68

Figure 3.27 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Aout68

Figure 3.28 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Septembre...69

Figure 3.29 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Octobre.....69

Figure 3.30 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Novembre ...71

Figure 3.31 :Courbe de la quantité d'Hydrogène en fonction de Temps mois de Décembre ...71

Figure 3.32: Quantité d'Hydrogène pour chaque mois.....72

Liste des symboles

I_{pv}	courant photovoltaïque
T_{ref}	temperature de reference (K)
G_{ref}	irradiance at STC(W/m ²)
k	constant de Boltzmann (J/K)
q	la charge de l'électron (C)
I_{sc}	courant de court de circuit(A)
V_{oc}	tension de circuit ouvert (V)
K_i	constant de température de courant
N_s	nombre de cellule en série
a	constant idéalité de diode
E_g	énergie gap
G	radiation actuel (W/m ²)
R_s	résistance série de panneau photovoltaïque
I_0	courant de saturation de diode
V_{cell}	tension de cellule(V)
V_{tn}	tension thermo neuter(V/cell)
i_a	densité de courant a l'anode
i_c	densité de courant a cathode
η_a	surtension d'activation a l'anode
η_c	surtension d'activation a cathode
R_{ele}	résistance électrolyseur
R_{io}	résistance ionique
η_{Ω}	surtension ohmique
$\dot{\eta}H_2$	débit d'hydrogène
V_{rev}	tension réversible
P-V	panneau photovoltaïque
PEM	Electrolyseur membrane polymère

Résumé

في ظل قلة الطاقات خاصة البترول وانخفاض الأسعار وجب علينا الاعتماد على طاقات أخرى ومن أهم هذه الطاقات

الطاقة الهيدروجين

انتاج الهيدروجين يعتمد عليه اليوم في العالم نظرا لخصائصه المميزة وكذلك لخفضه على البيئة من جهة أخرى والجزائر تمتلك كل هذه المقومات من أجل استغلال هذه الطاقة

لإنتاج الهيدروجين نستغل الطاقة الشمسية وذلك باستعمال الواح الشمسية ومن أجل فصل مكونات الماء نستعمل محلل كهربائي

مطلب ومحلل كهربائي وذلك باستعمال برنامج بمنزجه مولد فووفولطائية ومن أجل الحصول على هذه النتائج قمنا

كلمات مفتاح: انتاج الهيدروجين، محلل كهربائي، فووفولطائية

Résumé :

Compte tenu du manque d'énergie notamment du pétrole et des bas prix, nous devons nous appuyer sur d'autres énergie, et la plus importante de ces énergies est l'énergie hydrogène

Production L'hydrogène en dépend aujourd'hui dans le monde en raison de ses propriétés distinctives, ainsi que pour préserver l'environnement d'autre part, et l'Algérie possède tous ces ingrédients afin d'exploiter cette énergie

Pour produire de l'hydrogène, nous utilisons l'énergie solaire en utilisant des panneaux solaires, et afin de séparer les composants de l'eau, nous utilisons un électrolyseur PEM

Afin d'obtenir ces résultats, nous avons modélisé un générateur photovoltaïque et un électrolyseur PEM, en utilisant logiciel Matlab

Mots clés : production l'hydrogène, électrolyseur PEM, photovoltaïque

Abstract:

in light of the lack of energies, especially oil and low prices, we must rely on other energies, and the most important of these energies is energy of hydrogen

hydrogen production depends on it today in the world due to its distinctive properties,

as well as to preserve the environment from other witnesses, and Algeria possesses all these ingredients for exploit this energy

to produce hydrogen, we use solar energy using solar panels and in order to separate the components of the water we using an electrolyse PEM

in order to obtain its results, we modelled a photovoltaic generator and an electrolyser using

Matlab software

Keywords: hydrogen production, electrolyser PEM, photovoltaic

Introduction générale

Introduction Générale :

L'énergie est un facteur important qui contribue au développement d'une nation en particulier dans le secteur industriel. Toute fois, en raison de l'augmentation de la demande mondiale d'énergie, les réserves de combustibles comme le gaz naturel et le pétrole diminuent à un rythme alarmant. Les combustibles fossiles tels que le charbon et méthane sont connus pour émettre du dioxyde de carbone dans l'atmosphère responsable des effets du réchauffement planétaire. Il est donc important de rechercher une source d'énergie durable. L'hydrogène en tant que vecteur d'énergie propre représente une bonne alternative [2,3]. C'est l'une des solutions potentielles aux crises actuelles de pollution de l'énergie et de l'environnement sans carbone [3]. Aujourd'hui, il existe plusieurs technologies de production d'hydrogène, la plupart se basent sur l'utilisation de combustibles fossiles. Néanmoins, l'hydrogène vert est associé également aux technologies propres, comme l'électrolyse, la photo électrochimie...etc.

L'électrolyseur PEM offre un moyen efficace et pratique pour une haute qualité de production d'hydrogène. En effet, la technologie PEM permet l'utilisation de densité de courant plus élevées et d'augmenter le rendement et le degré de pureté des gaz produits en plus d'un meilleur niveau de sûreté [4].

L'objectif de notre travail est de modéliser et simuler un système de production d'hydrogène à partir d'un électrolyseur alimenté par 'un champ solaire photovoltaïque.

Notre travail est présenté en trois chapitres .Le premier est consacré à l'étude du contexte énergétique mondial et en Algérie pour la production d'hydrogène. On a passé en revue les techniques de production de l'hydrogène .Le chapitre 2 décrit le système de production d'hydrogène, à savoir le champ photovoltaïque et l'électrolyseur PEM. L'aspect théorique et modélisation du fonctionnement de l'électrolyseur y est décrit. Un programme est développé pour la simulation du champ photovoltaïque et la production d'hydrogène.

Dans le troisième chapitre ,nous présentons les résultats de notre simulation qui consiste en la production d'hydrogène sur le site de Timimoune

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre1: Contexte et Problématique énergétique

Introduction :

L'approvisionnement énergétique mondial est aujourd'hui essentiellement basé sur l'utilisation des ressources fossiles et nucléaire. A terme, de telles sources d'énergie pourraient causer de sérieux préjudices à notre environnement. Les pollutions atmosphériques et l'effet de serre, mis en cause dans le réchauffement climatique, associés aux retombées radio actives liées au nucléaire sont des conséquences attendues. Ainsi, à la lumière de tous ces éléments, le système d'énergie actuel n'est pas viable sur le moyen et long terme. Le changement climatique est tenu pour l'une des menaces les plus sérieuses pesant sur la durabilité de l'environnement de la planète, sur la santé et le bien-être humain et sur l'économie mondiale.

L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme qui met la situation énergétique mondiale en rupture avec les objectifs du développement durable, provoque une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes.

1.1.Contexte énergétique mondiale:

1.1.1.production d'hydrogène dans le monde:

N'existant pas dans la nature à l'état libre, l'hydrogène est produit en le dissociant des atomes avec lequel il est combiné. Ceux-ci sont des atomes d'oxygène dans le cas de l'eau, on procède alors par électrolyse. Ce sont des atomes de carbone pour les matières fossiles qui, elles, sont dissociées par reformage ou oxydation en faisant également intervenir de l'eau dans les réactions. Hormis l'eau, les matières fossiles représentent 96% des matières premières productrices d'hydrogène dans le monde. Elles se répartissent en: 49% de gaz naturel ; 29% d'hydrocarbures liquides ; 18% de charbon¹ . Au total ce sont 60 millions de tonnes d'hydrogène qui sont produits chaque année dans le monde¹ : - 11 Mt le sont aux Etats-Unis, - 8,8 Mt le sont en Europe, - 922 000 t le sont en France. Cette production qui consiste à échanger les atomes d'hydrogène des hydrocarbures par des atomes d'oxygène est accompagnée d'une émission de gaz carbonique. En cela elle n'est guère envisageable pour obtenir ce vecteur clé de la filière énergétique décarbonée² qu'est l'hydrogène.[5]

1.1.1.a Les principaux usages chimiques et pétroliers de l'hydrogène

a- L'hydrogène dans l'industrie chimique

L'hydrogène est une des matières de base des industries chimique et pétrochimique. Il est : - soit fabriqué spécifiquement dans des unités dédiées à sa production (vaporeformage du méthane, électrolyse de l'eau, ...) - soit coproduit dans des fabrications d'autres produits chimiques, tels que l'éthylène ou le chlore. Sa valorisation en tant que matière première étant encore très supérieure à sa valeur énergétique, les disponibilités d'hydrogène sont généralement regroupées sur chaque site dans un « réseau hydrogène » et redistribuées dans les diverses unités de fabrications du site qui en sont consommatrices.[5]

b - L'hydrogène dans l'industrie pétrolière

Les raffineries s'efforcent de produire à partir de pétroles bruts variés le maximum de produits commercialisables (essence, diesel, kérosène, naphta...) qui doivent répondre à des normes précises.

Dans le schéma de raffinage, un certain nombre d'unités de traitement sous-produisent de l'hydrogène (cracking thermique ou catalytique, reformeur catalytique...) alors que d'autres en sont consommatrices (hydrocracking, hydrotraitement, désulfuration...). La tendance vers des spécifications de plus en plus sévères pour les carburants et les produits pétroliers fait croître la demande en hydrogène et conduit à des bilans globaux déficitaires. C'est pourquoi la plupart des raffineries sont amenées à produire dans des unités de « vaporeformage », l'hydrogène complémentaire dont elles ont besoin. De ce fait, en Europe et dans le monde, les besoins de l'industrie pétrolière sont devenus, au cours de ces dernières années, la plus importante source de consommation d'hydrogène.

c - Répartition de la consommation industrielle de l'hydrogène:

Utilisation	Quantité consommée (milliers des tonnes/an)	%
Raffinage pétrolier	544	59
Ammoniac et engrais	240	26
Industrie chimique	92	10
Métallurgie	9.2	1
Divers	36.8	4
Total	922	100

Tableau1.1 - Répartition française de la consommation d'hydrogène dans l'industrie chimique et le raffinage (Source : Alphéa Hydrogène, Actualité Chimique n°347, 2014)

En Europe :

Utilisation	Consommation	%
Production ammoniac	3.2	39
Autres produits chimiques Et Métallurgie	1.15	14
Raffinage	3.9	47
Total	8.25	100

Tableau 1.2 Répartition européenne de la consommation d'hydrogène dans l'industrie chimique et le raffinage (Source : Alphéa Hydrogène, Actualité Chimique n°347, 2014)

Dans le monde:

Utilisation	Consommation	%
Production ammoniac	22.8	38
Autres produits chimiques	4.8	8
Raffinage	26.4	44
Divers	6	10
Total	60	100

Tableau 1.3 - Répartition mondiale de la consommation d'hydrogène dans l'industrie chimique et le raffinage (Source : Alphéa Hydrogène, Actualité Chimique n°347, 2014)

1.1.1.b L'hydrogène et la demande mondiale d'énergie

S'ils étaient uniquement destinés à des besoins énergétiques, les 60 millions de tonnes d'hydrogène produits aujourd'hui dans le monde – soit un équivalent de 171 Mtep - ne représenteraient que 1,3 % de la production totale d'énergie qui est de 13 100 Mtep [5].

Il faudrait un ajustement d'ordre de grandeur difficilement envisageable et ce, tout particulièrement si l'on voulait s'en tenir à n'utiliser que de l'hydrogène vert, celui obtenu sans émissions de carbone par électrolyse à partir d'électricité renouvelable. Là en effet est la condition impérative pour conserver les vertus environnementales du recours à l'hydrogène-énergie.

Or, d'après le « Renewables 2014 Global Statu Report », la totalité de cette électricité renouvelable actuellement produite dans le monde, 524 Mtep, ne correspond qu'à 4% de la consommation totale d'énergie ! Même destinée au seul transport avec des véhicules à pile à combustible, l'actuelle production d'hydrogène serait de près de 13 fois inférieure à ce qui serait nécessaire, soit environ 2 200 Mtep [5].

Au jeu des propositions pour demain, pourquoi ne pas réserver, dans une première phase, cette mobilité hydrogène vertueuse pour l'environnement, de préférence aux zones urbaines et industrielles à forte concentration ? Dans tous les cas, un bel avenir pour l'éolien, le solaire et l'hydraulique avec toutefois un problème à résoudre : celui d'une énorme production conjointe d'oxygène.

Il faut ajouter que ces chiffres de production d'hydrogène vert sont même à revoir entièrement à la hausse si l'on prend en compte la filière du « Power to Gas », ce moyen de réguler et de valoriser l'intermittence de l'électricité renouvelable [5].

Quant à l'hydrogène obtenu à partir des combustibles fossiles, l'émission de CO₂ qui en résulte hypothèque son avenir tant le captage et l'enfouissement géologique de ce gaz restent problématique [5].

Quoi qu'il en soit, l'hydrogène-énergie est amené à devenir un vecteur énergétique largement répandu et complémentaire du vecteur électrique mais Il faudra en maîtriser la production.

Les prévisions sont difficiles à établir devant l'inconnu des progrès scientifiques et techniques à venir, tout comme l'est l'évolution du niveau de la demande mondiale en énergie dont on peut dire à l'évidence qu'elle ne peut être qu'en augmentation.

1.1.2 Production d'hydrogène dans l'Algérie:

1.1.2.1. POTENTIALITES DU SAHARA ALGERIEN:

Le sud algérien englobe les régions désertiques et arides du Sahara algérien. Ce Sahara occupe plus de 85% du territoire national mais abrite moins de 10 % de la population algérienne [6]. La région est toutefois très peu développée. Ceci revient peut être aux conditions climatiques des plus extrêmes. Ce milieu est soumis à des alternances de chaleur et

de froid : aux journées caniculaires succèdent les nuits glaciales et aux hivers rigoureux les étés torrides. Les terres sont peu arable et les pluies sont rares et ne dépassent que rarement les 200mm par an. C'est aussi une région très faiblement peuplée avec une densité de l'ordre de 1,3 habitants /Km². Les villages, concentrés dans les oasis éparses, sont caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication. Toutefois le Sahara algérien recèle d'énormes richesses qui sont autres que les hydrocarbures.

1.1.2.2. Potentiel Solaire

Le Sahara algérien constitue un des plus importants gisements solaires au monde. Avec un ciel clair, quasiment sans nébulosité, le Sahara est le domaine du soleil. La durée d'insolation, de l'ordre de 3 500 heures/an est la plus importante au monde. Elle est toujours supérieure à 8 heures/jours à l'exception de l'extrême sud où elle descend jusqu'à 6 heures/jour durant l'été. Pendant l'été, elle peut atteindre jusqu'à plus de 12 heures/jour au centre du Sahara. De par sa position géographique, la durée d'insolation journalière ne présente pas d'importants écarts entre les différents mois de l'année, comme c'est le cas des villes du nord du pays. Ceci permet une disponibilité égale durant toute l'année. L'irradiation solaire reçue par an est de l'ordre de 2650 kWh/m² [7]. La puissance reçue par jour est toujours supérieure à 5 kWh/m² et peut atteindre facilement les 7 kWh/ m². La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de tout le pays. Si toute cette énergie est mise en valeur, cela constituerait une source d'énergie très importante et un revenu inestimable.

1.1.2.3 Potentiel éolien

En plus du gisement solaire, le Sahara algérien et plus particulièrement la région centre et ouest constitue un important gisement éolien. Avec une vitesse annuelle moyenne de 6 m/s à 10 m du sol, la région d'Adrar représente le potentiel énergie éolienne le plus important de tout le pays.[8, 9]

1.1.2.4 Potentiel hydrique

Au Sahara, les besoins en eau sont satisfaits par les eaux souterraines. Les ressources superficielles, d'un potentiel de l'ordre de 600 millions m³/an, se trouvent surtout au nord du Sahara [10]. Toutes ces ressources, peu renouvelables et surexploitées peuvent s'avérer insuffisantes. Néanmoins, l'existence d'une nappe aquifère attribuée à l'Albien peut jouer un rôle majeur dans le développement de la région. S'étendant de l'ouest de la Libye et de la Tunisie à la région d'Adrar et de Biskra et de Laghouat jusqu'à Illizi, cette nappe couvre une superficie de 800 000 Km². Les réserves sont estimées à 6 1010 m³. Sa profondeur varie d'est en ouest ; elle est de quelques dizaines de mètres à Adrar, de quelques centaines de mètres à Ghardaia et Ouargla et plus de 1700 m à Touggourt [10].

1.1.2. 5 Gaz naturel

Le gaz naturel n'est pas une ressource renouvelable mais un important vecteur énergétique. En plus du pétrole, le Sahara renferme de très importants gisements gaziers [11]. Ces gisements, dont les réserves sont de l'ordre de 3 1012 m³, sont situés principalement à Hassi Messaoud, Hassi Touil, Rhourd Nous, Haoud Berkaoui, Adrar et Tin Fouye Berkaoui. La production du gaz naturel est de l'ordre de 60 milliards de m³ avec autour de 10 milliards pour la consommation nationale.

Un vaste réseau, long d'un peu plus de 15 000 Km, achemine le gaz naturel vers les consommateurs nationaux et les complexes de liquéfaction. Des méthanières assurent sa livraison aux clients étrangers. Deux gazoducs, à travers la mer, délivrent du gaz naturel à l'Europe.

1.1.2.6 Estimation de la production d'hydrogène:

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène[12]. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon, l'électrolyse de l'eau, les cycles thermochimiques purs et hydrides de dissociation de l'eau ainsi que les procédés photochimiques et phytobiologiques sont parmi les techniques les plus utilisées. La plupart de l'hydrogène produit, particulièrement pour l'industrie pétrochimique, est obtenu à partir du gaz naturel, particulièrement par l'évaporé formage[13]. Les ressources gazières peuvent être valorisées par la production de l'hydrogène - solaire. De tous les systèmes de production d'hydrogène par décomposition de l'eau en utilisant les énergies renouvelables, la combinaison du module photovoltaïque pour la captage de l'énergie solaire et les cellules électrolytiques pour la décomposition de l'eau est de loin le système le plus attrayant et le plus simple. Ce système comprend :

1. Le module photovoltaïque qui est constitué de panneaux de matériaux photovoltaïques pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'efficacité du module dépend de la nature des cellules photovoltaïques et des conditions météorologiques. Jusqu'à présent le rendement du meilleur module photo voltaïque est en pratique de l'ordre de 12 % [14].

2. Le système de mise en forme et de conditionnement du signal issu du module photovoltaïque. Dans ce système, des unités de stockage sont aussi à prévoir pour les périodes hors peak. Des études sur ces systèmes [15,16] ont montré que leur rendement ne dépasse pas les 97 %. Une valeur très conservatrice de ce rendement serait de l'ordre de 85 %.

3. Le système électrolytique qui comprend l'ensemble de cellules consistant chacune de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique et connectées à une alimentation DC. La solution électrolytique est principalement de l'eau au quelle un produit chimique conducteur est ajouté. Le rendement du système électrolytique dépend aussi bien de la nature de la cellule et de sa température que des conditions météorologiques et des caractéristiques du module photovoltaïque. Ce rendement est en général compris entre 65 % et 85 % [17]

En plus de ces systèmes, on doit prendre en compte les systèmes auxiliaires tels que les systèmes de contrôle et de séparation des gaz produits et le système d'alimentation et de traitement de l'eau. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut provenir de différentes sources. Elle peut être prise de l'importante nappe phréatique qui dans certain cas, n'est qu'à quelques mètres de la surface. Ceci est plus particulièrement vrai dans la région d'El Oued et d'Adrar. L'estimation de la production d'hydrogène a été obtenue en utilisant les rendements des différents composants du système d'électrolyse et les moyennes annuelles ou les moyennes mensuelles de l'irradiation globale journalière pour les dix dernières années.

Sites	Latitude (Nord)	Longitude	Insolation (kWh/m ² /jour)	Potentiel hydrogène (l/m ² /jour)
Adrar	7° 49'	00° 11'w	6,04	120,3772
Tamnassat	22° 48'	05° 27'e	6,3	125,559
A-guezzem	9° 34'	05° 46'e	6,45	128,5485
Hassi-Mess	31° 40'	06° 8'e	5,71	113,8003
Biskra	34° 48'	05° 44'e	4,96	98,8528
I-Sefra	32° 45'	00° 36 w	5,35	106,6255
Timimoun	29° 15'	00° 17'e	5,84	116,3912
Laghouat	33° 48'	02°53'e	5,23	104,2339
Illizzi	26° 30'	08°28'e	6,04	120,3772
El Goléa	30° 34'	02°52e	5,78	115,1954
B.BMokhtar	21° 12'	00°34'e	6,27	124,9611
Djanet	24° 16'	09°28'e	6,25	124,5625
Tindouf	27° 40'	08° 09'	5,77	114,9961
Naama	33° 16'	00°18'w	5,13	102,2409
In Amenas	28°03'	09°38'e	5,99	119,3807
El oued	33° 30'	06°47e	5,29	105,4297
Béchar	31° 38'	02°15'w	5,48	109,2164
Touggourt	33° 07'	06° 08'e	5,29	105,4297
Ouargla	31°55'	05°24'e	5,7	113,601
In Salah	27° 12'	02° 28'e	5,98	119,1814
Ghardaia	32°24'	03° 48'e	5,48	109,2164
BeniAbès	30°08'	02°10'w	5,65	112,6045
Assekrem	23°16'	05°34'e	6,21	123,7653

Tableau I.4 :Potentiel de Production annuelle d'hydrogène (l/m²/j) [17]

1.1.3 Les propriétés de l'hydrogène :

Le dihydrogène est un composé moléculaire à l'état gazeux aux conditions normales de pression et de température. Les molécules comportent deux atomes d'hydrogène, sa formule chimique est H_2 . Il est présent sous forme de traces (0,5 ppm) dans l'air. C'est un gaz léger que la gravité terrestre ne peut d'ailleurs retenir.[18]

Des larges quantités d'hydrogène sont nécessaires dans l'industrie, notamment dans le procédé Haber-Bosch de production de l'ammoniac, l'hydrogénation des graisses et des huiles et la production de méthanol. D'autres utilisations de l'hydrogène sont la fabrication de l'acide chlorhydrique, le soudage, les carburants pour fusées et la réduction de minerais métalliques, L'hydrogène liquide (LH_2) est utilisé pour les recherches à très basses températures, compris l'étude de la supraconductivité, l'hydrogène était utilisé dans les ballons car il est quatorze fois plus léger que l'air. Le deutérium ($2H$) est utilisé dans les applications nucléaires n comme modérateur pour ralentir les neutrons. Les composés du deutérium sont aussi utilisés en chimie et en biologie pour étudier ou utiliser l'effet isotopique. [19]

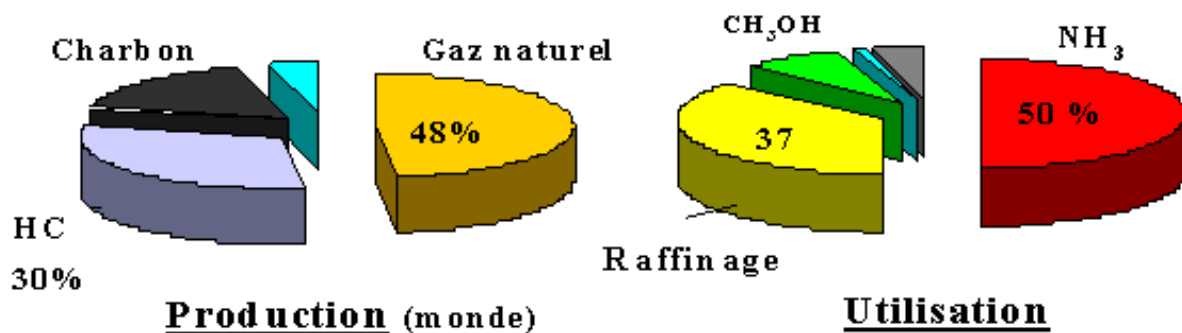


Figure I.1 Les sources d'hydrogène et son utilisation.(mémoire production d'hydrogène par énergie renouvelable) [1]

L'hydrogène est régulièrement cité comme vecteur d'énergie d'avenir. Qui est un combustible « propre » dans le sens où sa combustion ne génère que de la vapeur d'eau, mais qui n'est pas présent dans l'atmosphère sauf à l'état de traces (il faut donc prendre en compte la pollution générée par la fabrication de l'hydrogène). Il ne s'agit donc pas d'une source d'énergie primaire, ou fossile, mais d'un moyen de stockage de l'énergie, comme une batterie.

Combustible de gaz	PCI en kWh/Nm ³	PCS en kWh/Nm ³	Combustible Liquide	PCI en kWh/kg	PCS en kWh/kg
Hydrogène	2.985	3.542	Hydrogène	33.33	39.41
Monoxyde de carbone	3.513	3.513	Hexane	12.520	13.507
Méthane	9.960	11.074	Octane	12.433	13.397
Propane	25.993	28.292	Benzène	11.265	11.736
Butane	34.361	37.253	Styrène	11.358	11.835
Ethylène	16.504	17.601	Fioul lourd	11.091	12.079
Propylène	24.343	26.016	Fioul domestique	11.643	12.427

Tableau I .5: La valeur énergétique de certain combustible compare a l'hydrogène.[19]

L'hydrogène suscite beaucoup d'espoirs car il apporterait une réponse à deux des principaux défis énergétiques du XXI^e siècle : L'épuisement progressif des sources d'énergie non renouvelables, l'émission de gaz à effet de serre par les sources d'énergie utilisées actuellement. Claude Mandil, directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie, estime ainsi que l'hydrogène devra « jouer un rôle crucial » dans l'économie mondiale. De nombreuses expériences ont été menées dans le domaine des véhicules propres.

DaimlerChrysler possède une flotte de voitures (moteurs thermiques) roulant à l'hydrogène H₂, sans pile à combustible, avec réservoir cryogénique. Plusieurs pays européens subventionnent des programmes d'utilisation d'hydrogène dans les transports en commun.

Toutefois la production, le stockage et le transport de l'hydrogène posent encore de nombreux problèmes technologiques, de sorte que son utilisation de masse n'est pas possible actuellement.

Rappelons que l'hydrogène est sans couleur, sans odeur, sans goût, inflammable et non toxique. Lorsqu'il est condensé à son point d'ébullition, l'hydrogène devient un liquide incolore dont le poids est de 1/14 fois celui de l'eau. En raison de sa très basse température, l'hydrogène liquide rend très friable les matériaux qui sont en contact direct avec lui. En raison de ses propriétés chimiques, l'hydrogène est fondamentalement un agent réducteur et il est surtout employé comme tel dans l'industrie chimique, si on considère l'aspect physiologique, l'hydrogène est non toxique mais est asphyxiant en trop grande quantité dans l'air.[1]

Propriété	Valeur numérique	
PCI	3kWh/Nm ³	33.33kwh/kg
PCS	3.55kWh/Nm ³	39.41kwh/kg
Densité gazeuse à 20,3 °K	1.34 kg/m ³	
Densité gazeuse à 273 °K	0.08988 kg/Nm ³	
Densité liquide à 20.3 °K	70.8 kg/m ³	
Densité solide à 14.01 °K	85.8 kg/Nm ³	
Chaleur spécifique gaz (25°C) (Cp)	14.3 J/kg °C	
Chaleur spécifique liquide (-256°C) (Cp)	8.1 kJ/kg °C	
Chaleur spécifique solide (259.8°C) (Cp)	2.63 kJ/kg °C	
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg K	
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/ (mK)	
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg	
Chaleur latente de fusion au point triple	58.09 kJ/kg	
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)	
Electronégativité (Pauling)	2.1	
Masse atomique	1.0079 g/ mol	
Constante du gaz	4 124.5 J/kg °K	
Température de solidification	14.01 °K	
Température d'ébullition(1.013 bar)	20.268 °K	
Température critique	33.30 °K	
Pression critique	12.8 atm	

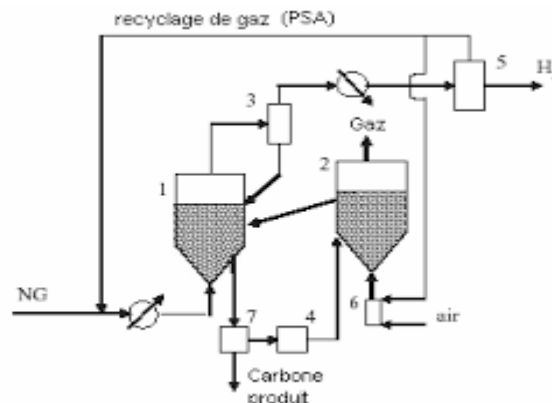
Tableau I.6:Quelques propriétés physiques de l'hydrogène.[1]

1.2.LES TECHNIQUES DE PRODUCTION D'HYDROGENE:

1.2.1. La décomposition catalytique du gaz naturel:

L'étude de la faisabilité technique de la production simultanée de l'hydrogène et du carbone par décomposition catalytique du méthane a été démontrée [20]. Les particules du carbone circulent entre un réacteur à lit fluidisé (où siège la décomposition du méthane) et un échangeur de chaleur (four de chauffage) à lit fluidisé. (Figure 2)

Figure I.2 four de chauffage [20]



1. réacteur à lit fluidisé
2. four de chauffage à lit fluidisé
3. Cyclone
4. Broyeur
5. Unité de séparation de gaz
6. brûleur
7. Séparateur de carbone

1.2.2. Oxydation partielle:

Le procédé d'oxydation partielle POX est un autre procédé coûteux en installation car il emploie comme oxydant l'oxygène (nécessite la séparation de l'air) mais comme charge tous les hydrocarbures lourds ne sont pas traités, donc il bénéficie d'un faible coût de la charge. Deux procédés sont proposés : catalytique ou non catalytique.[21]

Matière première	Reforming	Oxydation partielle Gaz désulfuré	Gazéification du charbon Gaz désulfuré
H ₂	56.1	46.8	40.3
CO	12.9	46.9	32
CO ₂	8	4.7	21.37
CH ₄	0.3	0.3	4.9
H ₂ S	0	Trace	0.3
H ₂ O	0.57	0.434	0.64

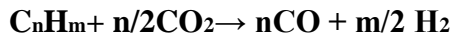
Tableau I.7 Composition des gaz de synthèse issus de quelques procédés.[21]

1.2.3. Oxydation partielle (Non catalytique)

On va donner un exemple du **procédé SGP (Shell Gasification Process)**. Un avantage clé du procédé non catalytique et d'utiliser toute forme d'hydrocarbure, il opère (à des hautes températures 1100–1500°C), on préfère les résidus lourds pour la production d'hydrogène car leur contenu en soufre et métaux lourds est aussi difficile à transformer à cause de leur émission de SO_x et NO_x, donc rejeter des raffineries.[21]

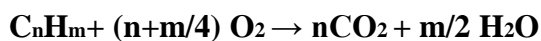
1.2.3.1. Les Réactions chimiques mise en jeux

Le procédé Shell de gazéification (SGP) est un procédé d'oxydation partielle qui consiste à convertir une charge d'hydrocarbures en gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$), suivant la réaction:



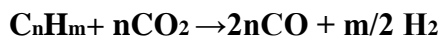
Cette transformation résulte de la mise en œuvre d'un grand nombre de réactions, dont les principales sont décrites ci-après.

