

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Electrotechnique Industrielle
Présenté par :

CHAOUCHE Mohammed Said

ARIBI Mohammed Salah

Thème :

Etude et analyse d'un système hybride autonome

Soumis au jury composé de :

M ^r BOUHAFS Ali	MCB	Président	UKM Ouargla
M ^r DJAFOUR Ahmed	Professeur	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r KOUACHE Ahmed Zouhir	Doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla
M ^{me} BENBOUZA Naima	MCB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

DÉDICACES

Je dédie ce travail à :

Mon gentil père est mon modèle et mon idéal dans la vie. Il m'a appris à vivre avec dignité et dignité.

Ma tendre mère, je ne trouve pas de mots qui puissent lui rendre ce qui lui est dû, car elle est l'épopée de l'amour et de la joie de vivre, et l'exemple du dévouement et du don.

Mes frères sont mon soutien, mon soutien, mes joies et mes peines.

Mes chers professeurs et tous mes amis et proches sans exception.

Et à tous ceux qui m'ont aidé à faire ce travail.

Aribi Mohammed Salah

DÉDICACES

Tous les mots ne peuvent exprimer la gratitude, l'amour, le respect et l'appréciation... Je dédie juste ce mot à ma chère maman. Aussi expressives que soient les phrases, elles ne peuvent pas montrer le degré d'amour et d'affection que je ressens pour vous. Mon cher père qui n'a jamais cessé de me soutenir et de m'encourager tout au long de mes années scolaires, tu as toujours été à mes côtés.

Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

A mes chers frères et soeurs qui sont toujours à mes côtés

Et pour chaque famille shush

A mon cher partenaire dans cette note, Arab Mohamed Salah

Et à nos chers amis et camarades (Hisham - Riad - Iqbal - Ramzi

Akram Taqi)

A tous mes professeurs depuis le primaire jusqu'à maintenant, et je n'oublie pas le Département de Génie Electrique de Ouargla..

Chaouche Mohammed Said

REMERCIEMENTS

Et surtout nous remercions notre Seigneur Dieu pour nous
Donner du courage et de la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre
encadreur Le Professeur *DJAFOUR Ahmed* et à notre co-
encadreur *M^r. KOUACHE Ahmed Zouhir*, qui ont fait
d'énormes efforts en nous fournissant des informations, et nous
tenons également à remercier les membres du jury *M^r.*
BOUHAFS Ali et *M^{me} BENBOUZA Naima*, qui nous ont fait
l'honneur d'avoir accepté de participer au jury de ce mémoire.

Nous remercions aussi tous les professeurs du Département de
génie électrique.

Nos derniers remerciements à tous ceux qui ont été de près ou de
loin, avoir contribué à la réalisation de ce mémoire.

LISTE DES ACRONYMES

LES ACRONYMES	LES DEFINITIONS
TSM	Temps solaire moyenne
TU	Temps universel
ET	Equation du temps
TL	Temps légal
PV	Photovoltaïque
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PAC	Pile A Combustible
PEM	Proton Exchange Membrane (Membrane d'échange de protons)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Pile à Combustible à Membrane d'Echange de Protons)
GE	General Electric
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique)
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell (Pile à Combustible au Méthanol Direct)
DEFC	Direct Ethanol Fuel Cell (Pile à Combustible à l'Ethanol Direct)
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (Pile à combustible à acide phosphorique)
AFC	Alkaline Fuel Cell (Pile à combustible alcaline)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Pile à combustible au carbonate fondu)

SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Pile à combustible à oxyde solide)
WOA	Whale optimizaton algorithm
HOMER	Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources
NREL	National Renewable Energy Laboratory

LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Définitions	Unités
O_2	Oxygène	[-]
h	Est la constante de Planck	[-]
c/λ	La fréquence (en hertz) de l'onde électromagnétique	[Hz]
Φ	Latitude du lieu	[-]
δ	La déclinaison du soleil	[-]
w	L'angle horaire	[-]
λ	En degrés, elle est positive (+) en Est, et négative (-) en West	[-]
N	Numéro du jour.	[-]
ET	Equation du temps	[-]
P	Pression atmosphérique	[atm]
Z	Altitude	[m]
h	Hauteur du soleil	[Km]
C	La correction de distance	[-]
(W_1, W_2)	Sont les valeurs de (W) entre les quelles $\cos(i)$ est positif, le soleil étant au – dessus de l' horizon.	[-]
β	L'inclinaison du capteur	[-]
ρ	Albedo	[-]
H^+	Protons	[-]
e^-	Électron	[-]
H_2O	L'eau	[-]
H_2	Hydrogène	[-]
SO_3	Groupes sulfoniques	[-]
CO_2	Le dioxyde de carbone	[-]
KOH	L'hydroxyde de potassium	[-]
OH^-	Ion hydroxyde	[-]
Y_2O_3	L'yttrium	[-]

CH₄	Méthane	[-]
V_{PAC}	La tension aux bornes de la pile à combustible	[V]
E_{nernst}	La tension théorique	[V]
R_{act}	La résistance d'activation	[Ω]
R_{con}	La résistance de concentration	[Ω]
V_{act}	La surtension d'activation.	[V]
V_{ohm}	La surtension ohmique	[V]
V_{conc}	La surtension de concentration	[V]
ΔG	Le changement d'énergie libre	[J/k. mol]
ΔS	Le changement d'entropie	[J/k. mol]
F	La constante de faraday	[C/k. mol]
T	La température de fonctionnement de la pile	[k]
T_{ref}	La température de référence	[k]
R	La constante universelle du gaz	[J/k. mol]
P_{H₂}[*]	La pression partielle à l'interface d'hydrogène	[atm]
P_{O₂}[*]	La pression partielle à l'interface d'oxygène	[atm]
RH_a	L'humidité relative à l'anode	[%]
RH_c	L'humidité relative à la cathode	[%]
P_{anode}	La pression de l'hydrogène à l'anode.	[atm]
P_{cathode}	La pression de l'oxygène à la cathode.	[atm]
P_{H₂O}^{sat}	La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié	[atm]
ξ₁, ξ₂, ξ₃, ξ₄	Coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC	[-]
I_{PAC}	Le courant de fonctionnement de la pile	[A]
CO*₂	La concentration d'oxygène à la surface de la catalyseur	[mol/C ³]
R_c	La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	[Ω]
R_m	La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons	[Ω]

l	L'épaisseur de la membrane	[μm]
A	La surface active de la pile	[cm^2]
ρ_M	La résistivité spécifique de la membrane	[$\Omega \cdot \text{cm}$]
$\lambda_{\text{H}_2\text{O}/\text{SO}^{-3}}$	La teneur en eau dans la membrane	[-]
J	La densité de courant	[A/cm^2]
J_{max}	La densité de courant maximale	[A/cm^2]
b	La constante électrochimie	[V]
Q_{H_2}	Le débit d'hydrogène	[ml/min]

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Liste des Acronymes	
Liste des Symboles	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	

Table des matières

CHAPITRE I : Gisement solaire et énergie photovoltaïques

I.1	Introduction.....	3
I.2	Données relatives au soleil.....	3
I.3	Rayonnement solaire hors atmosphère	3
I.4	Position du soleil et le temps.....	4
I.4.1	Position du soleil	4
I.4.2	Définition des différents temps	5
I.5	Influence de l’atmosphère sur le rayonnement solaire.....	7
I.6	Rayonnement solaire au niveau du sol.....	8
I.6.1	Éclairement solaire	8
I.7	Rayonnement solaire en Algérie	9
I.8	Energie photovoltaïque	10
I.8.1	Fonctionnement d’une cellule photovoltaïque	11
I.8.2	Modélisation mathématique d’un panneau PV.....	11
I.9	Conclusion	15

CHAPITRE II : Hydrogène et pile à combustible

II.1	Introduction.....	16
II.2	Propriété de l'hydrogène.....	16
II.3	Modes de production d’hydrogène	17
II.4	Stockage de l'hydrogène.....	18

II.4.1	Sous pression	19
II.4.2	Sous forme liquide	19
II.4.3	Forme solide	20
II.5	Production de l'hydrogène par les Énergies renouvelables	20
II.6	Production de l'hydrogène par l'énergie solaire	22
II.7	Production par l'électrolyse de l'eau	22
II.8	Principe de fonctionnement l'électrolyse de l'eau	22
II.8.1	Relation de Nernst	24
II.8.2	Tension d'électrolyse.....	24
II.8.3	Loi de Faraday	24
II.9	Différentes technologies d'électrolyseurs	25
II.9.1	Electrolyseurs alcalins	25
II.9.2	Electrolyseurs PEM	25
II.9.3	Electrolyseurs à haute température	26
II.10	Historique générale de la pile à combustible	27
II.11	Structure d'un module (stack).....	28
II.12	Principe de fonctionnement	29
II.13	Différents types des piles à combustible.....	30
II.14	Avantages et les inconvénients de la pile à combustible	31
II.14.1	Avantages.....	31
II.14.2	Inconvénients	31
II.15	Applications des piles à combustibles	31
II.15.1	Applications transports	31
II.15.2	Applications stationnaires.....	31
II.15.3	Applications portables	32
II.15.4	Applications militaires et spatiales	32
II.16	Principe de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM.....	32
II.17	Modélisation mathématique de la pile PEMFC	33
II.17.1	Tension Nernst.....	34

II.17.2	Surtension d'activation	35
II.17.3	Surtension ohmique	35
II.17.4	Surtension de concentration.....	35
II.18	Conclusion	36
CHAPITRE III :Analyse et optimisation du système hybride par HOMER		
III.1	Introduction.....	37
III.2	Présentation du système hybride.....	37
III.3	Identification de paramètres du module PV.....	39
III.4	Principe de la méthode algorithme d'optimisation des baleines.....	39
III.4.1	Encerclement de la proie.....	40
III.4.2	Attaqué par le filet à bulles	41
III.4.3	Recherche de la proie.....	41
III.5	Fonction objectif	41
III.6	Application de la méthode algorithme d'optimisation des baleines	42
III.7	Analyse d'un système hybride autonome	44
III.7.1	Présentation du logiciel HOMER	45
III.7.2	Données relatives à l'ensoleillement moyen au site de Ouargla	45
III.7.3	Configuration du système	46
III.7.4	Résultats optimisés	46
III.7.5	Production et consommation d'énergie électrique.....	47
III.7.6	Puissance de sortie du générateur photovoltaïque	49
III.7.7	Puissance de sortie du Pile à combustible	50
III.7.8	Consommation de l'électrolyseur.....	51
III.7.9	Convertisseur	52
III.7.10	Réservoir d'hydrogène	52
III.7.11	Batteries	53
III.7.12	Coût du système	53
III.8	Conclusion	54
	Conclusion générale	54

Références Bibliographiques

Annexes

LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES DES FIGURES	PAGES
CHAPITRE I		
Figure I.1	spectre solaire AM0 et AM1 et le corps noir à 5760 K	4
Figure I.2	Sphère céleste, et plan de l'écliptique	5
Figure I.3	Bilan du rayonnement solaire au niveau du sol	8
Figure I.4	Rayonnement solaire en Algérie	9
Figure I.5	Données climatiques d'Ouargla (1996-2005)	10
Figure I.6	Principe de fonctionnement d'une cellule PV.	11
Figure I.7	Modèle équivalent d'une cellule PV	12
Figure I.8	Caractéristique d'un photovoltaïque pour différents éclairagements	14
Figure I.9	Caractéristique d'un module photovoltaïque pour différents températures	15
CHAPITRE II		
Figure II.1	Produire de l'hydrogène à partir de différentes sources.	18
Figure II.2	formes principales de stockage l'hydrogène.	20
Figure II.3	Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène.	21
Figure II.4	Mécanisme de l'électrolyse.	23
Figure II.5	Principe de l'électrolyse alcaline	25

