

Université Kasdi Merbah-Ouargla
Faculté des Hydrocarbures et des Energies Renouvelables et des Sciences de la
Terre et de l'univers
Département des énergies renouvelables



Mémoire

Présenté pour l'obtention d'un diplôme de
Master

Filière : génies mécaniques

Spécialité : énergies renouvelables en mécanique

Présenté par : BOUAZIZ Nasreddine & ALLAM Abdelmoumen

Thème :

Dimensionnement d'un Système photovoltaïque
Orienté pour alimenter l'électrolyseur pour
produire de l'hydrogène vert

Soutenu publiquement le : 18/06/2023

Devant le jury :

Gharbi Brahim	MCB	Univ.K. M. Ouargla	président
Abada Zhour	MAB	Univ. K. M. Ouargla	Examineur
Berrebeuh Mohamed Hafed	MCB	Univ.K. M. Ouargla	Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

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

Nous exprimons nos remerciements, notre appréciation et notre gratitude au notre encadreur, le'' Dr Berrebeuh Mohamed Hafed'' pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportés durant l'étude et la réalisation de ce document. Nos remerciements les plus vifs s'adressent aux messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

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

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



DÉDICACE



A mes chers parents

Quoi que je dise ou que je fasse, je n'arrivai jamais à vous remercier comme il se doit. C'est grâce à vos encouragements, vos bienveillances et votre présence à mes côtés, que j'ai réussi ce respectueux parcours. Je souhaite que vous soyez fière de moi, et que j'ai pu répondre aux espoirs que vous avez fondé en moi.

A mes chers frères

Merci pour vos soutiens moraux, vos confiances et vos conseils précieux, qui m'ont aidé dans les moments difficiles.

Je vous souhaite le bonheur et la réussite dans vos vies.

A toute ma famille et mes amis

À travers ses lignes je ne peux pas vous décrire tous mes sentiments d'amour, le seul mot que je peux dire est merci, vraiment merci beaucoup à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce mémoire.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES.....	I
LISTE DES TABLEAUX.....	II
Nomenclature.....	III
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'hydrogène vert, son principe de fonctionnement et technologie de production	
I.1. Introduction.....	3
I. 2. Définition de l'Hydrogène vert	3
I.3. Historique des définitions de l'hydrogène vert	3
I.4. Les différentes type de l'hydrogène	4
I.5. Caractérisations del'hydrogène	4
I.5.1. Propriétés physique	4
I.5.2. Propriétés énergétiques.....	5
I.6. Production de l'hydrogène	7
I.7. Définition d'électrolyseur.....	8
I.7.1. Description du système.....	8
I.7.2. Principe de fonctionnement.....	9
I.7.3. Rendement et consommation du système.....	10
I.8. Les différentes types d'électrolyseurs.....	10
I.8.1. L'électrolyseur alcalin	10
I.8.2. L'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane).....	11
I.8.3. L'électrolyseur à haute température par SOEC (Solid Oxid Electrolyser Cell).....	12
I.9. Stockage de l'hydrogène	13
I.9.1. Stockage conventionnel.....	13
I.9.2. stockage par adsorption	14
I.9.3. stockage par hydrure.....	14
I.10. L'utilisation de l'hydrogène.....	15
I.11. Conclusion.....	16
Chapitre II : Gisement solaire et système photovoltaïque	
II.1. Introduction	18

II.2. Les énergies renouvelables.....	18
II.2.1. L'énergie solaire	18
II.2.2. L'énergie hydraulique	19
II.2.3. L'énergie éolienne	19
II.2.4. L'énergie géothermique	19
II.2.5. La biomasse (masse des végétaux)	20
II.3. L'énergie renouvelable en Algérie	20
II.4. La conversion photovoltaïque	21
II.4.1. L'énergie solaire	21
II.4.2. Rayonnement solaire	21
II.4.2.1. Rayonnement direct	21
II.4.2.2. Rayonnement diffus	22
II.4.2.3. Rayonnement réfléchis.....	22
II.4.2.4. Le rayonnement global	22
II.5. Principe de la conversion photovoltaïque (PV)	22
II.5.1. Cellules solaires photovoltaïques	23
II.5.2. La cellule PV	23
II.5.3. Technologie de cellules photovoltaïques	23
II.5.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	25
II.6. Systèmes Photovoltaïques	25
II.6.1. Système autonome	25
II.6.2. Système PV raccordé au réseau	26
II.6.3. Système PV hybride	27
II.7. Le générateur photovoltaïque.....	27
II.7.1. Module photovoltaïque.....	27
II.7.1.1. Montage en série	28
II.7.1.2. Montage en parallèle.....	28
II.8. Les convertisseurs statiques	29
II.8.1. Les convertisseur DC/DC (hacheur)	29
II.8.2. Les convertisseur DC/AC (onduleur).....	29
II.9. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	30
II.9.1. Avantages	30
II.9.2. Inconvénients.....	30
II.10. Conclusion.....	31

Chapitre III : Dimensionnement et simulation de système étude

III.1	Introduction	32
III.2	Dimensionnement desystème photovoltaïque	32
III.2.1	Choix de l'électrolyseur et détermination d'Energie crête nécessaire E_c	32
	Calcul de l'Energie électrique crête E_c	33
	Calcul de la puissance maximale (puissance crête)	33
III.2.2	Choisissez le type de modules PV	33
	Calculer le nombre total d'unités PV	34
III.2.3	Choisir un convertisseur :	34
III.2.4	Installation de modules photovoltaïques	34
	Calcul de nombre des séries	35
	Calcul du nombre batteries	35
III.2.5	Calcul de capacité de stockage de la batterie :	35
	Calcul du nombre batteries	35
III.3	Simulation de système	36
III.3.1	Simulation de système de calcul	36
III.4	Effets économiques et environnementaux de système étudié, moyennant de logiciel Homer	37
III.4.1	Vue d'ensemble sur le Logiciel Homer	37
III.4.2	Données nécessaires pour les calculs	37
III.4.3	Système PV connecté aux batteries	38
III.4.4	Résultats obtenus par HOMER	39
III.4.5	Conclusion des impacts environnementaux	40
III.5	Validation numérique des propriétés électriques et productives de l'électrolyseur (Simulation de système)	41
III.6	Conclusion	46
	Conclusion générale	47
	Références bibliographique	49
	Résumé	52

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Densité de masse d'énergie de quelques carburants.....	5
Figure I.2 : Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, et distribution	7
Figure I.3 : Schéma de fonctionnement d'une cellule.....	8
Figure I.4 : L'électrolyseur PEM.....	11
Figure I.5 : L'électrolyseur à haute température	12
Figure II.1 : Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables.....	21
Figure II.2 : Composantes du rayonnement solaire.....	22
Figure II.3 : Principe de la conversion PV	23
Figure II.4 : Différents technique de cellules photovoltaïque	24
Figure II.5 : Types de cellules photovoltaïques	24
Figure II.6 : Système PV autonome	26
Figure II.7 : Système PV raccordé au réseau	26
Figure II.8 : Module photovoltaïque	27
Figure II.9 : Caractéristiques de groupement série des cellules	28
Figure II.10 : caractéristiques de groupement parallèle des cellules.....	28
Figure II.11 : Schéma de principe d'un hacheur	29
Figure II.12 : Schéma de principe d'un onduleur	29
Figure III.1 : Maquette d'un système de production d'hydrogène PV connecté à des batteries.	38
Figure III.2 : Production électrique moyenne mensuelle (par HOMER).....	39
Figure III.3 : Résumé des coûts nets (par HOMER).....	39
Figure III.4 : Production mensuelle d'hydrogène (par HOMER).....	40
Figure III.5 : Schéma de système PV sous simulink.....	44
Figure III.6 : Les courbes de l'hydrogène produit et l'évaluation de consommation de batterie pour un jour.....	44
Figure III.7 : Les courbes de l'hydrogène produit et l'évaluation de consommation de batterie pour une semaine.	45

LISTE DES TABLEAUX

Table I.1 : Les propriétés physiques de l'Hydrogène	5
Table I.2 : Polluants émis par les différents carburants	6
Table III.1 : Les caractéristiques de l'électrolyseur utilisé	32
Table III.2 :Caractéristiques techniques du type de module PV sélectionné	33
Table III.3 : Les caractéristiques de l'électrolyseur choisis	34
Table III.4 : Températures moyennes au cours des mois de l'année 2022	37
Table III.5 : Rayonnement solaire pour la région de Touggourt.....	38
Table III.6 : Emissions environnementales du système PV (par HOMER).....	40

Nomenclature

R_S	La résistance série.
R_{sh}	La résistance shunt.
I_{sat}	Le courant de saturation.
W	L'éclairement.
T	La température.
P_c	puissance crête. (kw)
E_c	consommation journalière d'énergie électrique. (kWh)
P_i	Capacité d'éclairage journalier en conditions standards. $cet = 1 \text{ kW/m}^2/\text{j}$
I_r	rayonnement quotidien moyen ($6.506 \text{ kW/m}^2/\text{j}$).
K	facteur de correction total .
N_m	Nombre de modules.
P_m	Puissance d'un module PV
N_s	nombre de module en séries
N_p	nombre de module en parallèle
C_t	capacité totale de stockage(Ah)
E_c	Consommation journalière d'énergie électrique (Wh/ jour)
N	Le nombre de jours de réserve.
U	Voltage de batterie(v)
D	Pourcentage de décharge de la batterie.
N_b	nombre batteries.
C_p	capacité de stockage de batterie(Ah)
H_h	Rayonnement d'inclinaison horizontale, $\text{W/m}^2.\text{s}$
H_{opt}	Rayonnement d'inclinaison optimal, $\text{W/m}^2.\text{s}$
H	Rayonnement à 90 degrés, $\text{W/m}^2.\text{s}$
SOEC	Solid Oxid Electrolysis Cell
PEM	Proton Exchange Membrane
PV	photovoltaïque
PAC	pile à combustible
GPV	générateur photovoltaïque .

Introduction générale

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières, la sciences est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans le domaine de recherche et développement.

Aujourd'hui, il existe de nombreuses sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et le photovoltaïque. Le principal avantage de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et ont une faible production de gaz tels que (dioxyde de carbone et oxydes d'azote) responsables du réchauffement climatique.

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

De l'avis de plusieurs scientifiques, l'hydrogène est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur. L'hydrogène représente la forme énergétique la moins nocive pour l'environnement. Muni d'un cycle énergétique fermé, il rentre dans divers applications, tels que la production d'électricité et le chauffage des habitats.

Cette étude a pour objet l'étude d'une installation de production d'hydrogène solaire en utilisant le logiciel de simulation MATLAB. Le système est constitué des panneaux photovoltaïques et d'un électrolyseur. Les panneaux photovoltaïques alimentent l'électrolyseur en énergie électrique. L'électrolyseur produit l'hydrogène et l'oxygène.

Dans cette étude, nous avons simulé un système photovoltaïque dans le but de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, et la production d'énergie électrique est assurée par des panneaux photovoltaïques, en utilisant les données climatiques de la région de Touggourt. La modélisation des éléments du système a été présentée et un organigramme pour simuler les performances du système a été mis en œuvre sous MATLAB, afin de mieux déterminer les conditions les plus favorables à la production d'hydrogène.

Introduction générale

Ce travail a été organisé et structuré en trois chapitres:

Dans le premier chapitre nous faisons une étude bibliographique sur l'hydrogène (production, stockage et fonctionnement) en général et des notions fondamentales sur l'hydrogène vert plus précisément.

Dans le deuxième chapitre nous exposons une étude générale sur le gisement solaire, les systèmes photovoltaïques et les applications de ces systèmes.

Le troisième chapitre se portera sur l'étude technico-économique pour l'électrolyse photovoltaïque par HOMER et la simulation du système de production à l'aide du logiciel MATLAB et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, nous concluons ce modeste travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

*Généralités sur l'hydrogène vert, son principe de fonctionnement et
technologie de production*

I.1 Introduction :

Aujourd'hui, l'énergie utilisée par nos sociétés est issue à 80 % des énergies fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon) et 20 % dans les énergies dites renouvelables (biomasse ,nucléaire, hydraulique, et dans une moindre mesure renouvelable de type solaire ou éolienne). A moins de modifier ses comportements de production et de consommation d'énergie, le développement et la pérennité des sociétés humaines à long.[1]

Dans ce chapitre, nous allons en apprendre davantage sur l'hydrogène vert et d'autres types, ainsi que sur les types d'électrolyseurs et la méthode de stockage de l'hydrogène.

I.2. Définition de l'Hydrogène vert :

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. La molécule de dihydrogène (H₂) est constituée de deux atomes d'hydrogène. On parle communément d'hydrogène pour désigner en effet le dihydrogène [5].

L'hydrogène est très abondant à la surface de la terre mais n'existe pas à l'état pur, il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau, les hydrocarbures [5].

Les organismes vivants (animal ou végétal) sont également composés d'hydrogène. La biomasse constitue donc une autre source potentielle d'hydrogène.

Extraire l'hydrogène de ces sources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie, comme pour l'électricité, on considère ainsi que l'hydrogène est un vecteur énergétique [5].