1) La combustion complète d'une partie de la charge d'hydrocarbures conduit a la formation de CO_2 et H_2O :



Cette réaction est très exothermique elle permet d'atteindre la température nécessaire a l'opération.

2) Les molécules de CO_2 et H_2O formées réagissent avec les molécules d'hydrocarbures :



Ces réactions endothermiques absorbent une partie de la chaleur dégagée par la réaction de combustion et permettent d'abaisser la température des gaz vers 1 300-1 500 °C.

3) La présence d'eau formée lors de la combustion, ou apportée par injection de vapeur, provoque la réaction d'équilibre du « gaz a l'eau »[21]



2.3.2.Évolution de l'équilibre

D'un point de vue thermodynamique, l'obtention d'une teneur élevée en H_2 dans le gaz de synthèse brut est favorisée à basse température, condition incompatible avec l'opération d'oxydation du fait de la forte exo thermicité de celle-ci. En pratique, l'injection de vapeur d'eau permet de corriger cet effet en limitant la température de flamme et de déplacer l'équilibre vers la formation d'hydrogène.[21]

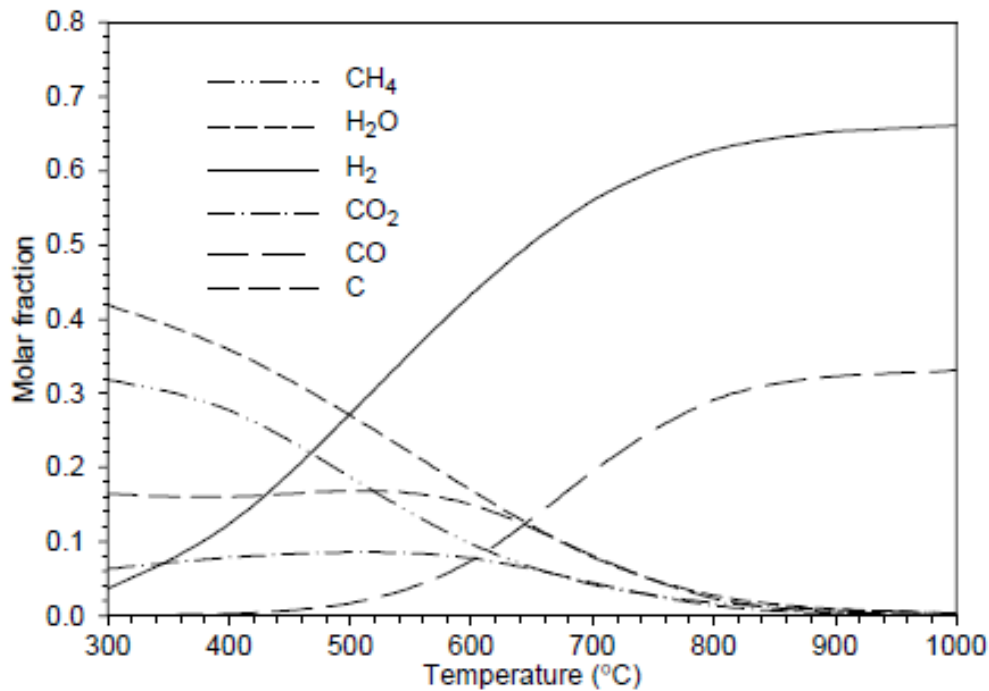


Figure I.3 Déplacement de l'équilibre avec la température $\text{CH}_4/\text{O}_2 = 2/1$. [21]

Ces différentes transformations s'accompagnent de réactions secondaires de craquage qui conduisent à la formation de méthane, d'hydrogène et de produits craqués.

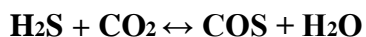
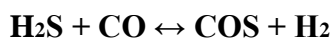
La décomposition du méthane, favorisée à haute température, produit des particules solides et carbonées (suires), selon la réaction :



La présence d'eau et de CO_2 permet de limiter la formation de carbone par les équilibres suivants :



Le soufre contenu dans la charge est converti dans la flamme en H_2S et COS . Le sulfure de carbonyle est obtenu par les réactions suivantes :



La quantité de sulfure de carbonyle dépend très peu de la pression et de la température. En pratique, des rapports molaires $\text{H}_2\text{S}/\text{COS}$ de l'ordre de 25 sont mesurés. H_2S et COS peuvent être facilement séparés du gaz par des procédés tels que les procédés Sulfinol ou Rectisol. Les composés azotés de la charge, généralement des dérivés de la pyridine, se décomposent en produisant de l'ammoniac, dont la majeure partie se décompose en N_2 et H_2 suivant :



L'ammoniac résiduel, très soluble dans l'eau, se concentre dans l'eau utilisée pour l'élimination des suies. Le pH de cette solution est de l'ordre de 9, ce qui permet d'éviter la corrosion de l'équipement par le dioxyde de carbone en solution.[21]

1.2.4. Gazéification du charbon[21][22]

La gazéification du charbon est le procédé permettant de transformer le charbon en gaz combustible riche en hydrogène et en monoxyde de carbone. Ce procédé est mis au point vers 1780 et largement commercialisé au début du XX^e siècle. Avant la vaste disponibilité du gaz naturel des années 40, de nombreuses villes nord-américaines et européennes utilisaient le gaz de houille comme gaz de chauffage et gaz d'éclairage. On l'appelait gaz bleu, gaz pauvre de gazogène, gaz à l'air, gaz à l'eau, gaz de ville ou gaz combustible. En utilisant souvent les mêmes conduites principales à basse pression pour la distribution, le gaz naturel remplace le gaz combustible dans la plupart des utilisations vers les années 50, en raison de son plus grand pouvoir calorifique et de l'absence de contaminants.[21]

1.2.4.1 Principe:

Le combustible, finement divisé, est introduit sous forme de pulpe dans un gazéificateur ou sous atmosphère contrôlée d'air ou d'oxygène, à une pression variant de 20 à 80 bars et à une température de 1300 à 1600°C, il produit du gaz synthèse suivants les réactions.

Gazéification à l'oxygène: $C + O_2 \rightarrow 2CO$

Gasification à l'eau: $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$

Hydro gazification : $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$

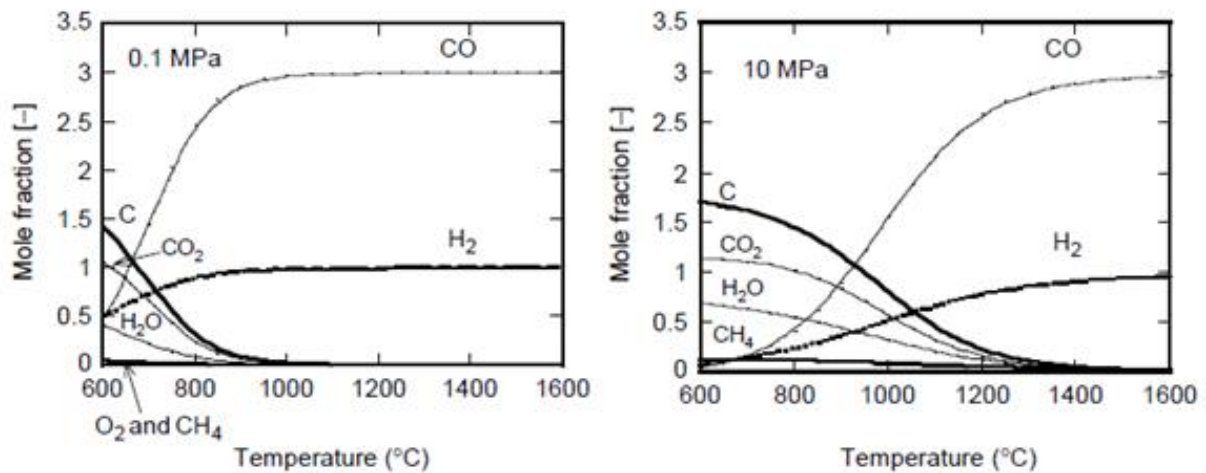


Figure. I.4 Déplacement de l'équilibre en fonction de la température et de la pression avec un rapport molaire C/O₂/H₂O =3/1/1.[21]

La proportion de H₂, formé par réaction du CO sur l'eau, varie de 18-20% avec la combustion à l'air (gaz pauvre) à 30-32% en volume à l'oxygène (gaz riche). Le pouvoir calorifique du gaz évolue parallèlement à cette concentration.

1.2.5. L'électrolyse

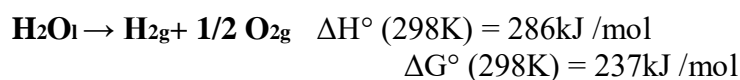
Est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. La première électrolyse (électrolyse de l'eau) a été réalisée le 2 mai 1800 par deux chimistes britanniques, William Nicholson (1753-1815) et Sir Anthony Carlisle (1768-1842), quelques

jours après l'invention de la première pile électrique (publication soumise le 20 mars 1800 dans une lettre en français au président de la Royal Society, Joseph Banks) par Alessandro Volta et grâce à celle-ci.

L'électrolyse peut être menée à des fins : Préparatifs, elle permet de réaliser des **oxydations** et des réductions, par conséquent elle modifie la nature des espèces dissoutes (changement du degré d'oxydation en chimie minérale ou de fonction en chimie organique), Séparatives, elle Effectue une séparation par électrolyse consiste à éliminer une espèce dissoute sous forme d'un solide déposé sur l'électrode ou le faire dégager sous forme de gaz. Les conditions opératoires et le milieu ont une influence sur la qualité du dépôt et son Adhérence et Analytiques, Dans ce dernier cas, soit on mesure la quantité d'électricité mise en jeu au cours de la réaction électrochimique, soit on mesure un dépôt sur l'électrode. On opère le plus souvent à potentiel ou à intensité constante. Un avantage de cette méthode est que l'on maîtrise parfaitement les conditions opératoires.[22]

1.2.5.1 Principe général de l'électrolyse de l'eau:

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide.



La tension minimale ou réversible E_{rev} d'une cellule d'électrolyseur correspond à l'énergie libre (ΔG) nécessaire pour décomposer la molécule d'eau. Ces deux grandeurs sont reliées par la formule suivante :

$$E_{\text{rev}} = \Delta G / nF$$

E_{rev} : voltage réversible pour électrolyser l'eau (V)

ΔG : énergie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol)

F : constante de Faraday ; $F = 96487 \text{ C/mol}$

n : nombre d'électrons échangés lors de la réaction (ici $n=2$)

$$E_{\text{rev}} = 1,23 \text{ V a } 298\text{K}$$

La tension thermo neutre (E_{th}) correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur, cette tension ne dépend que faiblement de la température elle est donnée par la formule suivante :

$$E_{\text{th}} = \Delta H / nF$$

E_{th} : tension thermo neutre (V)

ΔH : enthalpie libre de la réaction d'électrolyse (J/mol)

$$E_{\text{th}} = 1,48 \text{ V a } 298\text{K}$$

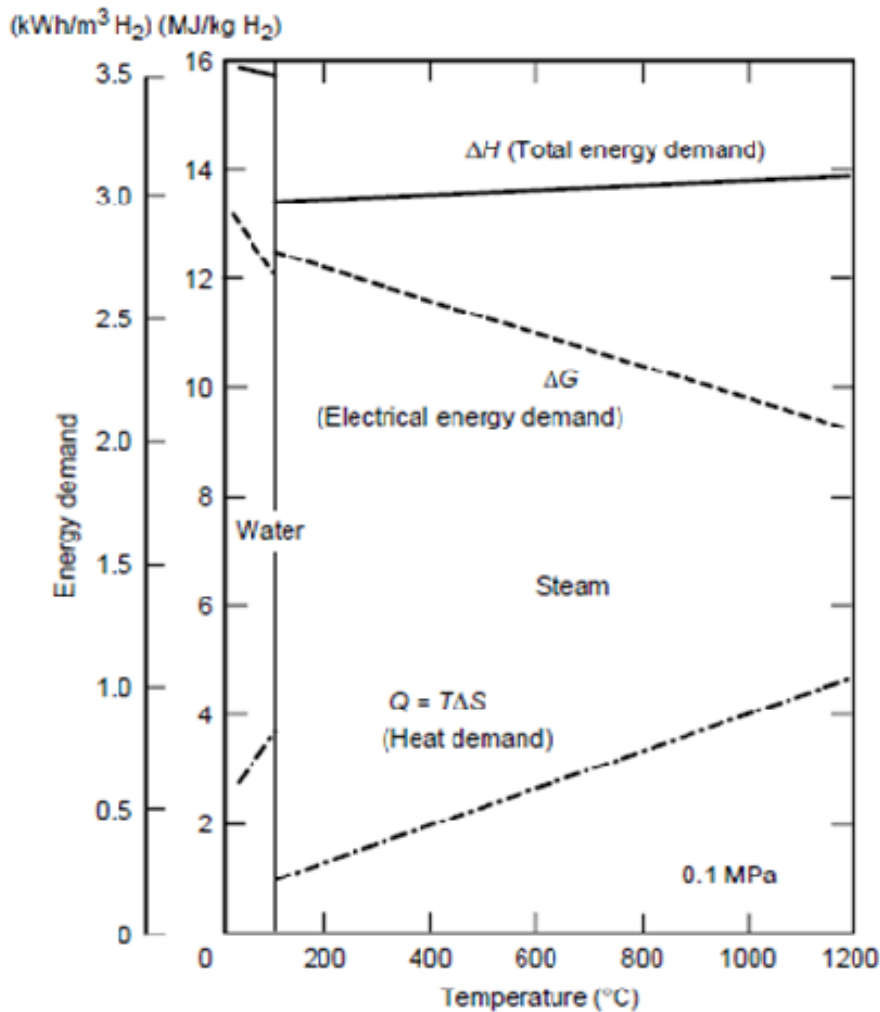
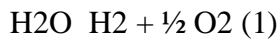


Figure 1.5 Evolution des potentielle ΔH et ΔG en fonction de la température.[22]

On constate que deux types de fonctionnement sont possibles en fonction de la tension de l'électrolyseur :

- $E_{rev} < U < E_{th}$: un apport extérieur de chaleur est nécessaire aux cellules d'électrolyse.
- $U > E_{th}$: la chaleur est alors produite par la réaction.

Décomposition de l'eau par cycle thermochimique (CTC) L'utilisation de cycles thermochimiques pour la production d'hydrogène est largement étudiée, depuis les années 60, car ils présentent le très grand avantage théorique de diminuer le niveau de température nécessaire à la dissociation de l'eau tout en assurant une libération d'oxygène et d'hydrogène en des lieux différents. En effet, la mise en œuvre de réactifs chimiques intermédiaires pouvant être qualifiés de manière abusive de catalyseurs thermodynamiques, permet pour chacun d'entre eux d'assurer à des niveaux d'énergie moindres, une partie du parcours nécessaire à la rupture de la molécule d'eau et donc à la libération de l'hydrogène. L'intérêt de l'exploitation de ces cycles prend toute sa dimension si tous ces intermédiaires chimiques sont réellement intégralement régénérés au cours d'un processus de production de telle manière que le bilan global se réduise à la simple réaction de dissociation :[22]



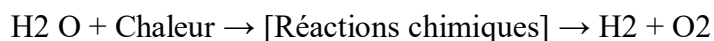
Les réactions chimiques mises en jeu étant hétérogènes, une agitation des systèmes semble nécessaire pour activer la diffusion des réactifs et produits gazeux des réactions. Les flux de matières nécessaires à une production massive d'hydrogène sont très importants ce qui nécessite le recours à des procédés utilisant le principe des lits fluidisés, au sein desquels les systèmes sont naturellement agités.

Le principe des cycles consiste à dissocier la molécule d'eau par des réactions chimiques successives en introduisant certains composés chimiques (S, I, Br, Ca, Cu,...) qui sont restitués au cours des réactions, pour être réutilisés en boucle fermée dans le procédé. La succession de réactions aboutit à la formation d'hydrogène et d'oxygène (Figure 2). La réaction de base produisant de l'hydrogène et de l'oxygène est endothermique ; elle est complétée par une ou deux réactions exothermiques qui restituent les substances chimiques à leur état initial (pression et température) et produisent de l'hydrogène (2). D'après la littérature, environ 280 cycles thermochimiques ont été référencés. Le tableau 1 résume quelques cycles parmi ceux qui semblent actuellement les plus prometteurs, sur le point technique et économique pour un développement industriel

Cycle	Elément chimique	Etape	Température Max (°c)	Rendement (%)
Iode soufre(I-s)	I,S	3	850	30-50
UT-3	Br,Ca,Fe	4	750	40-50
Qxyde-Zinc	Zn	2	1800	45
Hybride de Soufre	S	2	>850	40-50
Hybride Cu-Cl	Cu,Cl	4	550	40-50

Tableau I.8 Les cycles thermochimiques peuvent être classés en deux catégories[22]

1 - Cycles thermochimiques purs qui utilisent seulement de la chaleur et de l'eau pour réaliser la décomposition.



Cycle thermochimique iode-soufre (I-S) Le cycle iode-soufre (cycle I-S) est aujourd'hui considéré comme le cycle thermochimique potentiellement le plus intéressant. Ce procédé, illustré dans la figure 2A, a été proposé par General Atomic, USA, vers la fin des années 70. Le cycle iode soufre fait appel à trois réactions et est basé sur la décomposition de deux acides à haute température : l'acide

sulfurique qui produit de l'oxygène et du SO₂ (dioxyde de soufre) et l'acide iodhydrique qui produit de l'hydrogène et de l'iode. L'iode et le dioxyde de soufre réagissent à basse température

1.3. Technique De Production De L'hydrogène

1.3.1 Procédés biologiques

La plupart de l'hydrogène produit par voie biologique dans la biosphère est issue de procédés de fermentation microbiologique : des organismes décomposent la matière en CO₂ et H₂.

Un grand nombre de micro-organismes contiennent des enzymes, hydrogénases, capables d'oxyder le dihydrogène en protons ou de réduire des protons en hydrogène moléculaire. L'hydrogène sert alors d'accepteur ou de donneur d'électrons (suivant l'état d'oxydation de l'hydrogène) et s'inscrit comme intermédiaire dans les processus métaboliques complexes. Il est estimé qu'environ 200 millions de tonnes d'hydrogène sont cyclés annuellement dans la biosphère, l'atmosphère n'en contenant qu'une très faible fraction (environ 10⁻⁴ % en volume.).

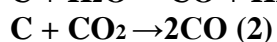
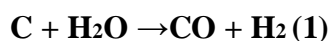
Les principales méthodes biologiques de production d'hydrogène sont :

1. la bio photolyse de l'eau par des algues ou des cyanobactéries ;
2. la décomposition de composés organiques par des bactéries photosynthétiques ;
3. la dégradation de composés organiques par fermentation en présence de bactéries ;
4. un procédé hybride utilisant les deux dernières méthodes.

Bien que ces procédés représentent un fort potentiel de production d'hydrogène, leur avancement technologique et industriel reste faible. De nombreux aspects techniques sont encore en cours d'évaluation (efficacité des procédés, durabilité, traitement et ségrégation des gaz produits).[23]

1.3.2. La gazéification de la biomasse:

Différent méthode se présente a nous pour produire de l'hydrogène a partir de la biomasse. La gazéification nous permis d'obtenir un gaz riche en hydrogène L'obtention d'un produit intermédiaire tell que le biogaz ou du méthanol est sa transformation en hydrogène La gazéification est une transformation thermochimique d'un solide combustible (charbon, bois, paille, ...) en présence d'un compose gazeux (O₂, air, CO₂, vapeur d'eau...). Le but de cette transformation est généralement de convertir le solide en un mélange gazeux combustible. Elle se distingue donc de la pyrolyse, opération thermique s'effectuant en l'absence de gaz réagissant avec le solide, et de la combustion dans laquelle la plus grande partie du carbone contenu dans le solide est transformée en CO₂.La gazéification, d'un point de vue purement scientifique, se décrit comme une réaction endothermique hétérogène entre le carbone (C) contenu dans le solide et un gaz réactant qui peut être de la vapeur d'eau (H₂O) ou du dioxyde de carbone (CO₂).[23]



Sur le plan industriel, lorsque l'on parle de gazéification, l'objectif est donc de favoriser ces deux réactions (1) et (2), qui vont produire le gaz combustible. Cependant, pour se faire, il faudra préalablement ou simultanément générer les éléments nécessaires à ces deux réactions;

à savoir, le charbon (ou char) très concentré en carbone, les réactants CO_2 et H_2O ainsi qu'une quantité importante d'énergie. Dans les procédés de gazéification, ces trois composantes sont produites par les réactions de pyrolyse ainsi que les oxydations homogène et hétérogène qui interviennent classiquement en combustion.

Le pouvoir calorifique du gaz de synthèse obtenu varie classiquement de 3,5 à 6 MJ/Nm³ selon sa concentration en divers gaz inertes tels que l'azote et dioxyde de carbone et dont la concentration dépend essentiellement des agents de gazéification utilisés et des procédés mis en œuvre. Cette valeur est largement supérieure dans les procédés de gazéification à l'oxygène ou la vapeur d'eau.

Ce gaz contient aussi divers composés à l'état de traces, HCl, HF, NH_3 , HCN, métaux alcalins à l'état de vapeur et dont les proportions sont directement liées à la nature du combustible. Enfin, il contient une part plus ou moins importante de composés hydrocarbonés, plus communément appelés goudrons, résultant d'une réduction incomplète des produits de pyrolyse de la première étape de la transformation. Leur concentration dans les gaz est fortement liée au type de réacteurs utilisés et, une fois encore, à la matière première.[23]

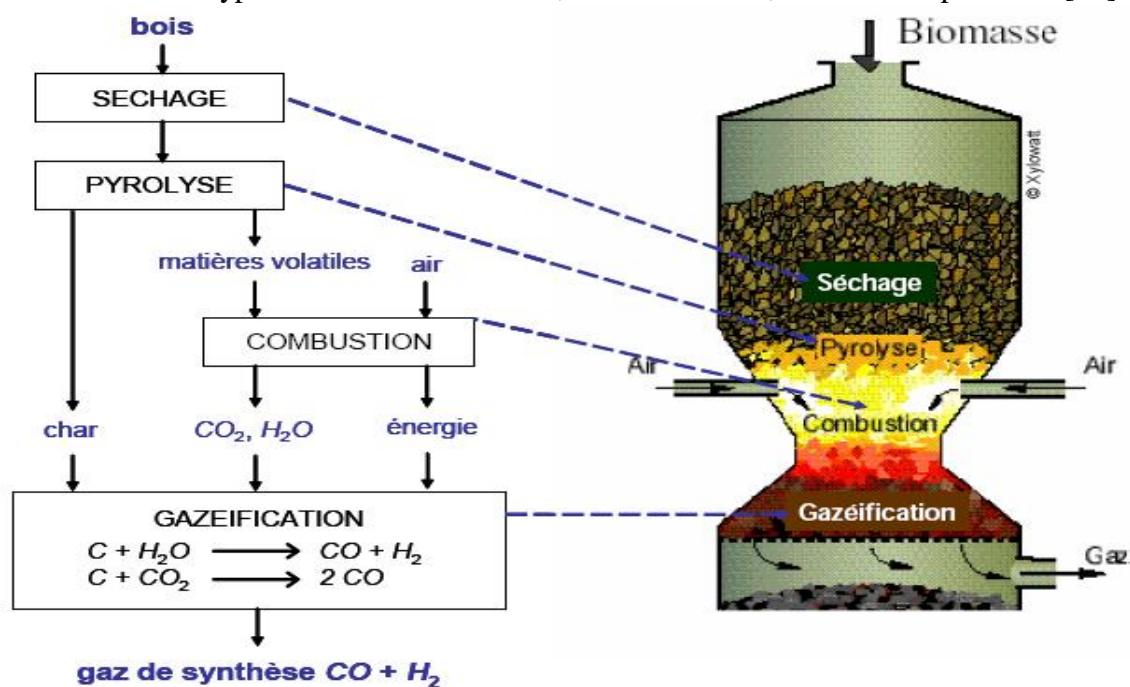


Figure I.6 Mécanismes et réactions mis en jeu lors du processus de gazéification.[23]

1.4.SYSTEME DE CAPTAGE:

1.4.1. RAYONNEMENT SOLAIRE

L'efficacité d'un dispositif photovoltaïque dépend de la distribution spectrale du rayonnement solaire. Le Soleil est une source de lumière dont le spectre de rayonnement peut être comparé au spectre d'un corps noir proche de 6000 K. Un corps noir absorbe et émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les longueurs d'onde. La distribution théorique des longueurs d'onde du rayonnement du corps noir est décrite mathématiquement par la loi de Planck, qui établit les relations et les interdépendances entre la longueur d'onde (ou la fréquence), la température et la distribution spectrale du corps noir. La figure I.8 montre la distribution

spectrale du rayonnement du corps noir par rapport aux radiations solaires extraterrestres et terrestres .[24]

L'étude de l'effet du rayonnement solaire sur les dispositifs photovoltaïques est difficile parce que le spectre de la lumière solaire à la surface de la Terre est influencé par des facteurs tels que la variation de la température sur le disque solaire et l'influence de l'atmosphère . Dans l'espace extraterrestre, à la distance moyenne entre le Soleil et la Terre, l'énergie solaire irradiée est d'environ 1,353 kW/m² . À la surface de la Terre, l'irradiation est d'environ 1 kW/m² (il s'agit d'une valeur de référence uniquement, car l'irradiation nette à la surface de la Terre dépend de nombreux facteurs).

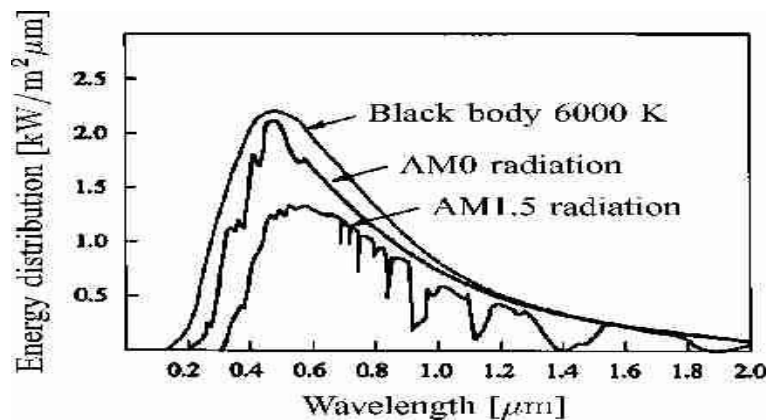


Figure 1.7 Distribution spectrale du rayonnement du corps noir et du rayonnement solaire dans l'espace extraterrestre (AM0) et à la surface de la Terre (AM1.5). Source : Moller

1.4.2 Types de rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire atteint sur une surface sous trois formes:

1.4.2.1. Le rayonnement direct:

C'est la part du rayonnement provenant directement des rayons solaires;

1.4.2.2. Le rayonnement diffus:

Le rayonnement diffus est constitué des photons, il provient de la diffusion de la lumière par les nuages ou par les particules de l'atmosphère;

1.4.2.3. Le rayonnement réfléchi:

C'est le rayonnement réfléchi par les surfaces environnantes, sol, bâtiments proches, Végétation. Il faudra tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

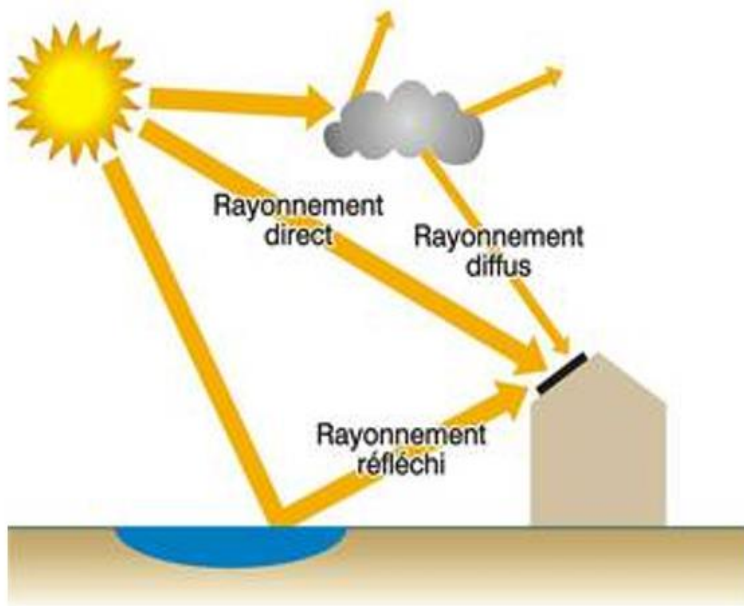


Figure 1.8 : Différentes composante de rayonnements

Un système photovoltaïque est installé pour remplacer les autres énergies qui sont plus chère
Et l'utiliser pour le besoin pour satisfaire le consommateur

Ce système généralement est constitué par les éléments suivants : D'un générateur photovoltaïque, batterie, onduleur et un système de régulation.