Figure II.6	Principe schématique de l'électrolyse PEM.	26
Figure II.7	Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.	27
Figure II.8	L'expérience de Sir William, inventeur historique de la pile à combustible.	28
Figure II.9	Exemple de stack chez ZSW (23 cellules).	29
Figure II.10	Principe de fonctionnement.	30
Figure II.11	Principe d'une pile à combustible de type PEM.	33
CHAPITRE III		
Figure III .1	Schéma du système hybride	38
Figure III .2	Stratégie d'alimentation au filet à bulles des baleines à bosse.	39
Figure III .3	Stratégie de « bubble-net feeding ».	40
Figure III .4	Maquette d'expérimentations.	42
Figure III .5	Courbe tension-puissance.	43
Figure III .6	Courbe courant-tension.	44
Figure III .7	Radiation globale horizontale mensuelle à Ouargla.	45
Figure III .8	Montage du système hybride.	45
Figure III .9	Configuration proposée par le logiciel HOMER.	46
Figure III .10	Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.	48
Figure III .11	Production journalière de panneau photovoltaïque.	49
Figure III .12	Production journalière de la pile.	50
Figure III .13	Production journalière de l'électrolyseur	51

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	TITRE	PAGE
CHAPITRE I		
Tableau I.1	Liste des stations par zone énergétique.	10
CHAPITRE II		
Tableau II.1	Caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène.	17
Tableau II.2	Différents types de la pile à combustible.	30
CHAPITRE III		
Tableau III.1	Charge et temps de fonctionnement	38
Tableau III.2	Spécification du module solaire NM54P	42
Tableau III.3	Résultats de l'optimisation.	43
Tableau III.4	Architecture du système PV-Hydrogène.	47
Tableau III.5	Energie annuelle produite.	47
Tableau III.6	Energie annuelle consommée.	47

Tableau III.7	Caractéristique de fonctionnement du panneau photovoltaïque.	48
Tableau III.8	Paramètres de fonctionnement de la pile à combustible.	49
Tableau III.9	Paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur.	50
Tableau III.10	Paramètres de fonctionnement du convertisseur.	51
Tableau III.11	Paramètres de fonctionnement du stockage d'hydrogène.	52
Tableau III.12	Paramètres de fonctionnement du Batteries.	52
Tableau III.13	Tarifs des équipements.	53

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Aujourd'hui, une part importante de la production mondiale d'énergie est alimentée par des combustibles fossiles. La consommation de ces sources entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est que l'épuisement excessif des stocks de ressources naturelles réduit ce stock d'énergie de manière dangereuse pour les générations futures, et face aux multiples crises économiques et pétrolières, la communauté scientifique s'est intéressée aux ressources dites renouvelables, qui constituent un secteur stratégique occupant une place particulière dans la recherche et le développement.

Aujourd'hui, il existe plusieurs sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. Le principal avantage de ces sources d'énergie renouvelables est que leur utilisation ne pollue pas l'atmosphère et ne produit pas de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui contribuent au réchauffement climatique [1].

Comme toutes les énergies renouvelables, elles présentent des inconvénients : Premièrement, les installations nécessaires pour les exploiter pendant de nombreuses années sont relativement coûteuses. De plus, l'énergie solaire est soumise aux caprices de la nature et, les jours de vent, la lumière peut gravement interférer avec l'énergie éolienne et solaire et peut ne pas être disponible à tout moment de la journée.

Pour cela, il fallait trouver une solution adaptée et idéale ; cela a conduit à l'idée d'un système hybride, qui a montré des résultats très efficaces. L'hydrogène est considéré par de nombreux scientifiques comme l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur. L'hydrogène est la forme d'énergie la moins nocive pour l'environnement. Il est équipé d'un circuit d'alimentation fermé et peut être utilisé dans diverses applications telles que la production d'électricité et le chauffage domestique.

Notre recherche a porté sur l'analyse d'un système hybride et son application pratique. Le sujet traité est une charge alimentée par un système hybride. Ce système est défini comme une fusion de deux sources d'énergie distinctes. L'objectif central de cette analyse est l'exploration de deux catégories distinctes d'énergie : l'énergie conventionnelle non renouvelable et l'énergie renouvelable. Le système hybride peut être efficacement mis en œuvre sur la charge en utilisant des panneaux solaires en combinaison. Le stockage et le transfert d'énergie peuvent être réalisés grâce à l'utilisation de piles à combustible et de batteries selon les besoins.

INTRODUCTION GENERALE

Nous avons décidé de structurer notre travail en conséquence :

Dans le premier chapitre, il y a des descriptions de plusieurs concepts importants qui se rapportent à l'énergie solaire et aux champs solaires, y compris une brève mention de chacun. Le principe de fonctionnement, ainsi que les avantages et les inconvénients des différents types, sont des facteurs importants à prendre en compte lors de leur évaluation. Le deuxième chapitre propose une introduction à l'hydrogène, à son transport et à son stockage, ainsi qu'un aperçu complet des piles à combustible, de leurs caractéristiques et de leurs diverses applications. De plus, le chapitre explore la modélisation mathématique de la pile à combustible de type PEMFC. Le troisième et dernier chapitre consistera à simuler le système hybride. En utilisant les logiciels Matlab et Homer Pro, par le choix de la configuration optimale du système en se passant sur des critères technico économique.

CHAPITRE I
Gisement solaire et énergie
photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil a joué un rôle dominant depuis des temps immémoriaux pour différentes activités naturel dans l'univers et sur terre en particulier. Il continuera à le faire jusqu'à la fin des temps [2]. La source d'énergie solaire est l'une des sources importantes dans notre vie quotidienne, car nous pouvons en bénéficier dans le processus de chauffage ou de génération d'énergie électrique au moyen de cellules solaires. Par conséquent, notre dépendance à l'égard de la source de lumière solaire est devenue un objectif principal pour fournir une énergie renouvelable exempte de toute émission susceptible de polluer l'environnement qui nous entoure, et l'énergie solaire joue un rôle important en tant qu'énergie énorme que nous pouvons exploiter n'importe où sur terre.

I.2 Données relatives au soleil

Le soleil est une sphère gazeuse de 1391000 km de diamètre situé à une distance moyenne de 149598000 km de la terre cette distance varie peu au cours de l'année (+/- 1.65 %) puisque l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée $e = 0.017$. Elle conduit néanmoins à des variations d'éclairement de (6.7%) au bénéfice de l'hiver, on estime par ailleurs qu'entre les périodes calmes et les périodes de grandes éruptions solaires, la variation d'intensité ne dépasse pas (4%). Les rayons solaires, et par suite des interactions thermonucléaires parviennent sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur allant de $0.2\mu\text{m}$ (ultra-violet) à $0.4\mu\text{m}$ (infrarouge). Ces radiations constituent la matière première de l'énergie solaire [3].

I.3 Rayonnement solaire hors atmosphère

L'essentiel du rayonnement solaire hors atmosphère se trouve dans l'intervalle spectral ($0.25 - 0.4\mu\text{m}$). La figure (1.1) représente la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère, elle est assez proche de la répartition spectrale de l'émission du corps noir à la température à $T = 5760\text{ K}$ [3].

Les rayons à ondes longues qui parviennent à la surface de la terre sont principalement :

- 10% dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- 40% dans la bande visibles (0.4 à $0.8\mu\text{m}$).
- 50% dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$) [4].

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ selon la relation :

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Avec E_f : Est l'énergie du photon.

h : est la constante de Planck.

c/λ : La fréquence (en hertz) de l'onde électromagnétique.

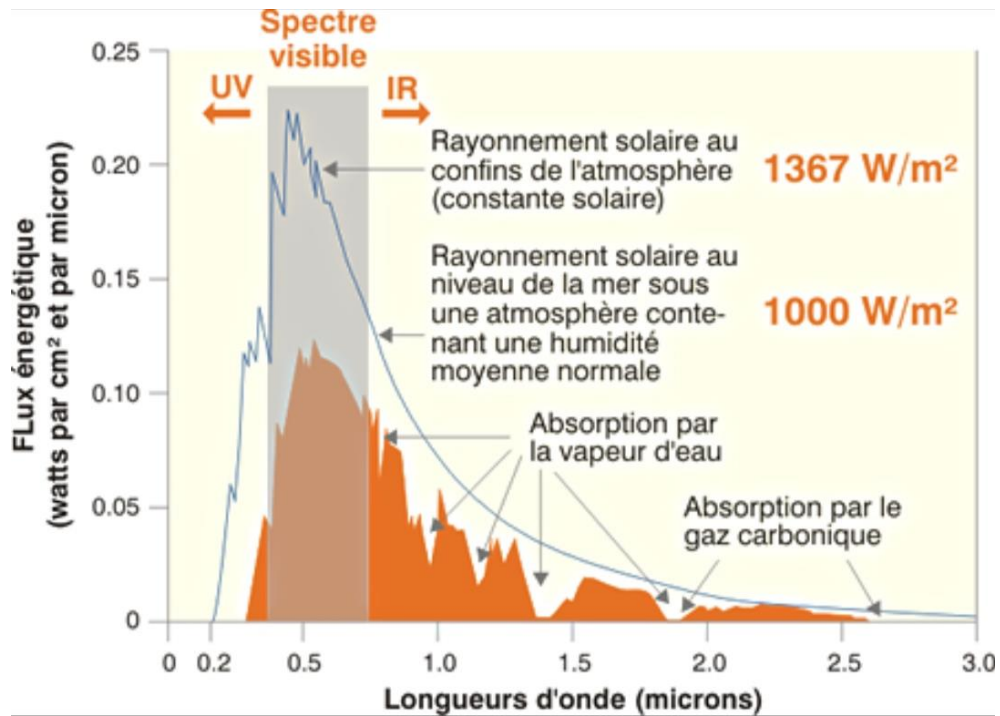


Figure I.1 : spectre solaire AM0 et AM1 et le corps noir à 5760 K

I.4 Position du soleil et le temps

I.4.1 Position du soleil

I.4.1.1 Déclinaison solaire (δ)

C'est l'axe imaginaire perpendiculaire au plan de l'écliptique traversant le centre de la terre. Entre l'axe imaginaire passant par les pôles célestes et l'axe imaginaire passant par les pôles écliptiques, il y a un angle de $23^\circ 27'$ [5].