L'hydrogène pourrait être quasi inépuisable, à condition de savoir le produire en quantité suffisante et à un coût compétitif et idéalement à partir d'énergie (nucléaire et renouvelable) [5].

On appelle technologie de l'hydrogène l'ensemble des technologies étudiées pour produire l'hydrogène, le stocker et le convertir à des fins énergétiques [5].

I.3. Historique des définitions de l'hydrogène vert :

La première référence que nous avons trouvée au terme hydrogène vert ou renouvelable a été mentionnée par NREL (1995) [2], qui a utilisé le terme d'hydrogène renouvelable (hydrogène produit à renouvelables) comme synonyme de vert. L'État de Californie (2006) [3] a défini l'hydrogène vert comme étant produit proprement et durablement, en utilisant une source renouvelable telle que l'énergie solaire ou éolienne.

La première mention de l'hydrogène vert dans les documents politiques de l'UE est la déclaration d'établissement une économie verte de l'hydrogène en Europe [4].

L'hydrogène vert est de l'hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou l'hydroélectricité. L'hydrogène vert est souvent présenté comme une alternative aux hydrocarbures fossiles, et comme un levier pour faire baisser les émissions de gaz à effet de serre de certains secteurs (industrie, transports, etc.).

I.4. Les différents type de l'hydrogène :

- L'hydrogène vert

Est fabriqué par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable [5].

- L'hydrogène gris

Est fabriqué par procédés thermochimiques avec comme matières premières des sources fossiles (charbon ou gaz naturel) [5].

- L'hydrogène bleu

Est fabriqué de la même manière que l'hydrogène gris, à la différence que le CO₂ émis lors de la fabrication sera capté pour être réutilisé ou stocké [5].

- L'hydrogène jaune

Plus spécifique à la France, est fabriqué par électrolyse comme l'hydrogène vert mais l'électricité provient essentiellement de l'énergie nucléaire [5].

L'Ademe a récemment suggéré de changer la terminologie. L'hydrogène qui était jusqu'ici appelé « vert » est désormais appelé « renouvelable », l'hydrogène « gris » devient « fossile », et enfin, les hydrogènes « bleu » et « jaune » sont regroupés sous l'appellation « bas-carbone » [5].

I.5. Caractérisations de l'hydrogène :

I.5.1 Propriétés physique :

Hydrogène (du grec « que produit de l'eau »), élément de symbole H, incolore, inodore et insipide. Il représente 75% de la masse de l'univers. C'est l'élément le plus léger. Cependant, il se trouve pratiquement en combinaison avec d'autres éléments tels que l'oxygène, le carbone et l'azote [6].

Sur terre, on le trouve principalement dans l'eau et les hydrocarbures. Le **tableau I.1** présente ses propriétés physiques.

Table I.1 : Les propriétés physiques de l'Hydrogène[6]

Masse moléculaire	2.016
Electronégativité	2.1
Densité de masse (phase gazeuse)	0.0838 kg/m
Masse volumique (phase liquide)	70.8 kg/m
Température d'ébullition	20 K
Température de fusion	13.8 K
Chaleur latente de fusion	58.23 KJ/kg
Chaleur latente de vaporisation	449.59KJ/kg
Chaleur latente de sublimation	507.39KJ/kg
Capacité calorifique (phase gazeuse)	14.9KJ/kg K
Capacité calorifique (phase liquide)	9.69KJ/kg K
Valeur de chauffage supérieur	140MJ/kg
Valeur de chauffage inférieur	120MJ/kg

I.5.2. Propriétés énergétiques :

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène présente plusieurs avantages :

- Il a une très grande densité de masse d'énergie. Comme on peut le voir dans la figure I.1, l'énergie fournie par unité de masse d'hydrogène est deux fois plus celle fournie par l'énergie conventionnelle, elle est presque trois fois celle de l'essence et près de six fois celle du méthanol [5].

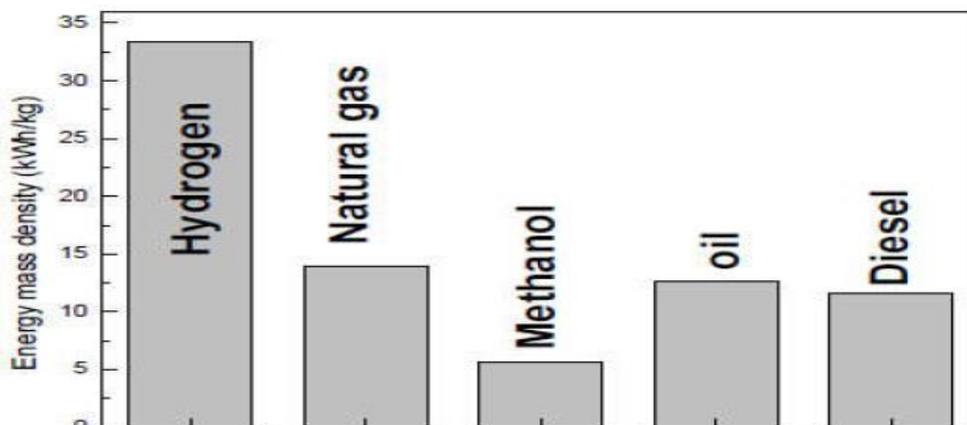


Figure I.1 : Densité de masse d'énergie de quelques carburants.[5]

- L'hydrogène est le vecteur d'énergie le plus polyvalent. En effet, les sources d'énergies conventionnelles ne peuvent pas être converties sous forme d'énergies utiles (mécanique, thermique ou électrique) suivant seulement un seul processus : la combustion. Par contre, l'hydrogène peut être converti en énergie utile selon cinq processus différents. En plus de la combustion, l'hydrogène peut :
 - Etre directement transformé en vapeur.
 - Etre converti directement en chaleur par combustion catalytique.
 - Etre converti directement en électricité par des procédés électrochimiques.
 - Agir comme une source de chaleur et /ou dissipateur de chaleur par réaction chimique [5].
- En tenant compte des impacts environnementaux, l'hydrogène solaire est un carburant propre comparé aux divers combustibles, comme le montre le **tableau I.2**. La seule particule émise est le NOx et cela lors de la combustion de l'hydrogène. Toute autre forme d'utilisation d'hydrogène (hydratation, génération de vapeur, combustion catalytique, etc.) ne produit ou produit très peu d'éléments nocifs pour l'environnement [5].
- Comme pour tout carburant, des précautions de sécurité élémentaires doivent être respectées pendant l'utilisation de l'hydrogène. Cependant, en comparaison avec les dangers liés à l'utilisation d'autres combustibles, en particulier la toxicité et les risques d'incendie, l'hydrogène est le carburant qui représente le moins de risque [5].

Table I.2 : Polluants émis par les différents carburants [5].

Polluant	Hydrocarbure	Charbon	Hydrogène
CO₂	72.40	100.00	0.0
CO	0.80	0.65	0.0
SO₂	0.38	0.50	0.0
NOx	0.34	0.32	0.10

I.6. Production de l'hydrogène :

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale [5].

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

- ❖ la matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois ;
- ❖ l'énergie nécessaire pour la production : cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale, etc.).
- ❖ Le procédé de production : plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie quantique telle que la photolyse, à l'énergie électrique telle que l'électrolyse ou à l'énergie thermique tel le procédé thermochimique [6].

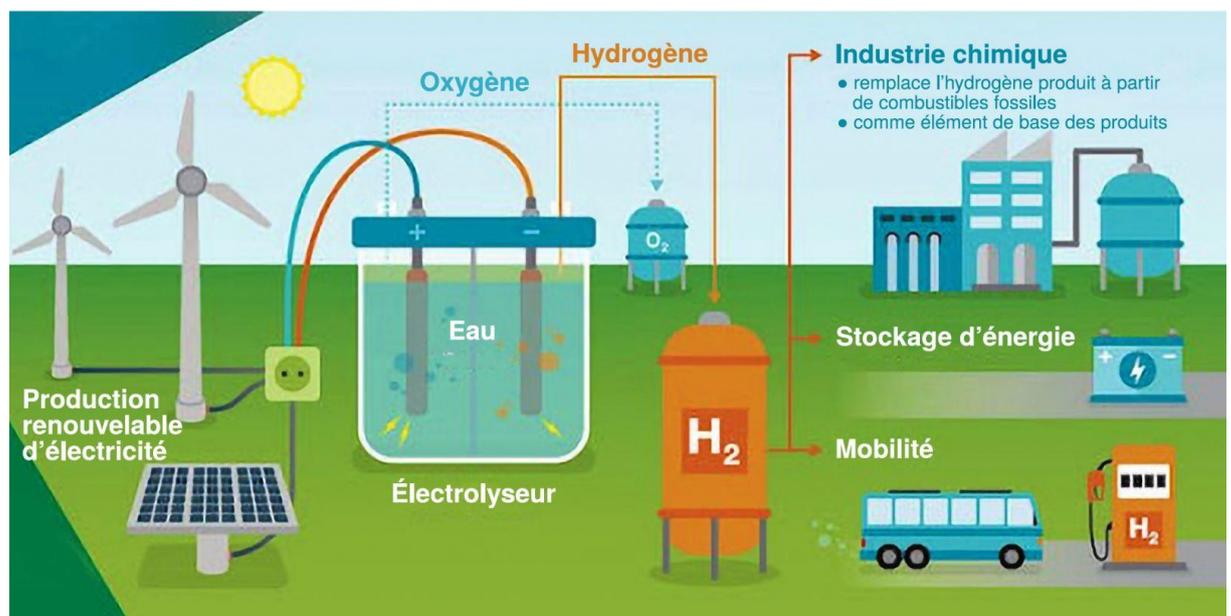


Figure I.2 : Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, et distribution[6]

L'électrolyse de l'eau est un processus qui utilise un courant électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Cela se fait dans une cellule électrolytique contenant une solution d'eau avec un électrolyte. Lorsque le courant passe à travers la cellule, des réactions chimiques se produisent aux électrodes. À l'anode, l'oxydation de l'eau produit

de l'oxygène, des ions hydrogène et des électrons. À la cathode, les ions hydrogène captent les électrons et forment de l'hydrogène. Ainsi, l'électrolyse de l'eau permet d'obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux, qui peuvent être utilisés à diverses fins. la réaction de décomposition s'écrit :

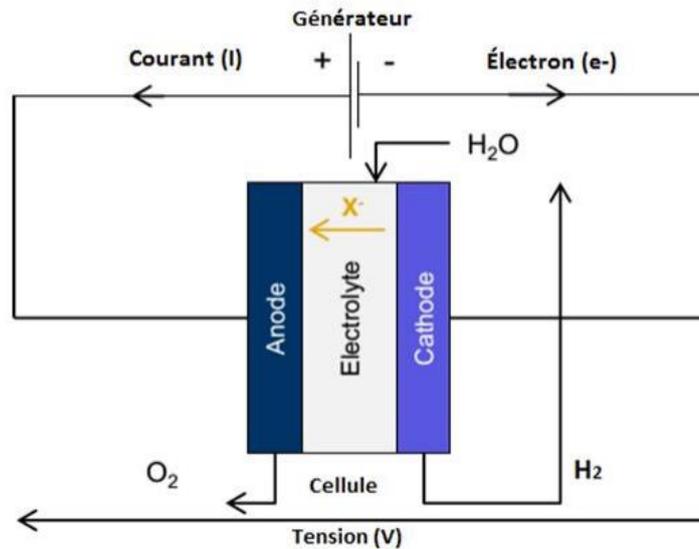
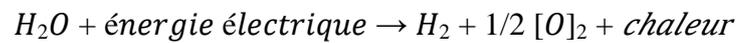


Figure I.3 : Schéma de fonctionnement d'une cellule.

I.7. Définition d'électrolyseur :

Ce mode de production consiste à décomposer les composants de la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène par le passage d'un courant électrique entre deux électrodes immergées dans un électrolyte aqueux. L'hydrogène produit par ce procédé de production est plus pur que celui du reformage à la vapeur.[7]

I.7.1 Description du système :

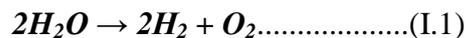
Les cellules sont disposées en série électrique au sein des technologies actuelles, grâce à des électrodes bipolaires (anode d'un côté et cathode de l'autre), permettant une meilleure compacité et une densité de courant plus élevée. Ce dernier point constitue un aspect important dans le fonctionnement nominal d'un électrolyseur. En effet, le taux de production d'hydrogène de la cellule augmente avec la tension aux bornes des cellules (d'une valeur minimale de 1,23V pour engager la réaction), tandis que l'efficacité des cellules diminue.

Le producteur doit donc proposer un compromis entre ces deux critères. Les cellules sont ensuite organisées en groupes appelés cheminées [16], puis couplées à différents

appareils permettant d'obtenir les conditions optimales en eau et électricité en entrée (redresseur, osmoseur inverse, réservoir) ainsi que de stocker l'hydrogène en sortie (compresseur, réservoir). De plus, le procédé d'électrolyse étant exothermique, un dispositif d'élimination de la chaleur produite est aussi installé. Cet ensemble forme l'électrolyseur.

I.7.2. Principe de fonctionnement :

L'électrolyse de l'eau est un processus par lequel la molécule d'eau sera dissociée pour produire les éléments, hydrogène et oxygène, gazeux à l'état ambiant. La réaction globale est :



Cette réaction n'est pas spontanée ; elle sera produite en appliquant une différence de potentiel (tension électrique) entre deux électrodes.