1.4.3 Générateur Photovoltaïque :

Il produit l'énergie formée par une association série/parallèle de cellules élémentaires convertissant l'énergie solaire en une énergie électrique.

La durée de vie d'un générateur peut arriver jusqu'à 20 ans.

On doit prendre en considération technico-économiques ; aussi bien le rendement énergétique que la taille de l'investissement.

Un générateur photovoltaïque est un système qui produit directement de l'énergie ou bien l'électricité à partir de l'énergie solaire et qui est soit plusieurs cellules on les appelle module ou bien plusieurs modules on les appelle un panneau photovoltaïque. Pour donner plus de l'énergie [25].

1.4.4 La cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque est généralement fabriquée à matériau semi-conducteur pour laisser passer le courant

On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière ; La cellule photovoltaïque est l'élément constitutif des modules photovoltaïques.

Une cellule peut produire 1.5 W pour un ensoleillement de 1000 W/m² avec une tension de 0.6.

Cette tension est insuffisante pour augmenter nous avons besoin de plusieurs cellules

Les conditions standards de tests (STC) correspondent à un ensoleillement de 1000 W/m², masse d'air optique AM (Air Mass) égale à 1,5. et à une température de cellule de 25°C Les caractéristiques électriques des modules commercialisés peuvent être sensiblement différentes à puissance identique selon que le courant et tension .[26]

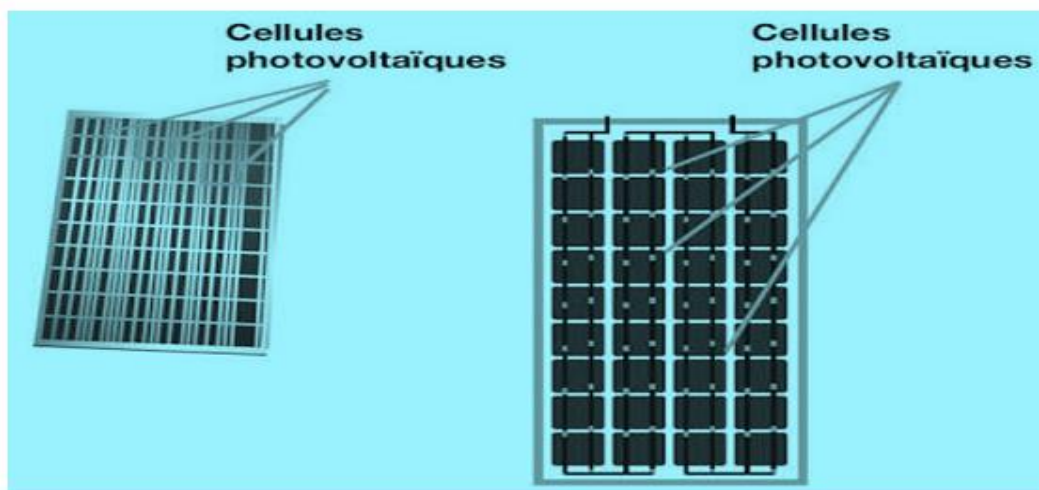


Figure1.9 : cellules photovoltaïque [26]

1.4.5 Batterie :

Dans les systèmes de captage q on la production d'énergie très élevé il aura une quantité d'énergie perdu par le générateur et le rôle de batterie c'est de stocker cette énergie et on l'utiliser le jour quand il y a une production insuffisante ou bien il y a une grande consommation par l'utilisateur

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système Photovoltaïque sont : les accumulateurs au plomb acide qui rendement énergétique plus élevé Environ de 85%, et les accumulateurs au Nickel- cadmium qui donne rendement énergétique moins élevé par rapport au premier.

Et pour choisi une bonne batterie il faut avoir la profondeur de décharge moins élevé il nous donne un nombre de cycle (charge –décharge) et plus grand.[27]

1.4.6 Onduleur:

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu), il portera ainsi le nom de convertisseur DC/DC.

Soit entre la batterie et la charge il sera alors appelé onduleur ou convertisseur DC/AC, utilisé pour alimenter les charges dans une maison n'est pas raccordé au réseau électrique.[27]

1.4.7 Système de régulation :

Pour une utilisation en courant continu, le régulateur joue un rôle important il contrôle la charge et décharge de la batterie et limite la décharge d'une batterie et dirige ou bien transporter l'énergie de la batterie vers la charge pour la consommation et extraire le maximum puissance de panneau photovoltaïque.[27]

1.4.7.1 Principe de fonctionnement :

Principe de fonctionnement c'est absorber l'énergie solaire pour produire de l'énergie électrique mais le matériau. De cellule il ne peut pas transférer cette énergie c'est pour cela qu'il doit être dopé grâce à ses deux couches semi-conducteurs il va absorber les photons cette absorption libère des électrons qui passent dans le trou qui nous donne un courant

Le champ électrique interne à la jonction, entraîne alors le trou vers la région P et l'électron vers la région N.

Par jonction du semi-conducteur de région de type P et de type N ; la cellule solaire est donc

Une jonction P-N cette jonction c'est comme un diode

Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques s'appelle la photoconductivité : il. Dans l'obscurité, les électrons sont peu mobiles ; à la lumière, les photons absorbés par le silicium apportent une telle énergie que la mobilité des électrons du matériau s'en trouve fortement accrue, ce qui se traduit par une augmentation de la conductivité du matériau.

Pour garder un courant continu directement utilisable aux bornes de la cellule photovoltaïque Il faut assurer l'existence de la lumière grâce à son effet les électrons de la couche périphérique des atomes sont séparés ou bien arrachés cette opération on l'appelle photons courant.[26]

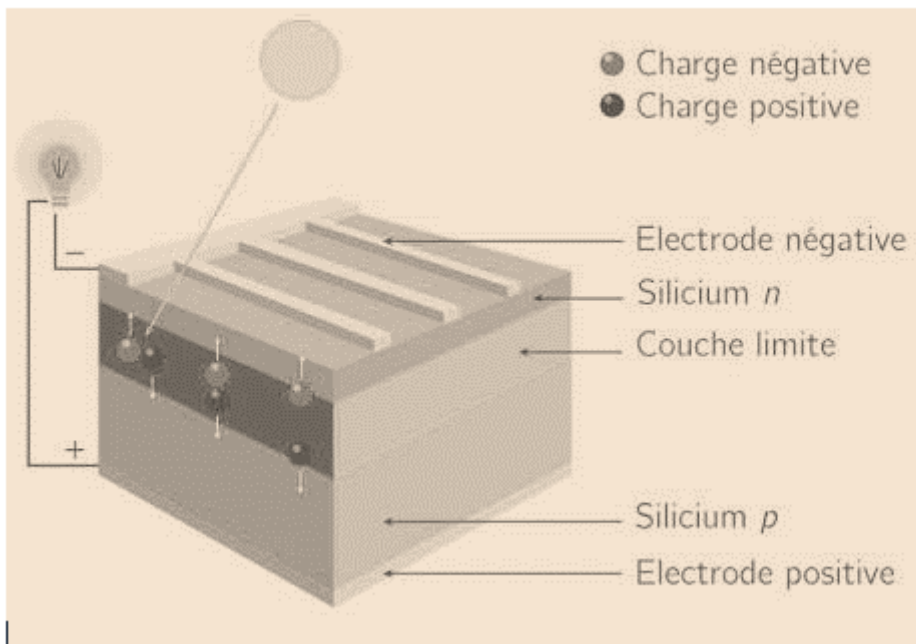


Figure I.10: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque[26]

1.4.8. Définition Du Système Photovoltaïque :

Le système photovoltaïque convertit l'énergie solaire directement en énergie électrique. Les photons du rayonnement solaire électromagnétique incident sur les cellules photovoltaïques libèrent des électrons, générant ainsi un courant continu.

Il y a plusieurs modèles et le plus utilisé est le modèle à une diode. Dans ce modèle, la cellule photovoltaïque est constituée d'un générateur de courant continu en parallèle avec une diode. Le générateur de courant est pour représenter le flux du rayonnement solaire incident et la diode est pour tenir compte des phénomènes de polarisation au niveau de la cellule photovoltaïque. Deux résistances, une résistance série et une résistance de shunt, qui modélisent les pertes. Les modèles semi-empiriques relient la puissance maximale délivrée par le système photovoltaïque aussi bien aux données météorologiques qu'à la technologie de fabrication. Le matériau le plus utilisé c'est le silicium qui existe dans la nature et qui est exposé sous la température ; nous avons le silicium monocristallin, polycristallin, et amorphe. [26]

1.4.9 CONCLUSION

Cette technologie présente divers avantages tels que

1. Faible coût comparativement aux autres technologies.
 2. largement disponible sur le marché.
 3. Haute fiabilité.
 4. Montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
 5. Coût de fonctionnement très faible (entretiens réduits et ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
 6. Présente des qualités sur le plan écologique (produit fini non polluant, silencieux)
- Néanmoins il y a lieu de signaler que la fabrication du module photovoltaïque nécessite un investissement d'un coût trop élevé et une puissance produite faible par rapport aux autres technologies

1.5-Les différentes technologies d'électrolyseurs:

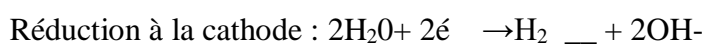
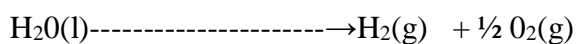
1.5.1 Introduction :

L'eau est très important dans la production de hydrogène mais pour séparation de ses composante on a besoin d'un électrolyseur qui joue un rôle essentiel dans la production de hydrogène ,il y a plusieurs électrolyseurs par exemple (alcalins ,électrolyseurs haut température) mais il Ya d'autre c'est électrolyseurs polymère a membrane qui le plus utilise et le plus connu et le plus adapté dans la production de hydrogène dans ce chapitre on va l'explique et va parler de sa modélisation

1.5.2.Électrolyseurs :

Il convertit l'énergie électrique en énergie chimique et se permettre de réaliser les réductions et les oxydations

Électrolyse décompose la molécule d'eau en atome d'hydrogène et atome d'oxygène et sa réaction générale c'est :



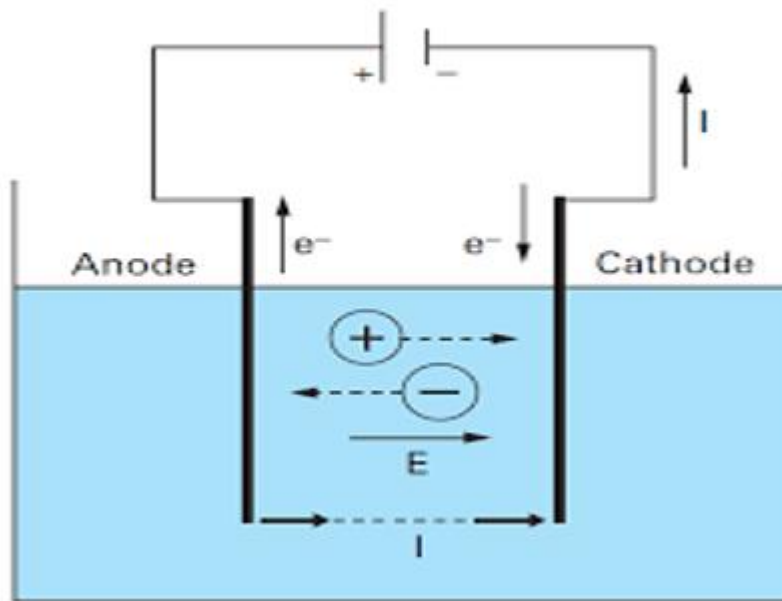


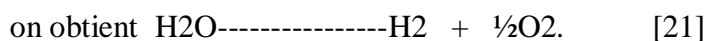
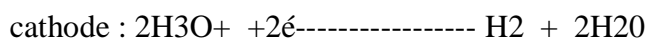
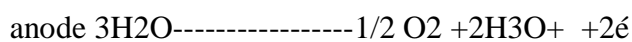
Figure I.11: électrolyseurs [28]

1.5.3.Électrolyseur solide à membrane polymère :

1.5-3-1.Principe de fonctionnement ;

Elle se présente sous une forme de feuillet de fantom qui est un polymère ayant des caractéristiques similaire a celui de polyter a fluoroethyline .le catalyseur est constitué d'oxydes de métaux noble a base de ruthénium et d'iridium.

la membrane elle une caractéristique c'est haute conductivité ionique et une pauvre conductivité électronique ;les ions H_3O^+ traversent la membrane lors de leur migration entre les deux électrodes, et les électrons prennent le chemin externe l'oxygène, les ions H_3O^+ et les électrons sont formes après décomposition électrochimique de l'eau utilisant différents chemins, les électrons et les H_3O^+ déplaçant vers la cathode et il se combinent pour donner de hydrogène et l'eau et sa sera la réaction suivant :



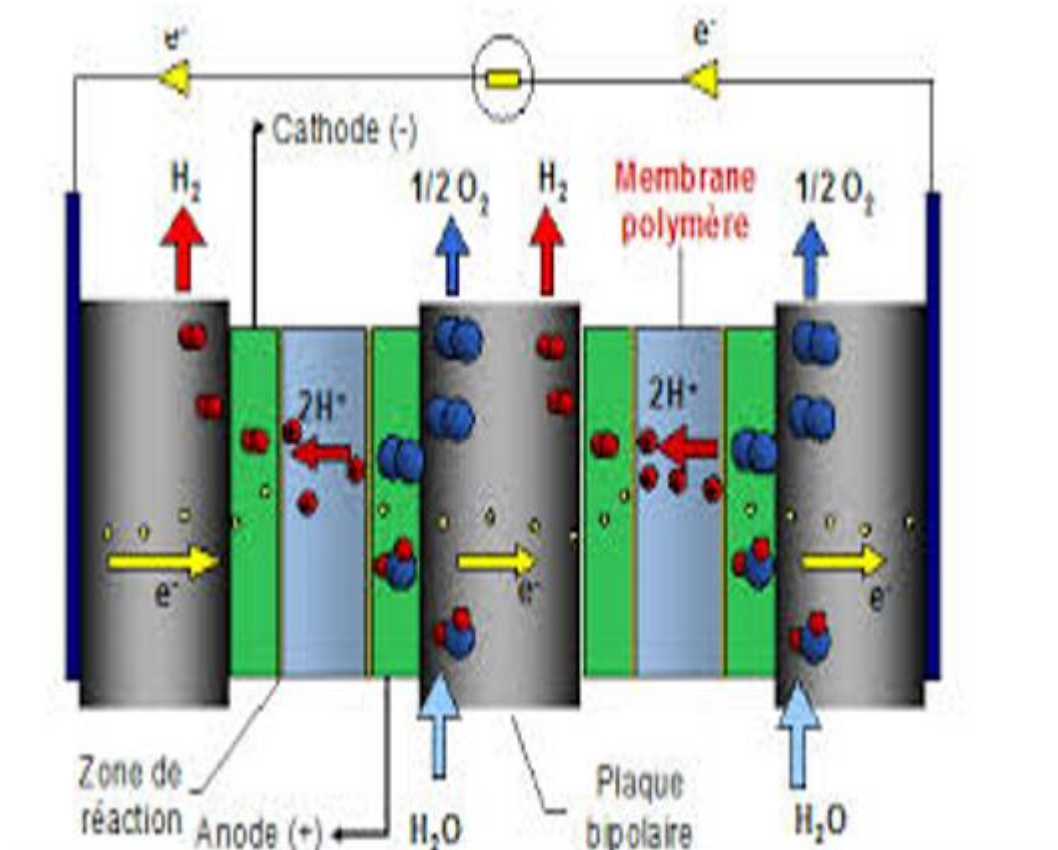


Figure I.12:Électrolyte solide à membrane polymère[29]

1.5.3.2.Électrodes :

Constitue de Deux couches catalytiques positive et négative à catalyser les réactions de la membrane. Il fait comme un électrolyte. Leur microstructure caractérise à plusieurs propriétés, parmi eux c'est:

1. Plus stable dans un environnement acide, oxydant ou réducteur, et sous forts potentiels
2. Une activité catalytique adaptée à l'espèce réactive et son environnement;
3. Une bonne conductivités électronique et ionique
4. Une porosité et distribution de taille de pores suffisante;
5. Sa fabrication moins chère

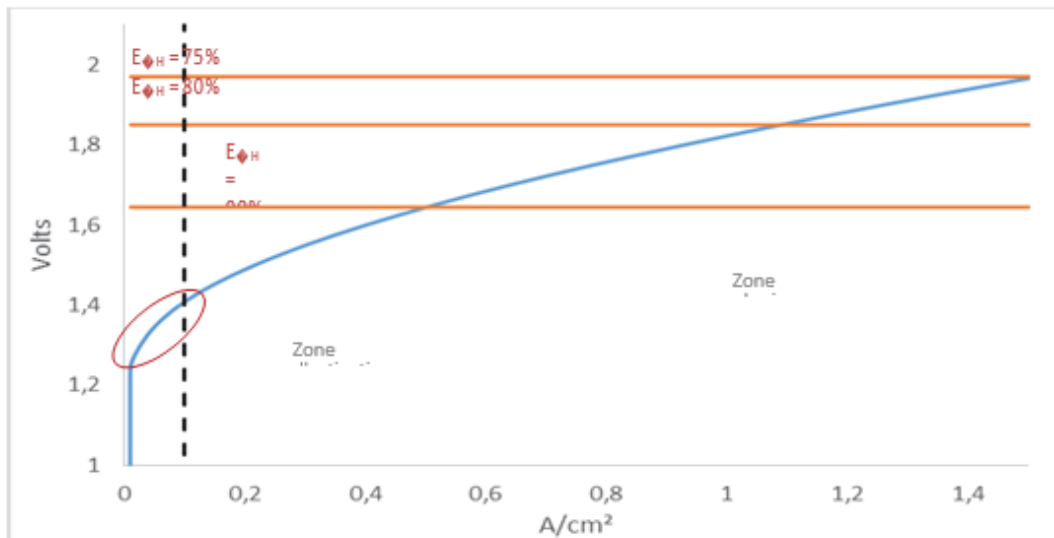


Figure I.13 : Courbe de polarisation typique d'une cellule d'électrolyse PEM, et rendements associés.[29]

1.5.3.3. Electrode positive :

Le côté anodique où bien côté positif est lié avec l'eau et l'oxygène qui circule dans ce milieu. En effet, la tension thermodynamique d'oxydation de l'eau. En général, le courant commence à devenir significatif il faut avoir une tension minimale de 1,4V, et les différentes contributions ohmiques et surtensions peuvent faire monter cette tension jusqu'à 2V à fort courant, Vale pour assurer un fonctionnement pérenne. L'électrode doit ainsi principalement résister à un environnement acide, à des forts potentiels (>2V), dans la durée; en ce qui concerne la mise en forme, elle doit aussi posséder une porosité optimisée permettant une bonne accessibilité de l'eau[29]

1.5.3.4. Electrode négative :

Grâce à la membrane ne laisse pas passer l'oxygène et laisse passer l'hydrogène, dans un côté le catalyseur employé classiquement pour la réduction des protons en hydrogène moléculaire est constitué de particules de platine ; son activité vis-à-vis de la réduction protonique étant bien plus importante que celle de l'iridium avec l'eau, il n'est donc pas nécessaire de charger autant la couche catalytique cathodique que la couche anodique.[29]

1.5.3.5. Dégradation des électrodes :

Dans les potentiels qui existent, l'anode est plus sujette à dégradation que la cathode opposée. Les conséquences majeures observées généralement après vieillissement sont une démontion de la surface électrochimiquement active, une augmentation des surtensions et une diminution de la densité de courant d'échange. Ces variations mesurables sont le résultat de mécanismes de dégradation chimique mais aussi changement de structure. On observe

régulièrement une augmentation de la taille des particules à la cathode et la formation d'agglomérats à l'anode .[29]

1.5.3.6 Caractéristique :

la température de fonctionnement entre 80 et 100 C° et une pression entre 1 et 7 bars avec un rendement qui peuvent être étaient plus de 90% pour cette électrolyseur et une densité de courant de 1 ,2 A/cm²

1.5.3.7. Avantages Electrolyseur PEM :

1. Technologie de fabrication simple
2. Temps de démarrage rapide
3. Basse température et petite taille
4. Grande capacité
5. Faible consommation intrinsèque
6. Différence de pression permise autour de la membrane

1.5.4. Electrolyseurs alcalins:

1.5.4.1 Principe de fonctionnement :

C'est l'un des technologie les plus connu qui produit de hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimique dont le chlore .

L'électrolyseurs choisi est a technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (NAOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde(OH⁻) et sodium(NA⁺). Les réactions anodiques et cathodiques sont suivant :

Cathode réduction : $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

Anode oxidation: $2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$

On orbite : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2$. [22]

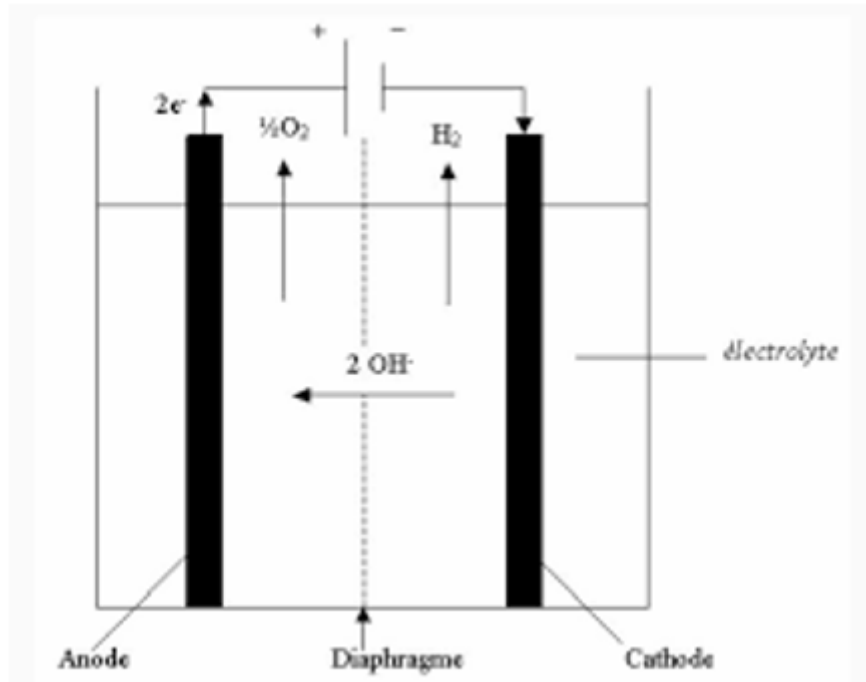


Figure I.14 :Principe de l'électrolyse alcaline[30]

1.5. 5 électrolyseurs à haute température:

1.5.5.1 Principe de fonctionnement :

Cette électrolyse est réalisée à des températures entre 700 et 1000 °C. Elle est formée d'une membrane céramique conductrice d'ions d'oxygène (O²⁻). Ces grandes températures nous assurent la bonne conduction ionique.

Dans cette technologie, on utilise la vapeur d'eau qui se dissocie à la cathode ou à l'anode selon la nature de l'électrolyte (céramique conductrice à ions oxydes ou céramique conductrice à protons).

Une réduction de la vapeur d'eau, formation de H₂ et O²⁻, est générée par différence de potentiel entre électrodes. Le surplus de la vapeur d'eau et l'hydrogène seront évacués sous l'effet du champ électrique. Les anions O²⁻ qui passent de la cathode à l'anode seront oxydés en O₂ et évacués.[31]

L'énergie électrique nécessaire pour la dissociation de l'eau diminue avec l'augmentation de la température et les réactions sont comme suit :

Cathode réduction: $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-} + \text{H}_2$

Anode oxydation: $\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{e}^- + \frac{1}{2} \text{O}_2$

On obtient $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2$

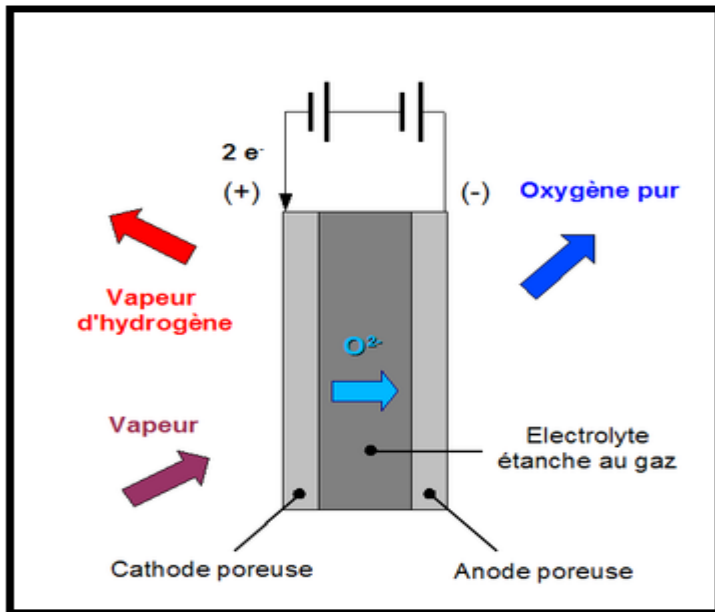


figure I.15: principe de fonctionnement a haut température [31]

1.6. Stockage d'hydrogène

Le stockage d'hydrogène est certainement un verrou technique et scientifique pour le développement de la technologie de l'hydrogène [30]. L'hydrogène est un gaz extrêmement léger qui occupe un volume important dans les conditions de pression standard, c'est à dire à la pression atmosphérique. Pour le stocker et le transporter efficacement, il faut fortement réduire ce volume. Le dihydrogène ne peut jouer son rôle de vecteur d'énergie que si l'on peut le stocker efficacement, pour un coût limité et dans des conditions de sécurité acceptables. Le risque de fuite de dihydrogène doit être pris en considération, compte tenu du caractère inflammable et explosif de ce gaz dans certaines conditions. Or, en raison de la petite taille de sa molécule, il est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris certains métaux. De plus, il en fragilise certains en les rendant cassants. Différents modes de stockage doivent être envisagés selon l'utilisation qui en sera faite : industrielle, domestique, mobile ou nomade. L'hydrogène peut être stocké sous forme liquide à basse température, gazeuse sous pression ou solide.

1.6.1 Stockage sous forme liquide à basse pression

C'est le moins coûteux et le plus abouti des procédés (par kWh) pour stocker de grosses quantités de dihydrogène. Les réservoirs actuels conditionnent le dihydrogène à -253 °C sous 10 bars. Pour les applications transport, des réservoirs ont été mis au point, permettant le stockage de 12 kg de H_2 pour les petits réservoirs des voitures (l'hydrogène liquide possède une masse volumique de $70,973\text{ kg/m}^3$). Cette solution, encore réservée aux lanceurs spatiaux pourrait à l'avenir concerner des véhicules terrestres. Le principal inconvénient de ce procédé est l'impossibilité d'éviter les fuites: même très bien isolés, les réservoirs absorbent de la chaleur qui vaporise lentement le liquide. Il faut alors laisser s'échapper le gaz obtenu pour éviter que la pression n'augmente trop. Néanmoins, aux difficultés techniques s'ajoutent le coût des réservoirs cryogéniques aptes à contenir l'hydrogène liquide pendant des longues

périodes de temps, ainsi que le coût de l'énergie consommée pour réaliser la liquéfaction. Le stockage en milieu confiné, comme dans les parkings, est ainsi rendu problématique.

1.6.2 Stockage gazeux sous basse pression

Lorsqu'il n'est pas nécessaire de réduire le volume de stockage (comme dans une maison disposant d'un vaste sous-sol), on peut envisager celui-ci sous forme gazeuse à une pression relativement basse (75 bars). Dans ce cas, la réserve de dihydrogène est régulièrement reconstituée par un dispositif de production in situ (électrolyse) alimenté par une source d'énergie renouvelable. Ce moyen de stockage est peu coûteux et parfaitement maîtrisé.

1.6.3 Stockage gazeux sous haute pression

Afin d'atteindre une densité d'énergie satisfaisante tout en évitant les inconvénients liés aux très basses températures nécessaires au stockage à l'état liquide, on cherche à développer le stockage à l'état gazeux sous haute pression (700 bars). A cette pression l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m³, soit un gain d'un facteur 500 environ par rapport à sa densité à pression et température ambiantes. A ce niveau de compression, 4.6 litres de dihydrogène comprimé sont encore nécessaires pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence). La recherche actuelle porte sur des réservoirs qui allient l'imperméabilité aux molécules de dihydrogène à la résistance aux hautes pressions et aux chocs. La partie interne du réservoir (le liner), assurant le confinement du dihydrogène, est réalisée en polymère selon un procédé innovant de synthèse et transformation simultanées. La coque composite externe assure quant à elle la résistance et la protection mécaniques. Elle est constituée par enroulement filamentaire et utilise des matériaux issus de l'aéronautique comme les fibres de carbone haute résistance.