I.4.1.2 Hauteur du soleil (h)

C'est la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon

$$\sin(h) = \sin(\Phi) \times \sin(\delta) + \cos(\Phi) \times \cos(\delta) \times \cos w \quad (\text{I.2})$$

Avec, Φ : Latitude du lieu

δ : La déclinaison du soleil

w: L'angle horaire

I.4.1.3 Azimut du soleil ψ

C'est l'angle entre la projection du rayon solaire sur le plant horizontal et la direction sud

$$\sin(\psi) = \cos(\delta) \times \sin(w) \div \cos(h) \quad (\text{I.3})$$

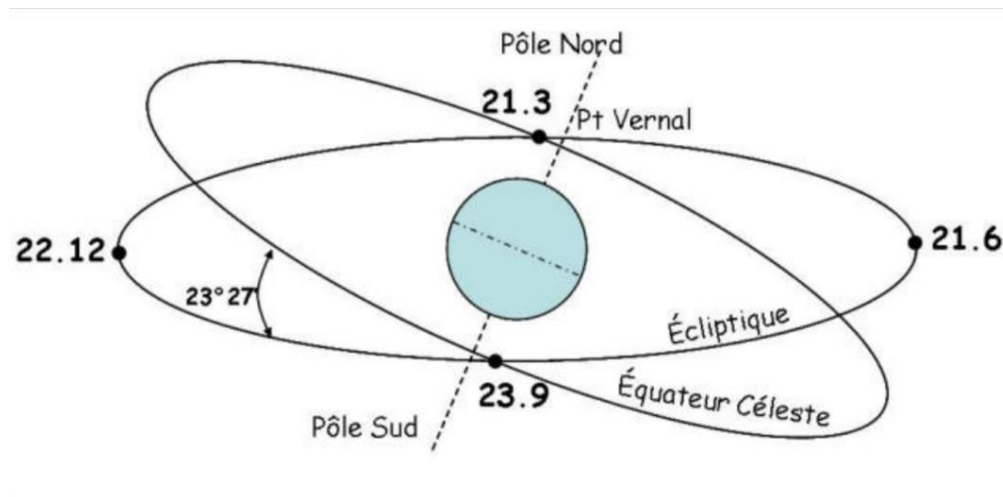


Figure I.2 Sphère céleste, et plan de l'écliptique

I.4.2 Définition des différents temps

I.4.2.1 Temps solaire vrai

C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même et son mouvement autour du Soleil. Son introduction est naturelle, car il est lié à l'alternance des jours et des nuits. C'est le TSV qui est indiqué sur les cadrans solaires. $TSV = 12h$ pour la valeur nulle de l'angle horaire [6].

On peut trouver le temps solaire vrai par la formule suivante

$$TSV = 12 + W \div 15 \quad (\text{I.4})$$

I.4.2.2 Temps solaire moyenne (TSM)

La vitesse de la Terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année. Pour avoir un temps qui " s'écoule " à vitesse constante (celui mesuré par les horloges), on définit donc un temps solaire moyen. La journée solaire moyenne a été utilisée pour définir les unités de temps. On a encore avec une bonne précision 1 jour = 24h 00m 00s. L'écart entre TSV et TSM varie selon la

date, mais est nul en moyenne, par définition et l'expression de cet écart porte le nom de " Equation du temps " [6].

I.4.2.3 Temps universel (TU)

C'est le temps solaire moyen (TSM) du méridien fondamentale (Méridien de Greenwich), pour un lieu de longitude λ on a :

$$\text{TSM} = \text{TU} + \lambda \div 15 \quad (\text{I.5})$$

λ : En degrés, elle est positive (+) en Est, et négative (-) en West.

I.4.2.4 Equation du temps (ET)

Le mouvement apparent du Soleil n'est pas parfaitement régulier pour deux raisons, La rotation de la terre se fait selon l'axe nord-sud, alors que le mouvement de la terre par rapport au soleil s'effectue dans le plan de l'écliptique. La vitesse angulaire de la Terre dans son mouvement héliocentrique n'est pas constante (loi des aires) [6].

La durée des journées varie donc légèrement (entre 23 h 59 m 39 s et 24h 00m 30s). Cette différence n'a guère d'importance à l'échelle d'une journée mais, si on l'intègre tout au long de l'année, elle entraîne l'existence d'un écart entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen

$$\text{ET} = \text{TSV} - \text{TSM} \quad (\text{I.6})$$

En faisant l'approximation que le même cycle recommence au début de chaque année (voir remarque ci-dessus), Et est donnée avec une bonne précision, en minutes, par la formule suivante

$$\text{ET}(\text{N}) = 9.87 \sin(2\text{B}) - 7.53 \cos(\text{B}) - 1.5 \sin(\text{B}) \quad (\text{I.7})$$

$$\text{B} = \left(\frac{360}{365}\right) \times (\text{N} - 81) \quad (\text{I.8})$$

Avec : N : numéro du jour.

ET : équation du temps en minutes.

I.4.2.5 Temps légal (TL)

On définit le temps universel (TU) comme le temps TSM du méridien de Greenwich. Le temps légal (TL) est ce temps augmenté d'un décalage DE qui dépend du fuseau horaire considéré La suite des relations qui relient le temps solaire vrai au temps légal est donc [6].

$$\text{TSV} = 12 + (\text{W} \div 15) \quad (\text{I.9})$$

$$\mathbf{TSM} = \mathbf{TSV} - (\mathbf{Et} \div 60) \quad (\mathbf{I.10})$$

$$\mathbf{TU} = \mathbf{TSM} - (\lambda \div 15) \quad (\mathbf{I.11})$$

$$\mathbf{TL} = \mathbf{TU} + \mathbf{DE} \quad (\mathbf{I.12})$$

$$\mathbf{DE} = \mathbf{TL} - 12 \quad (\mathbf{I.13})$$

I.4.2.6 Durée astronomique du jour (S0)

De la hauteur de soleil (h) on peut déduire les heures de lever et de coucher de soleil. On trouve en faisant, $h = 0$.

$$\cos(ws) = -(\tan(\Phi) \times \tan(\delta)) \quad (\mathbf{I.14})$$

La durée astronomique du jour s'obtient tout aussi facilement en écrivant :

$$\mathbf{S0} = \left(\frac{2}{15}\right) \times \cos^{-1}(-\tan(\Phi) \times \tan(\delta)) \quad (\mathbf{I.15})$$

I.5 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Après avoir atteint la Terre, le rayonnement solaire change considérablement, principalement en raison de phénomènes d'absorption et/ou de diffusion par les aérosols (poussières d'origines diverses) et par les molécules d'eau et différents gaz (azote, oxygène, dioxyde de carbone, etc.) présent dans l'atmosphère environnante. Ces changements de rayonnement dépendent de plusieurs facteurs (composition atmosphérique, épaisseur, etc.) qui varient selon le lieu et le temps. La référence spectrale pour un éclaircissement donné est obtenue en combinant ces facteurs en un paramètre représentant l'épaisseur de l'atmosphère traversée.

Ce paramètre est appelé "Air Mass" ou "Air Mass AM Quantité" et caractérise le trajet du rayon dans l'atmosphère. En prenant comme unité de référence l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne ramenée à 7800 mètres (condition dite normale), en supposant cette couche plane, la longueur de la trajectoire rectiligne d'un rayon incliné d'un angle (h) par rapport à l'horizontale sera donnée par [3].

$$\mathbf{AM} = \left(\frac{\mathbf{P}}{101.3 \times 10^3}\right) \times \left(\frac{1}{\sin h}\right) \times e^{\frac{-z}{7800}} \quad (\mathbf{I.16})$$

Avec :

- P: Pression atmosphérique (pa).
- Z: Altitude (m)
- $101.3 \cdot 10^3$: Pression de référence.
- h : Hauteur du soleil.
- 7800 : Epaisseur réduite de l'atmosphère (m).

I.6 Rayonnement solaire au niveau du sol

Après avoir traversé l'atmosphère, une partie du rayonnement incident parvient directement au sol, l'autre sera diffusé, une autre composante du rayonnement est mise en évidence, C'est la partie renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffusée par le sol, et qui varie en fonction du sol et de son état. Quelle que soit la surface réceptrice, le rayonnement globale incident est la somme des rayonnements direct et diffus parvenant à cette surface [7].

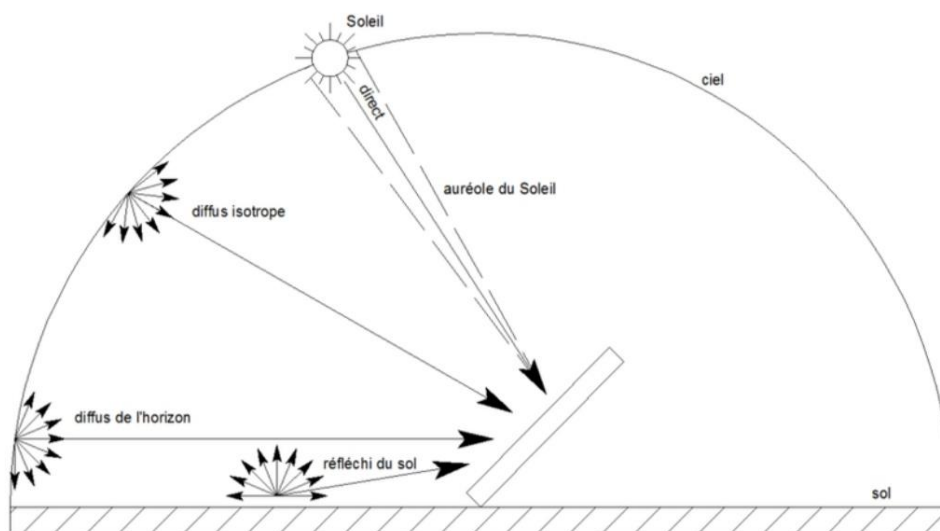


Figure I.3 : Bilan du rayonnement solaire au niveau du sol

I.6.1 Éclairement solaire

Nous introduisons la notion d'éclairement comme la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux dans les conditions atmosphériques, qui atteint 1 kW/m^2 pour un site situé au niveau de la mer. Il est important de préciser qu'en raison de la nature des nuages, de leur répartition dans le ciel, le capteur ne recevra pas la même quantité d'éclairement de toutes les directions, c'est pourquoi on parle de répartition anisotrope. Dans de rares cas (ciel complètement nuageux, la distribution est dite isotrope). La quantification de l'albédo dépend en grande partie de

la nature du sol. Par conséquent, un sol enneigé a des valeurs d'albédo plus élevées qu'un sol rocheux. A noter que les capteurs du capteur solaire ne répondront pas de la même manière lorsqu'ils sont en marche exposé au soleil Les cellules (PV) réagissent au rayonnement global et sont très dépendantes de la longueur d'onde. Il est particulièrement sensible au rayonnement solaire avec une longueur d'onde comprise entre (0,4 et 1) μm du spectre solaire.

Les capteurs thermiques (chauffe-eau, etc.) sont plus sensibles au rayonnement infrarouge [8].

I.7 Rayonnement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie constitue une région particulièrement ensoleillée sur Terre. En effet, les estimations basées sur les relevés météorologiques donnent les résultats suivants, avec des durées d'ensoleillement moyennes allant de 2650 heures/an au nord à 3500 heures/an au sud. L'énergie reçue par les surfaces horizontales varie de 1700 kWh/m²/an au nord à 2260 kWh/m²/an au sud, Le territoire de l'Algérie est divisé en huit zones d'énergie ou zones d'ensoleillement uniforme [9].