Le processus se produisant à l'électrode négative, la cathode, est la réduction. C'est le processus par lequel la molécule subit un gain en électron(s) et se divise en hydrogène (H_2), en produisant un anion hydroxyde (OH^-), selon la réaction suivante :

Réduction à la cathode :

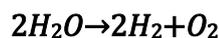


Le processus se produisant à l'électrode positive, l'anode, est l'oxydation. C'est le processus par lequel la molécule subit une perte en électron(s). Chaque molécule d'eau se divise alors en oxygène (O_2) et produit un cation hydrogène (H^+) en libérant des électrons qui se déplacent dans le circuit vers la cathode. La réaction est :

Oxydation à l'anode :



La somme des deux réactions (I, 2) et (I, 3) simultanées dans le circuit donne la réaction globale qui exprime l'électrolyse de l'eau ; pour balancer les électrons échangés, on doit multiplier l'équation de la réaction de réduction à la cathode par 2. Les ions H^+ et OH^- se combinent pour former des molécules d'eau. Après addition et simplification, on obtient :



I.7.3. Rendement et consommation du système :

Dépendant de la tension électrique et du compromis effectué par le producteur avec le taux de production d'hydrogène, les rendements des électrolyseurs actuels s'étalent de 62% à 89% selon les technologies et les conditions, notamment celles de l'eau en entrée [17]. Ainsi, 4 à 5 kWh et 1 litre d'eau sont consommés par norme-mètre cube produit dans les électrolyseurs industriels .

Finalement, la production d'un kilogramme d'hydrogène, permettant un déplacement de 100 kilomètres pour tout véhicule léger à pile à combustible, nécessite de 44 à 55 kWh d'électricité et 11 litres d'eau. L'électrolyse constitue le procédé de production d'hydrogène décarbonné le plus mature technologiquement. Toutefois, il ne contribue actuellement qu'à 1% de la production volontaire d'hydrogène du fait d'un manque d'investissements et de coûts dissuasifs.

I.8. Les différents types d'électrolyseurs :

Il existe à ce jour trois types d'électrolyseur dont la maturation va de la recherche en laboratoire à la commercialisation. Leur principale différence réside dans l'électrolyte utilisé. Quelles en sont les principales caractéristiques et le possible couplage avec des systèmes de production à bases d'énergies renouvelables ? [8]

I.8.1. L'électrolyseur alcalin :

Ce type repose sur la technologie qui utilise une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) comme électrolyte. L'électrolyse alcaline constitue la solution de production d'hydrogène la plus utilisée de nos jours, et propose un coût d'investissement faible en comparaison avec les autres technologies d'électrolyse, notamment grâce à la simplicité des matériaux. Bénéficiant déjà de rendements de 68 à 77%, l'électrolyse alcaline possède une marge d'amélioration limitée et une faible réactivité aux variations de puissance. Si ce dernier aspect est problématique pour un couplage avec des énergies intermittentes, il présente peu d'inconvénients pour la production d'hydrogène à partir de l'hydroélectricité.

Les perspectives d'amélioration de cette technologie se situent au niveau des coûts de fabrication, de la pression de fonctionnement et des conditions de couplage aux énergies intermittentes. Elle pourrait aussi profiter à terme de la recherche sur les piles à combustible alcalines. Ces améliorations sont cependant minimes au vu de sa maturité, si bien que la

recherche se focalise sur les deux autres technologies d'électrolyse dont les perspectives d'amélioration des performances sont plus grandes.

I.8.2. L'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) :

Une seconde technologie d'électrolyseur utilise une membrane en polymère (PEM pour Proton Exchange Membrane) comme électrolyte. Cette évolution d'un électrolyte liquide à un électrolyte solide permet de considérablement réduire les coûts de maintenance, d'entretien, dus aux effets de l'électrolyte liquide sur l'installation, ainsi que de compression de l'hydrogène en sortie. De plus, l'électrolyse PEM (figure ci-dessous) propose une excellente solution de production décentralisée, grâce à une meilleure réactivité aux variations de puissance ainsi qu'une grande compacité du système.

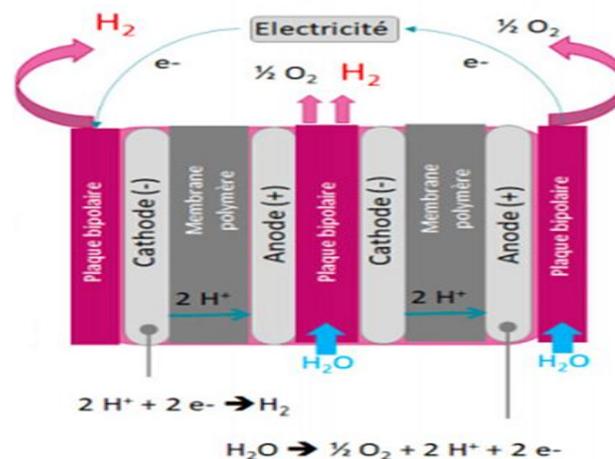


Figure I.4 : L'électrolyseur PEM

Avec des rendements de 62 à 77%, cette technologie est utilisée dans certains marchés de niche, notamment dans les sous-marins, mais elle reste encore en phase de développement pour une utilisation de masse. Le recours à des matériaux nobles, notamment le platine, la durée de vie des membranes ainsi que les limitations de taille des assemblages constituent les principaux obstacles rencontrés.

Les coûts actuels des électrolyseurs PEM sont de l'ordre du double de ceux des technologies alcalines. Toutefois, cette technologie profite de la forte recherche sur les piles à combustible PEM, et dispose de caractéristiques prometteuses (forte densité de courant acceptée, pression élevée). Les perspectives d'amélioration identifiées se situent principalement au niveau de la capacité des empilements, de la diminution de l'utilisation des matériaux nobles ainsi que d'une augmentation de la durée de vie des membranes.

Enfin, la recherche en laboratoire expérimente cette technologie à haute température (130-180°C, contre 70 à 80°C pour les électrolyseurs actuels).

I.8.3. L'électrolyseur à haute température par SOEC (Solid Oxid Electrolysis Cell) :

L'augmentation de la température lors d'une réaction d'électrolyse permet un apport d'énergie supplémentaire sans que l'énergie nécessaire à la décomposition moléculaire augmente. Cela conduit à la suppression de catalyseurs nobles (platine ou iridium) ainsi que l'énergie électrique à fournir pour atteindre le seuil de décomposition, ce qui diminue fortement les coûts d'investissement et de fonctionnement. [9]

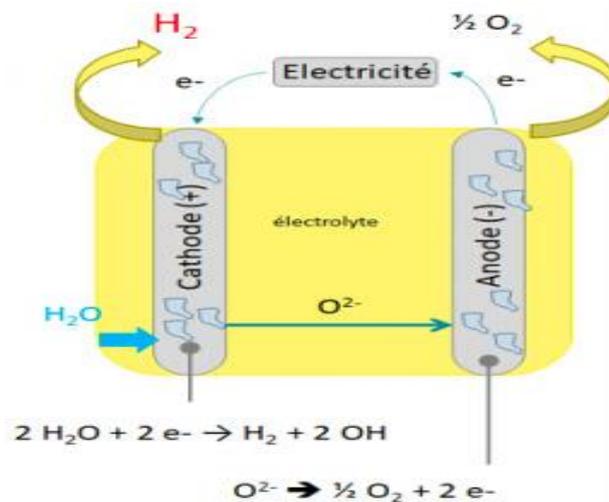


Figure I.5 : L'électrolyseur à haute température

La principale technologie d'électrolyse à haute température est la cellule d'électrolyse à oxyde solide (SOEC pour Solid Oxide Electrolysis Cell). Fonctionnant entre 700 et 900°C, l'électrolyse SOEC (figure ci-dessus) présente un dispositif similaire à l'électrolyse PEM. Cependant, une part significative de l'énergie est apportée sous forme de chaleur, qui passe de 10% à 400 Kelvin à 30 % à 1200 Kelvin, mais qu'il est possible de récupérer lors de l'électrolyse (exothermique). Cette technologie présente l'avantage de pouvoir fonctionner de manière réversible : en électrolyseur ou en pile à combustible. Avec des rendements pouvant dépasser 90%, l'électrolyse SOEC se situe dans la phase de recherche en laboratoire. Si les rendements actuels sont prometteurs, la dégradation accélérée des cellules constitue le principal frein à un développement rapide.[9]

I.9. Stockage de l'hydrogène :

Le concept de stockage de l'hydrogène désigne toutes les formes de mise en réserve du dihydrogène en vue de sa mise à disposition ultérieure comme produit chimique ou vecteur énergétique. Plusieurs possibilités de stockage existent, chacun d'eux a ses propres avantages et des inconvénients.

Sous forme de gaz, le dihydrogène doit être fortement comprimé quant au dihydrogène liquide il nécessite une très basse température et au final pour l'hydrogène solide il nécessite d'être lié à d'autres composants, notamment sous la forme d'hydrure [7].

Différents modes de stockages d'hydrogène existent, parmi ces modes on a :

I.9.1. Stockage conventionnel :

C'est le mode le plus utilisé. Il est surtout approprié pour de grandes quantités. Il y'a deux méthodes différentes :

Stockage sous compression : dans ce cas, l'hydrogène est encore sous forme gazeuse. Il est comprimé à une pression variante entre 200 bars et 350 bars. A cette pression, la densité d'hydrogène dépasse 11 Kg/m^3 , ce qui représente une augmentation de la densité d'un facteur 130 fois plus élevé que la densité à une pression normale. La densité volumique restent au moins faible pour les applications de transport. Cependant, les réservoirs capables de supporter les pressions supérieures à 450 bars sont en cours de développement. De plus, à fin de réduire (alléger) plus le poids du système de stockage, les développements sont en cours pour l'introduction de polymères et des fibres de carbone dans la structure des réservoirs qui sont actuellement en métal alliage .

Stockage sous forme liquide : l'hydrogène est liquéfié à 20K avant son stockage dans un réservoir d'acier à double paroi. L'espace entre les murs est rempli de matériaux isolants, d'azote liquide ou conservé sous vide. Les matériaux composites sont sous développements pour fabriquer des réservoirs plus légers sous forme liquide. La densité de l'hydrogènes 'élève à environ 71 Kg/m^3 , ce qui rend possible d'avoir des citernes répondant aux exigences du secteur de transport une fois le problème des pertes résolu. Cependant, la nécessité de maintenir la température basse et limité les pertes de vaporisation d'une part, et réduire le cout énergétique exorbitant de la liquéfaction d'autre part, fait que ce mode de stockage se conforme de manière optimale aux critères de stockage pour une consommation d'énergie d'hydrogène à grande d'échelle[5].

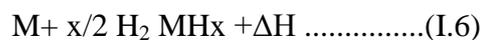
I.9.2. Stockage par adsorption :

Il s'effectue par la concentration d'hydrogène par absorption à la surface d'un adsorbant approprié. Si l'adsorption de l'hydrogène par une grande variété de matériaux est en théorie possible, seule l'adsorption par le carbone est significative et peut alors être considérée pour les applications technologiques[5].

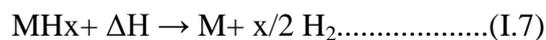
Dans les conditions normales, des densités d'environ 0.5% en poids ont été obtenues. Mais à très basse température et haute pression, la densité augmente jusqu'à 8%. Donc, pour que ce mode de stockage soit efficace, il est important de développer des adsorbants avec de grandes zones spécifiques. Dans ce sens, les nanotubes et les nano fibres sont sous considération pour le stockage de l'hydrogène. Ces matériaux, bien que prometteurs, sont toujours à l'état de recherche et développement [5].

I.9.3. Stockage par hydrure :

C'est le stockage sous forme atomique de l'hydrogène dans des composés connus sous le nom d'hydrure. Pendant le processus de formation de ce dernier, la réaction suivante a lieu [5]:



Le processus de décharge d'hydrogène peut être représenté par la réaction suivante :



Lors des processus de chargement et déchargement, la pression P est liée à la température T par l'équation de Van 't Hoff :

$$\ln P = \Delta H/RT - \Delta S/R \dots\dots\dots(I.8)$$

Ou: ΔH et ΔS sont respectivement l'enthalpie et l'entropie du processus d'hydrate.

R est la constante du gaz [5].

Il y a deux classes d'hydrure. Il y a les hydrures métalliques et les hydrures complexes :

- ✓ Hydrures métalliques : ce sont des hydrures à liaisons métalliques. Ces hydrures, agissant comme une éponge, sont capables d'absorber les atomes d'hydrogène dans les défauts du réseau. L'absorption d'hydrogène, connue aussi comme l'hydrate, a lieu à des températures et pressions caractéristiques. Plusieurs familles d'hydrures de métal existent ou sont en cours de développement. Si la capacité de stockage des hydrures métalliques est très satisfaisante, leur densité volumique et leur capacité de désorption sont loin de cela [5].