1.6.4 Stockage solide

Le stockage de l'hydrogène sous forme solide dans des conditions de température et de pression proches des conditions normales nécessite de l'associer à un autre élément chimique. Ce type de stockage est une piste de recherche prometteuse. Certains matériaux ont en effet pour propriété d'absorber (fixer en profondeur) ou d'adsorber (fixer en surface) l'hydrogène de façon réversible, par changement des conditions de température ou de pression. Il s'agit de métaux appelés hydrures et, potentiellement, de nanostructures, telles que les nanotubes de carbone. Les nombreux avantages du stockage d'hydrogène solide sont:

- ❖ Réduction drastique des risques par rapport à des solutions haute pression ou cryogénique
- ❖ Un système complètement réversible (stockage/déstockage)
- ❖ Sans effet mémoire, déchargeable à 100 % où puissance et énergie sont découplées
- ❖ Souple d'utilisation (absorbe les variations de production d'hydrogène de l'électrolyseur, idéal lorsqu'il s'agit de stockage d'énergie renouvelable intermittente) et réactif
- ❖ 10 ans de fonctionnement sans maintenance lourde à raison d'un cycle (stockage/de stockage) par jour, sans dégradation au fil du temps
- ❖ Stockage ou déstockage "flottant", à la demande du réseau, véritable éponge à hydrogène, ce que ne peuvent pas fournir des solutions sous pression ou liquide
- ❖ Un système "plug and play"
- ❖ Stockage sous forme atomique (H) et non plus moléculaire (H₂) comme les cas précédents.

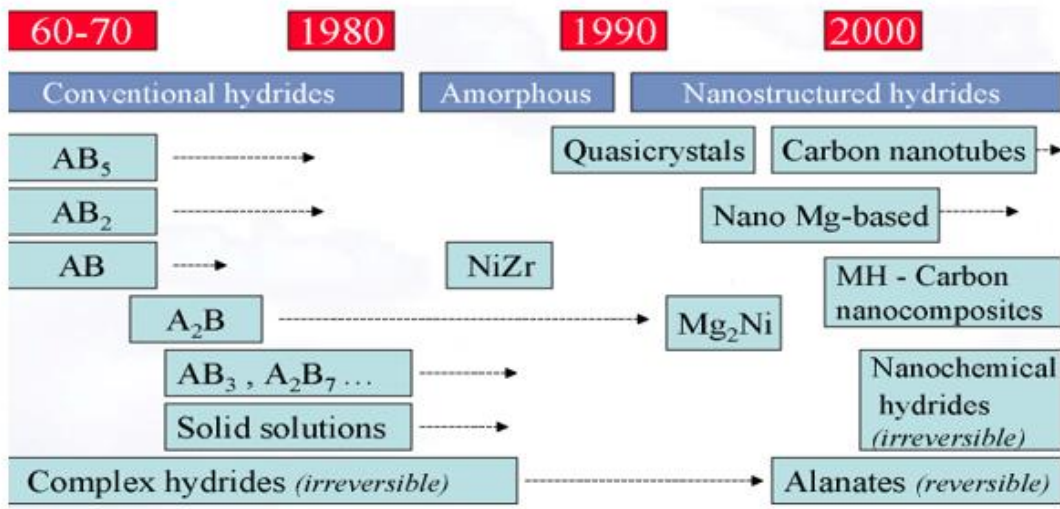


Figure I.16 Développement du stockage solide depuis 50 ans

Chapitre2:Modélisati on de système PV Hydrogène

2.1. INTRODUCTION

Le stockage saisonnier de l'énergie est une nécessité pour les procédés utilisant l'énergie solaire ou toute autre énergie renouvelable. L'hydrogène combiné aux piles à combustibles offre une excellente alternative à ce problème. L'objectif de notre travail est d'établir une méthode simple, rapide et efficace pour la prédiction de la production d'hydrogène par source en photovoltaïque. Cette méthode permettra par la suite, d'étudier l'optimisation du système de production d'hydrogène afin de rendre ce système plus compétitif sur le plan économique que les systèmes diesel, PV - batteries ou hybride, dans ce chapitre on va présenter la modélisation du système hybride photovoltaïque-Electrolyseur [18].

2. 2 Modélisation D'un Panneau Photovoltaïque:

2.2.1 Introduction:

Système photovoltaïque (PV) convertit directement la lumière du soleil en électricité. Le dispositif de base d'un système PV est la cellule PV. Les cellules peuvent être regroupées pour former des panneaux ou des tableaux. La tension et le courant disponibles aux bornes d'un dispositif photovoltaïque peuvent alimenter directement de petites charges telles que les systèmes d'éclairage et les moteurs à courant continu. Des applications plus sophistiquées nécessitent des convertisseurs électroniques pour traiter l'électricité du dispositif PV. Ces convertisseurs peuvent être utilisés pour réguler la tension et le courant à la charge, pour contrôler le débit d'alimentation dans les systèmes raccordés au réseau, et principalement pour suivre le point de puissance maximal (MPP) de l'appareil.

Afin d'étudier les convertisseurs électroniques pour les systèmes PV, il faut d'abord savoir modéliser le dispositif PV qui est attaché au convertisseur. Les dispositifs PV présentent une *caractéristique I-V* non linéaire avec plusieurs paramètres qui doivent être ajustés à partir des données expérimentales des dispositifs pratiques. Le modèle mathématique du dispositif PV peut être utile dans l'étude de l'analyse dynamique des convertisseurs, dans l'étude des algorithmes de suivi MPP (MPPT), et principalement pour simuler le système PV et ses composants à l'aide de simulateurs de circuits.[32]

Il existe plusieurs modèles des circuits équivalents d'une cellule photovoltaïque élémentaires, ces circuits se différencient en fonction de nombre des diodes, les résistances séries et les résistances shunt qui les composent, la figure suivante présente quatre modèles de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque.

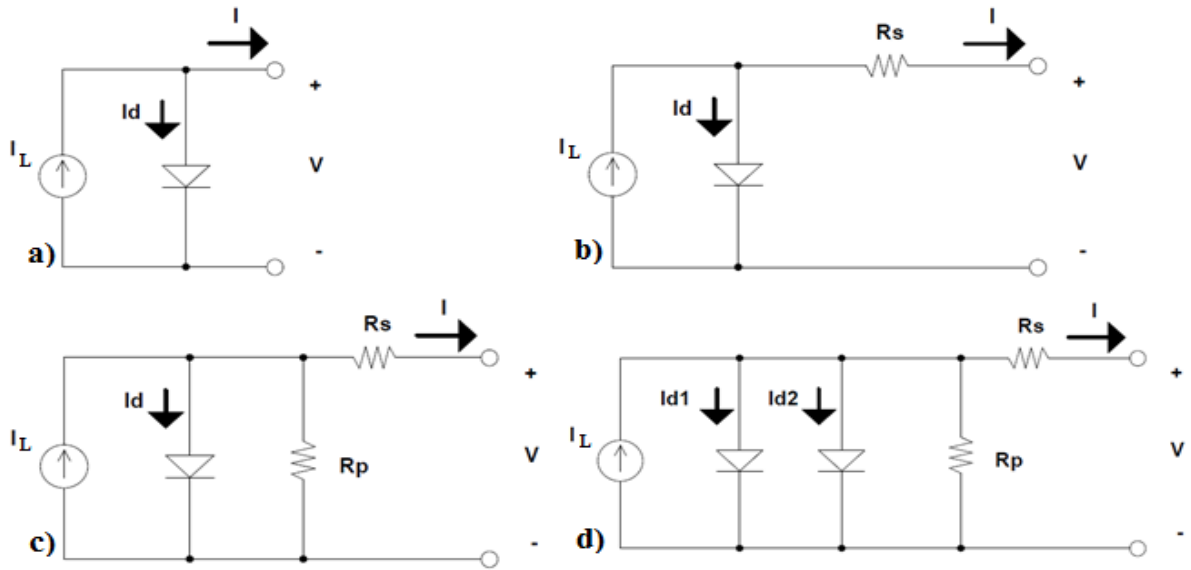


Figure 2.1 modèles de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque [32]

2.2.2. Cellule PV idéale:

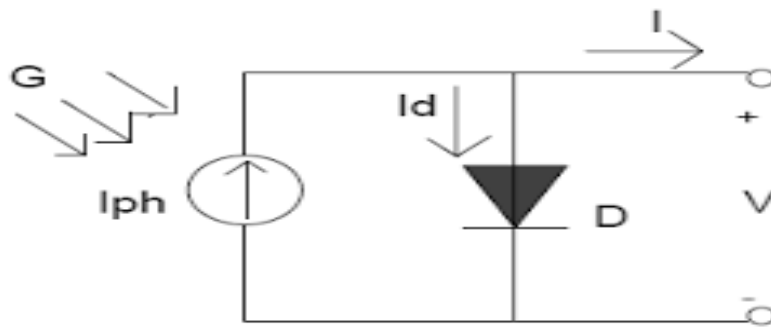


Figure 2.2 modèle simplifié [32]

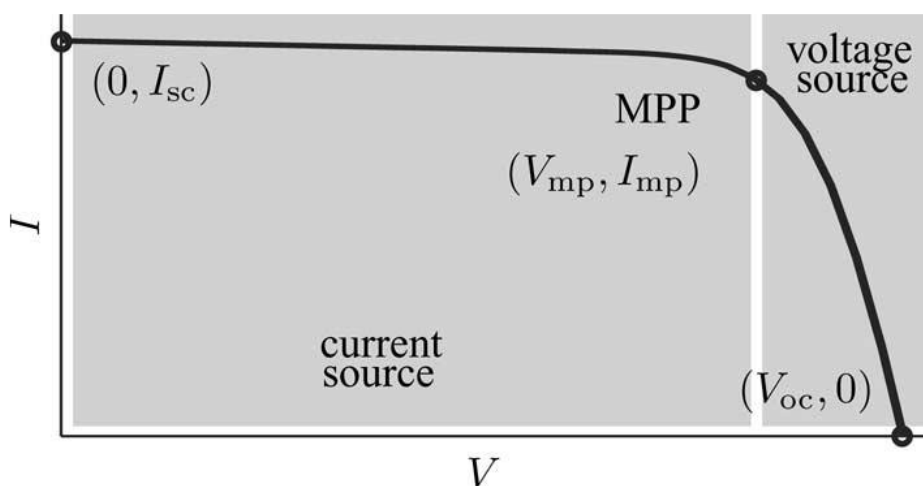


Figure 2.3 Courbe I-V caractéristique d'un dispositif PV pratique et les trois points : court-circuit $(0, I_{sc})$, MPP (V_{mp}, I_{mp}) et circuit ouvert $(V_{oc}, 0)$.

$$I = I_{pv, cell} - I_0 [\exp(qV/akT) - 1] \quad (1)$$

Où :

$I_{pv, cell}$ (A) :est le courant généré par la lumière incidente (il est directement proportionnel à l'irradiation solaire),

I_0 (A) :est l'équation de diode Schrockley,

$I_0, cell$ (A) : est le courant de saturation inverse ou de fuite de la diode,

q (C) est la charge électronique ($1.60217646 \cdot 10^{-19}$ C),

K (J/K) : est la constante de Boltzmann ($1.3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T (en Kelvin) : est la température de la jonction p–n,

a : est la constante d'idéalité de la diode. La figure 2.2 montre la courbe I-V à l'origine de l'équation (2).

2.2.3. Modélisation du réseau PV:

L'équation de base (2) d'une cellule PV élémentaire ne représente pas la caractéristique I-V d'un réseau PV pratique. Les modules PV sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées et l'observation des caractéristiques aux bornes du modules PV nécessite l'inclusion de paramètres supplémentaires à l'équation de base

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (2)$$

où

I_{pv} et I_0 :sont les courants photovoltaïques (PV) et de saturation(A).

$V_t = N_s kT/q$: est la tension thermique du réseau(V)

N_s : est les cellules connectées en série.

Les cellules connectées en parallèle augmentent le courant et les cellules connectées en série fournissent des tensions de sortie plus importantes. Si le réseau est composé de *connexions parallèles* N_p des cellules, les courants PV et de saturation peuvent être exprimés en

$$I_{pv} = I_{pv, cell} * N_p, I_0 = I_0, cell * N_p ; \text{ dans (2) .}$$

R_s est la résistance de série équivalente du réseau .

R_p est la résistance parallèle équivalente.

MPP (V_{m_p} , I_{m_p}) et circuit ouvert (V_{o_c} , 0). L'équation (3) décrit le modèle à diode unique présenté à la figure 2.2. Certains auteurs ont proposé des modèles plus sophistiqués qui présentent une meilleure précision et servent à différentes fins. Par exemple, dans [32], une diode supplémentaire est utilisée pour représenter l'effet de la recombinaison des porteurs. Un modèle à trois diodes est proposé dans [33] pour inclure l'influence des effets qui ne sont pas pris en compte par les modèles précédents. Pour plus de simplicité, le modèle à diode unique offre un bon compromis entre simplicité et précision.

La simplicité du modèle de diode avec la méthode d'ajustement des paramètres et les améliorations proposées dans ce document rendent ce modèle parfait pour les concepteurs d'électronique de puissance qui sont à la recherche d'un modèle facile et efficace pour la simulation de dispositifs PV avec des convertisseurs de puissance.[32]

Le dispositif PV pratique a une résistance en série R_s dont l'influence est plus forte lorsque le dispositif fonctionne dans la région de la source de tension, et une résistance parallèle R_p avec une influence plus forte sur la source actuelle région d'exploitation. La résistance R_s est la somme de plusieurs résistances structurelles du dispositif. Figure 2.1 montre la structure d'une cellule PV. R_s dépend essentiellement de la résistance de contact de la base métallique avec la couche de semi-conducteur p, les résistances des corps p et n, la résistance de contact du n couche avec la grille métallique supérieure, et la résistance de la grille. La résistance R_p existe principalement en raison du courant de fuite de la jonction p-n et dépend de la méthode de fabrication de la cellule PV. La valeur de R_p est généralement élevée et certains auteurs négligent cette résistance simplifier le modèle. La valeur de R_s est très faible, et parfois ce paramètre est trop négligé.

La caractéristique I-V du dispositif PV illustrée Figure 2.3 dépend des caractéristiques internes du dispositif (R_s , R_p) et sur les influences externes telles que le niveau d'irradiation et la température. La quantité de lumière incidente affecte directement la génération de et, par conséquent, le courant généré par le dispositif. Le courant généré par la lumière (I_{pv}) des cellules élémentaires, sans l'influence de la série et des résistances parallèles, est difficile à déterminer. Les fiches techniques informent seulement le raccourci nominal courant ($I_{sc,n}$), qui est le courant maximal disponible à les terminaux du dispositif pratique. L'hypothèse I_{sc} I_{pv} est généralement utilisé dans la modélisation des dispositifs PV parce que dans dispositifs pratiques la résistance de série est faible et le parallèle résistance est élevée. Le courant généré par la lumière de la cellule PV dépend linéairement de l'irradiation[32] solaire et est également influencé par la température selon l'équation suivante ,

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_i \Delta T)G/G_n \quad (3)$$

Où

$I_{pv,n}$: est le courant généré par la lumière l'état nominal (généralement 25 °C et 1000 W/m) (A).

$\Delta T = T - T_n$ (T et T_n étant les températures réelles et nominales[en kelvin], respectivement) (K)

G : (w/m^2) est l'irradiation à la surface de l'appareil.

G_n : est l'irradiation nominale (w/m^2).

Le courant de saturation de la diode I_0 et Sa dépendance la température peut être exprimée par :

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q E_g}{a k} \right) \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

où ,

E_g : est l'énergie de bande passante du semi-conducteur ($E_g = 1,12$ eV pour la poly cristalline Si à 25 C).

$I_{0,n}$: est le courant de saturation nominal (A) :

$$I_{0,n} = (I_{sc,n}) / (\exp \left(\frac{V_{oc,n}}{a V_t,n} \right) - 1) \quad (5)$$

Avec

V_t,n : étant la tension thermique des cellules de la série N_s connectée sa la température nominale T_n

.Le courant de saturation I_0 des cellules PV qui composent le dispositif dépend de la densité de courant de saturation du semi-conducteur (J_0 , généralement donnée en [A/cm^2]) et sur la zone des cellules. La densité de courant J_0 dépend de la caractéristiques de la cellule PV, qui dépendent de plusieurs des paramètres tels que le coefficient de diffusion des électrons dans le semi-conducteur, la durée de vie des porteurs minoritaires, le densité de porteurs, etc. . Ce genre d'information n'est généralement pas disponible pour les réseaux PV commerciaux. Dans le courant de saturation

$I_{0,n}$: est obtenu indirectement à partir du données par (5),

qui est obtenue par l'évaluation (3) à la condition nominale de circuit ouvert, avec

$$V = V_{oc,n}, I = 0, \text{ et } I_{pv} = I_{sc,n}$$

.La valeur de la constante de diode a peut être choisie arbitrairement. De nombreux auteurs discutent des façons d'estimer la valeur correcte de cette constante . Habituellement, 1 à 1,5 et le choix dépend d'autres paramètres du modèle I-V. Certaines valeurs pour a sont trouvés dans basé sur des analyses empiriques. Comme est donné dans , il y a différentes opinions sur la meilleure façon de choisira. Parce que a exprime le degré d'idéalité de la diode est totalement empirique, toute valeur initiale d'un peut être choisi dans pour ajuster le modèle. La valeur d'un peut être modifiée ultérieurement afin d'améliorer le montage du modèle, si nécessaire. Cette constante influe sur la courbure de la courbe I-V et améliorer la précision du modèle.[32]

2.3 Le panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

2.3.1. Montage en série :

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

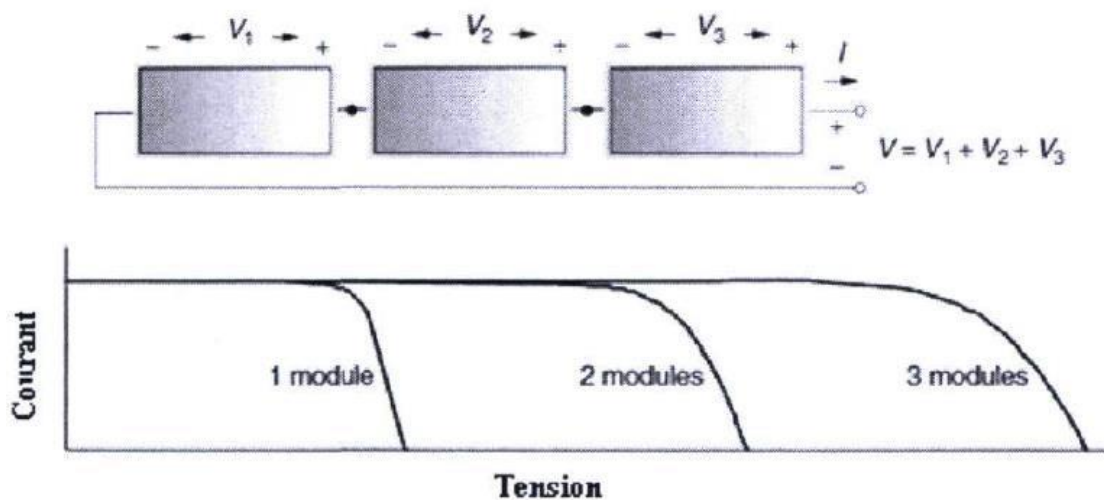


Figure 2.4 Branchement des modules en séries

2.3.2. Montage en parallèle :

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

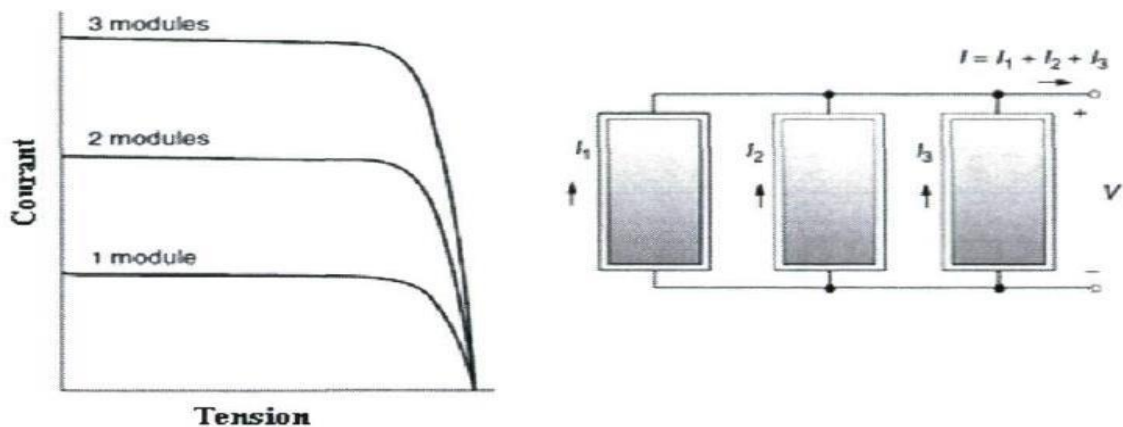


Figure 2.5 Branchement des modules en parallèles.

2.3.3. Le champ Photovoltaïque pour les calcul:

pour la simulation nous choisissons un champ Photovoltaïque presque 6kw monter de 10 panneaux en série et 3 panneaux en parallèle (model de panneau aleo S_17 180) voir le schéma de montage figure 2.3



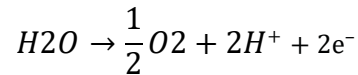
Figure 2.6: Schéma de montage de champ photovoltaïque

2.4. Modélisation D'un Electrolyseur PEM:

2.4.1. Mode de fonctionnement de l'électrolyseur (PEM) système

Une cellule d'électrolyseur PEM est composée d'une chambre d'anode, une chambre cathodique, deux surfaces de catalyseur d'électrode et un proton membrane d'échange [33]. La dissociation de l'eau en l'hydrogène et l'oxygène sont relativement élevés puisque les molécules d'eau ont une structure stable à température ambiante [34]. Aune tension minimale de 1,23 V (tension réversible) est appliquée à travers la cellule électrochimique pour lancer électrochimique réactions aux électrodes de l'anode et de la cathode. L'eau est introduit à l'anode et dissocié en oxygène, les protons et les électrons par la réaction suivante :

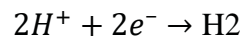
Anode



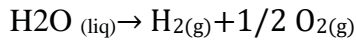
(6)

Les ions hydrogène sont conduits à travers la membrane jusqu'au cathode sous un champ électrique où ils se combinent avec les électrons arrivant du circuit externe pour former de l'hydrogène gaz :

Cathode



(7)



$$\Delta H_{25} = 285.84 \text{ KJ} \quad (3)$$

2.4.1.1 Tension de la cellule de fonctionnement:

Cette seule tension de cellule de fonctionnement de l'électrolyseur PEM est donnée par la somme de la tension réversible et de les autres sur potentiels différents [30];

$$V_{cell(A)} = V_{rev} + \eta_{act} + \eta_{\Omega} \quad (8)$$

V_{cell} : est la tension de cellule (V).

V_{rev} :Tension réversible Chaque réaction aux électrodes dépend des réactions de eau à la tension minimale qui correspond à la potentiel réversible.(V)

Ceci peut être déterminé en utilisant l'équation de l'énergie libre de Gibbs [38];

$$\Delta G = \eta F V_{rev} \quad (9)$$

$$V_{rev} = \Delta G / \eta F \quad (10)$$

où

G : est l'énergie libre de Gibbs de 237,178kJ/K.mole(également connu comme la valeur de chauffage inférieure, (LHV)),

V_{rev} :est la tension réversible(V).

η : est le nombre d'électrons .

F :est la constante de Faraday.

Puisque toute variable dans l'équation (10) est déjà connu, la valeur de la tension réversible de la cellule peut être calculé comme [37];

$$V_{rev} = \frac{273.178}{2 * 96485.3} = 1.22V \quad (11)$$

2.4.1.2. Tension thermo neutre:

En thermodynamique de l'électrolyse, depuis l'énergie libre de Gibbs est connu comme la quantité maximale d'énergie électrique utilisable disponible lorsque l'hydrogène se recombine avec l'oxygène, la tension thermo neutre peut être identifié comme la quantité de la pertes d'énergie dans le système d'électrolyse. la tension peut être identifiée comme [37];

$$V_{tn} = \Delta H^0 / \eta F \quad (12)$$

Où

ΔH^0 : est la valeur de chauffage élevée (HHV) de 285.84 kJ/K. mole.

La valeur de la tension thermo neutre peut être précisé comme [6];

$$V_{tn} = \frac{285.84}{2 * 96485.3} = 1481 \text{ volt/cell} \quad (13)$$

perdes d'énergie dans

la cellule, il ne sera pas inclus dans Eq. (4) pour trouver les valeurs de tension de la cellule.

2.4.1.3 Surtension d'activation :

En rapportant l'expression Butler-Vollmer, la densité actuelle à l'anode et à la cathode peuvent être exprimés les interms de charge phénomènes de transfert et densité du courant d'échange.

ia densité de courant à l'anode (A/cm²)

$$i_a \left(\frac{A}{cm^2} \right) = i_{o,a} \left[\exp \left(\frac{\alpha_1 \eta F}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{\alpha_2 \eta F}{RT} \right) \right] \quad (14)$$

ic densité de courant a la cathode (A/cm²):

$$i_c \left(\frac{A}{cm^2} \right) = i_{o,c} \left[\exp \left(- \frac{\alpha_2 \eta F}{RT} \right) - \exp \left(\frac{\alpha_1 \eta F}{RT} \right) \right] \quad (15)$$

Où

R : est la constante de gaz universelle, R = 8,314 J/mol. K,

T : est la température variable, T(K),

α_1 et α_2 sont les symétrie facteur qui à l'anode représente une énergie supplémentaire la fraction de réduction et la cathode représentent l'oxydation est le nombre d'électrons impliqués. En outre,

Les sur potentiels d'activation à l'anode et à la cathode peuvent être inscrit comme [30];

$$\eta_a = \frac{RT}{\alpha_a z F} \ln \left(\frac{i_a}{i_{o,a}} \right) \quad (16)$$

$$\eta_c = \frac{RT}{\alpha_c z F} \ln \left(\frac{i_c}{i_{o,c}} \right) \quad (17)$$

où

z : est le coefficient stœchiométrique du nombre de les électrons impliqués.

α_a et α_c : sont les coefficients de transfert de charge. Les valeurs de α_a et de α_c sont de 0,5 sur les réactions de symétrie.

La valeur du coefficient stœchiométrique est de 2 car il était électrolyse de l'eau.

La valeur de la densité de courant d'échange de l'anode, $i_{o, a}$ et cathode, $i_{o, c}$ peut avoir un impact très important sur l'activation des deux côtés. En exprimant les Équation d'Arrhenius, la valeur de chaque courant d'échange la densité à l'anode et à la cathode peut être identifiée à l'aide de ces équations [36];

$$i_{o, a} = i_{o, arev} \cdot \exp \left[-EA, aR \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (18)$$

$$i_{o, c} = i_{o, crev} \cdot \exp \left[-EA, cR \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (19)$$

où

T_0 : est la température de référence, T_0 (K),

EA, c 'est l'énergie active anodique et cathodique (J/mol), également $i_{oref, a}$, et $i_{oref, c}$, est la référence anodique et cathodique densité du courant d'échange à la température de référence T_0

le rôle de la sur potentielle d'activation peut être déduit comme [37];

$$\eta_{act} = \eta_a + |\eta_c| \quad (20)$$

En citant un exemple de Choi et al. [32], ils ont suggéré que les densités de courant d'échange à l'anode, cathode basée sur catalyseur d'électrode de platine et électrode iridium de platine catalyseur visé sur les paramètres indiqués dans le tableau 1.

Paramètres	Valeur	Démentions	Références
$i_{o, a}, Pt$	$10^{-12} - 10^{-9}$	A/cm ²	Catalyseur à électrode de platine
$i_{o, c}, Pt$	$10^{-4} - 10^{-3}$	A/cm ²	Catalyseur à électrode de platine

Tableau 2.1 Paramètre du modèle pour l'électrolyse de l'eau basée sur Pt électrodes d'anode et de cathode sur l'électrolyte Nafion [36.35]

2.4.1.4 Surtension ohmique: Le sur potentiel ohmique peut être classé en deux catégories :

a. Surtension ohmique due à la résistance de la membrane (résistance ionique). Ceci est causé par la résistance de la membrane au flux d'ions. Il a également appelé chute de tension due à la résistance de la membrane à la flux d'ions. Ceci peut être exprimé comme [36];

$$\eta_{\Omega, mem} = \varphi \cdot i / \sigma \quad (21)$$

où

$R_{iom} = \varphi / \sigma$ est une résistance ionique en fonction de la conductivité de l'épaisseur de la membrane, est la hauteur de la membrane, (cm).

σ_{mem} :est la conductivité ionique locale avec la teneur en eau et la fonction de température. Cela peut être écrit comme [36];

$$\sigma_{mem} = (0.001539\lambda - 0.00326) \exp[1268((1/303) - (1/T_{cell}))] \quad (22)$$

Où se trouve le degré d'humidification de la membrane.

b. Surtension inter faciale (résistance électronique).Ceci est causé par des matériaux électroniques tels que les plaques bipolaires, collecteurs de courant d'électrodes, etc. La résistance peut être exprimé en [37];

$$\eta_{\Omega,e}=R_{ele}i \quad (23)$$

Le résistance ohmique de matériaux électriques;

$$R_{ele}=\rho l/A \quad (24)$$

où,

Ω_m : est la résistivité du matériau .

l :est la longueur du chemin des électrons.

A : est la section transversale du conducteur(cm^2).

Le sur potentiel ohmique dû aux résistances électroniques et ioniques est [37].

$$\eta_{\Omega,mem}=(R_{ele}+R_{iom})i \quad (25)$$

parameters	Value	Unities
io,a	10⁻⁹	A/cm²
io,c	10⁻³	A/cm²
Rele	0.035	mΩ
t_{mem}	200	um
λ	17	-

Tableau 2.2 Sélection des paramètres en ohmique

La valeur de la sur potentielle d'activation à l'anode et à la cathode peut être calculé à l'aide de Eq. (12) et Eq. (13), en utilisant les paramètres du tableau 2.[37]

4.1.5. Surtension de diffusion

Les diffusions donnent une fonction dans le dépassement de l'énergie perdue présumé dans la cellule en raison de la résistance de transport de masse de réaction électrochimique à l'interface de la membrane et électrode [37]. Compte tenu de la valeur des diffusions est donc faible et peut ne pas avoir d'impact majeur sur le résultat de la simulation, il peut être négligé. Enfin, d'après Eq. (4), l'ensemble tension de la cellule de fonctionnement peut être conclu comme;

$$V_{cell} = V_{rev} + RT/\alpha azF \ln(ia/(io, a)) + | - RT/\alpha czF \ln(ic/(io, c)) | + (Rele + tmem/((0.001539\lambda - 0.00326)exp[1268((1/303) - (1/T_{cell}))])) \quad (26)$$

4.1.6.Débit molaire :

On sait que le courant, je peux être trouvé en utilisant [36];

$$I=i.A \quad (27)$$

où

i : est la densité de courant(A/cm^2)

A: est la zone de l'électrode(cm2).