La zone de Ouargla est la station solaire numéro 22, elle est dans la zone énergétique Z.E 4, elle a les coordonnées suivantes :

- Latitude : 31° 57' N

- Longitude : 5° 24' E

- Altitude : 141 m

- Albédo : 0.35

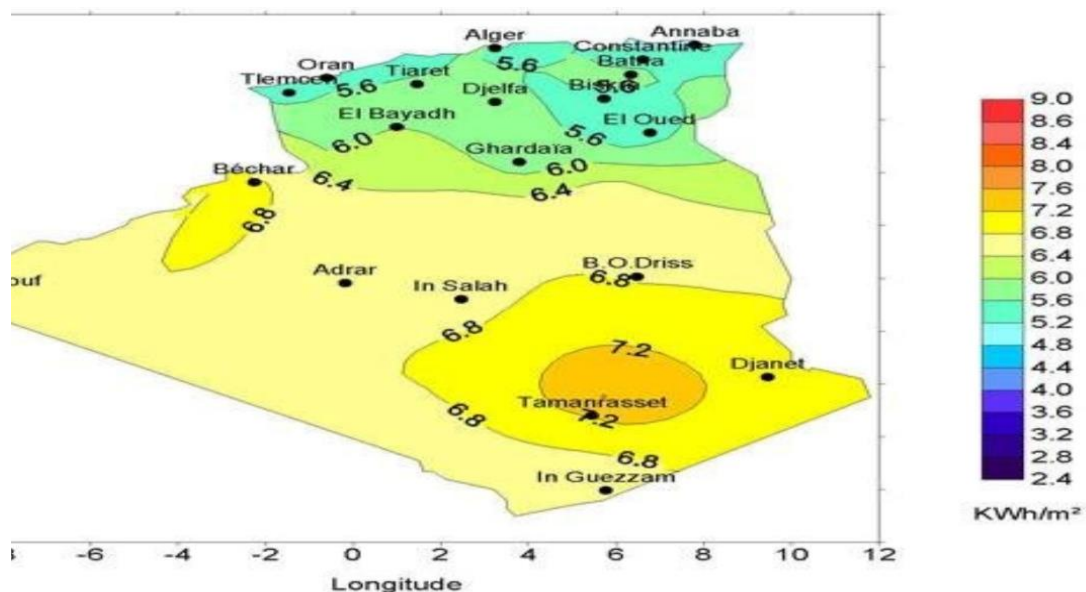


Figure I.4 : Rayonnement solaire en Algérie

ZE	Station de la ZE et N° AZA	Station type	ZE	Station de la ZE et N°AZA	Station type
ZE1	02	02 Annaba	ZE5	24 26 28 29 31 32 33 34 35	32 In Salah
ZE2	01 04 06 08 09 12	04 Alger	ZE6	25 27 30	30 Adrar
ZE3	07 10 11 15 17	10 Batna	ZE7	37	37 Tamanrasset
ZE4	14 16 18 19 20 21 22 23	22 Ouargla	ZE8	36	36 Djanet

Tableau I.1 : Liste des stations par zone énergétique.

Pour notre cas les données disponibles pour la région d'Ouargla est présenté comme suite :

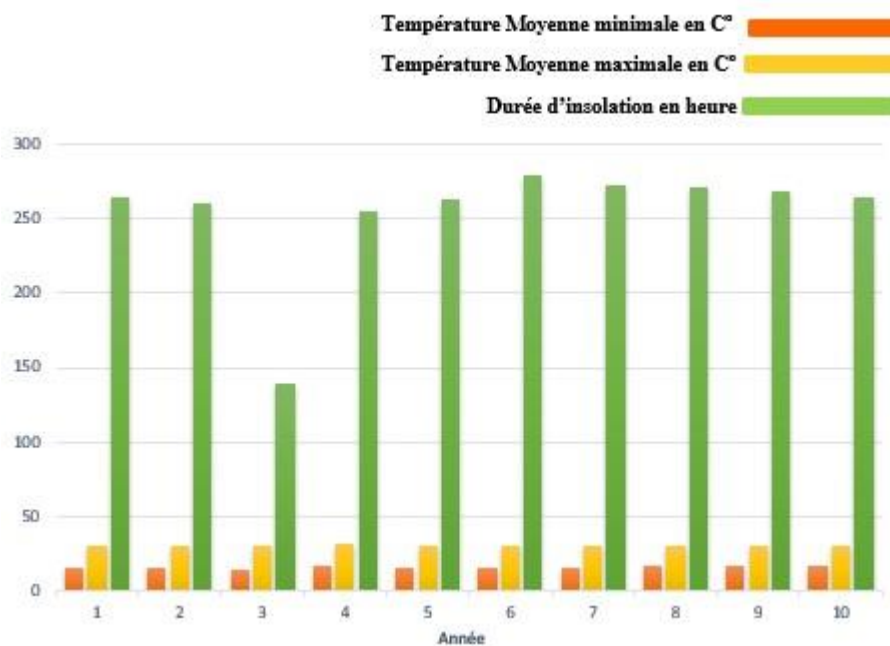


Figure I.5 : Données climatiques d'Ouargla (1996-2005)

Les diagrammes à barres suivants montrent les températures maximales et minimales moyennes, en plus de la durée du lever du soleil en heures, pour la région de Ouargla au cours de la période (1996-2005).

I.8 Energie photovoltaïque

Comprendre le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque est essentiel lorsque l'on souhaite recourir à cette technologie. Le module solaire photovoltaïque est un système capable de

capter l'énergie envoyée par le soleil vers la Terre, et de la convertir en courant électrique continu. Il existe également des équipements qui produisent de l'eau chaude à partir de l'énergie solaire [10].

I.8.1 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques capables de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, et ceci grâce à l'effet photovoltaïque. Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique. Le matériau semi-conducteur le plus massivement employé à l'heure actuelle par les fabricants de modules photovoltaïques demeure le silicium [11].

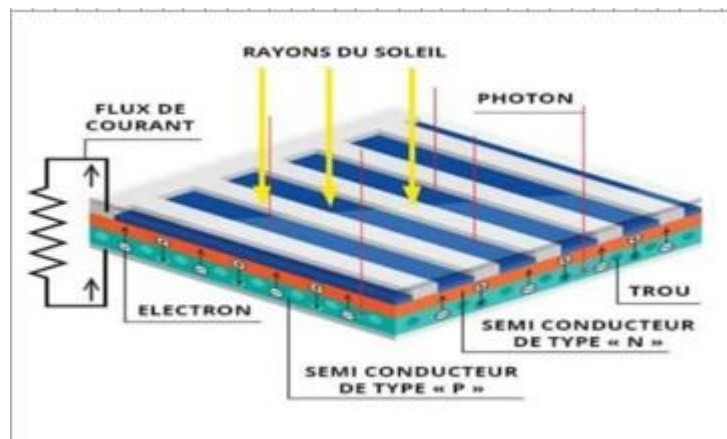


Figure I.6: Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

I.8.2 Modélisation mathématique d'un panneau PV

Un module solaire photovoltaïque (ou panneau solaire photovoltaïque) est un panneau constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement.

I.8.2.1 Modèle d'une seule diode

Figure I.7 montre le circuit électrique équivalent de modèle d'une diode. Le circuit est constitué d'une source de courant contrôlée I_{ph} (ou photo-courant) en parallèle avec une diode de jonction P-N. La diode ici imite la relation courant-tension (I-V) non-linéaire des cellules PV. De plus, deux résistances R_s et R_p sont incorporées pour représenter les pertes ohmiques de la cellule [12].

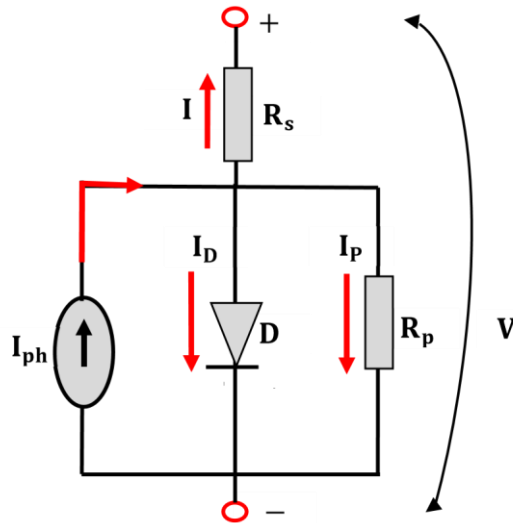


Figure I.7 : Modèle équivalent d'une cellule PV

Selon la loi de Kirchhoff, le courant de sortie (I) de cellules PV peut être écrit comme suit :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (\text{I.17})$$

Où, I_{ph} est le photo-courant, I_D est le courant de la diode, et I_p est les pertes de courant dus à la résistance R_p .

• **Le photo-courant (I_{ph})**

Ce courant est linéament couplé avec le rayonnement solaire incident (G). Il varie aussi avec la variation de température (T). L'équation utilisée pour estimer I_{ph} est donnée comme suite :

$$I_{ph} = [I_{cc} + \alpha_i \times (T - 298.15)] \times \frac{G}{1000} \quad (\text{I.18})$$

Avec :

I_{cc} : Courant de court-circuit de la cellule (A).

T : Température interne de la cellule (K).

α_i : Coefficient de température du courant (A/K).

• **Courant de la diode (I_D)**

Le courant de la diode peut être écrit comme suit :

$$I_D = I_0 \times \left[e^{\left(\frac{V+R_S \times I}{m \times V_T}\right)} - 1 \right] \quad (\text{I.19})$$

Avec :

V: Tension de sortie de la cellule (Volts).

R : Résistance série de la cellule dû au contact métallique présent aux bornes de la cellule (Ω).

m : Facteur d'idéalité de la diode.

V : Tension thermique $V_T = N_S \times K \times \frac{T}{q}$ Où, N_S est le nombre des cellules assemblées en séries, K est la constante du Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K), et q est la charge d'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

I : Courant de saturation de la diode (A), qui peut être trouvé par l'équation :

$$I_0 = I_{0,STC} \times \left(\frac{T}{298.15} \right)^3 \times e^{\left[\left(\frac{q \times E_g}{m \times K} \right) \times \left(\frac{1}{298.15} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (\text{I.20})$$

Avec :

$I_{0,STC}$: Courant de saturation aux conditions standards (i.e., $T=25^\circ\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$, et $AM=1.5$).

E_g : Energie du gap (1.12 eV).

• Courant parallèle (I_p)

Le courant I_p peut être calculé par l'application de l'équation.

$$I_p = \frac{V+R_S \times I}{R_p} \quad (\text{I.21})$$

Où, R_p est la résistance entre les couches P-N des cellules et le support métallique de cette dernière. Donc, l'expression finale du courant de sortie du panneau PV peut être exprimée comme suite :

$$I = I_0 \times \left[e^{\left(\frac{V+R_S \times I}{m \times V_T}\right)} - 1 \right] - \left[\frac{V+R_S \times I}{R_p} \right] \quad (\text{I.22})$$

I.8.2.2 Modèle à double diode

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (\text{I.23})$$

Où

$$I_{d1} = I_{S1} \times \left(e^{\left(\frac{V+R_S \times I}{n_1 \times V_{th}} \right)} - 1 \right) \quad (\text{I.24})$$

$$I_{d2} = I_{S2} \times \left(e^{\left(\frac{V+R_S \times I}{n_2 \times V_{th}} \right)} - 1 \right) \quad (\text{I.25})$$

$$I_p = \frac{V+R_S \times I}{R_p} \quad (\text{I.26})$$

I_{S1} et I_{S2} : les courants de diffusion et de saturation d'obscurité.

$V_{th} = \frac{K \times T}{q}$: tension thermique de jonction.