- ✓ Hydrures complexes : ils sont des structures avec des métaux alcalins (généralement lithium et sodium). L'hydrogène est un élément du groupe 13 (généralement le bore et aluminium). Son stockage dans les hydrures complexes est effectué par des réactions chimiques et l'occupation du site sans treillis comme le cas dans les hydrures métalliques. Dans ce cas, le processus est également limité par les faibles densités d'énergie, la lenteur cinétique de remplissage et cout élevé des hydrures [5].
- ✓ Autres procédés de stockage : Autres types d'hydrures tels que la famille des Amin boranes (NHX BHX) sont en cours de développement. Ils constituent un moyen très prometteur de stockage de l'hydrogène en particulier pour les applications. En effet, certains de ces hydrures, tels que le composé $\text{NH}_3 \text{BH}_3$ peuvent absorber au moins 20% en poids, sont stables dans des conditions normales et peuvent absorber à des températures modérées .

L'hydrogène est utilisable soit directement dans des moteurs à combustion interne soit comme combustible dans une pile à combustible (PAC). Une PAC est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en énergie électrique et thermique sans apport d'énergie extérieure[5].

I.10. L'utilisation de l'hydrogène :

L'hydrogène produit par électrolyse peut être utilisé dans de nombreux secteurs. Par exemple, il peut être utilisé comme matière première dans plusieurs procédés industriels. Le marché mondial de la matière première d'hydrogène a été récemment estimé à 115 milliards USD et devrait augmenter de manière significative au cours des prochaines années pour atteindre 155 milliards USD d'ici 2022 [10].

La demande annuelle mondiale en hydrogène était d'environ 8 ex joules, en 2015 [11].

Les principales productions industrielles, dans lesquelles l'hydrogène est utilisé, sont :

- Produits chimiques : la production d'ammoniac, de polymères et de résines les principaux marchés de l'hydrogène industriel.
- Raffinage : L'hydrogène est utilisé pour les procédés d'hydrocraquage et d'hydrotraitement (désulfuration des carburants). Les raffineries représentent le deuxième consommateur d'hydrogène industriel.
- Fer et acier : un procédé innovant, appelé réduction directe du fer via l'hydrogène

La plus grande part de la demande en hydrogène provient des secteurs de la chimie et du raffinage. D'autres secteurs industriels utilisent également de l'hydrogène, mais leur part cumulée dans la demande mondiale est faible (seulement 1 % [10]). Il s'agit notamment de : fabrication de verre, de produits alimentaires (hydrogénation des graisses), de produits chimiques en vrac et de spécialité, de semi-conducteurs, de refroidissement de gros générateurs électriques fixes, de carburant propulseur pour véhicules aérospatiaux, etc.

Par conséquent, les grands secteurs industriels, tels que les raffineries et la production de produits chimiques, devraient être les premiers marchés clés du passage de l'électricité à l'hydrogène. En particulier, Al-Subaie et al. [12]

Ont affirmé que l'hydrogène peut être consommé instantanément par les industries du raffinage du pétrole et de la chimie sans qu'il soit nécessaire d'augmenter la pénétration du marché des FCEV.

À l'heure actuelle, l'hydrogène utilisé comme matière première industrielle est principalement produit sur site dans des usines dédiées ou comme sous-produit d'autres procédés (20 à 30 % [11]). Par exemple, en Australie, l'hydrogène est produit en grande partie par gazéification du charbon.

Selon le Conseil de l'hydrogène [11], d'ici 2050, la demande d'hydrogène dans les seules applications actuelles pourrait atteindre 70 millions de tonnes (10 EJ), tirée par l'augmentation de la consommation mondiale.

I.11. Conclusion :

Un électrolyseur est un appareil utilisé pour décomposer l'eau en ses composants de base, à savoir l'hydrogène et l'oxygène, à l'aide d'un courant électrique. L'électrolyseur est constitué d'une cellule d'analyse contenant deux jeux d'électrodes immergées dans une solution aqueuse. Lorsqu'un courant électrique traverse l'électrolyseur, une réaction d'électrolyse de l'eau se produit, dans laquelle l'eau est convertie en hydrogène et en oxygène.

La production d'hydrogène vert fait référence à la production d'hydrogène à l'aide de sources d'énergie renouvelables et propres, telles que l'énergie solaire et éolienne. L'hydrogène vert est l'un des moyens importants d'énergie durable, car il est produit sans émissions de carbone et peut être utilisé comme carburant propre dans de nombreuses applications.

L'hydrogène vert est une option durable pour s'appuyer sur les combustibles fossiles, car il peut être utilisé dans la production d'électricité, le fonctionnement des véhicules électriques à hydrogène et d'autres applications industrielles.

Chapitre II :

Gisement solaire et système photovoltaïque

II.1. Introduction :

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituées le plus rapidement qu'elles ne sont consommées. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelés à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelées sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe de rayonnement solaire produite par le soleil sous forme des photons en énergie électrique à l'aide des méthodes de conversion nommées cellule photovoltaïque qui constituent des modules ou panneaux. En effet le mot " photovoltaïque " mot grecque vient de " photo "qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien ALESSANDRO VOLTA (175 - 1807) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité.[13]

Dans ce chapitre, nous sommes concentré plus précisément sur l'énergie solaire photovoltaïque, les différents détails et les éléments ayant un trait à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

II.2. Les énergies renouvelables :

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux ont autant de ressources naturelles capables de produire de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme, leur faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Il existe divers types d'énergies renouvelables qui sont des sources d'énergie inépuisables comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leurs caractéristiques commune est de ne pas produire d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre [14].

D'ici on distingue plusieurs familles des énergies renouvelables, ainsi que les différentes technologies qui sont mis en œuvre afin de les exploiter convenablement.

II.2.1. L'énergie solaire :

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

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.

- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques): la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité. [13]

II.2.2. L'énergie hydraulique :

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité [16].

II.2.3. L'énergie éolienne :

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien est également siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.[17]

II.2.4. L'énergie géothermique :

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie.

- La géothermie de basse énergie.

- La géothermie de très basse énergie Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...).[18]

II.2.5. La biomasse (masse des végétaux) :

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...). Le bois issu des déchets de la forêt ou des industries du bois est brûlé pour produire de la chaleur. Il représente 14 % de la consommation énergétique mondiale. [15]

II.3. L'énergie renouvelable en Algérie :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution prometteuse avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés [19].

Dans ce propos l'Algérie l'un des pays de fort potentiel des énergies renouvelables, avec une capacité nationale d'électricité qui dépasse les 56.74 TWh avec 0.45 TWh crête seulement pour les énergies renouvelables (en 2012) , spécifiquement l'énergie solaire photovoltaïque, car l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara), et l'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/ m² au Grand Sud (TAMENRASSET) [20].

L'Algérie s'engage donc avec une grande volonté sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions sérieuses et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile [20].

Ainsi, un programme très ambitieux est envisagé pour développer les énergies renouvelables durant la période 2015-2030, il consiste à installer une capacité totale de 22000

MW, et le solaire photovoltaïque sera la principale source de production d'énergie propre car il représenterait 62% de la capacité totale projetée à 2030 [20].

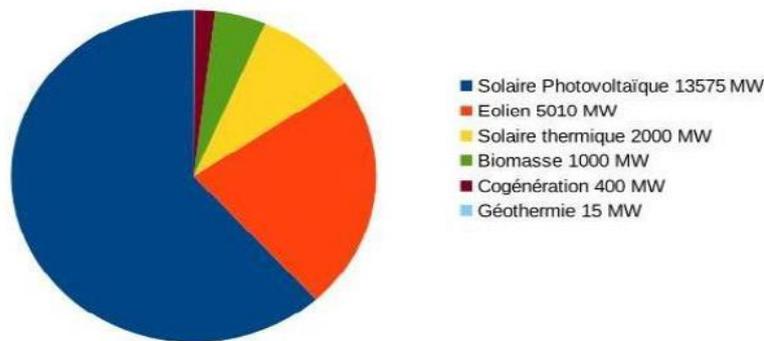


Figure II.1: Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables [20].

II.4. La conversion photovoltaïque :

Un système photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque et d'un ensemble de composants électriques (convertisseur statique, batterie de stockage avec son régulateur de charge, câblage et protection) qui permettent d'adapter la puissance électrique produite aux spécifications des récepteurs [21].

II.4.1. L'énergie solaire :

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge.

II.4.2. Rayonnement solaire :

L'énergie solaire est l'énergie émise par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques (principalement entre 0,3 et 3 μm) ou toute autre énergie obtenue par captage du rayonnement solaire. [18]

II.4.2.1. Le rayonnement direct :

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

II.4.2.2. Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. [22]

II.4.2.3. Rayonnement réfléchi (Albédo):

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

II.4.2.4. Rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre.

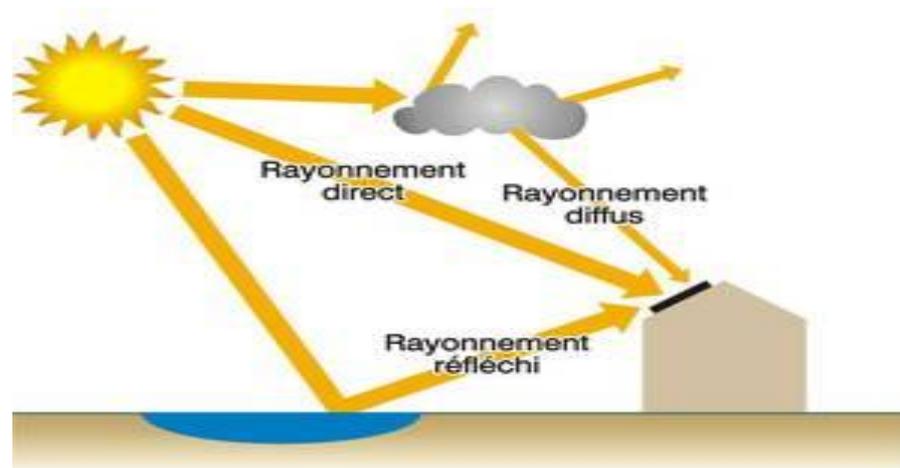


Figure II.2 : Composantes du rayonnement solaire.[23]

II.5. Principe de la conversion photovoltaïque (PV) :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires convertit l'énergie lumineuse des rayons solaires directement en électricité en transférant l'énergie des photons aux électrons du matériau. Ce matériau a deux parties, l'une est l'excès d'électrons et l'autre est le manque d'électrons, appelés respectivement dopage de type N et dopage de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la deuxième, les électrons en excès dans la partie N diffusent dans la partie P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone dopée initialement P devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ

électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formé. [24]

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite (gap) communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trous. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel. [24]

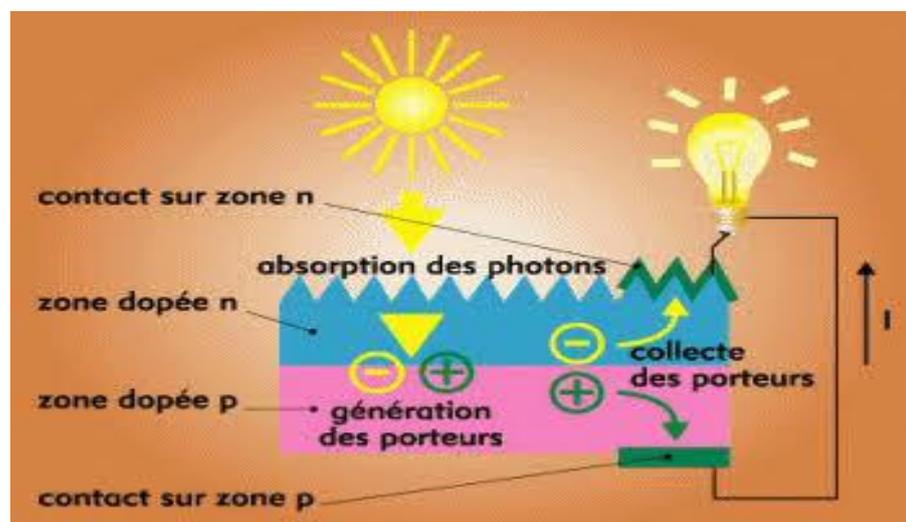


Figure II.3 : Principe de la conversion PV.[24]

II.5.1. Cellules solaires photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée.

II.5.2. La cellule PV :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. [25]

II.5.3. Technologie de cellules photovoltaïques :

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

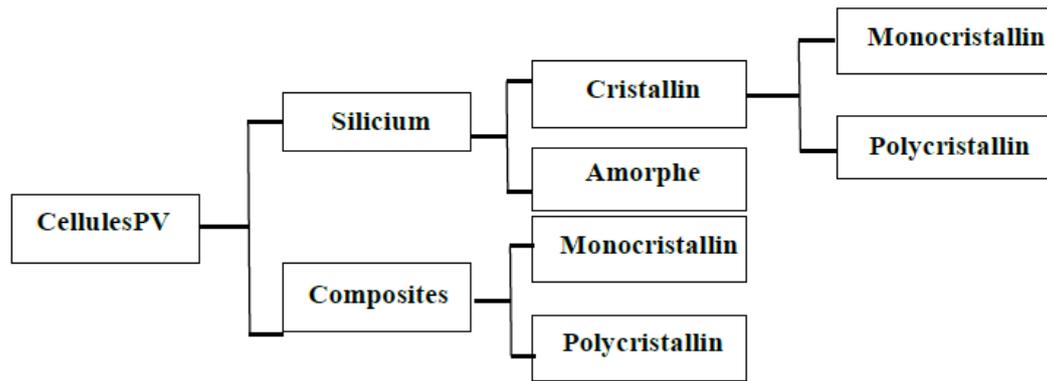


Figure II.4 : Différents technique de cellules photovoltaïque [25].

a. Les cellules monocristallines

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée [25].

b. Les cellules poly-cristallines

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible (11% -13%) [25].

c. Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres [25].