Par régir la loi de Faraday dans cette cellule électrochimique, débit molaire lié peut être écrit comme [37];

$$\dot{H}_2 = \frac{\eta_{cell}.I}{2F} \eta F \quad (28)$$

$$\dot{O}_2 = \frac{\eta_{cell}.I}{4F} \eta F \quad (29)$$

$$\dot{H}_2O = 1.25 \frac{\eta_{cell}.I}{2F} \eta F \quad (30)$$

$\eta_{cell}=1$ Le nombre de cellules électrolytiques utilisées une seule cellule.

tandis que je suis le courant global à travers la cellule.

ηF : Le Faraday efficacité.

I: l'écart entre les et le débit d'hydrogène théorique.

Il peut être supposé comme 100% puisque beaucoup d'autres littératures ont convenu qu'il a la valeur plus de 95 % [37]. Comme cela a été expliqué, l'Eq. (28) , (29),et (30) peut être simplifié pour être [31];

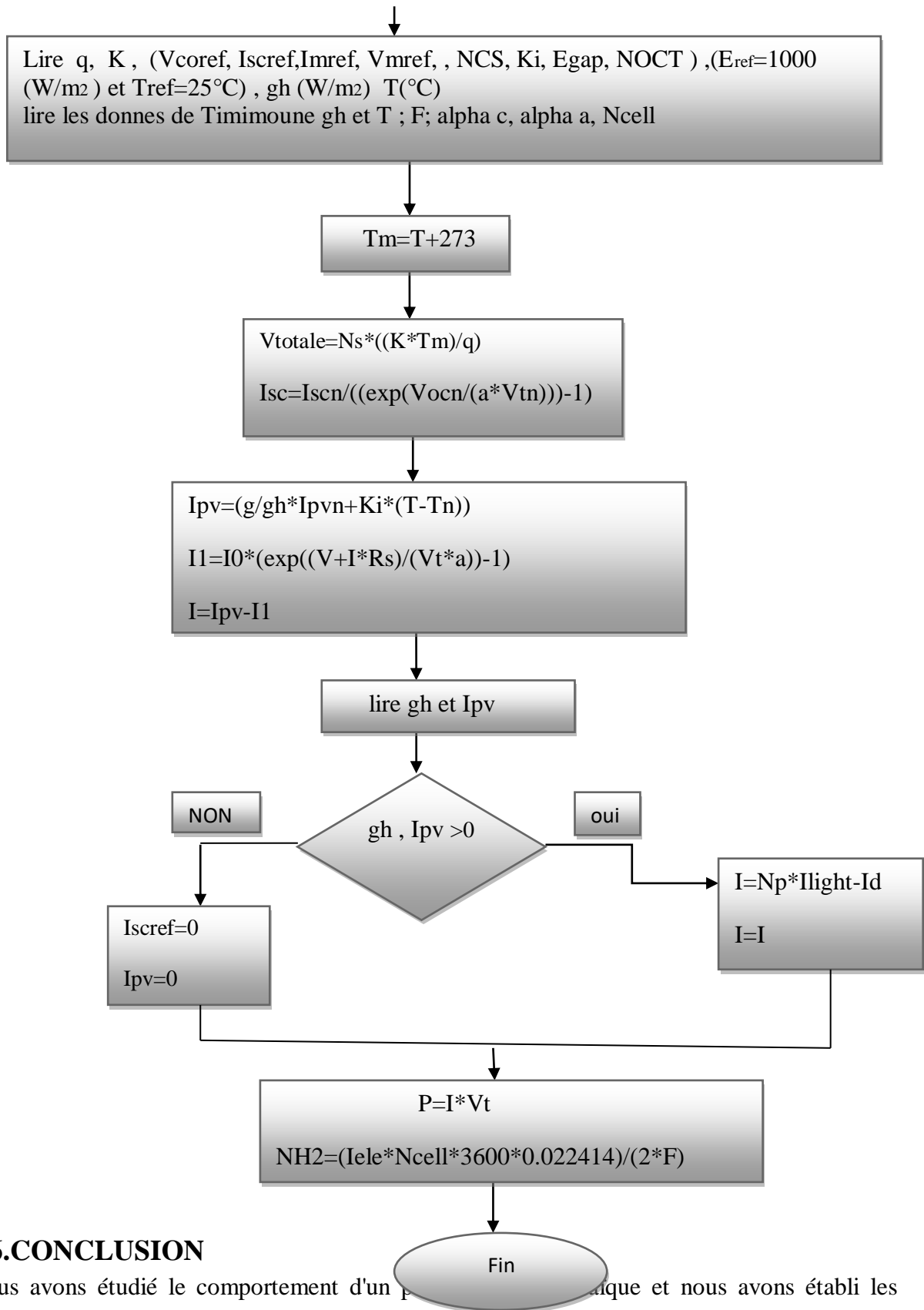
$$\eta \dot{H}_2 = I/2F \quad (31)$$

$$\eta \dot{O}_2 = I/4F \quad (32)$$

$$\eta \dot{H}_2O = 1.25I/2F \quad (33)$$

2.5.L'organigramme pour tracer la caractéristique (I-V) et la production d'hydrogène:





2.6.CONCLUSION

Nous avons étudié le comportement d'un p... et nous avons établi les équations et méthodes mathématiques nécessaires à la détermination de sa caractéristique I-V et pour sa prédiction à différentes conditions opératoires.

Nous avons aussi établi les équations nécessaires à la prédiction de la production d'hydrogène solaire par électrolyse en utilisant le panneau photovoltaïque comme source électrique.

Chapitre3:Résultats et Discussion

3.1.INTRODUCTION:

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude d'un système de production d'hydrogène solaire. Pour cela on a simulée la production électrique d'un champ photovoltaïque et de production d'hydrogène de l'électrolyseur avec un programme MATLAB nous prenons le site de Timimoune pour l'étude

Coordonnées géographiques de Timimoune	Latitude: 29.25, Longitude: 0.25 29° 15' 0" Nord, 0° 15' 0" Est
Superficie de Timimoune	993 600 hectares 9 936,00 km ²
Altitude de Timimoune	281 m
Climat de Timimoune	Climat désertique sec et chaud (Classification de Köppen: BWh)

Tableau 3.1 Données géométriques de Timimoune



Figure 3.1 Données géométrique de Timimoune A partir d'un champ photovoltaïque qui permet d'alimenter

3.2. Le model et les caractéristiques de le Panneau Photovoltaïque:

Valeurs électriques (STC)			S17 180
Puissance nominale	P_{mpp}	[W]	180
Tension nominale	V_{mpp}	[V]	23.6
Courant nominale	I_{mpp}	[A]	7.63
Tension à circuit ouvert	V_{oc}	[V]	30.4
Courant de court circuit	I_{sc}	[A]	8.42
Rendement	η	[%]	12.4
Superficie spécifique de puissance	A_p	[m ² /KWc]	8.09

Tableau 3.2: les caractéristiques de model aleo s_17 sol

Valeurs électriques dans les conditions standard de test (STC) : 1000w/m² ;25C°;AM 1.5

Valeurs électriques (NOCT)			S17 180
Puissance	P_{mpp}	[W]	138
Tension	V_{mpp}	[V]	22
Courant	I_{mpp}	[A]	6.28
Tension de circuit ouvert	V_{oc}	[V]	27.8
Courant de court circuit	I_{sc}	[A]	6.81
Rendement	η	[%]	11.9

Tableau 3.3:les caractéristiques de model aleo s_17 sol

Valeurs électriques dans les conditions nominales de fonctionnement de cellule : 800w/m²;20c° AM1.5

Coefficient de température	K_i	[%/k]	0.03
Nombre des cellules en série	NCS	50	

3.2.1. Modèles de simulation de la caractéristique I-V :

On peut représenter notre module photovoltaïque par Le schéma équivalent le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN idéale qui comprend une source de courant I lumière, qui modélise le courant photoélectrique, associée à une diode en parallèle qui modélise la jonction P-N dont la polarisation détermine la tension

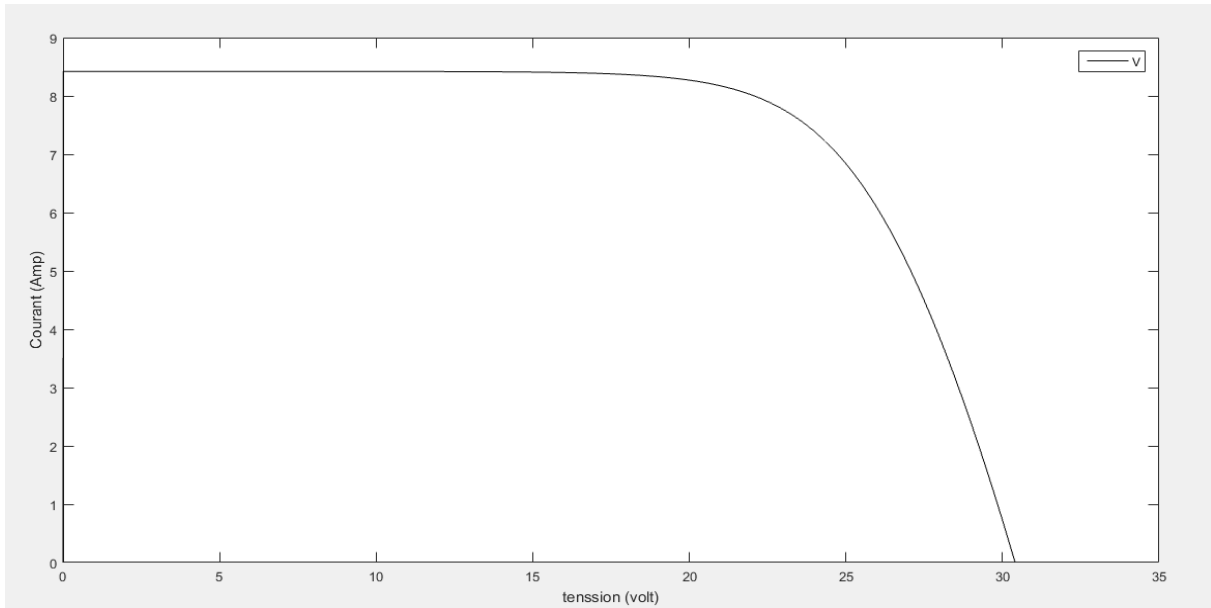


Figure 3.2: la courbe I-V de le panneau aleo S_17 180

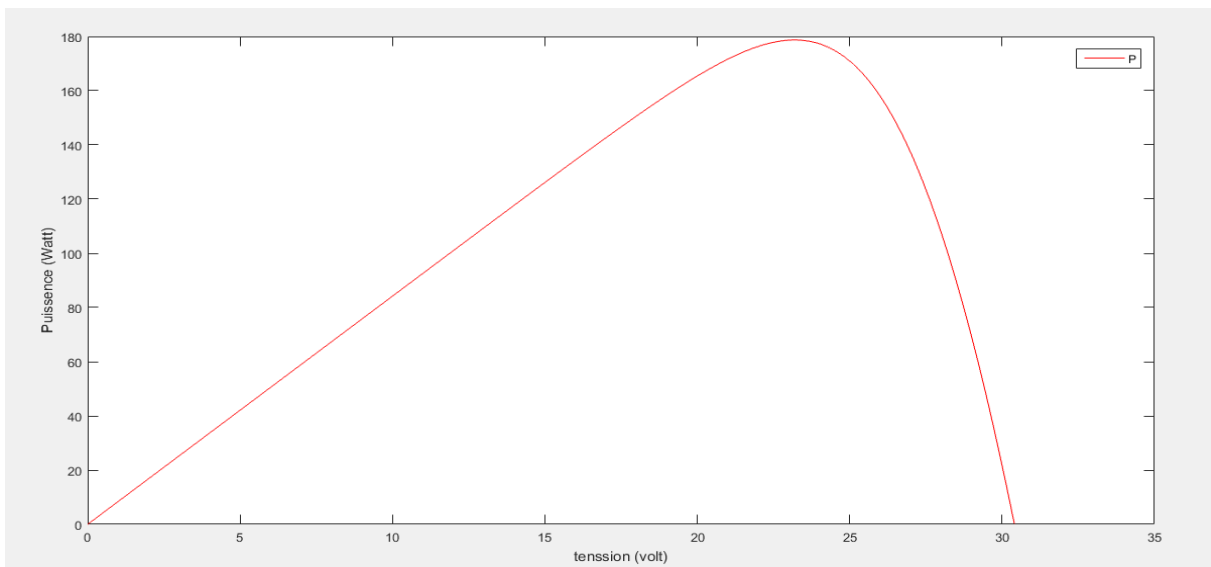


Figure 3.3: la courbe P-V de panneau aleo S_17 180

dans la figure 3.2 on remarque que le courant varie de $I_{sc}=8.42$ a $I=0$ en fonction de la tension V et pour la figure 3.3 on a représenté la variation de la puissance P en fonction de la tension V la valeur maximale de la puissance est $P= 180W$

3.3.Variation de l'irradiation et les températures mensuel:

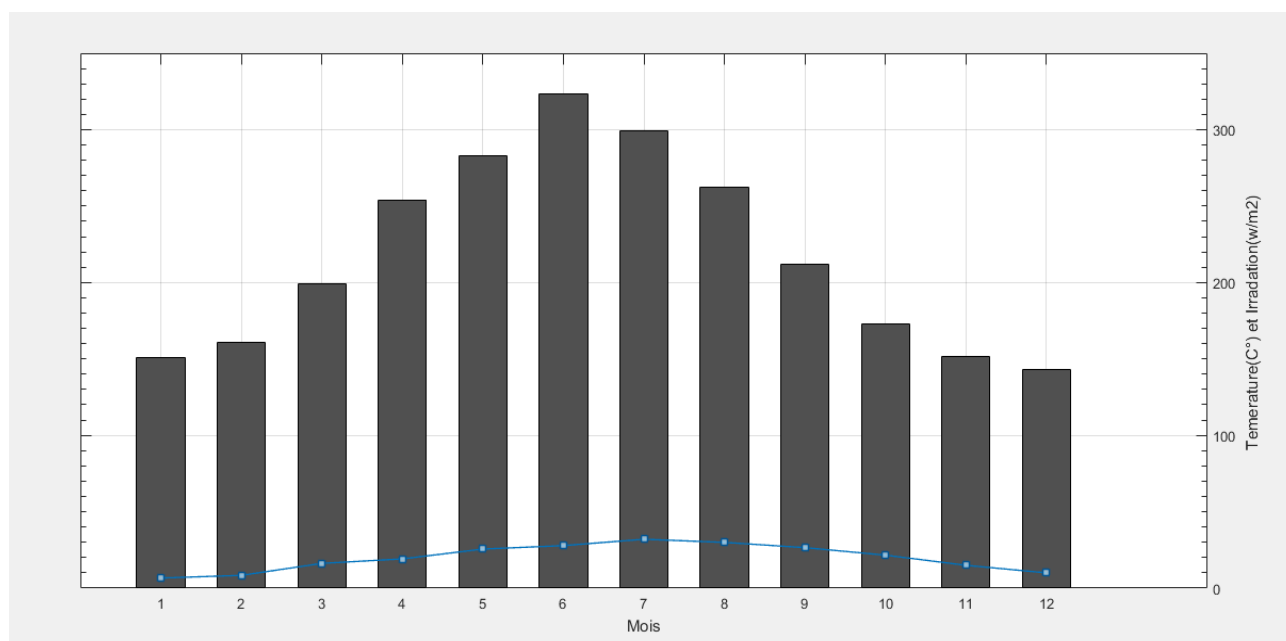


Figure 3.4: Variation de la Température et irradiation pour chaque Mois

Cette figure représente les moyennes des températures et l'irradiation pour chaque mois de l'année 2005 au niveau de la wilaya de Timimoune, on voit l'augmentation des températures et l'irradiation ,de janvier jusqu'à juin pour ce dernier et de janvier jusqu'à juillet concernant la température ,on voit aussi qu'il y'a une diminution de l'irradiation entre juillet et décembre et même chose pour la température de août a décembre .

Mois	Températures(C°)	Irradiation globale (W.h/m2)
Janvier	6.62	150.6
Février	8.38	161.1
Mars	16.2	199.26
Avril	19.15	254.1
Mai	25.58	283
Juin	27.83	323.43
Juillet	32	299.37
Aout	29.94	261.98
Septembre	26.5	212.25
Octobre	21.59	172.53
Novembre	14.59	151.34
Décembre	10.01	142.98

Tableau 3.4 La moyen des valeurs des températures et irradiation pour chaque mois

3.4. La puissance électrique annuel et pour chaque mois

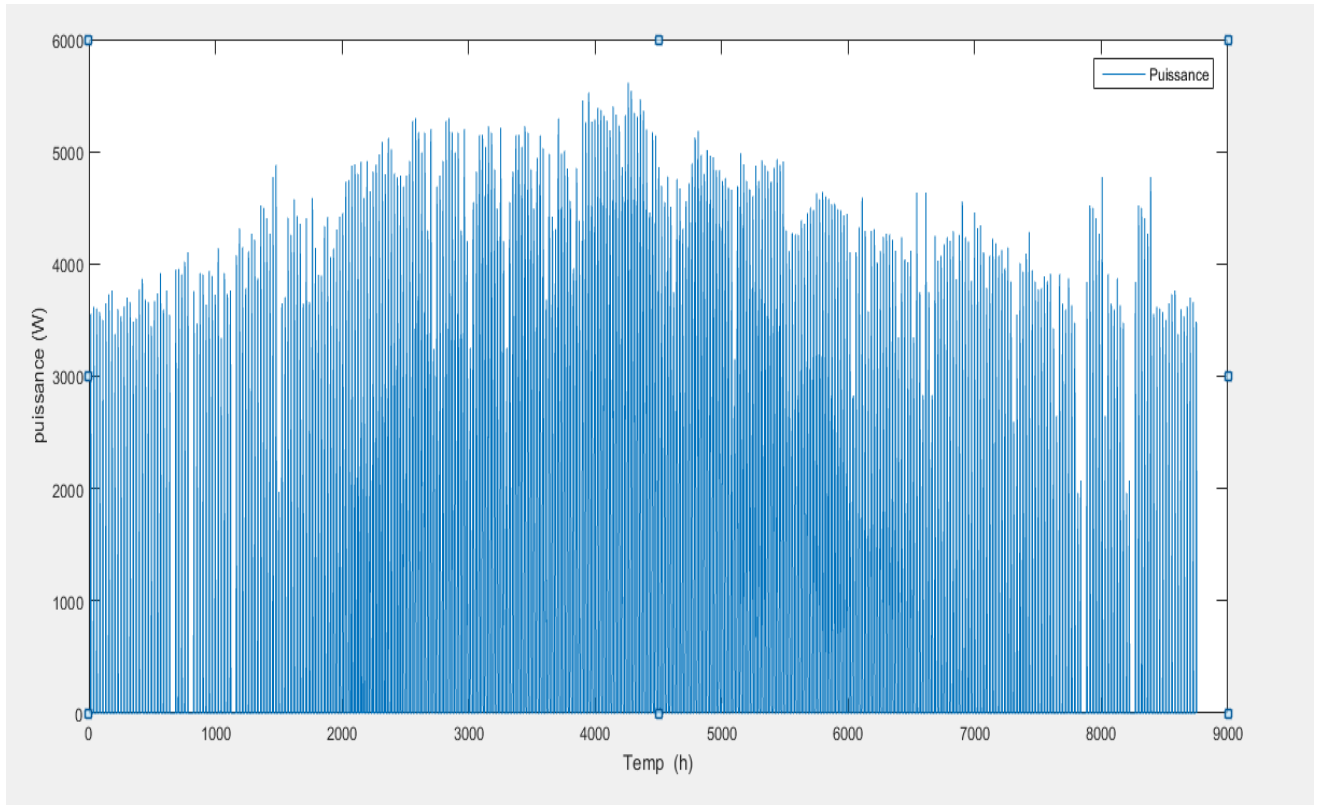


Figure 3.5: Courbe de variation de Puissance en fonction de Temps

Résultat et discussions Pour cette variation de puissance électrique produite par le champ photovoltaïque nous avons étudié presque 6 kW la valeur exacte est $P=5614.7W$ cette puissance marquée le 27/06/2005 à 13:00 avec $T=33.20C^{\circ}$ et $G=1083.86w/m^2$ la puissance minimale; $P=5.1179W$ le 18/01/2005 à 7:00 à $T=-0.39C^{\circ}$ et $G=1w/m^2$; Et quand l'irradiation est nulle la température est de même ou bien quand la puissance égale zéro pour la nuit

Nous concluons que les grandes puissances effectuent pendant la saison d'été à laquelle l'irradiation solaire et les températures sont plus élevées et totalement le contraire pour les petites puissances.