Le modèle de module PV à double diode est composé de nombreuses cellules connectées. La relation courant-tension est formulée par :

$$I = I_{ph} - I_{S1} \times \left(e^{\left(\frac{V+R_S \times I \times M}{n_1 \times V_{th} \times M} \right)} - 1 \right) - I_{S2} \times \left(e^{\left(\frac{V+R_S \times I \times M}{n_2 \times V_{th} \times M} \right)} - 1 \right) - \frac{V+R_S \times I \times M}{R_p \times M} \quad (\text{I.27})$$

I.8.2.3 Effets de l'éclairement et température sur les caractéristique VI et VP

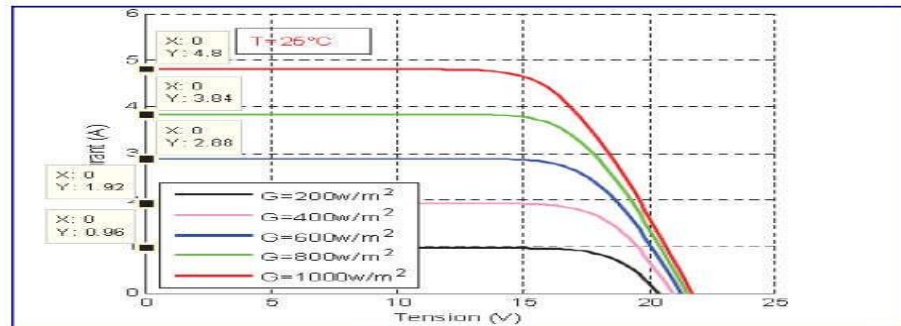


Figure I.8 : Caractéristique d'un photovoltaïque pour différent éclairements.

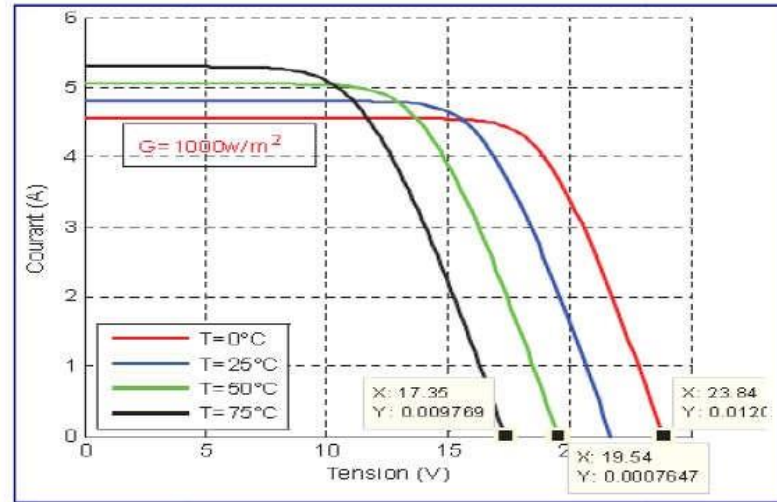


Figure I.9 : caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures.

La **Figure I.8** donne un exemple de courbes (I, V) pour différents niveaux de rayonnement à température constante. Lorsque l'éclairement augmente, le courant de court-circuit augmente, mais par contre, la tension change légèrement. Cela se traduit par une augmentation de la force.

Quant à **Figure I.9**, on voit que le courant dépend de la température, mais ce n'est pas le cas pour la tension. A chaque fois que la température augmente, on remarque que le courant augmente également légèrement, mais par contre la tension en circuit ouvert diminue, ce qui affecte négativement la puissance du générateur, qui diminue également [13].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes familiarisés avec les données du soleil et du rayonnement solaire en Algérie et son effet sur l'atmosphère, ainsi que le mouvement du soleil autour de lui-même et autour de la terre, et nous avons également abordé le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et la modélisation mathématique des modules photovoltaïques, et enfin les effets de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques de VI et VP des modules PV.

CHAPITRE II

**HYDROGENE ET PILE A
COMBUSTIBLE.**

II.1 Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple et le plus accessible de l'univers, son noyau est constitué d'un proton et ses atomes n'ont qu'un seul électron. La molécule de dihydrogène (H_2) est constituée de deux atomes d'hydrogène, et ce que nous appelons habituellement hydrogène signifie dihydrogène.

Les piles à combustible sont des convertisseurs d'énergie, et non des générateurs ou des sources d'énergie. Une pile à combustible convertit directement l'énergie chimique de la réaction d'un carburant (hydrogène, méthanol etc...) et d'un oxydant (habituellement oxygène ou air) en énergie électrique par une réaction d'oxydoréduction. Cette réaction consiste en l'oxydation d'un combustible d'une part (à l'anode) et en la réduction d'un comburant d'autre part (à la cathode) [16-17].

Ce chapitre introductif sur l'hydrogène et les piles à combustible poursuit plusieurs objectifs. Nous vous parlons d'abord de Propriété et Les modes de production et le stockage de l'hydrogène Et les différents types de production ,Ensuite sur l'électrolyseur d'eau et Principe de fonctionnement et ses différents types. Pour finir, on parle des piles à combustible et de leur histoire générale, puis on présente leurs différents types, puis on explique leur principe de fonctionnement, et quelques avantages et inconvénients des piles à combustible.

II.2 Propriété de l'hydrogène

Premier élément dans la table périodique. Dans la condition normale c'est un gaz sans couleur, inodore et insipide, constitué par les molécules diatomiques, H_2 . L'atome d'hydrogène, le symbole H, est constitué par un noyau avec une unité de charge positive et d'un électron. Son nombre atomique est 1 et son poids atomique 1, 00797. Il y a trois isotopes d'hydrogène : le protium, de masse 1, trouvé dans plus de 99.98% de l'élément normal ; le deutérium, de masse 2, trouvé dans la nature à approximativement 2%, et tritium, de masse 3, qui apparaît en petite quantité dans la nature. Il peut aussi être artificiellement produit par diverses réactions nucléaires, Dans ce tableau ci-dessous, nous découvrirons certaines propriétés de l'hydrogène [18].

Caractéristiques	Valeur numérique
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	12770 Kj/Nm^3 – 141860 Kj/Kg
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10800 Kj/Nm^3 – 119930 Kj/Kg
Masse volumique du gaz à P_{atm} et 273K	0.08988 Kg/Nm^3
Masse volumique de la vapeur à P_{atm} et 20.3K	1.34 Kg/m^3
Température de flamme dans l'air à 300K	2318k
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 Km/s
Cp (Capacité thermique massique à pression constante)	14266 $J/Kg \cdot k$
Cv (Capacité thermique massique à volume constante)	10300 $J/Kg \cdot k$
Conductivité thermique du gaz	0.1897 $W/m \cdot k$

Tableau II.1 : Caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène [19-20].

II.3 Modes de production d'hydrogène

Aujourd'hui, il existe plusieurs filières technologiques qui permettent de produire de l'hydrogène à partir de différentes sources. Les techniques de production consistent à extraire l'hydrogène H₂ de la ressource primaire, les Différentes techniques de production existent :

- Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO₂. Le CO₂ émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarboné.
- La gazéification permet de produire, par combustion, un mélange de CO et d'H₂ à partir de

charbon (solution qui émet beaucoup de CO₂) ou de biomasse.

- Une autre méthode utilise des composés organiques principalement constitués d'hydrogène et de carbone, comme le gaz naturel, le charbon ou la biomasse. Elle représente actuellement plus de 90% de la production d'hydrogène.
- La production de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Elle utilise soit un courant électrique pour l'électrolyse, soit une succession de réactions chimiques pour les cycles thermochimiques qui permettent de « casser » les molécules d'eau afin d'obtenir de l'hydrogène.
- Une autre filière utilise les énergies renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne (la lumière du Soleil et la force de vent).
- L'hydrogène peut également être produit via la production biologique par des algues, par réduction chimique, ou encore par la chaleur (thermolyse).
- L'hydrogène peut aussi être produit à partir l'énergie nucléaire [21].

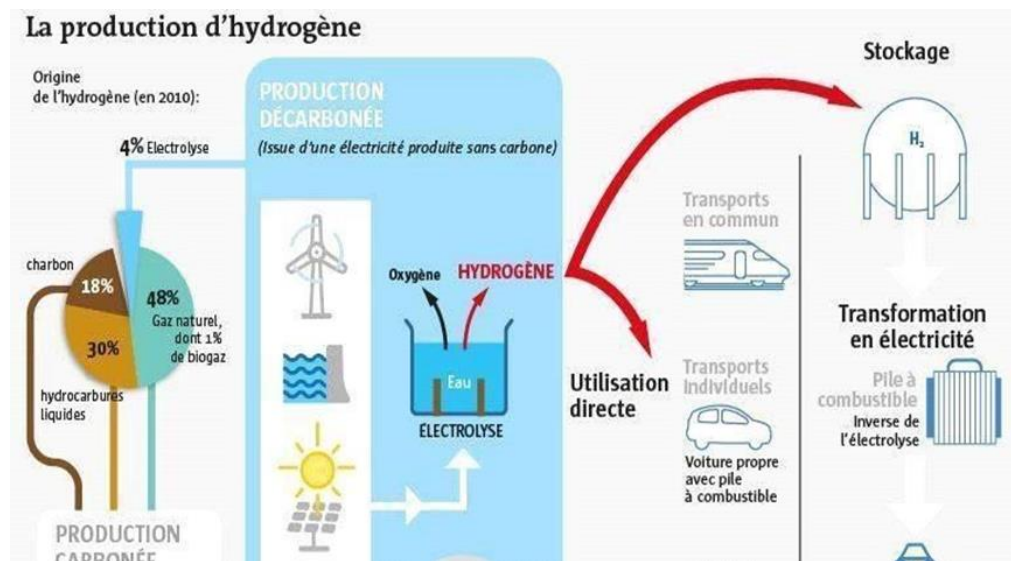


Figure II.1 : Produire de l'hydrogène à partir de différentes sources.

II.4 Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz ultraléger qui occupe un volume substantiel dans des conditions de pression standard, c'est-à-dire la pression atmosphérique. Un litre de ce gaz ne pèse que 90 mg sous pression atmosphérique normale, ce qui signifie qu'il est 11 fois plus léger que l'air que nous respirons. Afin de stocker et de transporter efficacement l'hydrogène, ce volume doit être considérablement réduit. Un volume d'environ 11 m³ est nécessaire pour stocker seulement 1 kg d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir 100 km. Pour cette raison, sa densité doit

être augmentée en utilisant l'une des techniques suivantes :

1. Stockage haute pression sous forme gazeuse
2. Stockage à très basse température sous forme liquide
3. Stockage à base d'hydrure sous forme solide

Pour un transport plus facile et plus efficace, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs ou des bouteilles en composite [22].

II.4.1 Sous pression

Le moyen le plus simple de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression. Ainsi, à 700 bar, soit 700 fois la pression atmosphérique normale, l'hydrogène a une densité de 42 kg / m³, contre 0,090 kg / m³ dans des conditions normales de pression et de température. A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 125 litres.

Aujourd'hui, la plupart des constructeurs automobiles ont opté pour la solution qui consiste à stocker l'hydrogène sous forme gazeuse, à haute pression. Cette technologie nous permet de stocker suffisamment d'hydrogène pour permettre à une voiture fonctionnant sur batterie à combustible de parcourir entre 500 et 600 km entre les pleins [22].

II.4.2 Sous forme liquide

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

L'hydrogène se transforme en liquide lorsqu'il est refroidi à une température inférieure à -252,87° C.

A -252,87 ° C et 1,013 bar, l'hydrogène liquide a une densité proche de 71 kg / m³.

A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 75 litres.

Afin de maintenir l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés. [22].

II.4.3 Forme solide

Le stockage de l'hydrogène sous forme solide, c'est-à-dire stocké dans un autre matériau, est également une piste de recherche prometteuse.

Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques impliquant des mécanismes d'absorption de l'hydrogène par un matériau.

Un exemple consiste à former des hydrures métalliques solides par réaction d'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption est le résultat de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes qui composent ces matériaux. Les matériaux les plus prometteurs sont composés de magnésium et d'alانات.

Seule une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, ce qui est actuellement le principal inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux génèrent actuellement un rapport poids d'hydrogène sur poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3% [22].



Figure II.2 : Les formes principales de stockage l'hydrogène.