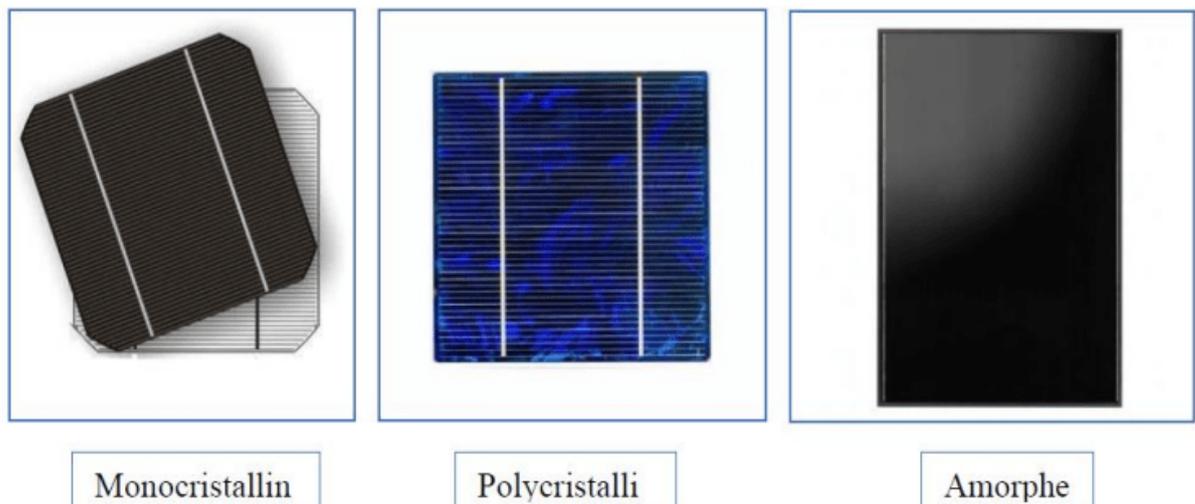


Figure II.5 : Types de cellules photovoltaïques.[25]

II.5.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque [24] :

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont :

- La résistance série R_S .
- La résistance shunt R_{sh} .
- Le courant de saturation I_{sat} .
- L'éclairement W .
- La température T .

II.6. Systèmes Photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée.

II.6.1. Système autonome :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau .[26]

Les deux types de système photovoltaïques autonomes sont :

◆ Système autonome avec stockage :

Système autonome avec stockage c'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques.[26]

◆ Système autonome sans stockage :

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairement solaire suffisant pour le démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de rayonnement solaire. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome ou le stockage de l'eau dans réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique.[26]



Figure II.6 : Système PV autonome

II.6.2. Système PV raccordé au réseau :

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique [27].

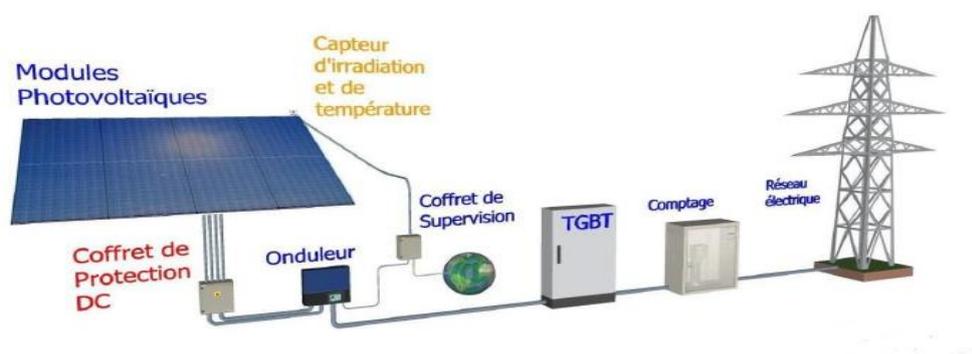


Figure II.7 : Système PV raccordé au réseau .

II.6.3. Système PV hybride :

Les systèmes PV hybrides intègrent un générateur PV avec un autre : éoliennes, groupe électrogène... et parfois même le réseau public. En règle générale, les systèmes de batterie stockent l'énergie afin de ne pas perdre d'énergie provenant de sources aléatoires telles que l'énergie solaire ou éolienne.

La difficulté de tels systèmes est d'équilibrer les différentes sources d'énergie pour les optimiser, car nous savons tous que la source de chaleur (diesel, gaz, etc.) et le réseau public sont toujours les recours de dernier recours.[27]

II.7. Le générateur photovoltaïque :

Les générateurs photovoltaïques représentent une partie de la production d'énergie électrique. Cette partie est principalement constituée d'un ou plusieurs modules photovoltaïques.

Ces modules sont assemblés à partir de cellules photovoltaïques en série/parallèle pour convertir l'énergie solaire en électricité [28].

II.7.1. Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I.8). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (I.8) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. [29]



Figure II.8 : Module photovoltaïque

II.7.1.1. Montage en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. Les figures (II.9) montrent l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [30].

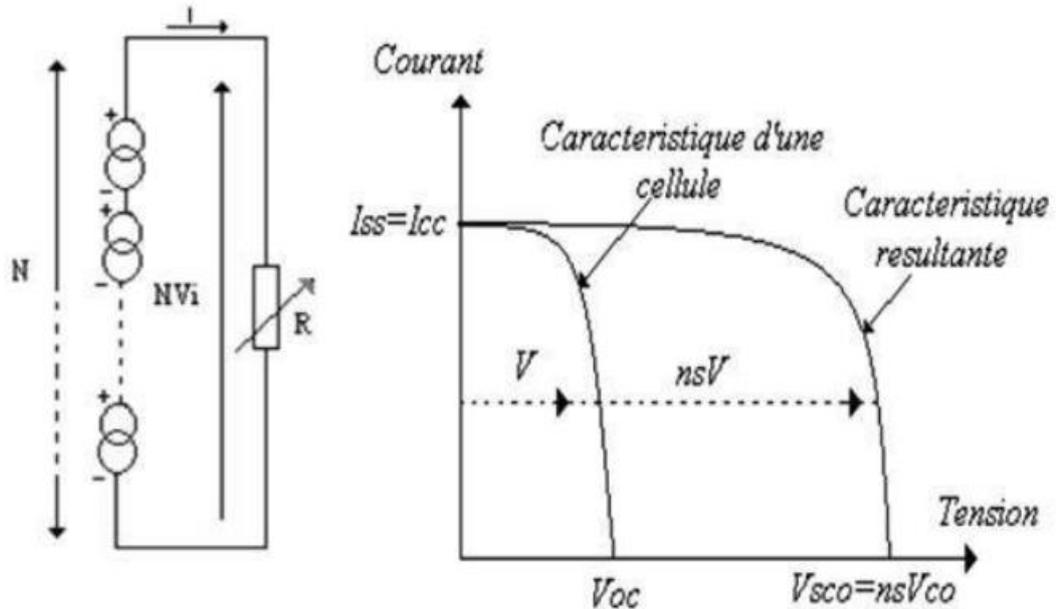


Figure II.9 : Caractéristiques de groupement série des cellules [29].

II.7.1.2. Montage en parallèle :

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. Les figures (II.10) montrent l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [30].

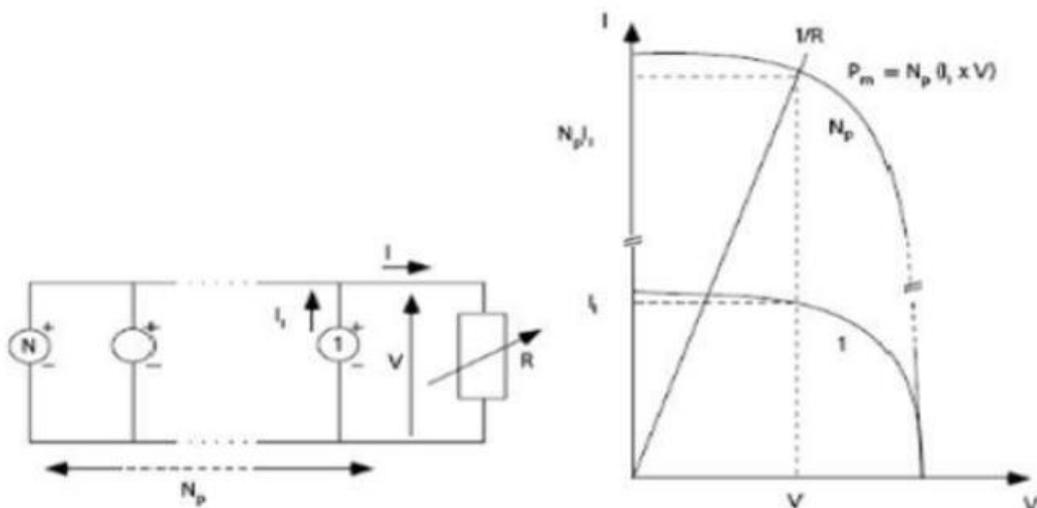


Figure II.10 : caractéristiques de groupement parallèle des cellules

II.8. Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques, également appelés convertisseurs électriques ou convertisseurs électroniques, sont des dispositifs utilisés pour convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre. Ils jouent un rôle essentiel dans de nombreuses applications électriques et électroniques en permettant le contrôle, la régulation et l'efficacité de la distribution et de la transformation de l'énergie électrique.

II.8.1. Les convertisseur DC/DC (hacheur):

Ces convertisseurs prennent une tension continue d'une valeur donnée en entrée et la convertissent en une autre tension continue en sortie. Ils sont couramment utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique, les véhicules électriques, les applications industrielles, etc., où des tensions différentes sont nécessaires pour alimenter différents composants.

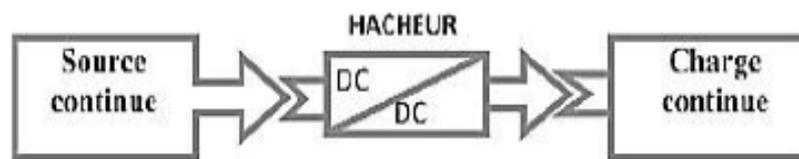


Figure II.11 : Schéma de principe d'un hacheur .

II.8.2. Les convertisseur DC/AC (onduleur):

Ces convertisseurs prennent une tension continue en entrée et produisent une tension alternative en sortie. Ils sont utilisés dans diverses applications, notamment pour convertir la tension de la batterie d'un véhicule électrique en une tension alternative pour alimenter le moteur, et dans les applications de conversion d'énergie solaire.

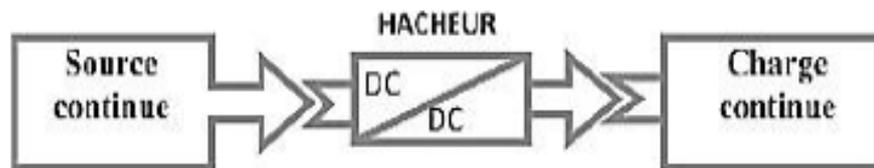


Figure II.12 : Schéma de principe d'un onduleur .

II.9. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque:

II.9.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque:

- L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:
- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.[31]

II.9.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque:

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion. S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication. [31]

II.10. Conclusion :

Pour la production d'hydrogène, il existe différents types et modes de stockage, en plus du transport de l'hydrogène et de ses applications. D'autre part, nous avons également parlé en termes généraux de divers concepts importants pour l'étude du système solaire photovoltaïque. Nous avons abordé le principe de la conversion photovoltaïque, les technologies utilisées, les différents types de cellules photovoltaïques, les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.

Chapitre III :

Dimensionnement et simulation de système étude

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons, premièrement, dimensionner le système photovoltaïque nécessaire pour alimenter un électrolyseur destiné à génération gros débits d'hydrogène vert à l'échelle industrielle, Ceci en utilisant les caractéristiques de certains des électrolyseurs disponibles sur le marché industriel que nous avons choisis.

Deuxièmement, nous étudierons les effets économiques et environnementaux de ce système photovoltaïque, moyennant de logiciel **Homer**.

Troisièmement on va vérifier les propriétés électriques de l'électrolyseur sélectionné et de sa productivité au moyen d'un programme en **Matlab**.

III.2 Dimensionnement de système photovoltaïque

III.2.1 Choix de l'électrolyseur et détermination d'Energie crête nécessaire E_c

A travers une longue recherche à travers le Net, dans le domaine des électrolyseurs, En raison de la convergence des caractéristiques électriques et de la productivité pour la plupart des types, notre choix s'est porté sur un groupe Gamme McLyzer : de 200 à 3200 Nm³/h à 30 bar.