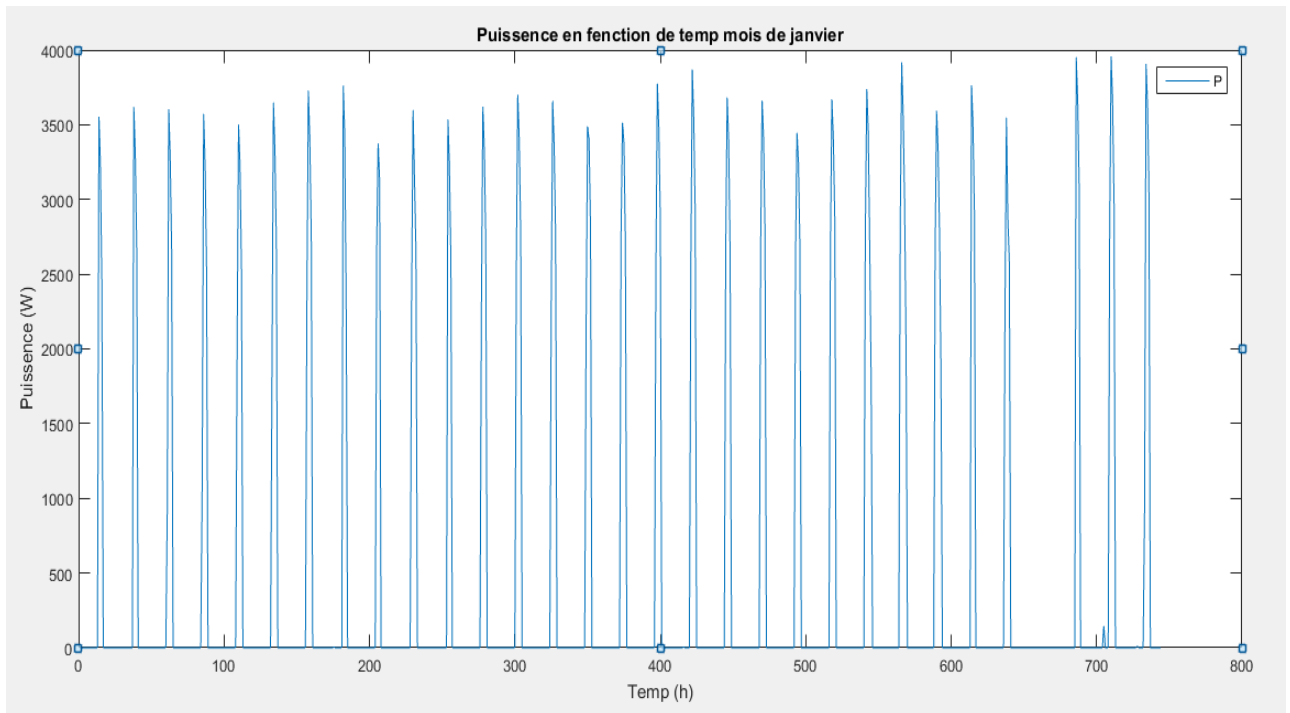


Figure 3.6 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Janvier

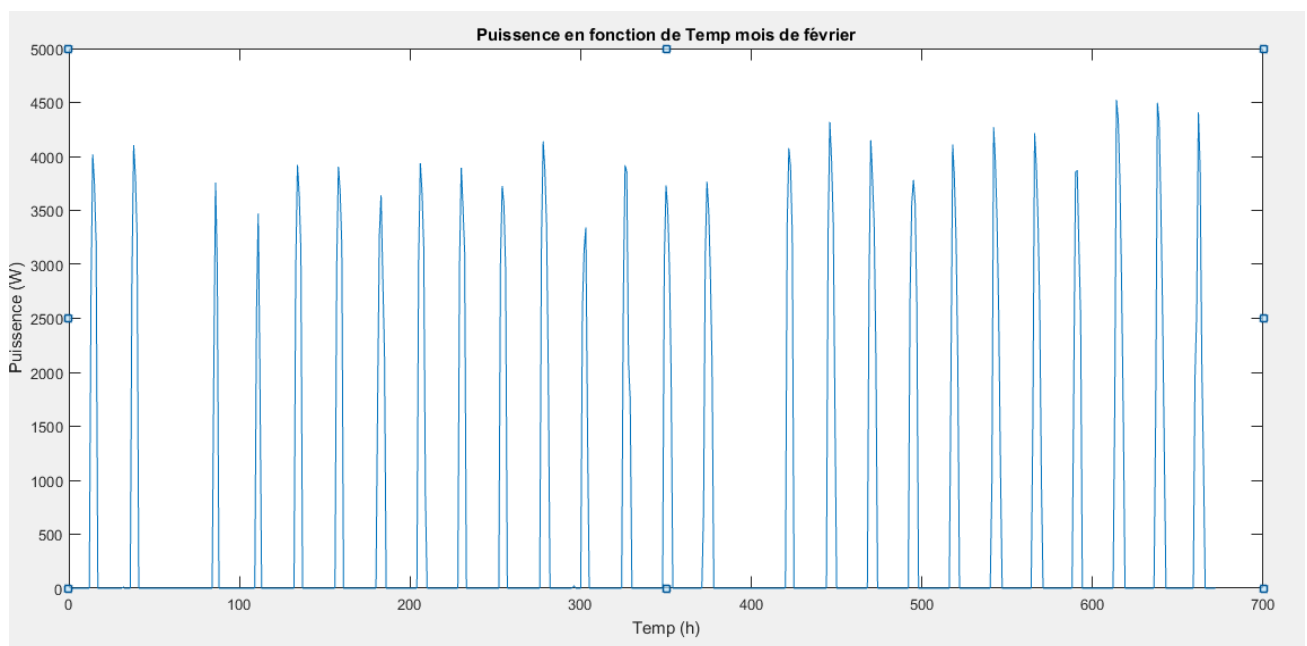


Figure 3.7 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Février

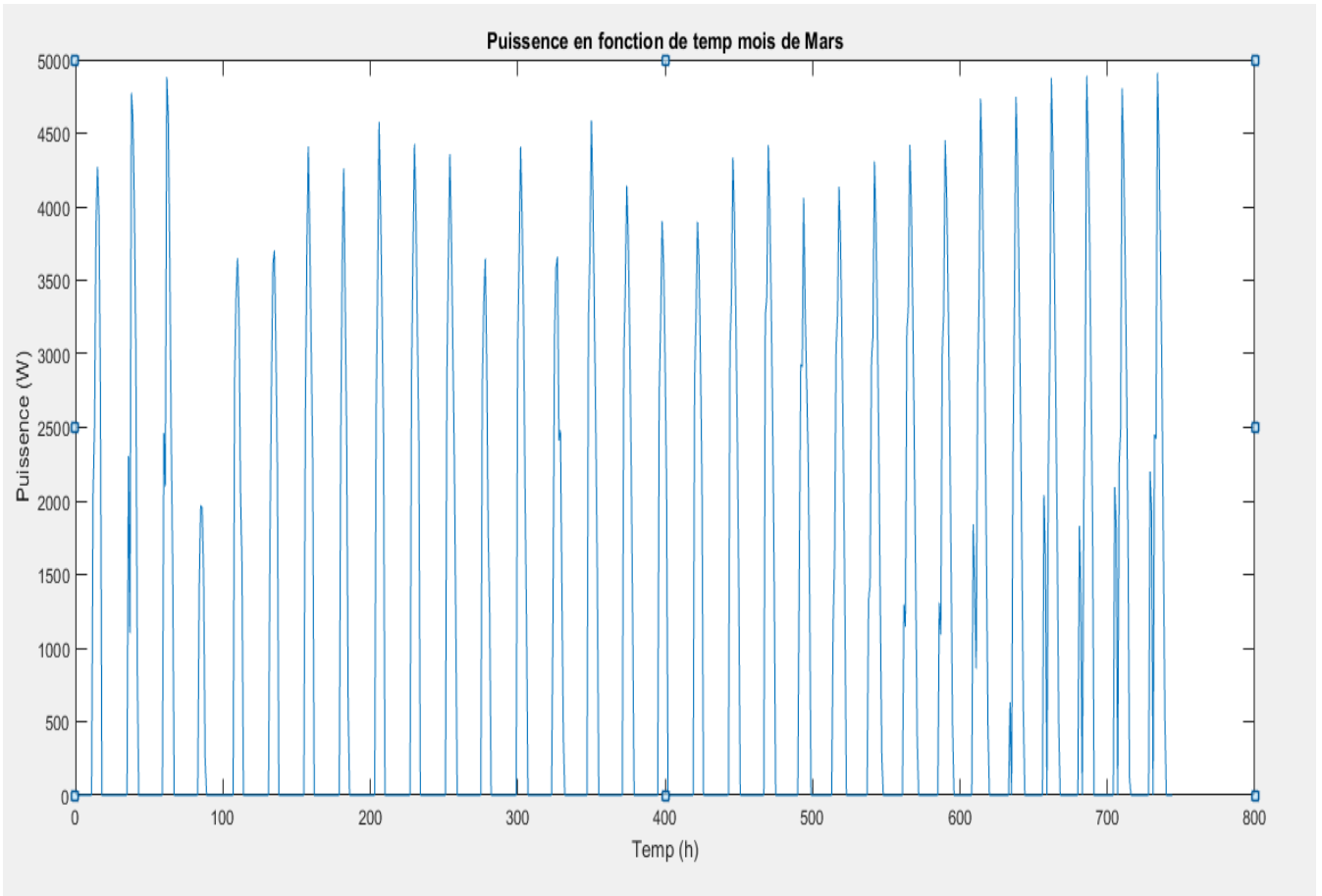


Figure 3.8 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Mars

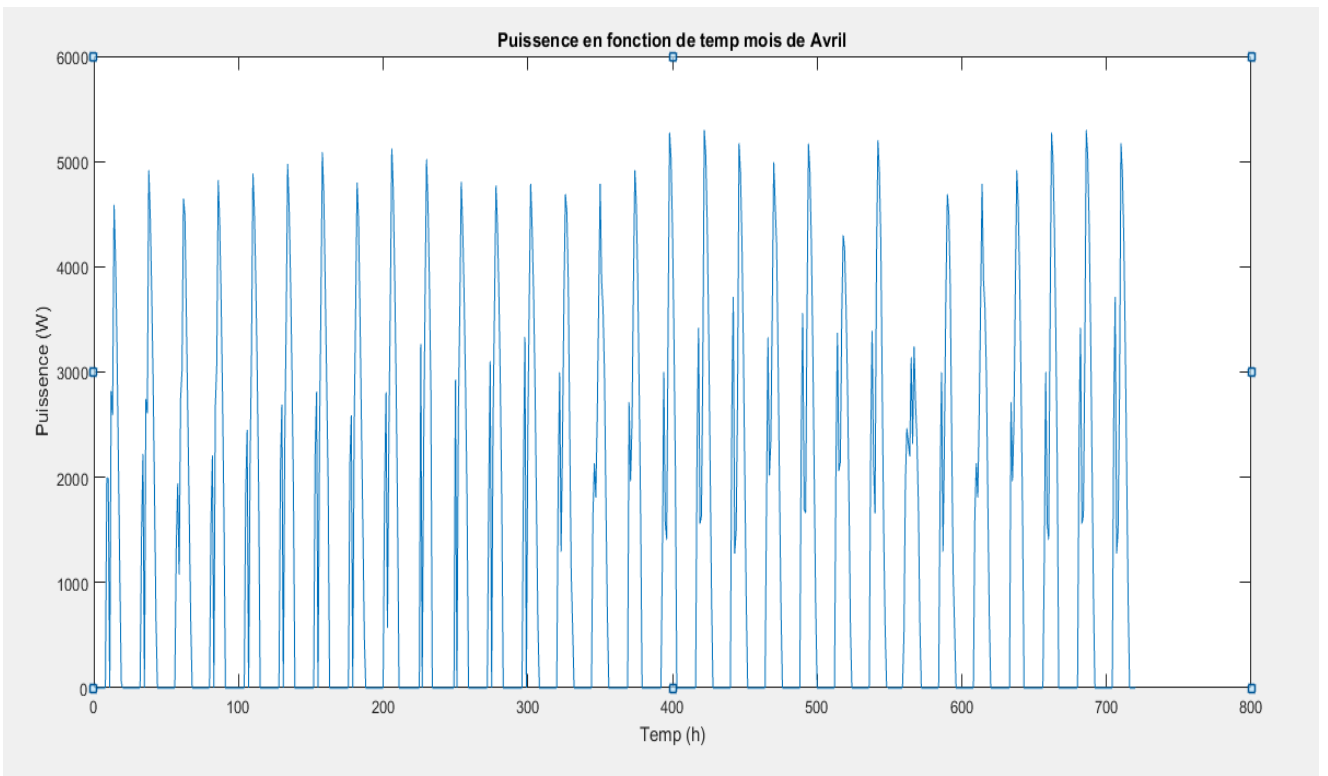


Figure 3.9 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Avril

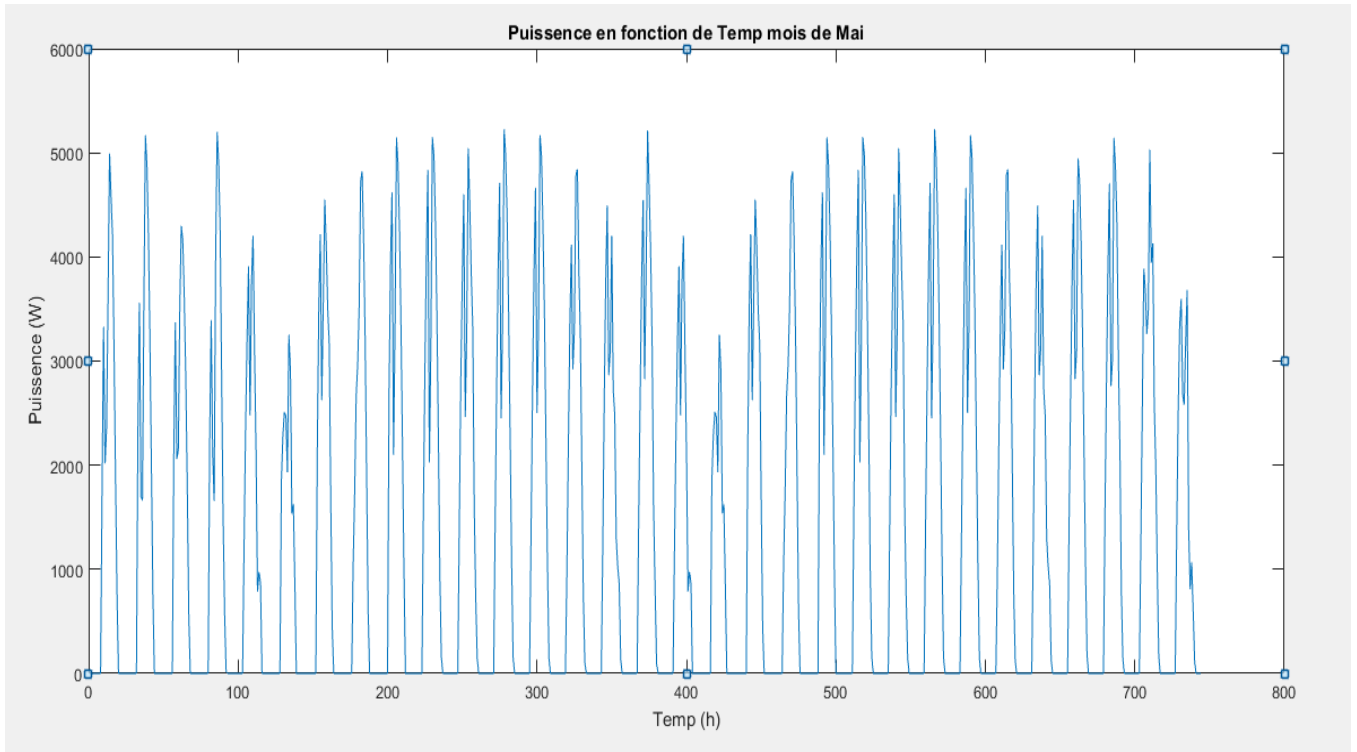


Figure 3.10 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Mai

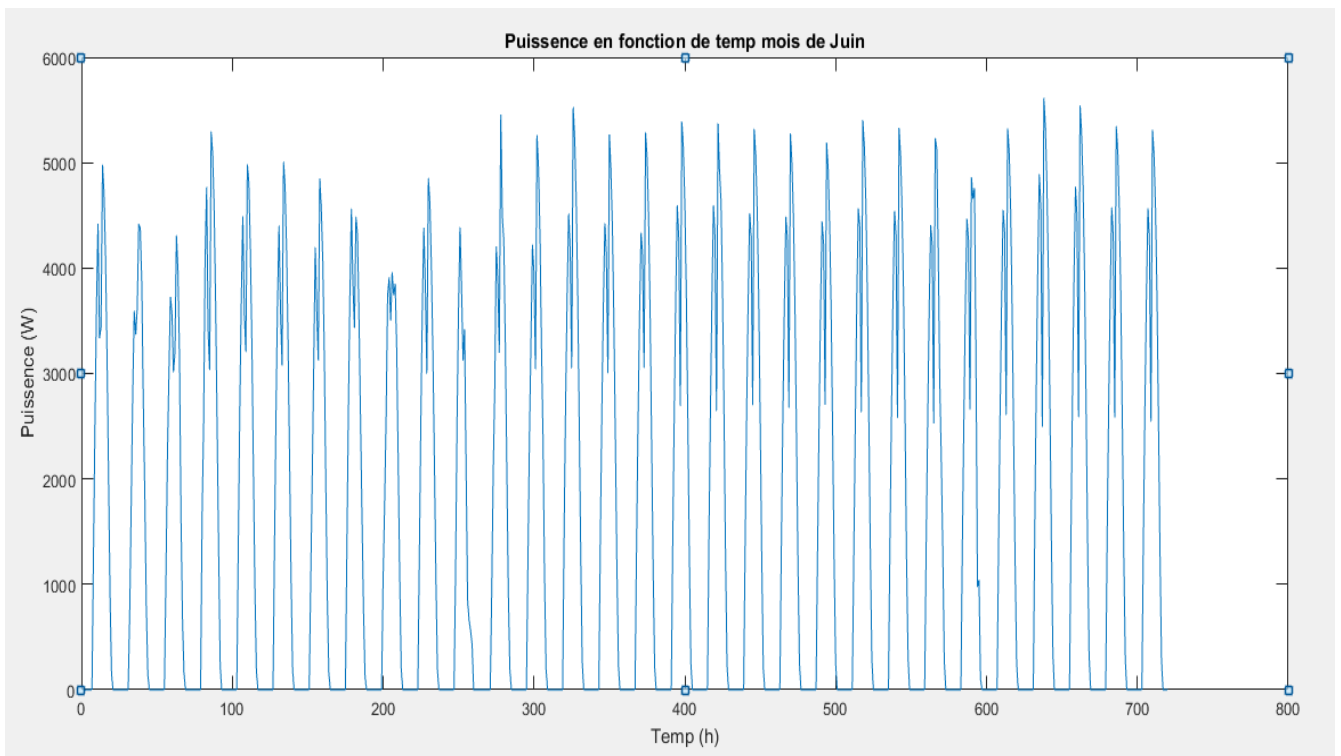


Figure 3. 11: Courbe de puissance en fonction de Temps mois de juin

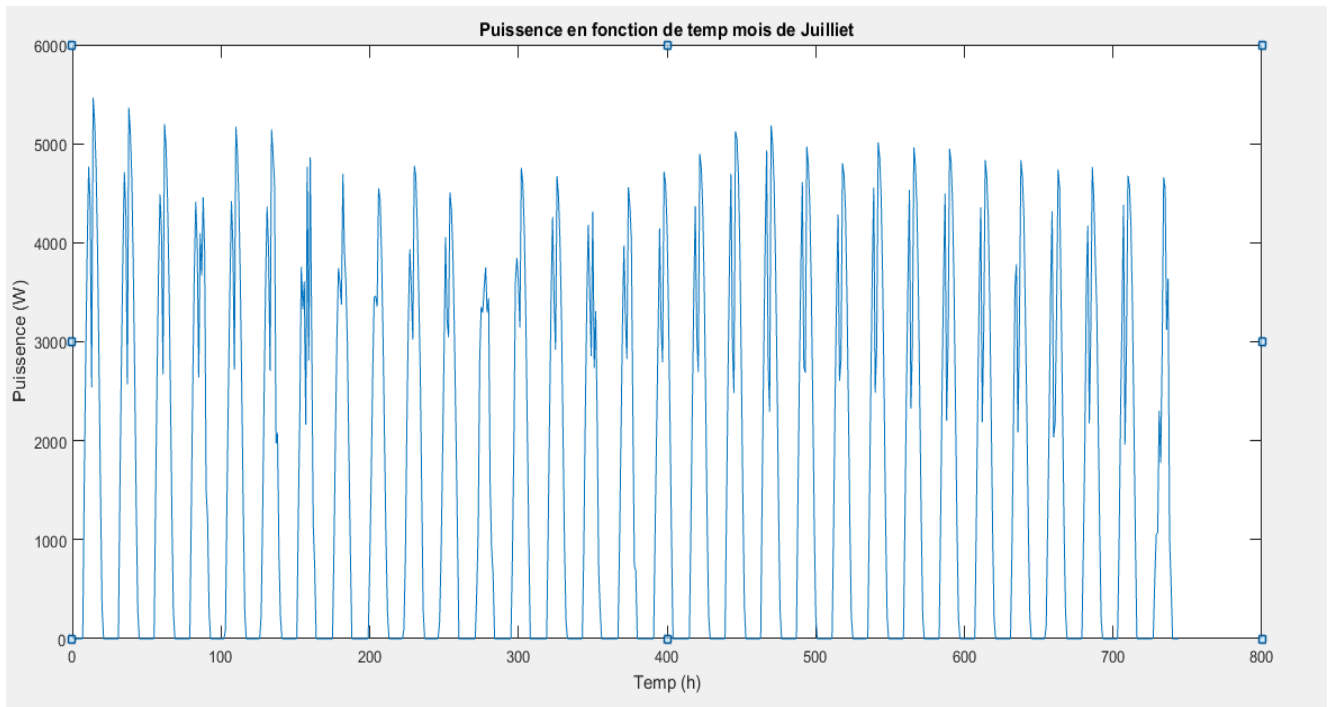


Figure 3. 12: Courbe de puissance en fonction de Temps mois de juillet

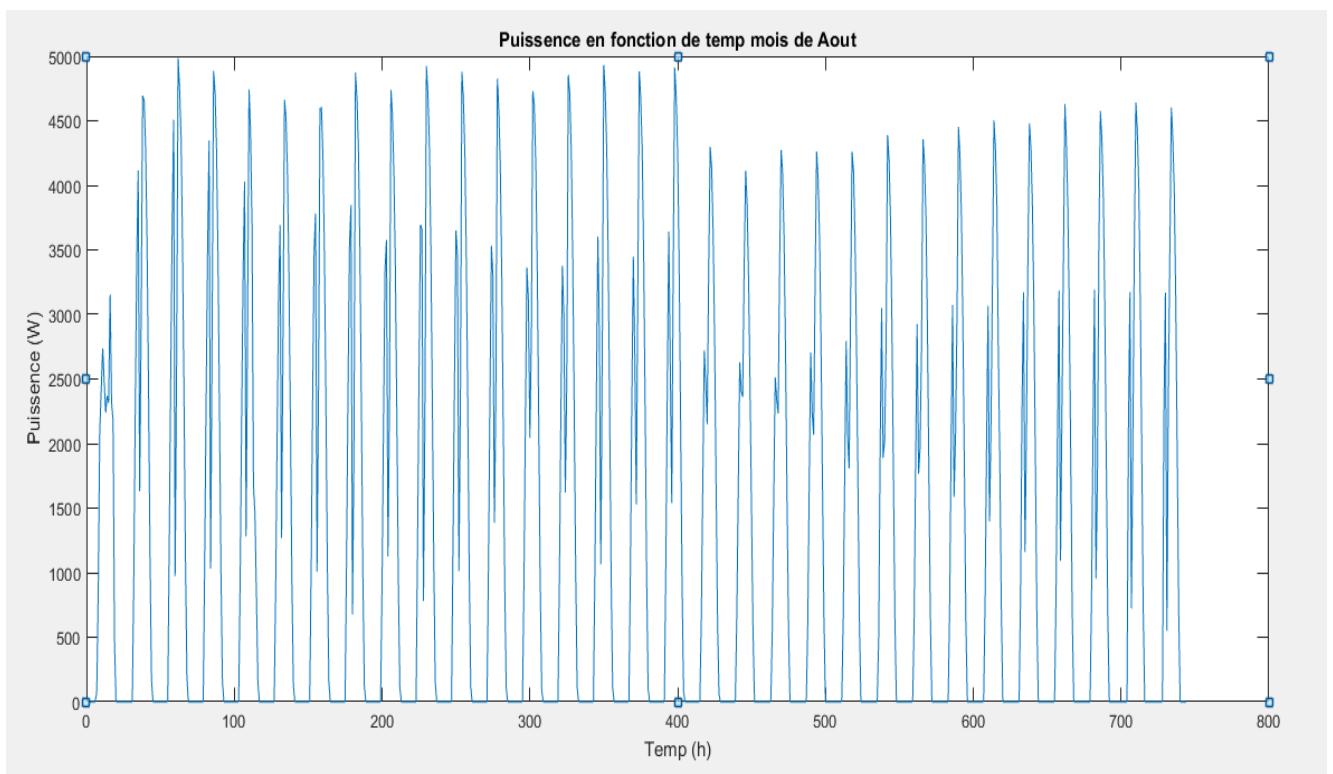


Figure 3.13 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Aout

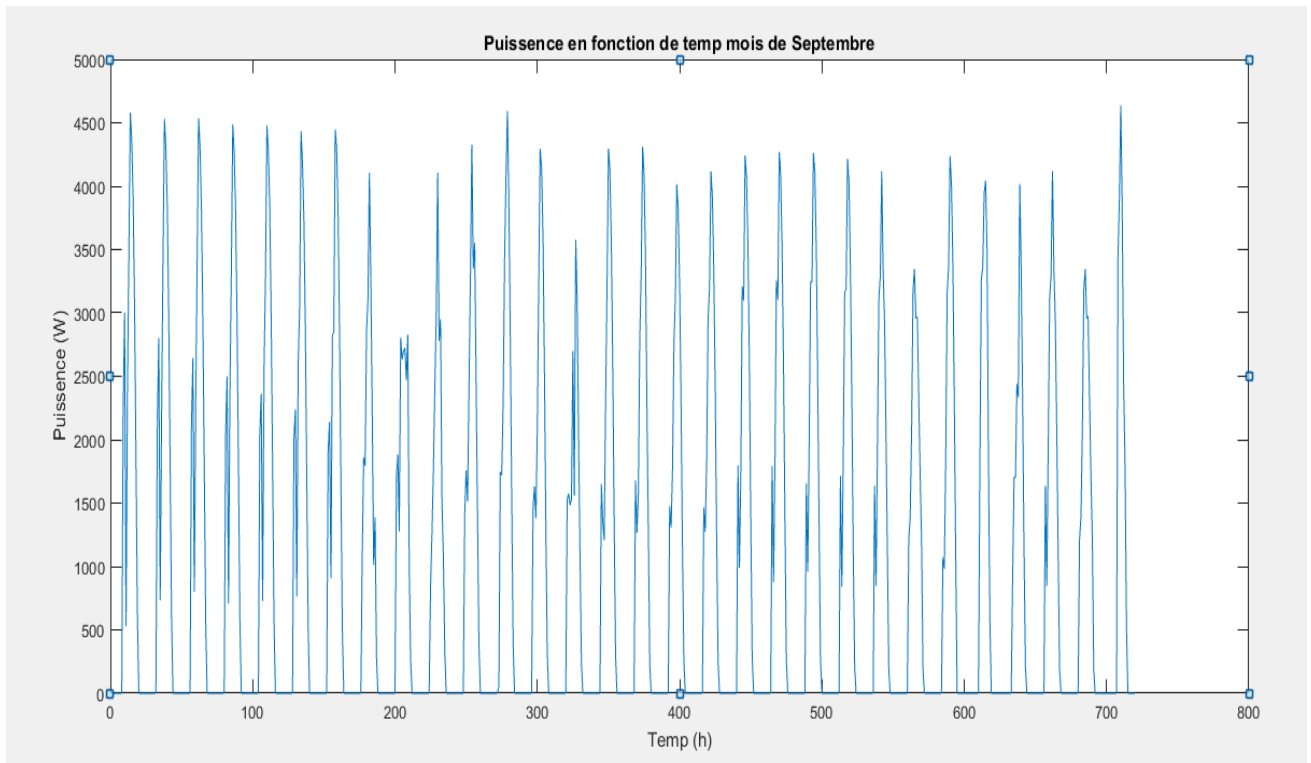


Figure 3.14 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Septembre

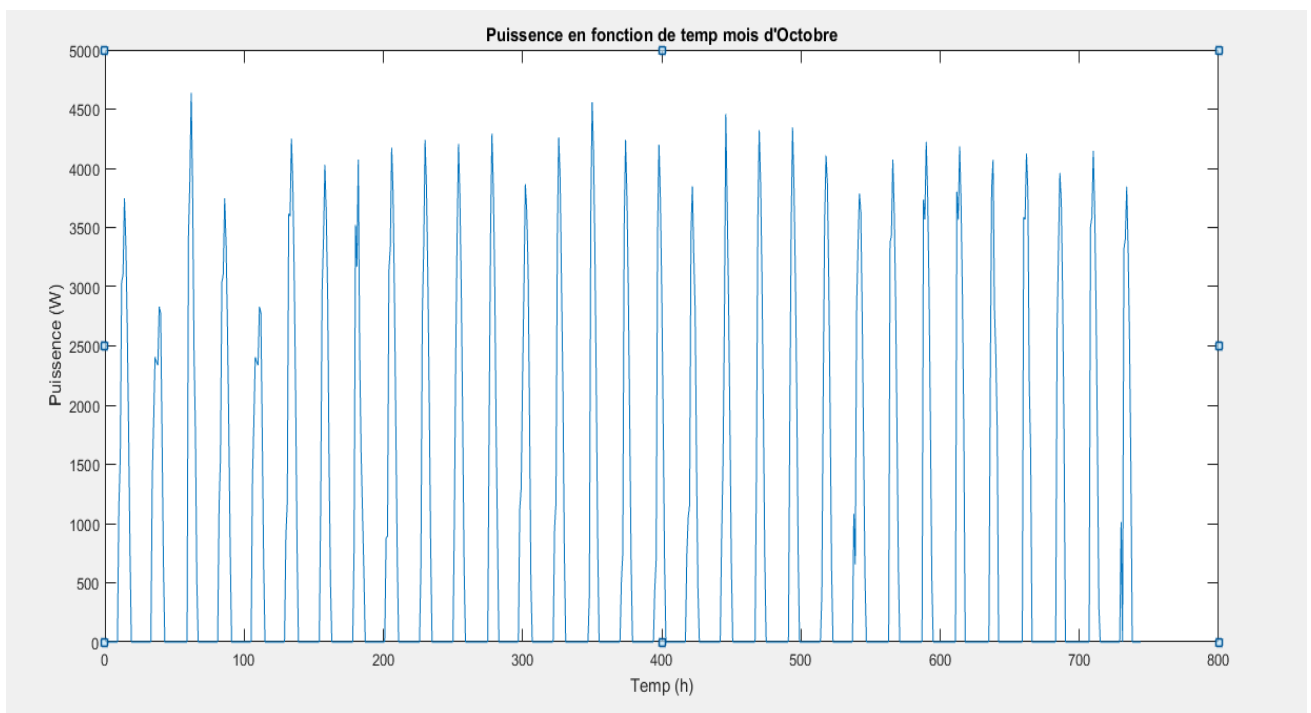


Figure 3.15 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Octobre

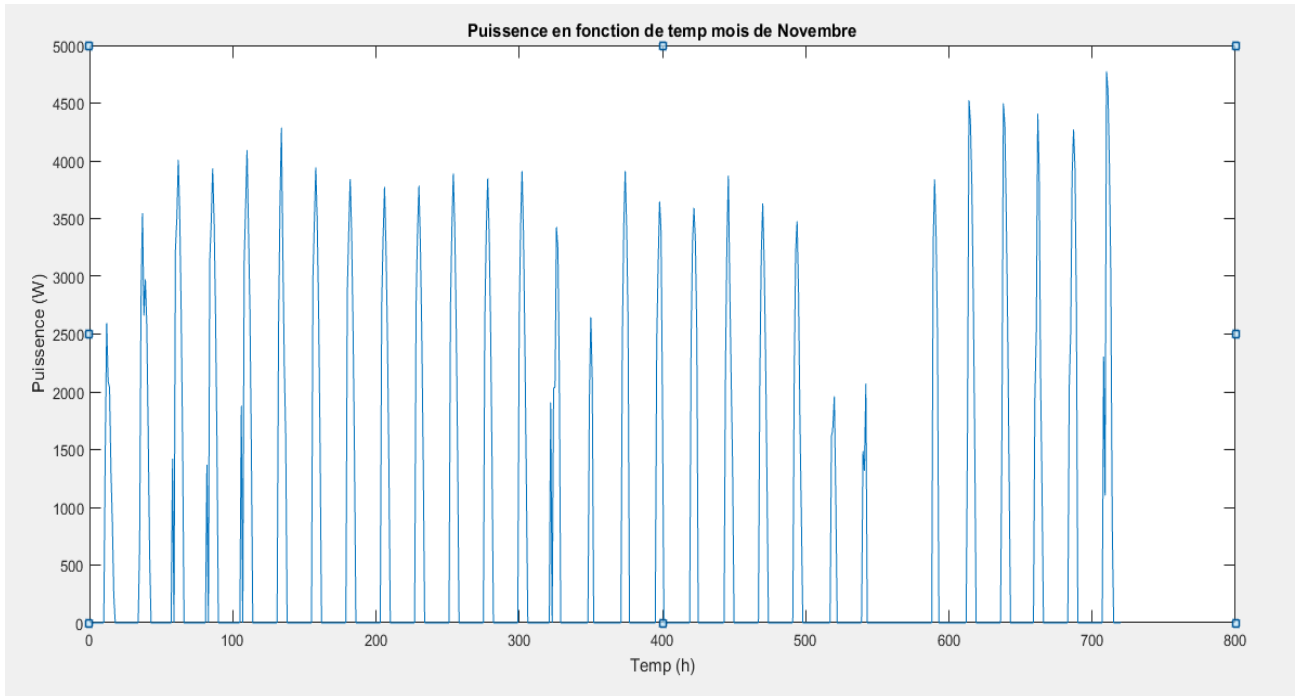


Figure 3.16 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Novembre

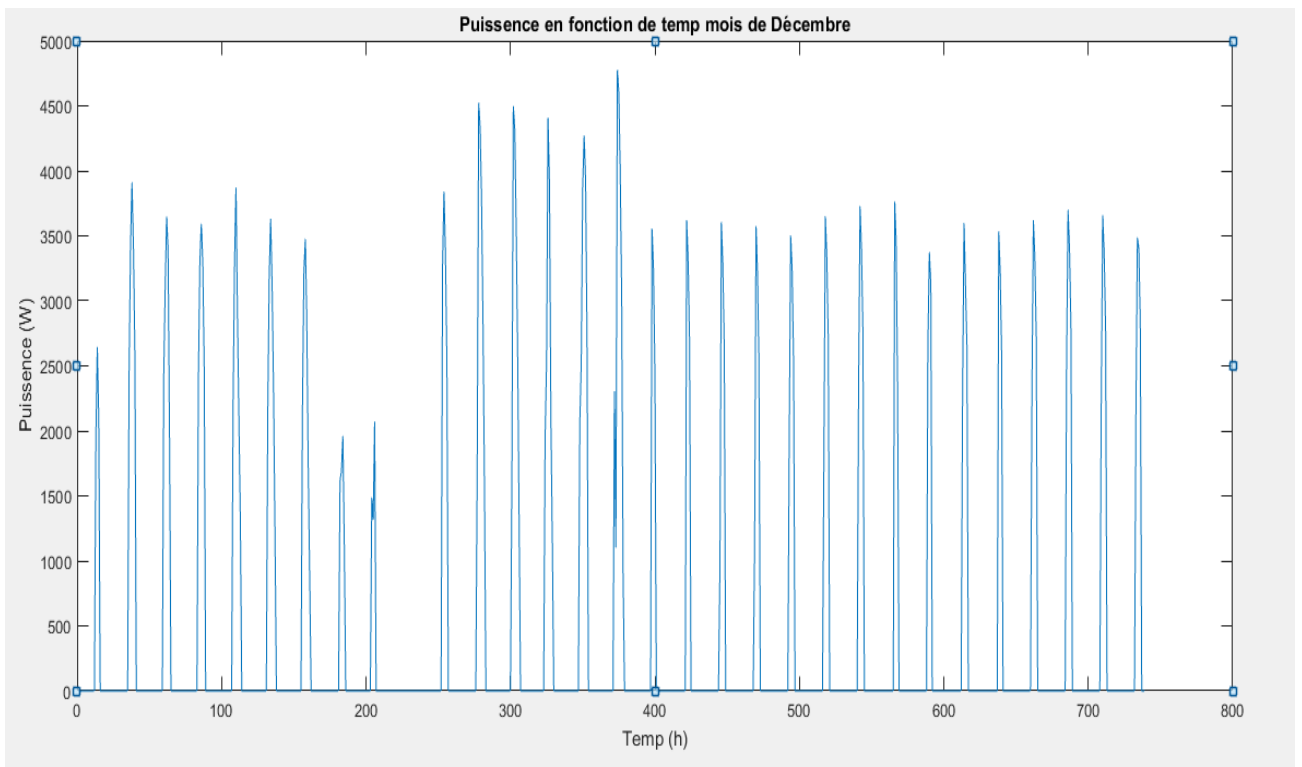


Figure 3.17 : Courbe de puissance en fonction de Temps mois de Décembre

Nous remarquons que les figures de 3.6 à 3.17 qui représentent la puissances électrique mensuelle produite par le champ P-V on remarque que les puissance maximale mois de janvier [3958.22w]; février de (4522.525w); Mars(4909.7w); Avril(5299.45w);

Mai(5212.15w); Juin(5614.65w); Juillet (5464.93w); Aout(4985.49w); Septembre(4636.26w); Octobre(4636.27w); Novembre(4774.82w); Décembre(4774.83w).