II.5 Production de l'hydrogène par les Énergies renouvelables

Pierre-Etienne Franc, en charge de l'activité mondiale énergie hydrogène du groupe Air Liquide, en est convaincu, « l'électricité est le vecteur principal qui permettra, avec l'hydrogène, de se passer un jour des énergies fossiles ». Un lien étroit et vertueux peut être tissé entre hydrogène et énergies renouvelables intermittentes, solaires et éoliennes, notamment. Lorsque le soleil brille -

- ou que le vent souffle -- et seulement à ce moment-là, les panneaux photovoltaïques -- ou les éoliennes -- produisent de l'électricité. Lorsque la demande rencontre l'offre, tout se passe bien. Mais si l'électricité produite ne trouve pas preneur, elle est perdue. Sauf si elle peut être employée... à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. On parle alors de « Power to hydrogen ».

Cet hydrogène propre et durable peut alors servir différentes applications dans lesquelles il se substituera aux ressources fossiles. Il pourra intéresser les industriels et représenter pour eux un moyen de décarboner leurs procédés. Il pourra aussi servir à alimenter des stations de recharge pour véhicules roulant à l'hydrogène (voitures, camions, bus, chariots élévateurs, bateaux), des véhicules qui n'émettent ni particules fines ni CO₂ et qui ne rejettent que de l'eau. À ce titre, on peut mentionner le projet **Hy Balance**, mené par Air Liquide au Danemark. Il s'agit du plus grand site européen de ce type avec un électrolyseur de 1,2 MW produisant de l'hydrogène décarboné destiné à l'industrie et la mobilité. Le projet GRHYD, mené par Engie du côté de Dunkerque, expérimente quant à lui, l'injection d'hydrogène vert à hauteur de 20 % dans les réseaux de chauffage au gaz naturel.

L'électricité produite par la pile à combustible alimentée en hydrogène répond par ailleurs à de multiples besoins comme l'alimentation électrique de zones isolées ou encore l'alimentation de secours de sites sensibles. Et l'hydrogène peut aussi être utilisé comme un moyen de stockage de l'énergie renouvelable produite localement comme la montre la figure II.3. En somme cela permet d'assurer l'autonomie de sites dits « non électrifiés », c'est-à-dire non reliés au réseau électrique national [23].

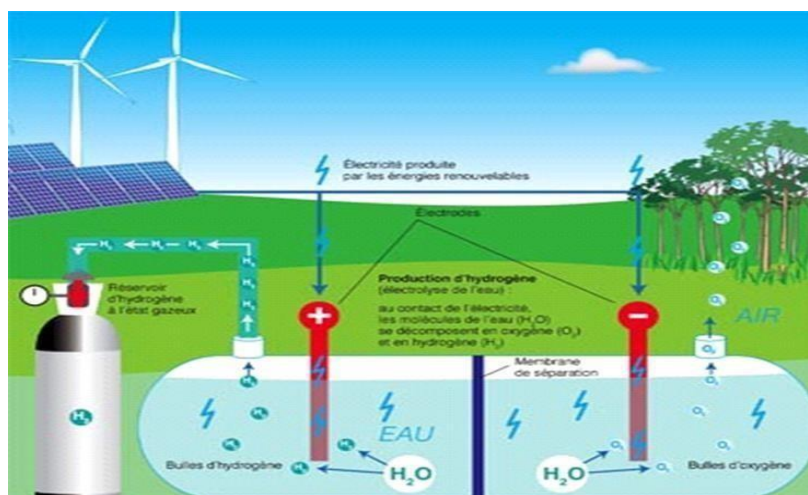


Figure II.3 : Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène.

II.6 Production de l'hydrogène par l'énergie solaire

Parmi les pistes explorées dans le secteur des énergies renouvelables, il y a celle de l'électrolyse de l'eau grâce à une cellule solaire.

Des ingénieurs belges ont mis au point un nouveau procédé pour produire de l'hydrogène à partir d'un système de panneaux solaires. Ce processus vise à diviser l'eau de l'air en deux parties : d'un côté l'hydrogène, de l'autre l'oxygène. Grâce à des panneaux solaires, ils utilisent 15 % de l'énergie solaire pour obtenir de l'hydrogène gazeux. Chacun peut produire jusqu'à 250 litres d'hydrogène par jour.

Les chercheurs ont mené à bien des études, pendant dix ans, pour parvenir à ce que chacun de ces panneaux solaires capables de transformer l'eau en hydrogène tout en produisant de l'électricité utilisable par ailleurs de 1,6 m² transforme 15 % de la lumière solaire en hydrogène gazeux à partir de la vapeur d'eau. Pour rappel, un panneau solaire classique transforme 18 à 20 % de l'énergie solaire en électricité [23].

II.7 Production par l'électrolyse de l'eau

En dehors de la réformation des gaz, l'électrolyse de l'eau est le procédé le plus développé et le plus utilisé dans l'industrie de production d'hydrogène car c'est la méthode la plus avantageuse écologiquement parlant (pas d'émission de CO₂).

Il s'agit d'une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène par le biais d'un courant électrique circulant entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique. Ce rendement énergétique varie entre 50% à 92% selon la technologie utilisée [24].

Etant donnée la cherté de cette méthode due à l'utilisation de métaux nobles dans les electrocatalyseurs (Platine), seul 4% de l'hydrogène est actuellement produit par électrolyse. Et ce dans les cas où l'électricité est bon marché, ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire. La recherche se concentre donc principalement sur l'utilisation de matériaux moins onéreux et tout aussi performants pour la conception d'électrolyseurs [24].

II.8 Principe de fonctionnement l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique, qui crée un champ électrique orienté dans lequel les ions se mettent en

mouvement (les cations se dirigent vers la cathode et les anions vers l'anode). Cette tension dépend essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de la réaction, ce potentiel théorique de la décomposition est de 1,481 V à 298 K mais les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1,7 à 2,1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85%, C'est ce que montre la figure II.4

La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit de manière globale :



Avec une enthalpie de dissociation de l'eau : $\Delta H = 285 \text{ kJ/mole}$.

Quand la tension appliquée est suffisante des réactions se produisent aux interfaces Electrolyte électrodes :

À l'anode : oxydation avec émission d'électrons



À la cathode : réduction avec capture d'électrons



Les ions d'hydrogènes sont transportés à travers l'électrolyte par la différence de potentielle électrique V [25].

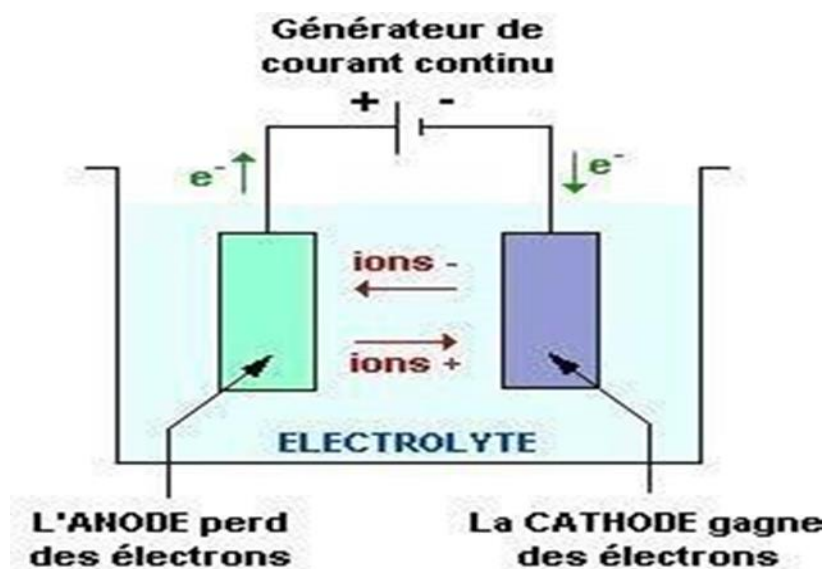


Figure II.4 : Mécanisme de l'électrolyse.**II.8.1 Relation de Nernst**

L'abandon dans un électrolyte (sous courant nul), une électrode prend une tension E_0 . Cette tension, qui correspond à un équilibre entre les espèces présentes, est appelée potentiel d'équilibre et suit la relation de Nernst :

$$E = E' + \frac{RT}{nF} \ln \frac{A_{ox}}{A_{red}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

E : le potentiel en Volt ; E' : le potentiel standard en Volt ; R : constante des gaz parfaits - $R = 8,3145 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; T : la température en Kelvin (K) ; F : la constante de Faraday = $96\,485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$; n : le nombre d'électron échangés ; A_{ox} : Activité de l'espèce oxydante ; A_{red} : Activité de l'espèce réductrice [29].

II.8.2 Tension d'électrolyse

En fonctionnement normal d'une cellule d'électrolyse, la tension V obéit à une loi de la forme suivante :

$$V = (E_0 + S)_{\text{anode}} - (E_0 + S)_{\text{cathode}} + RI \quad (\text{II.5})$$

Ou :

E_0 : Potentiel d'équilibre des électrodes, S : surtension d'électrodes, RI : chute ohmique due à la résistivité de l'électrolyte [25].

II.8.3 Loi de Faraday

La loi de Faraday exprime la relation qui lie la quantité d'électricité traversant une cellule d'électrolyse à l'amplitude des réactions se produisant aux interfaces électrodes électrolyte :

$$P = R_F \cdot \frac{M}{n} \cdot \frac{I \cdot t}{N \cdot E'} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

P : masse de constituant mise en jeu au cours de la réaction (g), R_F : Rendement de courant, M : masse molaire du constituant (g), $I \cdot t$: quantité d'électricité traversant la cellule (C), n : nombre d'électrons-grammes échangés lors de la réaction, N : nombre d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ pour une mole, E' : charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ [25].

II.9 Différentes technologies d'électrolyseurs

II.9.1 Electrolyseurs alcalins

Electrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle [26].

Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+). Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous :



La figure ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline

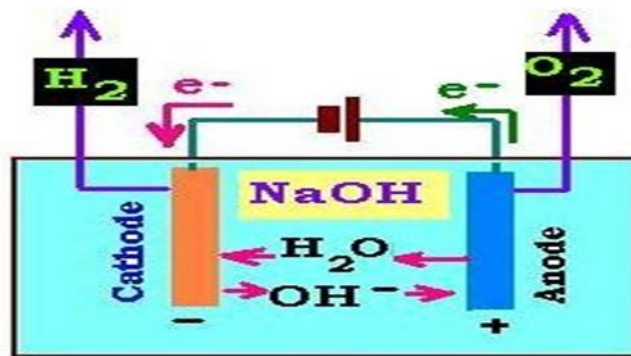
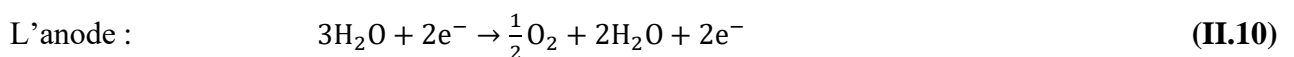
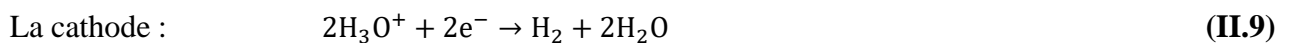


Figure II.5 : Principe de l'électrolyse alcaline

II.9.2 Electrolyseurs PEM

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM « Proton Exchange Membrane » est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les réactions ci-dessous :



Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure II.6. Les

performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM [27].