Cas particuliers

- Nous avons fixé comme objectif un débit égal à 200 mètres cubes par heure (200 Nm³ \h d'hydrogène vert).
- Nous avons sélectionné de cette gamme un électrolyseur dans lequel le flux d'hydrogène est égal à 200 Nm³/h (voir le **Tableau III.1**) et sur cette base et les données précédentes, nous avons effectué les calculs suivants.

Table III.1 : Les caractéristiques de l'électrolyseur utilisé

Modèles	McLyzer 200-30
Débit nominal H ₂ (Nm ³ /h)	200
Classe de puissance	1 MW
Consommation spécifique DC au débit nominal (kWh/Nm ³)	4,65

➤ **Calcul de l'Énergie électrique crête E_c**

E_c = le débit d'hydrogène vert à produire × consommation électrique de l'électrolyseur

- 200(Nm³/h): le débit d'hydrogène vert à produire
- 4,65 (kWh): consommation électrique de l'électrolyseur pour en 1Nm³ d'hydrogène vert

➤ **Calcul de la puissance maximale (puissance crête)**

$$P_c = \frac{E_c \times P_i}{I_r \times K}$$

- P_c (kw): puissance crête.
- E_c (kWh): consommation journalière d'énergie électrique.
- P_i : cet = 1 kW/m²/j Capacité d'éclairage journalier en conditions standards.
- I_r : rayonnement quotidien moyen (6.506 kW/m²/j).
- K : facteur de correction total (0.85).

III.2.2 Choisissez le type de modules PV

Le type de modules photovoltaïques a été sélectionné par la recherche et l'étude ci-dessus, qui montre leurs types et caractéristiques.

Table III.2 : Caractéristiques techniques du type de module PV sélectionné

Caractéristique technique	La valeur
Puissance du module (P_{max})	280 W
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	39 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	9.21 A
Tension à puissance max (V_{mpp})	31.8 V
Courant à puissance max (I_{mpp})	8.85 A
Courant inverse max	20 A
Tension max du système	1000 V
Température nominale de fonctionnement (NMOT)	45 °C
Température nominale de fonctionnement	-40 à +85 °C

- Calculer le nombre total d'unités PV

$$Nm = \frac{Pc}{Pm}$$

*Nm: Nombre de modules

*Pm: Puissance d'un module PV

III.2.3 Choisir un convertisseur :

Le choix du convertisseur dépend de la puissance de crête du système photovoltaïque.

Puissance de convertisseur= $1.3 \times Pc = 1.3 \times 168 = 218.14KW$

Nous avons choisi un adaptateur de 200 kW ; Type de Convertisseur DC/DC open frame.

❖ Caractéristiques convertisseur DC/DC

Table III.3: Les caractéristiques de l'électrolyseur choisis

	Tension d'entrée(v)	Tension de sortie(v)	Puissance(w)
min	12	12	100
max	800	800	200000

III.2.4 Installation de modules photovoltaïques

L'installation des modules photovoltaïques dépend de la tension maximale et le courant maximum de convertisseur.

nombre d'unités en série = V_{dc} / V_{max}

donc la tension totale de chaque série est:

nombre d'unités × Tension à puissance max

❖ **Calcul de nombre des séries**

N_s = nombre d'unités total / nombre d'unités en série

Alors, le courant total est:

courant total = $N_s \times$ Courant à puissance max

❖ **Calcul du nombre batteries**

La tension du système est de 48 (V), le pourcentage de décharge de la batterie **80% = 0.8** et la capacité de la batterie 200 (Ah).

III.2.5 Calcul de capacité de stockage de la batterie :

$$C_t = \frac{E_c \times N(\text{jour})}{D \times U}$$

* C_t : capacité totale de stockage(Ah)

* E_c : Consommation journalière d'énergie électrique (Wh/ jour)

* $N(\text{jour})$: Le nombre de jours de réserve

* $U(v)$: Voltage de batterie

* D : Pourcentage de décharge de la batterie

➤ **Calcul du nombre batteries**

$$N_b = \frac{C_t}{C_p}$$

* C_t (Ah): Capacité totale de stockage

* C_p (Ah): Une capacité de stockage de batterie

D'après les résultats obtenus nous avons constaté que le courant est doublé et la tension reste stable (à une valeur constante) quand la connexion a été en parallèle. Par contre, si la connexion est en série ; la tension est doublée et le courant reste stable à une valeur constante.

Cas généraux

III.3 Simulation de système

- Dans cette partie on a tenté de créer une simulation à l'aide de MATLAB, pour optimiser les conditions et les caractéristiques d'installation afin de faciliter les études au laboratoire et d'avoir les meilleurs rendements dans des meilleures conditions choisies.

III.3.1 Simulation de système de calcul

```
w=0.2 % levelWater kg/s
Eel=4.65 %KWh/nm3 electrolyzerenergyconsumption
pel=1000 %KW% Electrolyzer power
q=200;% puissance of batteries
pp=0.280 %kW panel power
mpv=31.8% PV voltage at MPP
j=1%Aut day
v=48%Battery voltage
```

➤ **Calcule**

```
Ec=Eel*1000*w %KWh
Pc=(Ec/(6.506*0.85)) %PV KW
Np=(Pc./pp)%Nt=(Pc/0.280) %PVPanelnumbers
Ns=800/mpv%
Nt=Np./Ns%PV
C=((Ec*j)/(0.80*v))*1000 %Ah Batteries capacity
NB=C./200 % Batteries branches
NS=v./12 %Batteries string
```

➤ **Result**

```
Ec=930kWh (Energie consommé par électrolyseur)
Pc =168.1706 kW (Puissance crût de PV)
Np =600.60 (Nombre de panneaux)
Ns =25.15 (Nombre de panneaux en série)
```

$N_t = 24$ (Nombre de panneaux en parallèle)

$C = 24218.75$ (Capacité totale de batterie)

$N_B = 122$ (Nombre de batterie en parallèle)

$N_S = 4$ (Nombre de batterie en série)

- Cette simulation nous a permis de créer un système qui facilite les calculs des paramètres nécessaire pour réaliser une installation de production d'hydrogène.

III.4 Effets économiques et environnementaux de système étudié, moyennant de logiciel Homer

III.4.1 Vue d'ensemble sur le Logiciel Homer

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybride Optimisation Model for Electric Renewables) est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybrides, composés de groupes électrogènes, de systèmes de cogénération, d'éoliennes, de systèmes photovoltaïques, de systèmes hydrauliques, de batteries, de piles à combustible, de la biomasse et bien d'autres. Homer permet d'obtenir la configuration optimale après une étude technico-économique.

III.4.2 Données nécessaires pour les calculs

a. Coordonnées géographiques du Touggourt

Latitude : 33° 16 Nord	Altitude : 55 m
Longitude : 6° 04 Est	32°

b. La température moyenne à Touggourt

A travers les données du tableau, qui met en évidence les températures moyennes au cours des mois de l'année, on constate que la température moyenne annuelle est de 22.66°C.

Table III.4 : Températures moyennes au cours des mois de l'année 2022 [35].

Température °C	Janvier	Février	Mars	Avril	May	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
	12.5	12.1	18.2	22.4	26	30.8	37.7	32	30.1	22.5	16	11.6

La température dans la région de Touggourt varie au cours d'année, le maximum de la température a été enregistré pour les mois : Juin 30.80°C, Juillet 37.7°C, Aout 32.1°C et septembre 30.1°C) par contre les températures minimales ont été pour Décembre 11.6°C, Janvier 12.5°C, Février 12.1°C.

c. Rayonnement solaire de la région de Touggourt

Table III.5 : Rayonnement solaire pour la région de Touggourt

Mois	Hh	Hopt	H (90°)
Janvier	3480	5550	5370
Février	4510	6360	5340
Mars	5980	7140	4760
Avril	6700	6960	3310
May	7280	6800	2380
Juin	7930	7020	1920
Juillet	7830	7100	2120
Aout	7130	7080	2890
Septembre	5730	6470	3830
Octobre	4810	6300	4860
Novembre	3780	5800	5380
Décembre	3120	5140	5150
Année	5700	6480	3930

Hh: Rayonnement d'inclinaison horizontale, **Hopt**: Rayonnement d'inclinaison optimal,

H (90°): rayonnement à 90 degrés, Unité de rayonnement $W/m^2.s$

III.4.3 Système PV connecté aux batteries

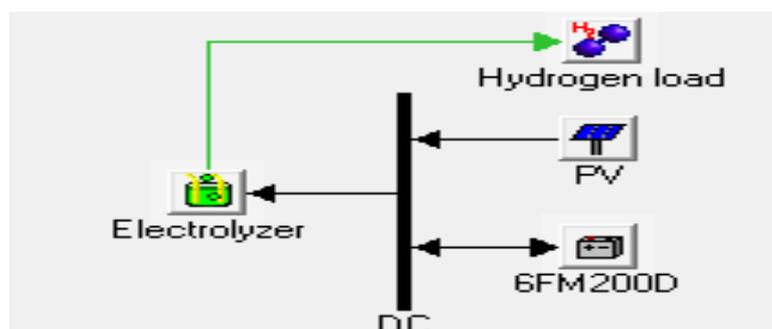


Figure III.1 : Maquette d'un système de production d'hydrogène PV connecté à des batteries.

L'étude réalisée par le programme de HOMER nous a permis de mise à l'échelle les données nécessaires dont les données géographiques et climatiques de la région de Touggourt.

III.4.4 Résultats obtenus par HOMER

❖ Production électrique mensuelle

Grâce à ce programme (HOMER), nous avons obtenu les résultats de l'énergie produite par le système photovoltaïque et de la production électrique mensuelle moyenne, comme le montre la figure ci-dessous.

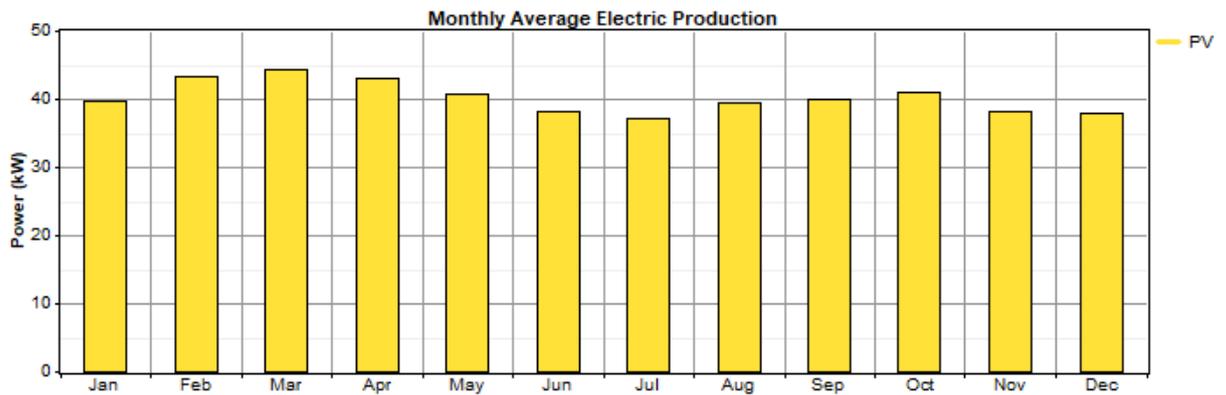


Figure III.2 : Production électrique moyenne mensuelle (par HOMER)

❖ Coûts nets du système photovoltaïque

Les coûts nets du système photovoltaïque, des batteries et de l'électrolyseur, illustrés dans la figure ci-dessous :

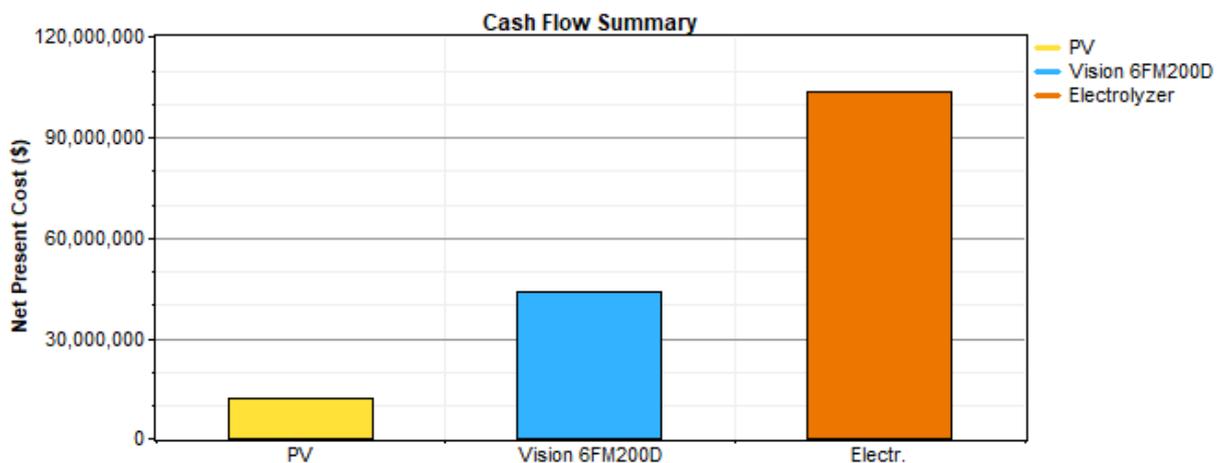


Figure III.3 : Résumé des coûts nets (par HOMER)

Ce qui est très claire da la figure III.3 que le coût d'un électrolyseur et très diminue en comparant avec les autres coûts.