La variation de la puissance est croissante de janvier jusqu'à juin ou la puissance maximale de champ photovoltaïque; et de juillet à décembre la puissance démunie; et augmente un peu en novembre et décembre pendant les journées ou l'irradiation augmente; mais la puissance est nulle pour les nuits ou l'irradiation est la température sont très faibles.

3.4.Caractéristiques de Electrolyseur PEM :

Prenons les caractéristiques d'électrolyseur le stack développé dans le cadre du projet GenHy PEM. Pour un fonctionnement à $j=1 \text{ A cm}^{-2}$ et 2 V, le courant est de 250 A et la tension de 24 V soit une puissance de 6 kW. La quantité d'hydrogène produite pour une cellule de 250 cm^2 fonctionnant à 1 A cm^{-2} est de $0,1 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ soit $1,2 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ pour le module de 12 cellules. L'énergie à fournir à cet électrolyseur est d'environ $5 \text{ kWh Nm}^3 \text{ H}_2$

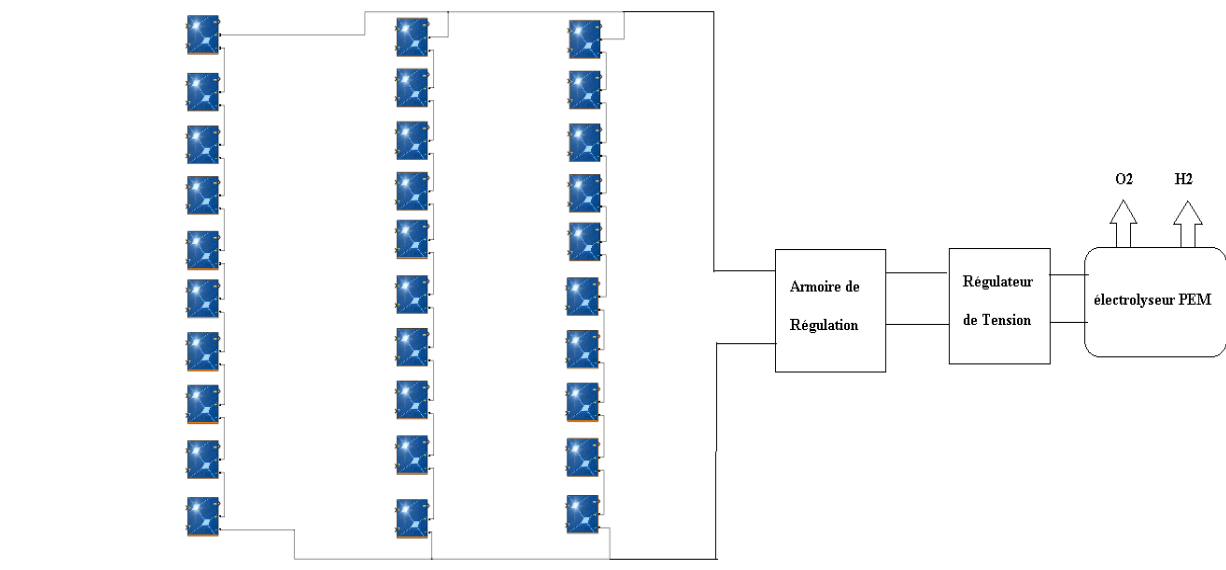


Figure 3.18 Schéma de système de production d'hydrogène

3.5. la Quantité d'Hydrogène produise de le champ Photovoltaïque:

Le courant produit par le champ photovoltaïque est destiné a alimenter l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène après avoir utiliser la modélisation de l'électrolyseur et simuler notre système de production d'hydrogène ;Nous avons obtenu les quantités d'hydrogène horaire

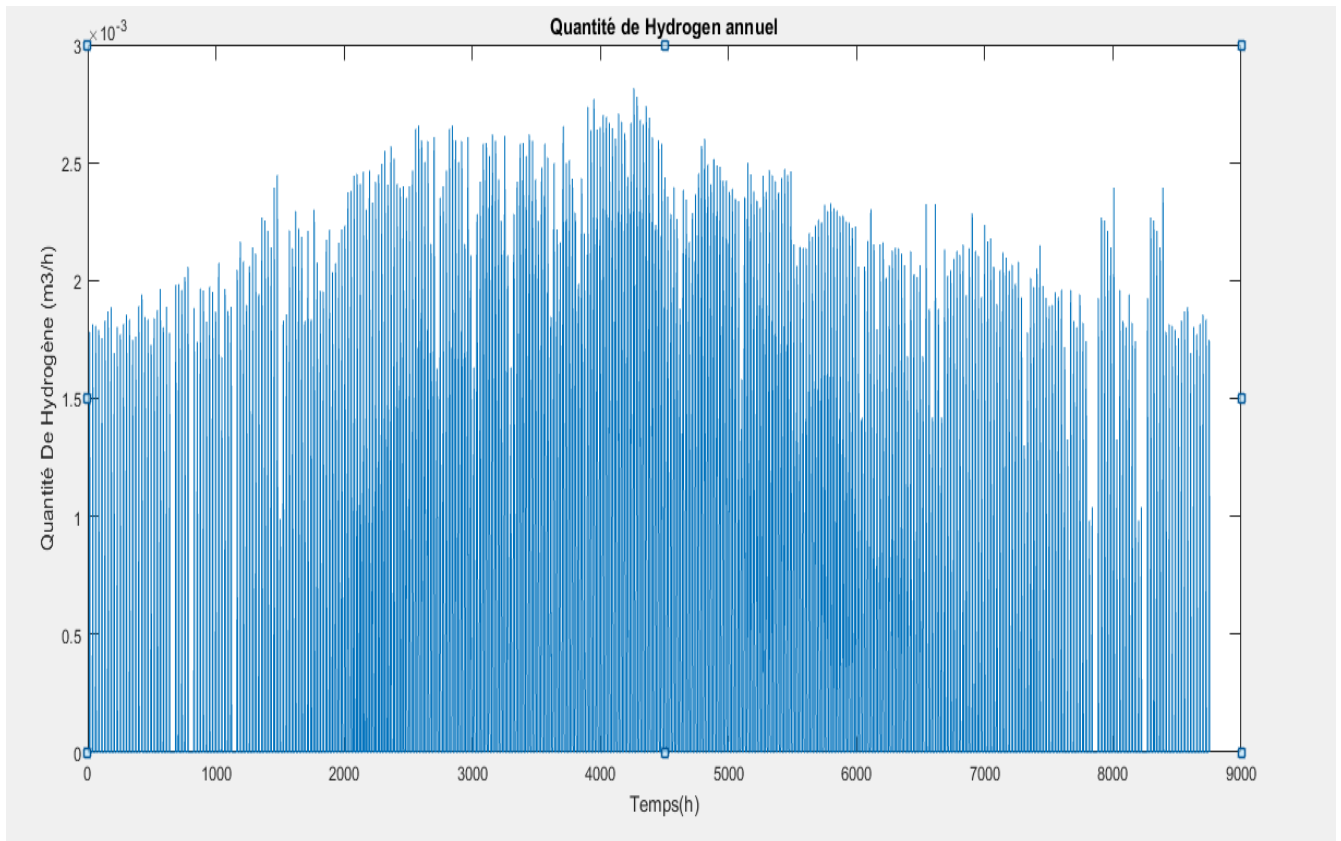


Figure 3.19 :Variation horaire de débit d'Hydrogène produit

On remarque que la quantité d'hydrogène produite dans une année varie en fonction de temps suite a la variation de puissance P de champ Photovoltaïque.

En effet, les quantités d'Hydrogène augmentent et diminuent pendant la journée; mais pendant la nuit la quantité est nulle si l'irradiation et/ou la température sont faibles d'où la puissance est égal à zéro donc quand on l'applique dans une équation la quantité est nul; la quantité maximale $NH_2=0.002815m^3/h$ au mois de juin a 13:00 (la puissance est maximale)