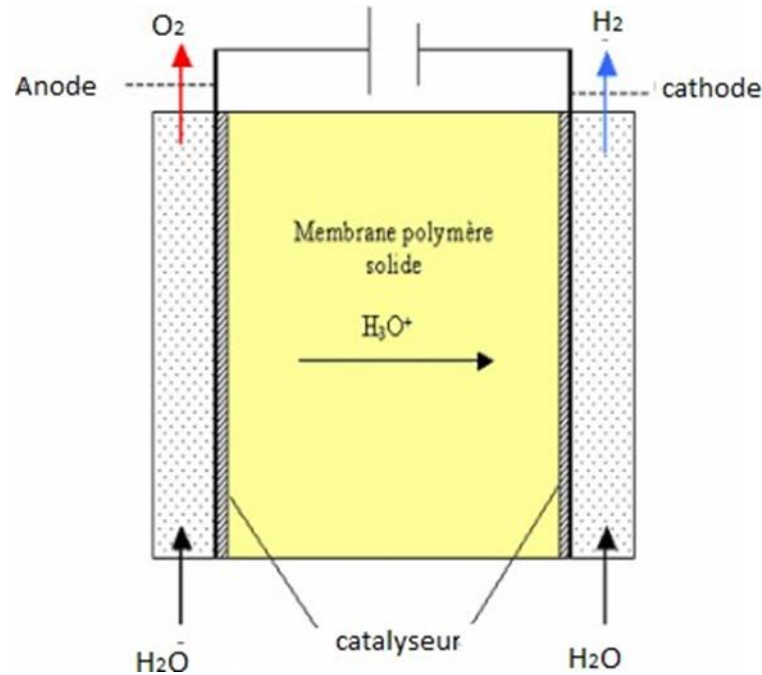
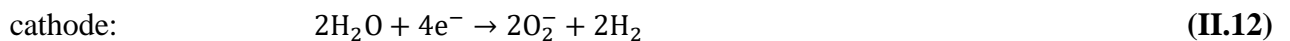


Figure II.6 : Principe schématique de l'électrolyse PEM.

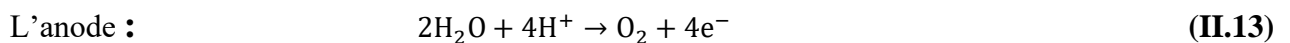
II.9.3 Electrolyseurs à haute température

Le principe de l'électrolyse à haute température (Figure II.7) repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions superoxydes O_2^- . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte [28].

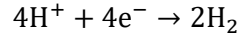
- Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :



- Electrolyte à conduction protonique :



cathode:



(II.14)

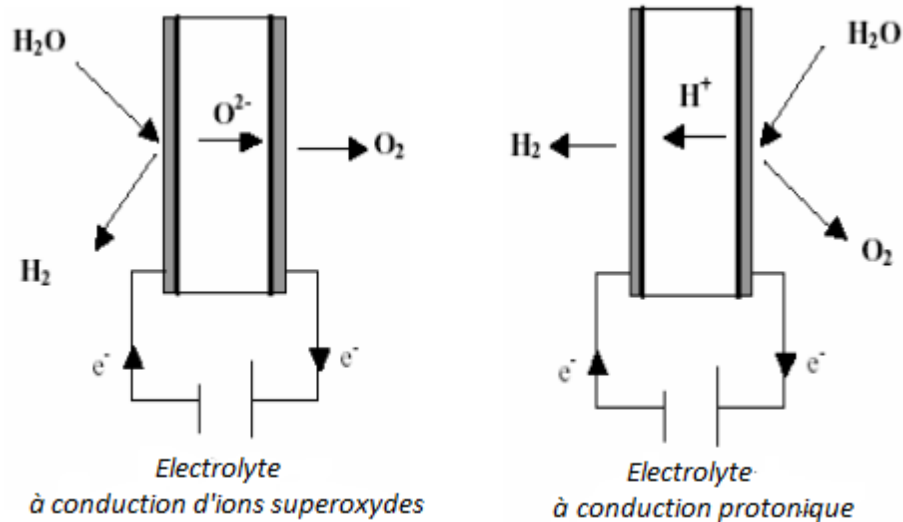


Figure II.7 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

II.10 Historique générale de la pile à combustible

En 1839, William Grove a effectué la première démonstration de pile à combustible. Il s'agit d'une pile hydrogène/oxygène basse température avec des électrodes en platine et un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Jusque dans les années 1930, grâce aux travaux de l'ingénieur britannique Francis T. Bacon à Cambridge, en milieu aqueux KOH (température 80 à 200°C, pression gazeuse de quelques atmosphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses en nickel et oxyde de nickel).

En 1953, le premier prototype de puissance significatif est réalisé. Le programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) a apporté une série de réalisations technologiques au programme GEMINI à la fin des années 1950 et à la pile à électrolyte polymère solide (SPEFC du General Electric) dans les années 1960, développée par Platt and Whitney (maintenant United Technologies) fabrique des piles alcalines de type bacon utilisées dans les missions lunaires Apollo et maintenant dans la navette spatiale. Parallèlement, Justi et Winsel en Allemagne développent plusieurs piles alcalines kilowatt (AFC), des électrodes au nickel de Raney à grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK) [29].

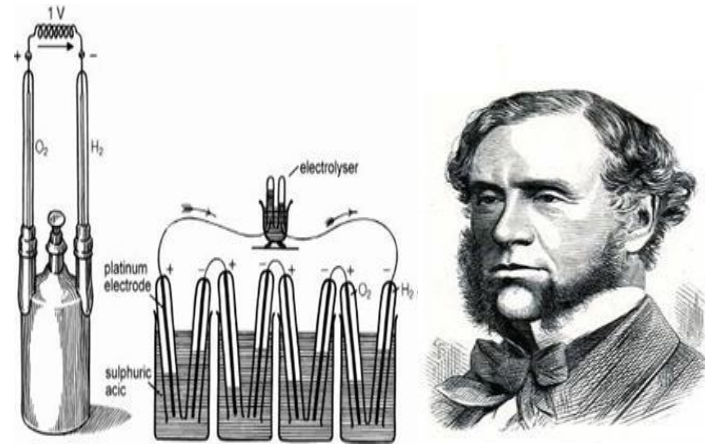


Figure II.8: L'expérience de Sir William, inventeur historique de la pile à combustible.

II.11 Structure d'un module (stack)

Les piles à combustibles sont des cellules électrochimiques constituées d'un électrolyte (solide ou liquide) pris en sandwich entre deux électrodes (anode et cathode), permettant just le passage d'ions pas d'électrons et les gaz. L'anode est alimentée par un combustible et la cathode alimentée par un comburant [30]. Lorsque l'atome d'hydrogène atteint la surface de l'anode, elle se divise en deux composants i.e. protone et électron. Les électrons dans ce cas sont obligés de traverser le circuit extérieur afin de firmé le cycle de conversion. La tension fournie par une cellule élémentaire d'une PAC elle très basse, généralement inférieure à 1 V.

Pour avoir une puissance suffisante, il est indispensable d'associer plusieurs cellules élémentaires en série pour former un assemblage appelé stack [31].

Les éléments de la connexion entre ces cellules dites les plaques bipolaires, car elles relient le pôle positif d'une cellule au pôle négatif du second (en série). En plus de cette fonction électrique, qui est la collecte de courant produit par chacune des cellules élémentaires vers des électrodes de sortie, les plaques bipolaires assurent également la circulation des divers fluides, le refroidissement ou le chauffage et l'assemblage [32-33].

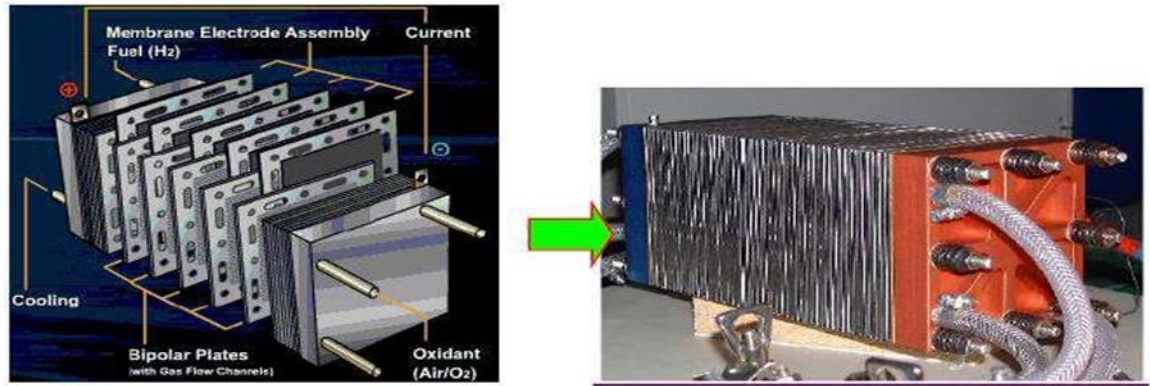


Figure II.9 : Exemple de stack chez ZSW (23 cellules).

II.12 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En effet, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale :



Dans les piles dites « acide », l'hydrogène est oxydé à l'anode, c.-à-d. décomposé en protons et électrons. Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode. Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons produisant ainsi de l'électricité. Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seul sous-produit de cette réaction chimique [34].

Oxidation (anode):



Réduction (cathode) :



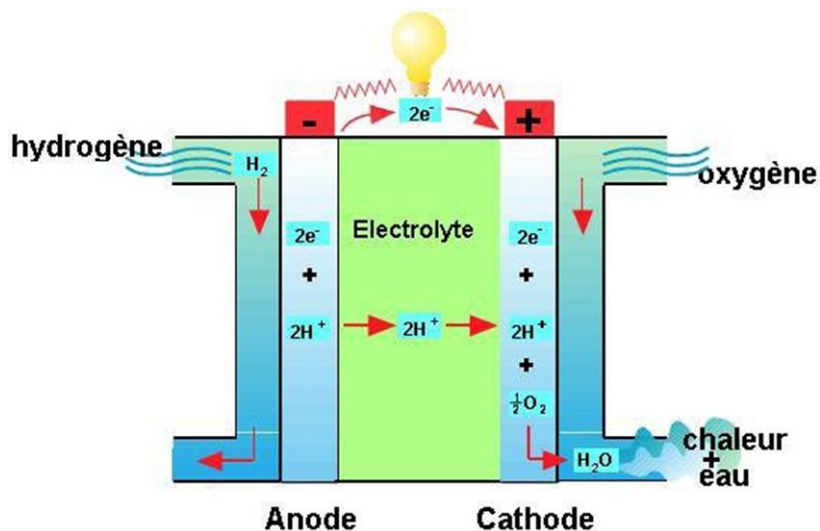


Figure II.10 : Principe de fonctionnement.

II.13 Différents types des piles à combustible

On compte actuellement six types de piles à combustible. Les différents types de piles sont rappelés dans le tableau II.2.

Type de pile	Electrolyte	Température De fonctionnement
AFC Alkaline Fuel Cell Pile à combustible alcaline	Hydroxyd De potassium	60°C à 90°C
DMFC Direct methanol Fuel Cell Pile à combustible au méthanol direct	Membrane polymère	60°C à 120°C
PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell Pile à combustible à membrane	Membrane polymère	60°C à 100°C
PAFC Phosphoric Acide Fuel Cell Pile à combustible à acide phosphorique	Acide phosphorique	150°C à 220°C
MCFC Molten Carbonate Fuel Cell Pile à combustible à carbonate fondu	Carbonate de Métaux alcalins	650°C
SOFC Solid Oxide Fuel Cell Pile à combustible à oxyde solide	Céramique	600°C à 1000°C

Tableau II.2 : Différents types de la pile à combustible.