❖ Production mensuelle d'hydrogène

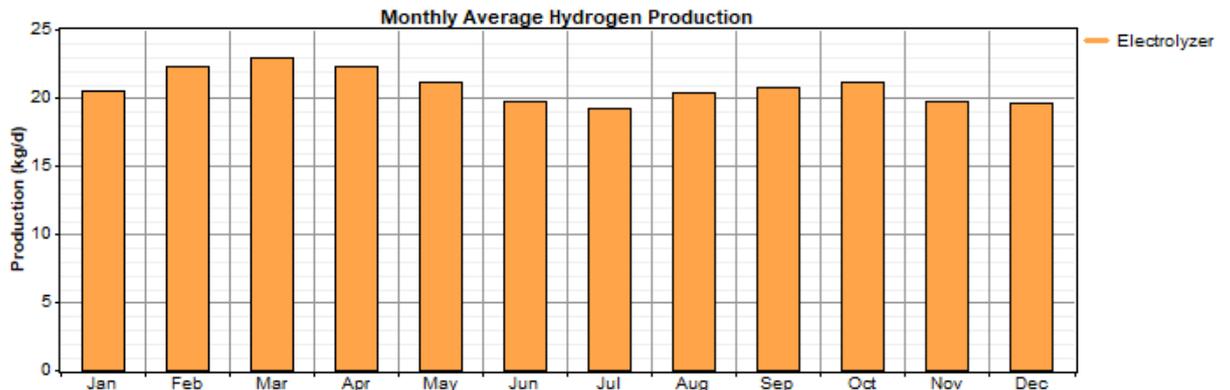


Figure III.4 : Production mensuelle d'hydrogène (par HOMER)

Les résultats présentés dans la figure III.4 montre que la meilleure production électrique a été enregistrée pour les mois : Février, Mars, Avril et Octobre ce qui est corrélé avec les résultats de la production d'hydrogène qui est en même mois que la production électrique.

III.4.5 Conclusion des impacts environnementaux

Le tableau suivant montre que le système photovoltaïque n'émet pas d'émissions qui affectent l'environnement.

Table III.6 : Emissions environnementales du système PV (par HOMER)

Polluant	Emissions (kg/yr)
Carbondioxide	0
Carbonmonoxide	0
Unburnedhydrocarbons	0
Particulatematter	0
Sulfurdioxide	0
Nitrogenoxides	0

Remarque

Nous notons que du point de vue économique, les données de recherche ne sont pas encourageantes, mais du point de vue environnemental, et dans le cadre du concept global de développement durable, ces travaux peuvent être inclus pour exploiter l'eau des marais pour préserver l'environnement, produire de l'hydrogène par énergie solaire et se passer de matériaux fossiles.

III.5 Validation numérique des propriétés électriques et productives de l'électrolyseur (Simulation de système)

La simulation suivant on a changé le niveau de l'eau [1KG/S] afin de améliorer la production hydrogène et on a obtenus les caractéristique suivants:

```
w=1 % Water levelkg/s
Eel=4.65 %KWh/nm3 electrolyzer energy consumption
pel=1000 %KW% Electrolyzer power
q=200;% puissance of batteries
pp=0.280 %kW panel power
mpv=31.8% PV voltage at MPP
j=1%Aut day
v=48%Battery voltage
  > Calcule
Ec=Eel*1000*w %KWH
Pc=(Ec/(6.506*0.85)) %PV KW
Np=(Pc./pp)%Nt=(Pc/0.280) %PVPanel numbers
Ns=48./mpv%
Nt=Np./Ns%PV
C=((Ec*j)/(0.80*v))*1000 %Ah Batteries capacity
NB=C./200 % Batteries branches
NS=v./12 %Batteries string
```

Resultat

$E_c = 4650$ kWh (Energie consommé par électrolyseur)

$P_c = 840.8528$ kW (Puissance crût de PV)

$N_p = 3.0030e+03$ (Nombre de panneaux)

$N_s = 1.5094$ (Nombre de panneaux en série)

$N_t = 1.9895e+03$ (Nombre de panneaux en parallèle)

$C = 1.2109e+05$ Ah (Capacité totale de batterie)

$NB = 605.4687$ (Nombre de batterie en parallèle)

$NS = 4$ (Nombre de batterie en série)

- Les caractéristiques obtenues on a appliqué dans la simulation suivante:

Hydrogen Properties

```
Hydrogen_Prop_File;
```

Solar Data

```
load('solarProfile.mat');
```

➤ Thermodynamic Energy

```
TDS = 48.7e3; % Entropy Reaction (@298K)
DH = 285.8e3; % Enthalpy Water (@298K)
theta0 = 298; % Reference Temperature (K)
dT_setpoint = 8;
```

➤ Stack Properties

```
Plate.X = 50; %cm
Plate.Y = 100; %cm
Plate.Z = 100; %cm
Electrolyzer.Np_electrodes = 2; %pair
Electrolyzer.N_cell = 50;
Electrolyzer.Temp_vect = linspace(273.15, 353.15, 5);
Electrolyzer.Efficiency_vect = linspace(0.55,0.9,5);
Electrolyzer.AreaMembrane =
(Plate.Y*Plate.Z)*Electrolyzer.Np_electrodes;
Electrolyzer.Xd = 2.0; %cm
```

➤ Tank Properties

```
Tank.Area = (Plate.X*Plate.Y)*Electrolyzer.Np_electrodes;
Tank.Volume = Tank.Area*(Plate.Z*1.25);
H2_Tank.Volume = 100*100*100; %cm^3
H2_Tank.T_storage = 273.15;
```

➤ Electric Properties

```
Electric.Resistance = 0.25; %Ohm
Heat.Resistance = 25; %Ohm
%% DC-DC converterProperties
DCDC_converter.I_vect = [0, 400, 1000];
```

```
DCDC_converter.eff_vect = [90, 95, 100];  
Solar.Area = 1.65*0.9*3000; %m^2  
Temp_vect_heat = [0 50 75 100]+273.15;  
I_vect_heat = [100 75 0 0];  
%% Control Parameters  
Control.InitVoltage = 100;  
Control.Slope = 750/(10*60);  
Control.T_filter = 30;  
Control.Vnom = 1000;
```

➤ Parameters used for green_hydrogen_Battery model

```
irradiance = 1000;  
temperature = 25;  
Ts = 10;  
Ts_Control = 1;
```

➤ Battery Data

```
Battery.Qn = 121093.75;  
Battery.Qinit = 121093.75;  
Battery.Q1 = Battery.Qn*0.5;  
Battery.Rs = 0.2;  
Battery.Un = 606;  
Battery.U1 = 210;  
  
Operation_Ref.Ie = [100 95 75 12.5 12.5];  
Operation_Ref.Isolar = [0 500 700 750 1000];  
Converter.Iout = [40 80 120];  
Converter.Efficiency = [95 98 100];
```

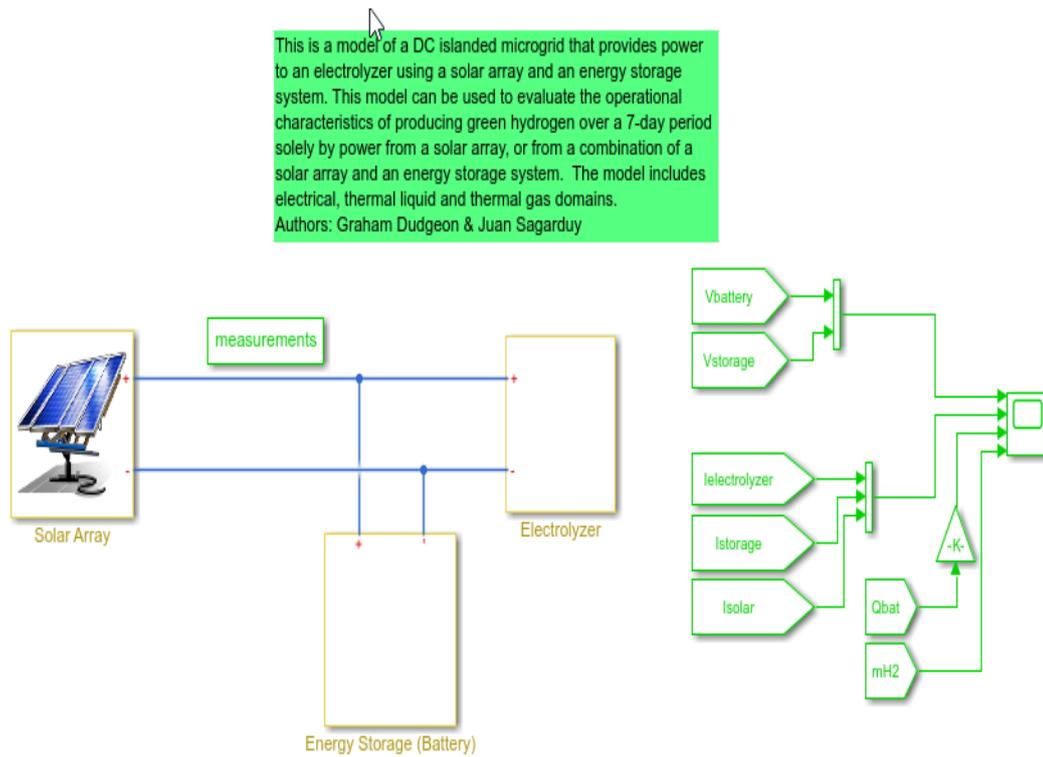


Figure III.5 : Schéma de système PV sous simulink

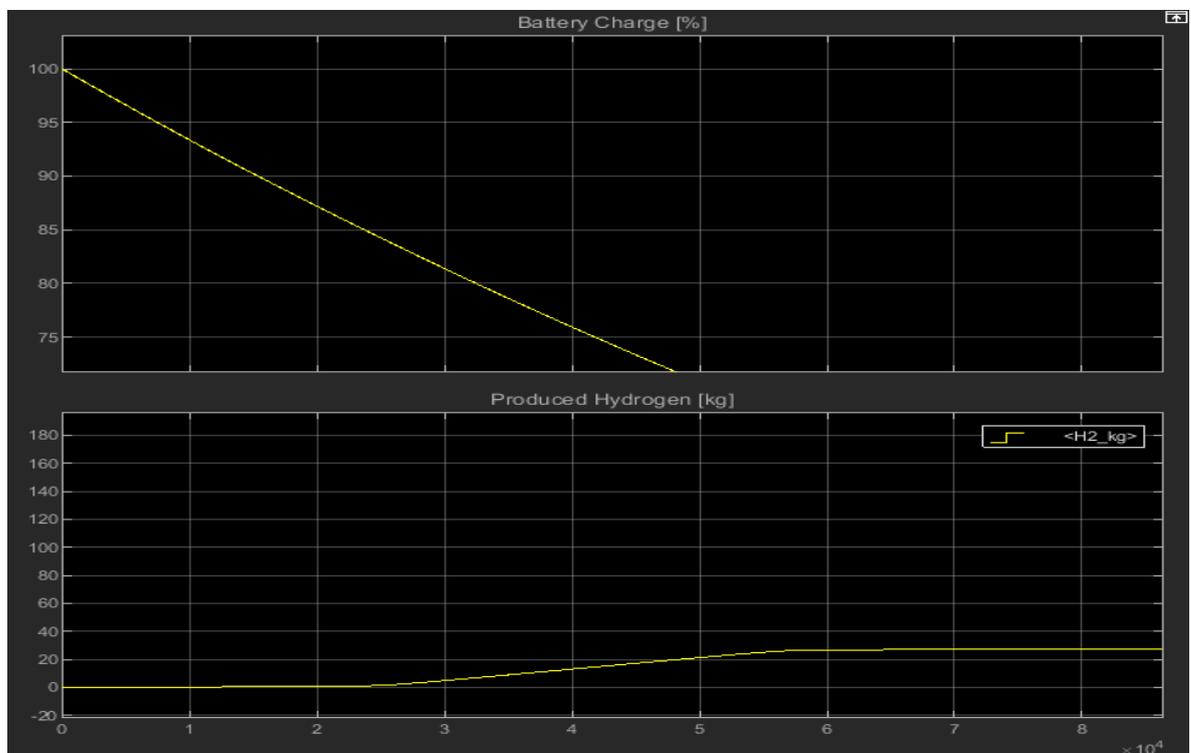


Figure III.6 : Les courbes de l'hydrogène produit et l'évaluation de consommation de batterie pour un jour.