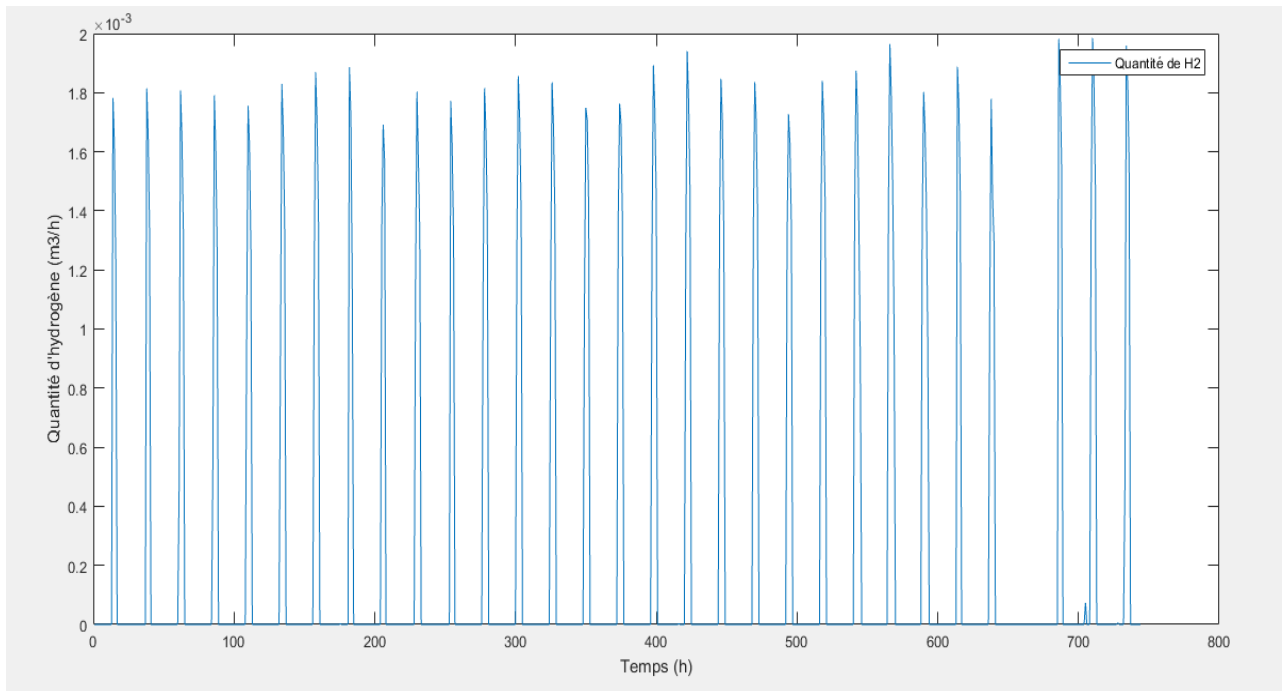


Figure 3.20 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Janvier

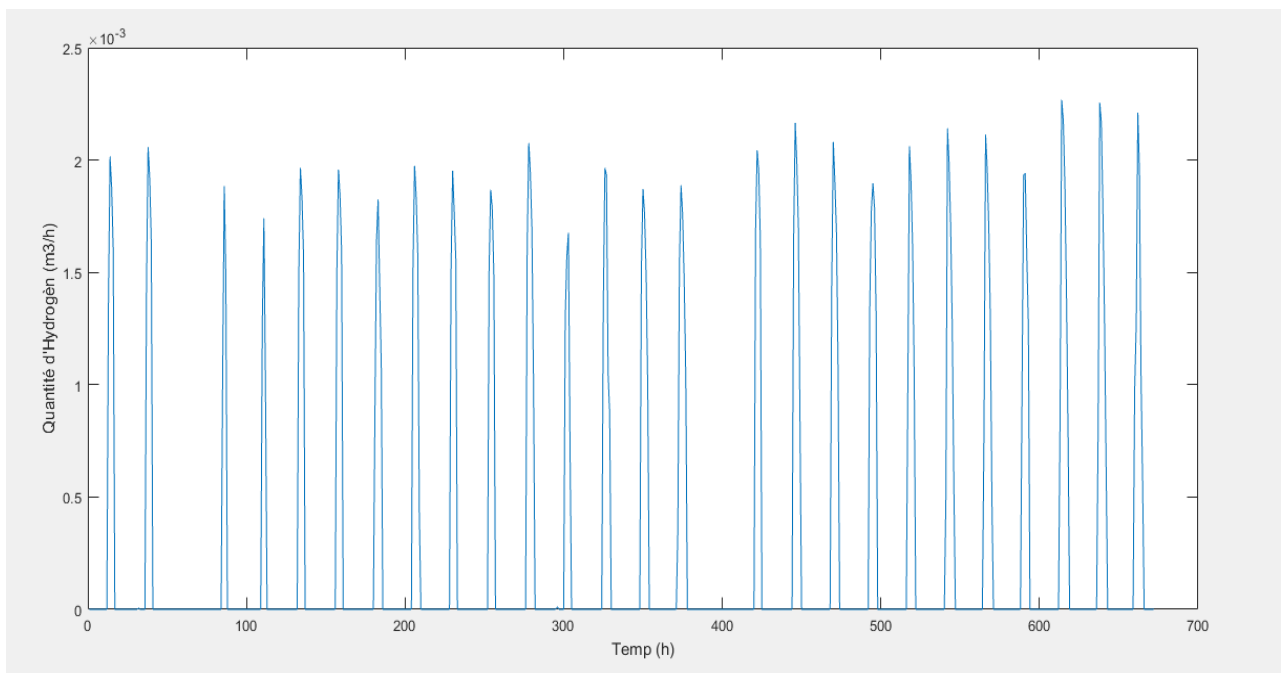


Figure 3.21 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Février

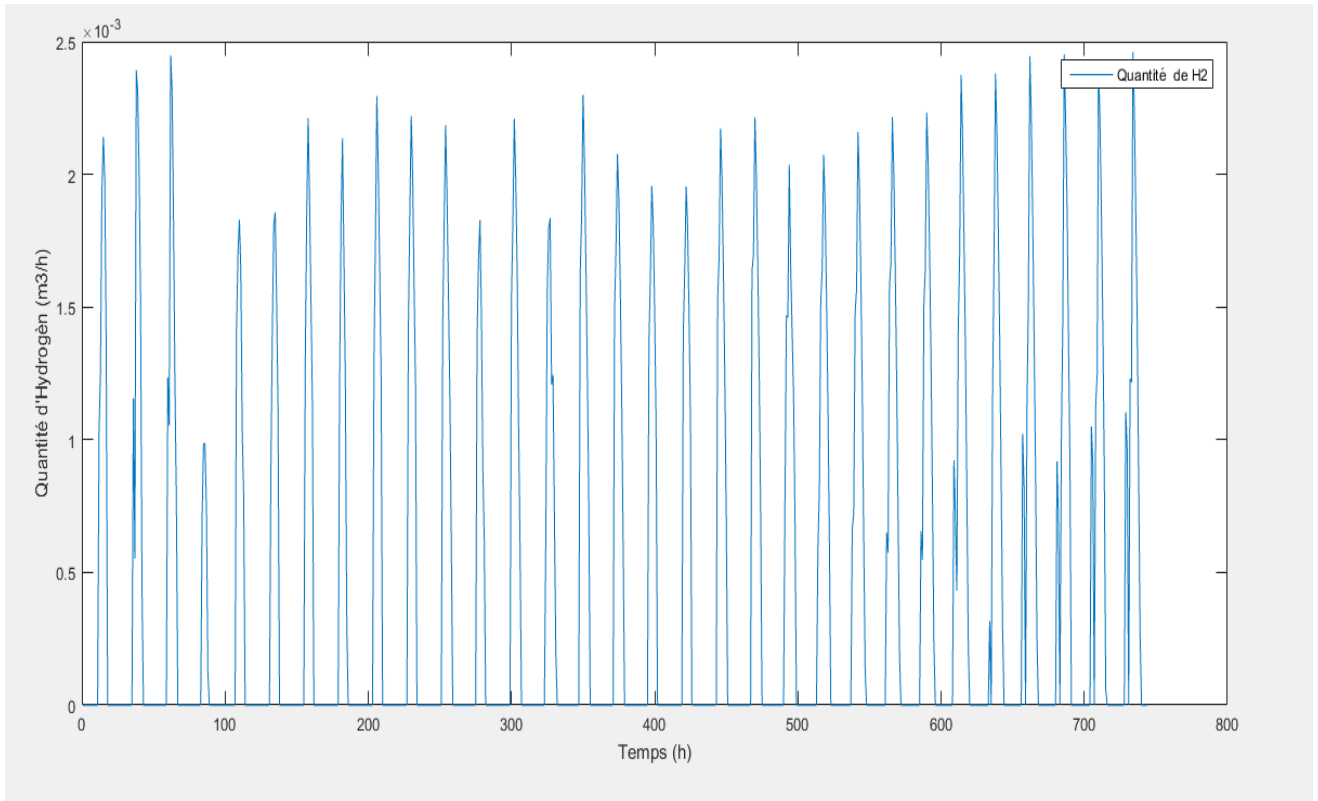


Figure 3.22 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Mars

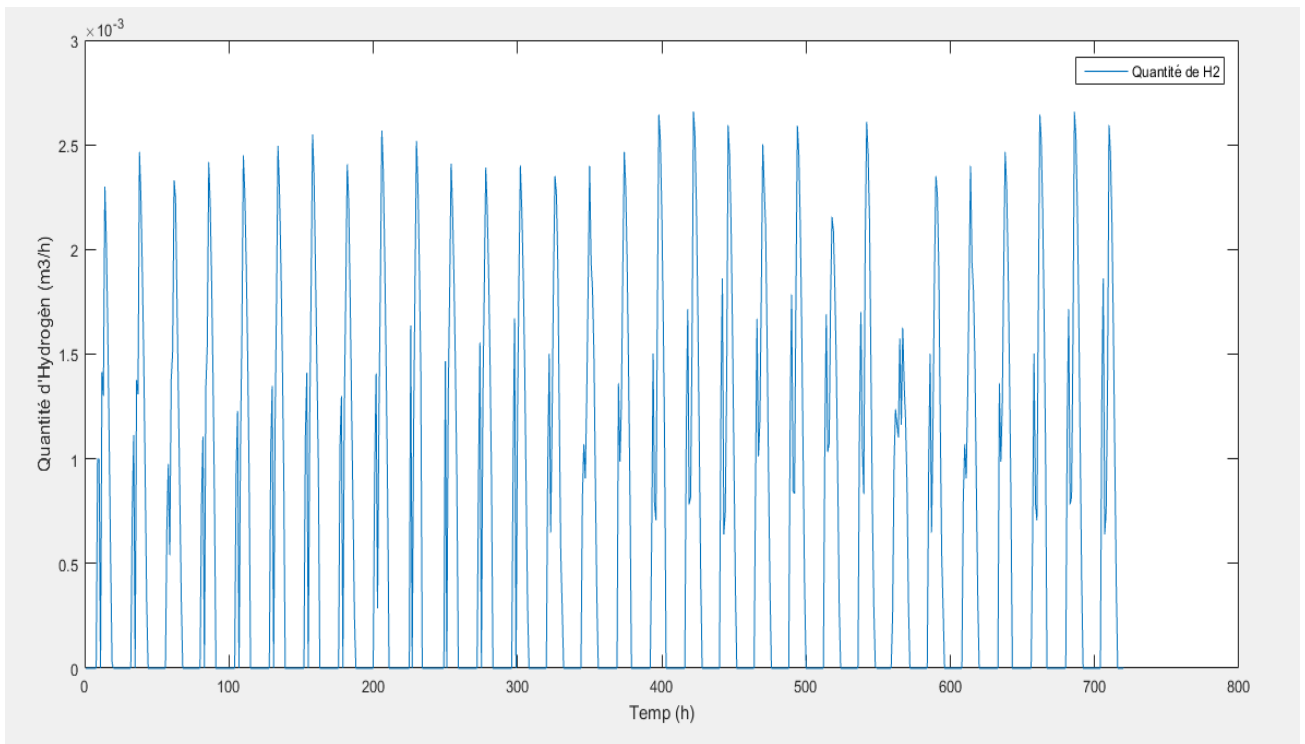


Figure 3.23 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Avril

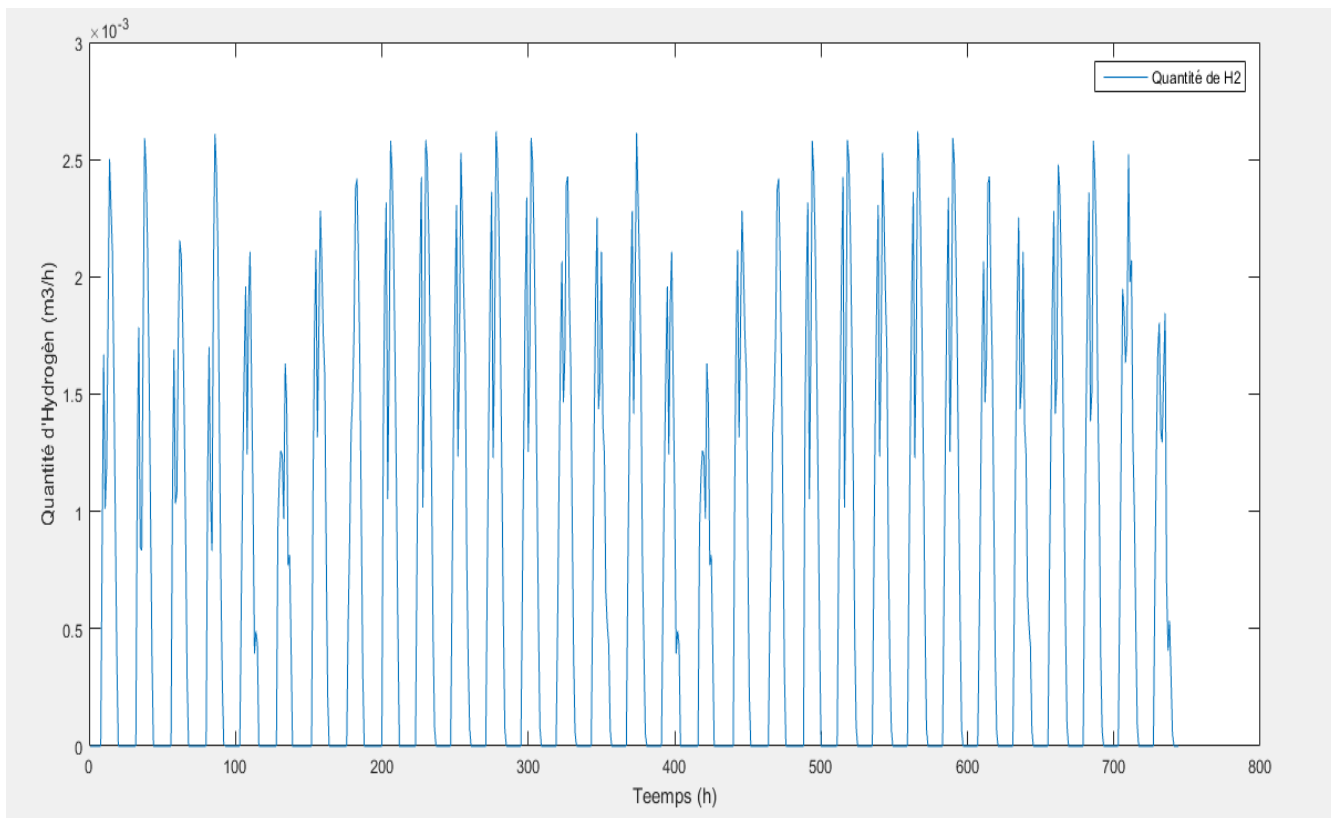


Figure 3.24 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Mai

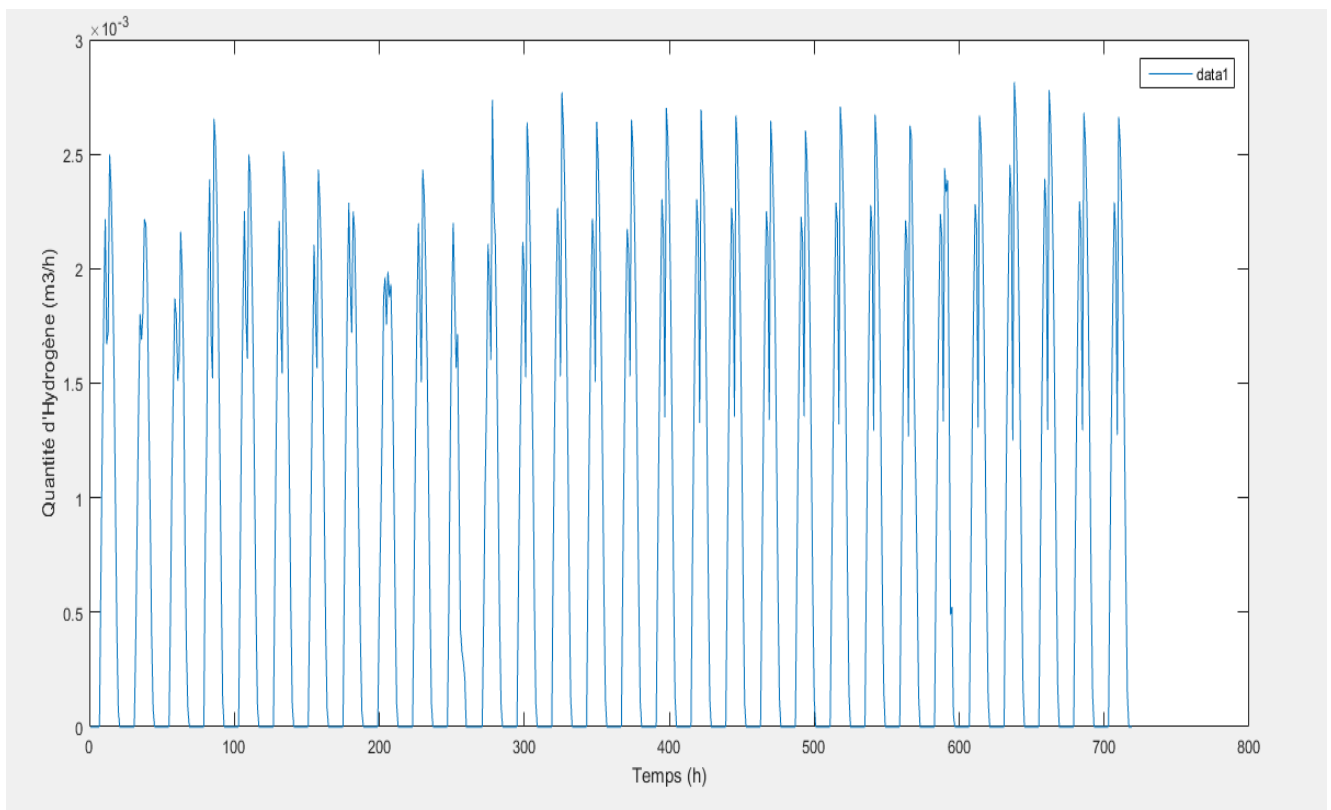


Figure 3.25 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Juin

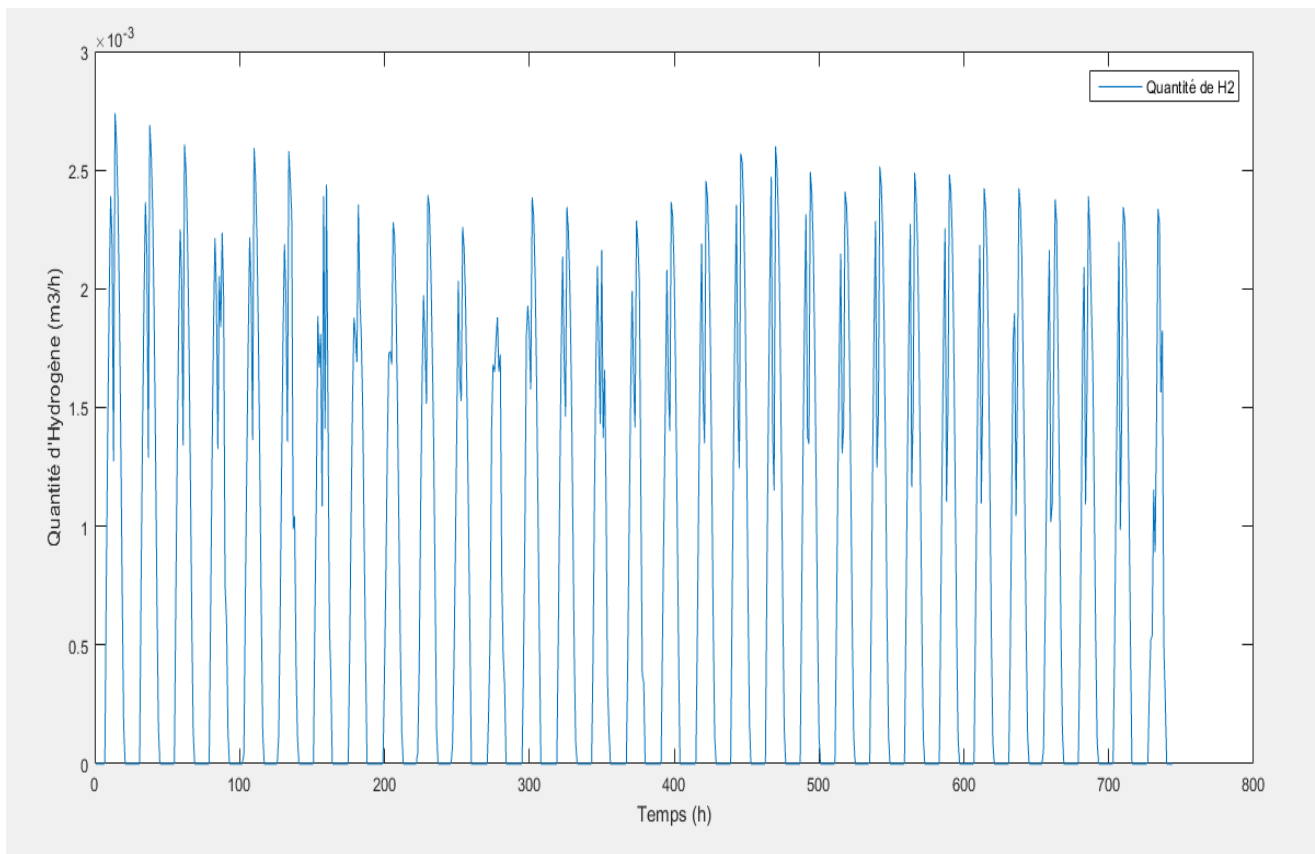


Figure 3.26 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Juillet

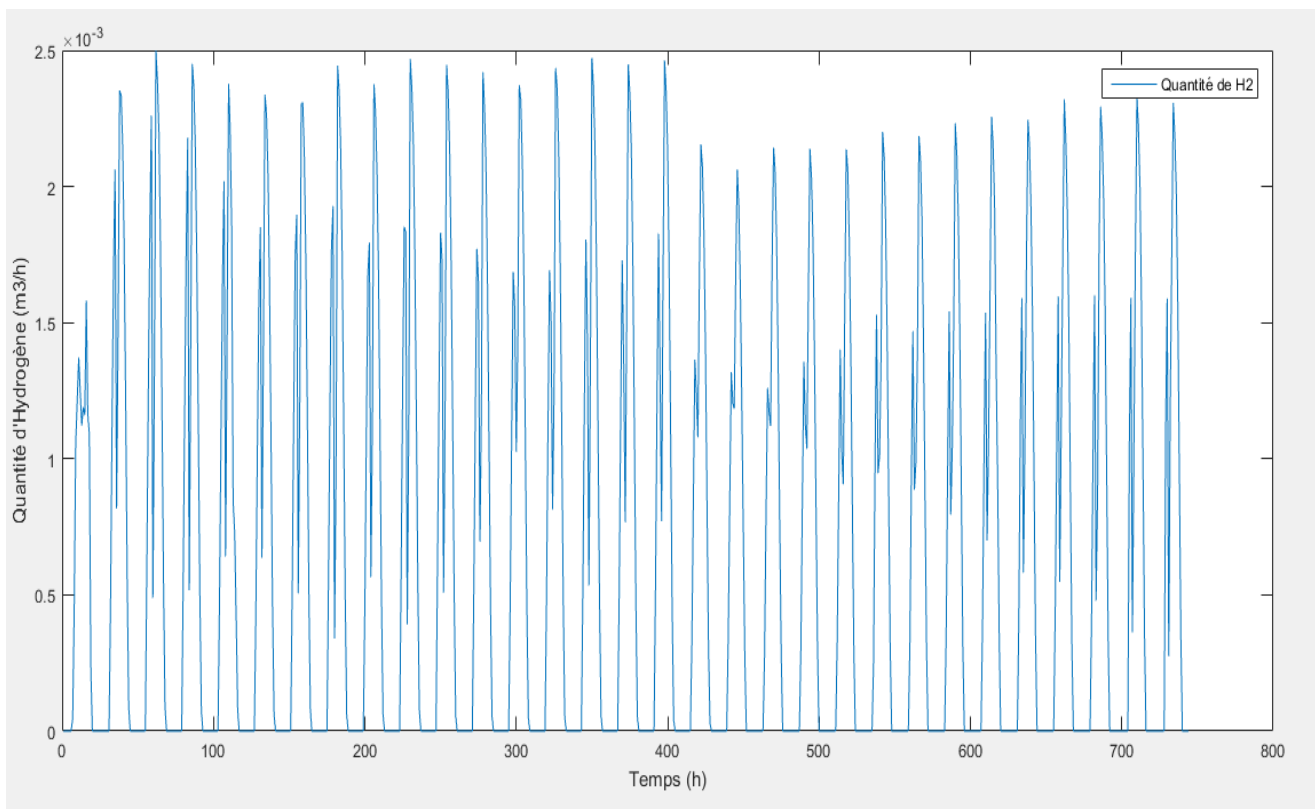


Figure 3.27 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Aout

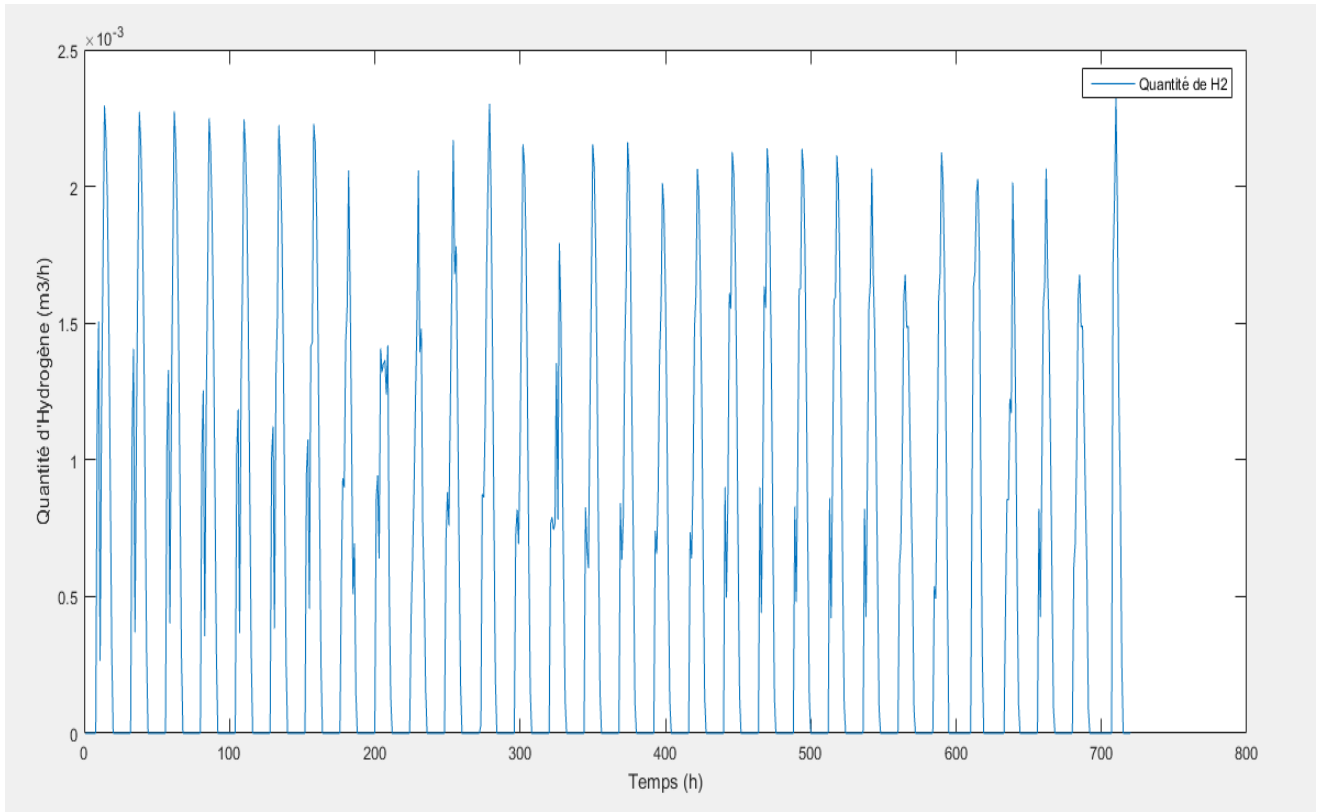


Figure 3.28 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Septembre

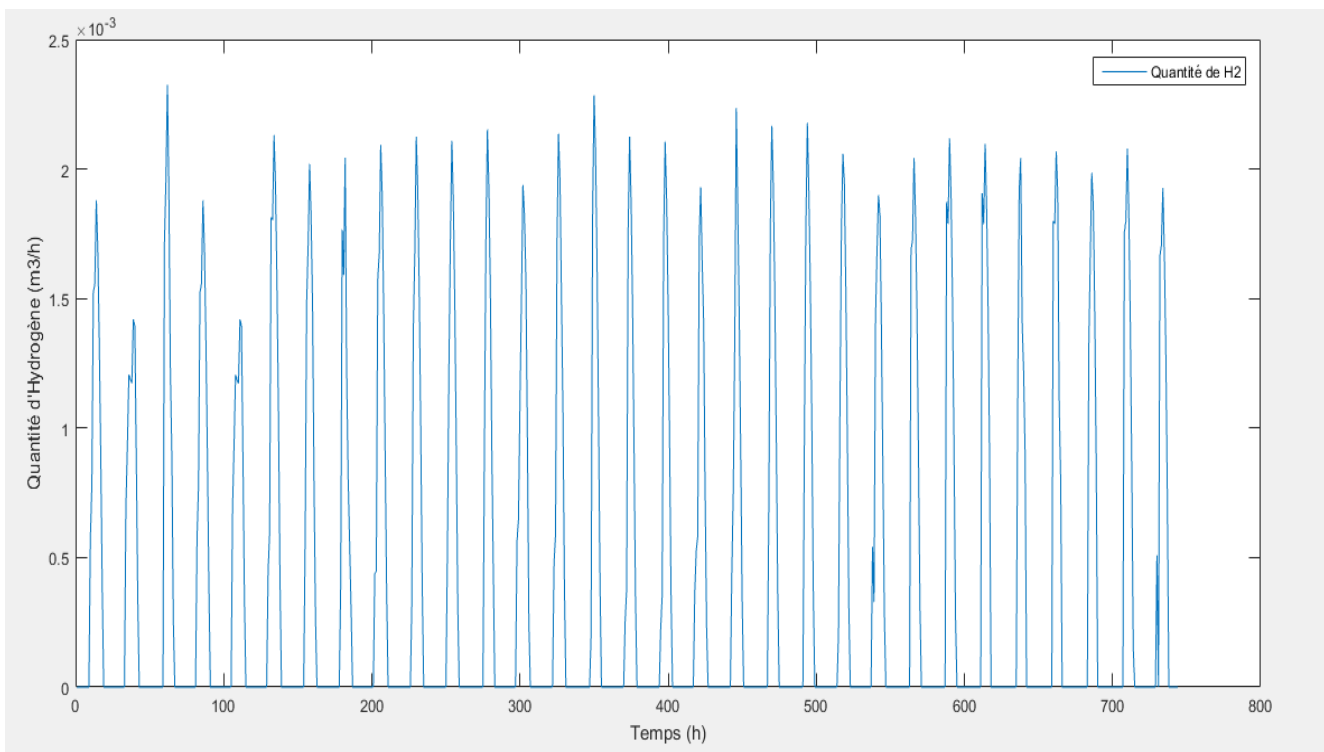


Figure 3.29 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Octobre

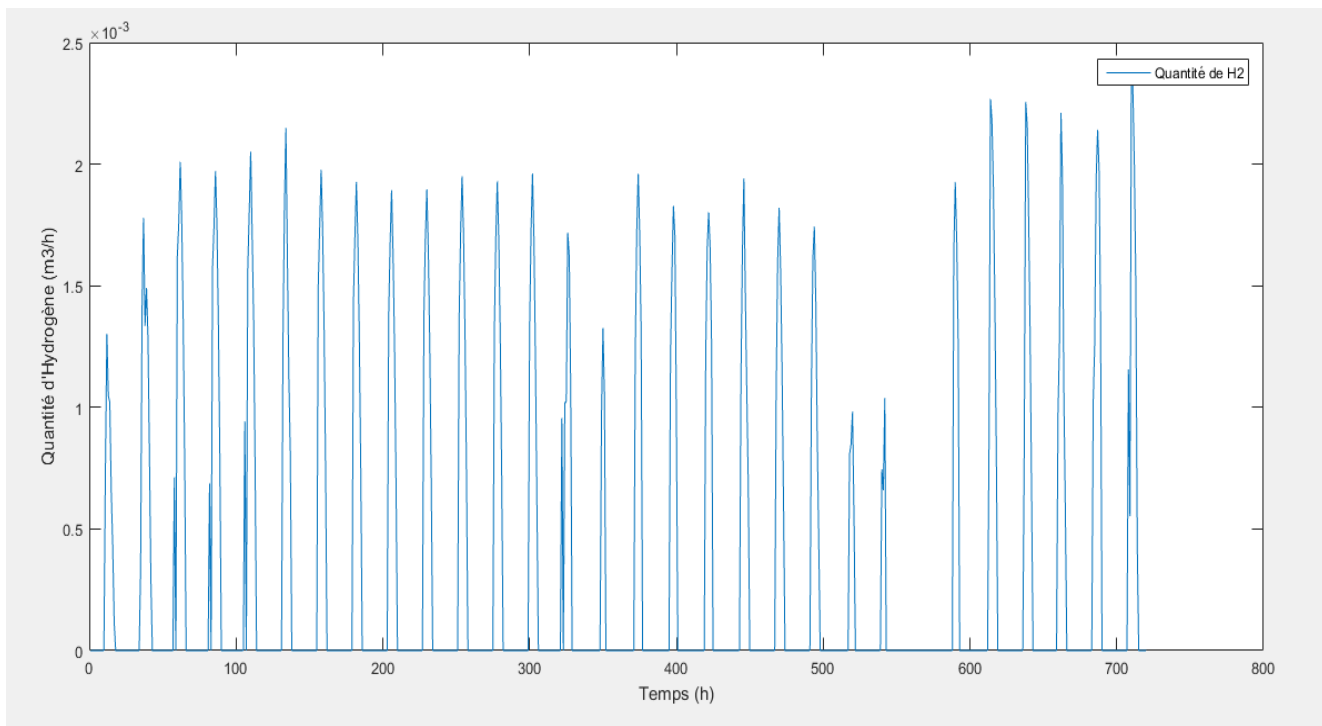


Figure 3.30 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Novembre

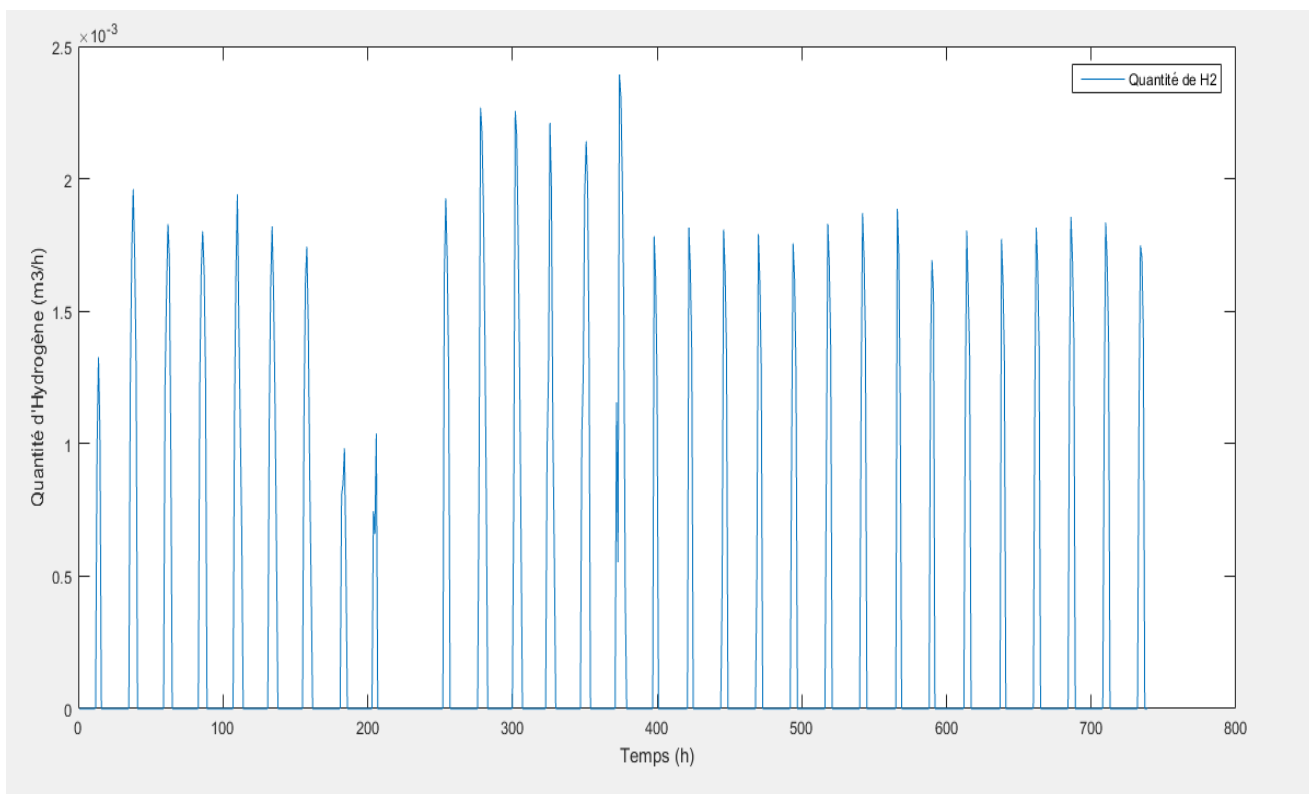


Figure 3.31 : La production horaire d'hydrogène pour le mois de Décembre

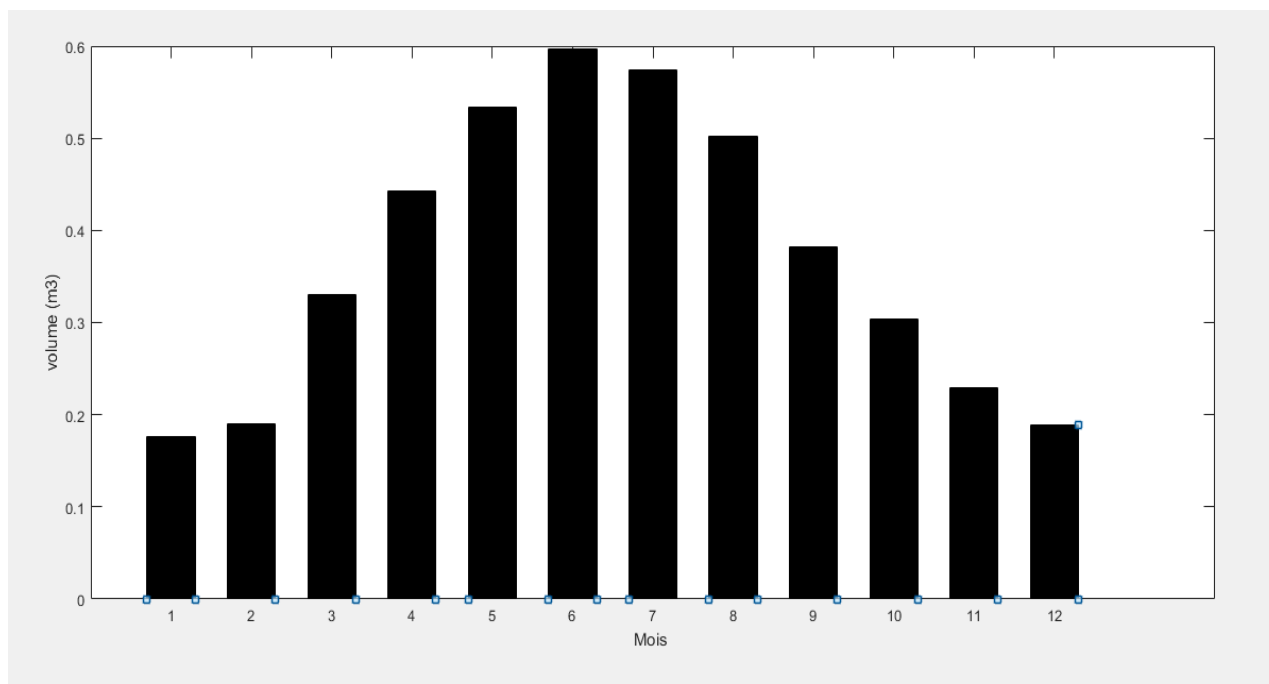


Figure 3.32 Volume d'Hydrogène produit mensuellement

Ces courbes mensuelles de la quantité d'Hydrogène produite en 2005 à Timimoune montrent que ces quantités varient chaque mois, et ce sont les valeurs optimales pour chaque période de temps: janvier(NH2=1.98 10⁻³m³/h) ; Février (NH2=2.26 10⁻³m³/h); Mars (NH2=2.46 10⁻³m³/h); Avril (NH2=2.65 10⁻³m³/h) Mai (NH2=2.62 10⁻³m³/h); Juin (NH2=2.815 10⁻³m³/h) ; Juillet (NH2=2.739 10⁻³m³/h) Aout (NH2=2.5.10⁻³m³/h); Septembre (NH2=2.3 10⁻³m³/h) ; Octobre (NH2=2.32 10⁻³m³/h) Novembre(NH2=2.39 10⁻³m³/h); Décembre (NH2=2.39 10⁻³m³/h) .

Mois	Volume d'hydrogène(m
Janvier	0,17628222
Février	0,19044463
Mars	0,33029017
Avril	0,44258276
Mai	0,53348253
Juin	0,59665414
Juillet	0,57410905
Aout	0,50164552
Septembre	0,38199678
Octobre	0,30399156
Novembre	0,22881926
Décembre	0,18928316

Tableau 3.5 Volume d'hydrogène produit mensuellement

Pour résumer on dit que les fluctuations dans ces courbes dévoilent que la quantité d'hydrogène augmente de Janvier à Juillet après ça on remarque une diminution allant de Aout jusqu'à octobre, pour le grand volume d'hydrogène est produit mois de juin parce que la puissance est maximale les quantités les plus grandes ont été marquées pendant l'été ou contrairement à l'hiver car l'irradiation et la température sont élevés

3.6.Conclusion:

Nous pouvons conclure après cette simulation (mesure des quantités d'hydrogène produites) c'est que pour qu'on puisse augmenter le volume d'hydrogène ou le débit on augmente la puissance électrique de champ P-V, avec plus des panneau ou choisi une site l'irradiation plus grand

Conclusion générale :

Ce mémoire présente un projet sur la production d'hydrogène avec une liaison d'un champ photovoltaïque et un électrolyseur polymère à membrane

Pour produire de l'hydrogène il a plusieurs méthodes a partir hydrocarbures de charbon de l'eau et dans ce mémoire on a utilisé par électrolyse de l'eau à partir de l'énergie solaire et la moins polluante par rapport au autre énergies

La production d'hydrogène dans notre cas demande de l'énergie électrique alors on a utilisé les panneaux photovoltaïques avec des données climatiques de la région de Timimoune

On a modélisé et simulée un champs photovoltaïque et électrolyseur avec différents températures et irradiations

Les résultats obtenus montrent que la variation de température et l'irradiation influe sur la puissance d'un champ photovoltaïque comme il influe sur la production d'hydrogène tout dépend la saison, et dans la saison d'été on obtient maximum de quantité d'hydrogène

Et montre aussi que la production d'hydrogène est importante avec un potentiel énorme

Le but de ce projet est de faire ressortir les bénéfices de l'exploitation de l'énergie solaire et d'hydrogène

L'hydrogène solaire représente la méthode donnant le meilleur rendement et un bon volume

Avec du meilleur qualités par rapport au autre

Ces résultats montre clairement que la production d'hydrogène dans notre régions est importante et l'investissement dans ce domaine permet un développement locale avec création d'emploi et d'infrastructure

Références:

- [1] M. OUALID, Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables université abou bekrbelkaid de Tlemcen faculté des sciences département de physique unité de recherche matériaux et énergies renouvelables
- [2] O. C. Onar, M. Uzunoglu, and M. S. Alam, "Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system," *Journal of Power Sources*, vol. 185, pp.1273-1283, 2008.
- [3] A. H. Abdol Rahim, A. S. Tijani, W. A. N. W. Mohamed, S. Hanapi, and K. I. Sainan, "An Overview of Hydrogen Production from Renewable Energy Source for Remote Area Application," presented at the 3rd International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials, Melaka International Trade Center (MITC), Malaysia, 2013.
- [4] S. Siracusano, V. Baglio, N. Briguglio, G. Brunaccini, A. Di Blasi, A. Stassi, R. Ornelas, E. Trifoni, V. Antonucci, and A. S. Aricò, "An electrochemical study of a PEM stack for water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 1939-1946, 2012.
- [5] Production et consommation d'hydrogène aujourd'hui mémento de l'hydrogène fiche 1.3
- [6] ONS, "Rapport synthétique 1960-1990", 1990
- [7] A. Mefti et M. Bouroubi, "Estimation et cartographie du Rayonnement solaire", Rapport technique (1992) CDER, Bouzareah, Alger
- [8] L. Hamane and A. Khellaf, "Wind energy resource in Algeria", *Proceedings of the World Energy Congress VI*, 1-7 juillet 2000 (United Kingdom) p.2352
- [9] L. Hamane et A. Khellaf "Cartographie des ressources éoliennes de l'Algérie", *Bulletin des Sciences Géographiques* 11(2003)23
- [10] EDIL, "Carte nationale d'identité (eau) de l'Algérie", 1993
- [11] Direction générale de l'environnement, "Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques", 2001
- [12] R. Momirlanet T. Veziroglu, "Recent directions of world hydrogen production", *Ren. Sust. Energy Rev.* 3 (1999) 219
- [13] M. A. Pena, J. P. Gomez et J. L. G. Fiero, "New Catalytic routes for syngas and hydrogen production", *Applied Catalysis A : General* 144(1996)7
- [14] M. A. Elhadidy, "Performance evaluation of hybrid (wind/solar/diesel) power systems", *Renewable Energy* 26(2002)401-413.
- [15] J. H. R. Enslin and D. B. Snyman, "Combined low-cost, high efficiency inverter, peak power tracker and regulator for PV applications", *IEEE Trans. Power Electron* 6, 2(1991)73-82
- [16] ETSU Report number ETSU/FCR/005, "Solid polymer fuel cell systems applications study to identify and priorities", R&D issues, Issue (1993) ETSU/DTI. U.K.
- [17] W. Zittel et R. Wurster, "Hydrogen in the Energy Sector", Ludwig-Bölkow Systemtechnik GmbH (1996)
- [18] Etude ab-initio des propriétés structurales et électroniques des hydrures métalliques TiFe-H : Restitution totale et partielle de l'hydrogène Université Kasdi Merbah Ouargla

- [19] J. Pelmont, bactéries et environnement , OPU Alger 1995.
- [20] 2IWH 2007, 27-29 Octobre 2007, Ghardaïa – Alegria Production de l'hydrogène en utilisant la technique des lits fluidisés amel OUNNAR, Fayrouz KAIDI, Lamia BENHABYLES, Rachida RIHANI Division Bioénergie & Environnement, Centre de Développement des Energies Renouvelables. CDER /Route de L'observatoire, P.O.Box 62–16340, Bouzaréah, Alger – Algérie.
- [21] R. B. Gupta, Hydrogen fuel Production, Transport, and Storage, CRC Press, USA 2009.
- [22] R. C. Dorf, B. G. Miller, Coal Energy Systems, Elsevier USA 2005.
- [23] J. LABBE l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité thèse de doctorat l'école des mines paris 2006
- [24] Etude ab-initio des propriétés structurales et électroniques des hydrures métalliques TiFe-H : Restitution totale et partielle de l'hydrogène Université Kasdi Merbah Ouargla
- [25] générateur de photovoltaïque diplôme master académique spécialité génie chimique dimensionnement d'une installation de production hydrogène photovoltaïque dans la région de Ouargla UNIVERSITE OUARGLA 2013
- [26] caractéristique de cellule R.khezzard et germination des paramètres de la caractéristique (I-V) d'un module photovoltaïque laboratoire électrochimique université Constantine
- [27] Batterie convertisseur système de régulation mémoire master génie mécanique étude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque 2016
- [28] conception d'un électrolyseur J. ANDRY. Électrolyseur PEM en exploitation la fabrication additive ses composants .université of applied science and arts western switzerland 2018
- [29] électrolyseurs a membrane polymères B.verdin. Étude d'électrodes grande surface d'électrolyseurs PEM : inhomogénéité de fonctionnement et intégration de catalyseurs innovants. Thèse De doctorat : chimie 2018 PARIS
- [30] électrolyseurs alcalins S. brusquet . Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque ,un électrolyseur et une pile a combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation . Thèse de doctorat :énergétique PARIS 2005
- [31] électrolyseurs haute températures M.oualid . Production de l'hydrogène a partir des énergie renouvelables. Memoir magister. university aboubekr belkaid Tlemcen 2009

[32] Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009

[33] Y. F. Liu, Q. Su, H. Zhang, and C. P. Cai, "Optimization of Photovoltaic-Electrolyzer System by Direct Coupling," Applied Mechanics and Materials, vol. 44-47, pp. 1578-1582, 2010.

[34] K. Mazloomi, N. Sulaiman, and H. Moayedi, "Electrical Efficiency of Electrolytic Hydrogen Production," Int. J. Electrochem. Sci, vol. 7, pp. 3314-3326, 2012.

[35] F. Marangio, M. Santarelli, and M. Cali, "Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyses for hydrogen production," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, pp.1143-1158, 2009

[36] P. Choi, "A simple model for solid polymer electrolyte(SPE) water electrolysis," Solid State Ionics, vol. 175, pp.535-539, 2004.

[37] R. García- Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina, "Simple PEM water electrolyser model and experimental validation," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37, pp. 1927-1938, 2012.

[38] L. Brahim, M. Bouziane, and S. Lazhar, "Theoretical Investigation on Solid Polymer Electrolyte Water," presented at the World International Hydrogen 2, Ghardaïa, Algérie, 2007.

[39] cartographie solaire sur la majeure partie du territoire national *K. Abdeladim , A. Hadj Arab CDER, Route de l'observatoire, BP. 62, 16340, Bouzaréah, Alger, Algérie