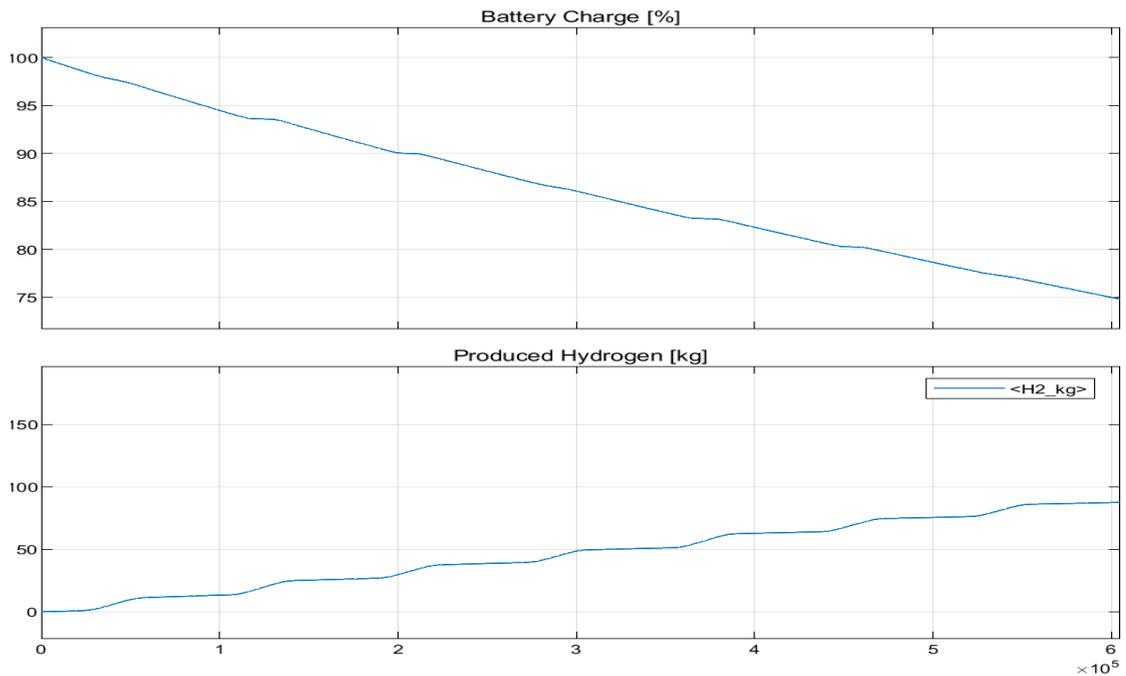


Figure III.7 : Les courbes de l'hydrogène produit et l'évaluation de consommation de batterie pour une semaine.

D'après les résultats des courbe obtenus on montré que:

- La production d'hydrogène varie de 25 Kg pendant un jour jusqu'à 90 Kg dans une semaine.
- La consommation de batterie atteint 75% dans une semaine.

Mraoui A *et al* [33] a été étudié la production d'hydrogène et il a trouvé un production de 0.8 Kg par jour d'autre étude de dimensionnement et simulation d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque réalisé par EIBAHRI Fatima et SAADOUNI Ibtissem[34], ils ont produit 2 kg pendant le mois de janvier.

Ces résultats confirment l'importance de notre production et l'amélioration fournie par notre simulation.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les principes données nécessaires pour réaliser le dimensionnement des systèmes photovoltaïques avec une simulation de l'installation. La comparaison des résultats obtenus par HOMER, utilisant les données mentionnées dans nos recherches, et par le MATLAB nous a confirmé la signification des résultats car on a trouvé la même production pour les deux études.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude de dimensionnement d'un Système photovoltaïque Orienté pour alimenter l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène vert (Un système PV, avec stockage électrochimique par batterie) à la willaya de Touggourt.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur l'analyse le calcul du nombre de panneaux nécessaires et de leur installation et le nombre des batteries et leur capacité total, par simulation en Matlab en utilisant encore le programme numérique Homer plus pour déterminations des effets économiques, et environnementale du système (PV +Catalyseur),

Au début, Nous avons fait une présentation générale sur l'hydrogène vert, son principe de fonctionnement et technologie de production

Par la suite Nous avons fait un aperçu sur le gisement solaire et système photovoltaïque, ses concepts, son importance, et les défis les plus importants auxquels elle est confrontée aujourd'hui dans le monde en général et en Algérie en particulier. ainsi nous avons présenté les différents modes de stockage, notamment, les stockages électrochimiques par batteries et ses constituants.

Dans la partit pratique, nous avons commencé par le choix de catalyseur, et la proposition de débit dihydrogène puis nous avons effectué les calculs de nombre des panneaux photovoltaïques, en utilisant les données de propriétés d'électrolyseur choisie et le débit d H_2 , ou nous avons calculé la puissance crête nécessaire qui consomment 168 KW, et les résultats obtenus étaient de 600 panneaux par panneau d'une capacité de 280w et 488 batteries d'une Capacité de 200 Ah et tension de 12 volts , et transformateur de courant(convertisseur DC/DC) d'une puissance max de 200 kw, ensuite nous avons dimensionné notre système photovoltaïque (pour des cas général) par simulation moyennant de programme Matlab.

Dans la 2^{eme} axe pratique, nous avons utilisé le logiciel Homer, sur la base des données de climatiques et géographiques de cite choisie plus quelques données économiques, nous avons déterminé les effets- économique du système.

Dans la 3^{eme} axe pratique, et dans le but de vérifier l'efficacité productive dans système, nous avons faire une simulation en Matlab.

Nous proposons l'évaluation de la production d'hydrogène dans différentes régions de l'Algérie ou l'utilisation d'un dispositif afin de réaliser une cartographie mettant en évidence les meilleurs sites d'installations photovoltaïques et géothermiques pour la production d'hydrogène.

Références bibliographique

- [1] **Soldi, B., et al.** "Conception et réalisation d'un système de production d'hydrogène à l'aide d'un dispositif de catalyse." *Journal of Renewable Energies* 12.1 (2009): 149-162.
- [2] **NREL**, 1995. The Green Hydrogen Report. NREL, Denver.
- [3] **State of California**, 2006. Senate Bill No. 1505. Chapter 877., in: State of California (Ed.). Legislative Counsel Digest.
- [4] **European Parliament**,. Written declaration on establishing a green hydrogen economy and a third industrial revolution in Europe through a partnership with committed regions and cities, SMEs and civil society organisations EU, 14 May 2007.
- [5] **R.Boudries, R.dizène, A. Khellaf and M. Belhamel**, «HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER », Editor: Aiden M.Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc.
- [6]**Bouziane, K.** (2011). Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par Electrolyse de l'eau. Mémoire de Magister en Génie des procédés. Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [7]**HAMICHI, Anissa.** Potentiel de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne en Algérie: Approche basée sur le SIG. Diss. 2019.
- [8] **Samer RABIH.**, « Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs Photovoltaïques » thèse de doctorat Univ de Toulouse 03/10/2008.
- [9] **Kauranen P.S, Lund P.D, Vanhanen J.P**, Development of a self-sufficient solar hydrogen energy system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1994, Vol. 19, p. 99-106.
- [10] **IRENA.** Hydrogen from renewable power: technology outlook for the energy transition. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; September 2018. ISBN: 978-92-9260-077-8.
- [11] **Hydrogen Council.** Hydrogen scaling up e a sustainable pathway for the global energy transition. Technical Report. November 2017.
- [12] **Al-Subaie A, Elkamel A, Mukherjee U, Fowler M.** Exploring the potential of Power-to-Gas concept to meet Ontario's industrial demand of hydrogen. In: 5th IEEE International conference on smart energy grid engineering (SEGE 2017), Oshawa, Canada, August 14-17; 2017. p. 336e 40. art. no. 8052821.
- [13]**BOUHAMED Yousri,TALEB AHMED Mejdj.** "LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR LES RESSOURCES RENOUVELABLES (PHOTOVOLTAÏQUE)."
- [14] **Bessemoulin P. et Oliviéri J.**, (2000), « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », *La Météorologie* 8e série - n° 31, Septembre 2000.

- [15] **Belakehal, Soltane.** *Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents.* 2010. thèse doctorat, université de Constantine.
- [16] <http://www.futura-sciences.com/>. Consulté le 17/05/2023.
- [17] **Ferkous, Khaled.** "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne." Mémoire de Magister, Université Mentouri *Constantine* (2009).
- [18] **Yasmine, Sekiou.** Dimensionnement d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque dans la région de Ouargla. Diss.
- [19] **Lalouni, Dr. Sofia Belaid.** *Cours Energie Solaire Photovoltaïque.* Université A.Mira : s.n., 2015.
- [20] **Abdelkader Mekemeche,** « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
- [21] **Bouزيد, A. Azizi, M.** Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'un ferme Etude de l'onduleur triphasé lié à cette application. Mémoire de projet de fin d'étude en Electrotechnique. Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2008.
- [22] **Office fédéral** des questions conjoncturelles « Centrales photovoltaïques » Guide pour le dimensionnement et réalisation de projets 1996.Academy, Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.
- [23] **B. Y. H. Liu and R. C. Jordan,** « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », *Solar Energy*, vol. 4, no. 3, p. 1–19, Jul. 1960.
- [24] **Narimene DEBILI.** Etude et optimisation en environnement Matlab / Simulink d'un système de pompage photovoltaïque, thèse de magister en électronique, UC1, 2015.
- [25] **Akassewa Tchapo SINGO,** Système d'alimentation photovoltaïque avec .stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [26] **SAYAH, Ikram.** "Etude d'une installation de pompage solaire photovoltaïque destinée à l'irrigation."
- [27] **A. MOHAMMEDI.,** « Etude d'un système de pompage photovoltaïque » Master en électrotechnique option : Electromécanique. Université de Bejaia, année 2010.
- [28] **E. Schiller,** « Le pompage photovoltaïque » manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, universités d'Ottawa, EIER / CERR, 1998.
- [29] **M .BELHADJ ;** Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome Mémoire de Magister ; Centre Universitaire De Bechar ; 2008.

[30] **A. MIRICKI** « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.

[31] <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/03/ZENATA-TAHER.pdf>

[32] **Mahmoud A. El-Dabah** , Ragab A. El-Sehiemy ., Hany M. Hasanien , Bahaa Saad ., Photovoltaic model parameters identification using Northern Goshawk Optimization algorithm. Energy., 262. 2023. 125522.

[33] **A. Mraoui , B. Benyoucef** , L. Hassaine. Experiment and simulation of electrolytic hydrogen production: Case study of photovoltaic-electrolyzer direct connection. International journal of hydrogen energy. 43. 2018 :3441- 3450.

[34] **EIBAHRI Fatima et SAADOUNI Ibtissem**. Etude, dimensionnement et simulation d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque.

Mémoire MASTER physique énergétique. Univ Adrar. Juin 2016.

[35] Agence Météorologique-touggourt.

Résumé

Ce travail vise à mener une étude de dimensionnement d'un Système photovoltaïque Orienté pour alimenter l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène vert à la willaya de Touggourt.

Dans notre étude, nous nous sommes appuyés sur un travail de calcul et simulation moyennant du logiciel d'Homer et un programme en Matlab pour quantifier le système photovoltaïque par stockage électrochimique (panne couplée à un électrolyseur de 1MW

Enfin, nous avons calculé la puissance crête nécessaire qui consommaient 168 KW, et les résultats obtenus étaient de 600 panneaux par panneau d'une capacité de 280 W et 488 batteries d'une Capacité de 200 Ah et tension de 12 volts, et transformateur de courant (convertisseur DC/DC) d'une puissance max de 200 kW, ensuite nous avons dimensionné notre système photovoltaïque (pour des cas général).

Mots-clés : Energie solaire photovoltaïque, hydrogène vert, électrolyseur, dimensionnement du système photovoltaïque, logiciel Homer,

ملخص

يهدف هذا العمل إلى إجراء دراسة تصميم لنظام كهروضوئي موجه لتغذية جهاز التحليل الكهربائي مخصص لإنتاج الهيدروجين الأخضر في ولاية تڤرت.

في دراستنا ، اعتمدنا على عمل حسابي ومحاكاة باستخدام برنامج Homer وبرنامج Matlab لتحديد

النظام الكهروضوئي عن طريق التخزين الكهروكيميائي (لوح مقترن بمحلل كهربائي 1 Mw).

أخيرا ، قمنا بحساب طاقة الذروة اللازمة التي استهلكت 168 KW ، وكانت النتائج التي تم الحصول

عليها 600 لوحة لكل لوحة ذات سعة 280 W و 488 بطارية بسعة 200 Ah و جهد 12 volts ، ومحول تيار

(DC/DC) بقوة قصوى تبلغ 200 kW ، ثم قمنا بحجم نظامنا الكهروضوئي (للحالات العامة).

الكلمات الرئيسية: الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، الهيدروجين الأخضر ، المحلل الكهربائي ، أبعاد النظام الكهروضوئي ، برنامج هومر ،

Summary

This work aims to conduct a sizing study of an Oriented Photovoltaic System to power the electrolyser to produce green hydrogen in the wilaya of Touggourt.

In our study, we relied on calculation and simulation work using Homer software and a Matlab program to quantify the photovoltaic system by electrochemical storage (failure coupled with a 1MW electrolyser

Finally, we calculated the peak power required which consumed 168 KW, and the results obtained were 600 panels per panel with a capacity of 280 W and 488 batteries with a capacity of 200 Ah and voltage of 12 volts, and transformer of current (DC/DC converter) with a maximum power of 200 kW, then we dimensioned our photovoltaic system (for general cases).

Keywords: Photovoltaic solar energy, green hydrogen, electrolyzer, sizing of the photovoltaic system, Homer software,