II.14 Avantages et Inconvénients de la pile à combustible

II.14.1 Avantages

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :

- De hauts rendements énergétiques même à charge partielle
- De faibles émissions sonores
- Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)
- Elles sont de construction modulaire,
- Diverses températures de fonctionnement (PEMFC)
- Pas de parties rotatives [35].

II.14.2 Inconvénients

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler :

- Le coût.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie.
- La gestion thermique du module.
- Le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi [35].

II.15 Applications des piles à combustibles

Les PAC ont été utilisées dans plusieurs domaines d'application on cite :

II.15.1 Applications transports

Parmi les applications des piles à combustible dans le domaine de l'automobile, on peut citer la PEMFC pour la propulsion du véhicule (20 à 50 kW) et les piles alcalines pour l'alimentation en électricité des appareils de bord (climatisation, appareils électroniques) [36].

II.15.2 Applications stationnaires

L'avantage des piles à combustible dans ce domaine est la production simultanée de l'électricité et de la chaleur, les types SOFC et MCFC sont mieux adaptées à la cogénération

d'électricité et de chaleur. La pile à combustible commence à intéresser de nombreux industriels de ce secteur, en particulier en France, Japon, Etats-Unis, etc. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications :

- La production collective (200 kW à quelques MW)
- La production domestique ou individuelle (2 à 7 kW) [37].

II.15.3 Applications portables

Pour des applications portables, les piles à combustible sont en concurrence avec les batteries. On espère gagner en temps d'autonomie et pouvoir recharger plus vite des réserves d'énergie épuisées. Les piles utilisées dans ce domaine doivent être extrêmement robustes et peu sensibles aux conditions extérieures, seulement deux types de piles sont susceptibles d'avoir des applications portables, les PEMFC et DMFC, qui sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement variable entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de gestion thermique et fonctionnent à température ambiante [38].

II.15.4 Applications militaires et spatiales

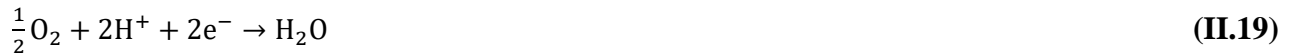
Les spécificités des piles peuvent être utilisées pour ces secteurs de pointe que sont le militaire et le spatial. La NASA a utilisé des piles à combustible de type AFC pour alimenter en électricité les circuits de navettes spatiales notamment au cours du programme GEMINI et des missions APPOLO. Il est maintenant question qu'ils choisissent les PEMFC dans des applications futures. L'armée allemande a aussi développé un sous-marin fonctionnant grâce à des PAC [39].

II.16 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) permet de convertir l'énergie chimique d'oxydation du dihydrogène en énergie électrique et thermique selon la réaction globale de synthèse de l'eau. La pile est constituée de deux électrodes, l'une alimentée en dihydrogène (que l'on appellera hydrogène dans la suite du document) et l'autre en dioxygène (ou en air) qui sont séparées par une membrane échangeuse de protons (l'électrolyte). Du côté anodique, l'hydrogène est oxydé à la surface d'un catalyseur en protons avec libération d'électrons selon la demi-équation suivante :



Et du côté cathodique l'oxygène est catalytiquement réduit en eau grâce à la présence d'une part des protons qui ont traversé la membrane électrolyte depuis l'anode et d'autre part des électrons qui sont transférés par le circuit extérieur, la membrane n'étant pas conducteur électronique. Cette demi-réaction de réduction s'écrit :



La réaction globale de ces deux demi-réactions électrochimiques permettant la production de courant s'écrit alors :



L'énergie thermique dissipée est liée aux phénomènes irréversibles engendrés lors du passage d'un courant électrique. Ces phénomènes sont clairement exposés dans [40] en plus d'une description détaillée des piles à combustible. Le schéma simplifié du fonctionnement d'une pile de type PEM est présenté en Figure II.11.

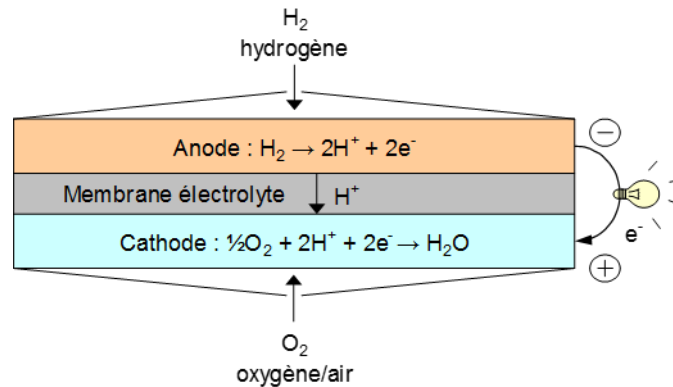


Figure II.11 : Principe d'une pile à combustible de type PEM [41].

II.17 Modélisation mathématique de la pile PEMFC

La potentielle thermodynamique théorique d'un PEMFC est d'environ 1,23 à la pression atmosphérique avec une température de 25° [42]. Mais, lorsque la charge est connectée au FC, la tension FC diminuera par rapport à la tension théorique en raison des phénomènes de polarisation, ainsi que des pertes ou des baisses de tension causées par l'irréversibilité du système [43]. On peut distinguer trois formes de polarisation : polarisation d'activation, polarisation de résistance et polarisation de concentration. La tension de la pile à combustible ($VPAC$) est exprimée comme suit

[44] :

$$V_{PAC} = n * (E_{\text{nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}}) \quad (\text{II.21})$$

Où n est le nombre de cellules élémentaires dans la pile, E_{nernst} est la tension de Nernst (V), V_{act} est la polarisation d'activation (V), V_{ohm} est la polarisation de résistance (V) et V_{conc} est la polarisation de concentration (V).

II.17.1 Tension Nernst

C'est une potentielle thermodynamique réversible de chaque pile. Elle représente la tension à vide de la pile (tension théorique). Cette tension s'exprime comme suit :

$$E_{\text{nernst}} = \frac{\Delta G}{2.F} - \frac{\Delta S}{2.F} (T - T_{\text{ref}}) + \frac{R.T}{2.F} \left[\ln(P_{\text{H}_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}^*) \right] \quad (\text{II.22})$$

Où ΔG est le changement d'énergie libre (J/k.mol), ΔS est le changement d'entropie (J/k.mol), F est le constant faraday (C/k.mol), T est la température de fonctionnement du PEM (k), T_{ref} est la température de référence (k) et R est la constante de gaz universelle (J/k.mol).

Lorsque nous substituons la valeur standard température et pression, l'équation devient simplifiée comme suit [44] :

$$E_{\text{nernst}} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.81 \times 10^{-5} \times T \times \ln \left(P_{\text{H}_2}^* \sqrt{P_{\text{O}_2}^*} \right) \quad (\text{II.23})$$

$$P_{\text{H}_2}^* = 0.5 \times RH_a \times P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} \left(\frac{1}{\frac{RH_a \times P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}}{P_{\text{cathode}}} \exp \left(\frac{1.635 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)}{T^{1.334}} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.24})$$

$$P_{\text{O}_2}^* = RH_c \times P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}} \left(\frac{1}{\frac{RH_c \times P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}}{P_{\text{cathode}}} \exp \left(\frac{4.192 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)}{T^{1.334}} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.25})$$

$$\log_{10}(P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}) = 2.95 \times 10^{-2}(T - 273.15) - 9.19 \times 10^{-5}(T - 273.15)^2 + 1.44 \times 10^{-7}(T - 273.15)^3 - 2.18 \quad (\text{II.26})$$

Lorsque $P^*\text{H}_2$ est la pression fractionnée à l'interface de l'hydrogène (atm), $P^*\text{O}_2$ est la pression fractionnaire à l'interface de l'oxygène (atm), RH_a est l'humidité relative à l'anode,

RH_c est l'humidité relative à la cathode, P_{anode} est la pression de l'hydrogène à l'anode (atm), $P_{cathode}$ est la pression de l'oxygène à la cathode (atm) et $P_{H_2O}^{sat}$ est la fraction mole de saturation de l'eau dans le gaz humidifié.

II.17.2 Surtension d'activation

À de faibles densités de courant, associées à l'énergie d'activation nécessaire pour démarrer la réaction entre les gaz, l'oxygène à la cathode [45]. La relation entre les pertes d'activation et la densité actuelle présentée par Amphlett est donnée comme suit :

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln([CO_2^*]) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(I_{PAC})] \quad (\text{II.26})$$

$$[CO_2^*] = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 \cdot e^{(-498/T)}} \quad (\text{II.27})$$

Où $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ est les coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la PEM, le CO_2^* est le foyer d'oxygène sur la zone du catalyseur (mol/cm^3) et I_{PAC} est le courant de fonctionnement de la PEM (A) [46].

II.17.3 Surtension ohmique

À des densités de courant moyennes, causées par des pertes ohmiques dues à la résistance électrique des différents éléments de la PEM (électrolyte, électrodes) [47]. Nous pouvons exprimer en utilisant la loi d'Ohm par l'équation suivante :

$$V_{ohm} = I_{PAC} \cdot (R_m + R_c) \quad (\text{II.28})$$

$$R_m = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (\text{II.29})$$

$$\rho_M = 181.6 \frac{\left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062 \left(\frac{T}{303}\right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3} - 0.643 - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)\right] \cdot \exp\left[4.18 \left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} \quad (\text{II.30})$$

Lorsque R_c est la résistance de contact équivalente à la conduction des électrons (), R_m est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons (Ω), l est l'épaisseur de la membrane (μm), A est la zone active de la PEM (cm^2), ρ_M est la résistivité qualitative de la membrane ($\Omega \cdot cm$) et λ_{H_2O/SO_3} est la teneur en eau de la membrane [46].

II.17.4 Surtension de concentration

Également appelée polarisation de concentration se produit à des densités de courant élevées,

causée par la variation de la concentration des réactifs (hydrogène ou oxygène) sur les électrodes, en particulier à la cathode [47]. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{\text{con}} = -b \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{\text{max}}} \right) \quad (\text{II.31})$$

Où J est la densité de courant (A/cm^2), J_{max} est la plus grande densité de courant (A/cm^2) et b est la constante électrochimique (V) [47].

II.18 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de méthodes de production et de stockage de l'hydrogène ainsi que le transport et les applications de l'hydrogène. Les piles à combustible fournissent un système d'alimentation à faible coût dans le domaine des énergies renouvelables, nous présentons donc un historique général des piles à combustible ainsi que la structure et les principes de fonctionnement ainsi que leurs différents types et applications de piles à combustible, et enfin nous discutons de la modélisation des piles à combustible.

CHAPTER III

Analyse et optimisation du système hybride par HOMER.

III.1 Introduction

Les systèmes à base d'hydrogène ont reçu un focus considérable, ces dernières années, à cause de leur efficacité à adresser les risques environnementaux et à surmonter le problème de manque d'énergie fossile. Pour cette raison, la modélisation précise des systèmes photovoltaïques a attiré beaucoup d'attention afin de concevoir des systèmes de haute qualité. La clé derrière le développement des modèles de haute qualité est de déterminer les paramètres inconnus de modèles PV avec précision. Dans ce contexte, ce chapitre propose l'algorithme WOA pour définir les paramètres optimaux de module photovoltaïques, aussi le dimensionnement optimal du système hybride. Vu que le coût de système proposé est considérable, un design optimal doit être assuré. Pour cette raison, un logiciel efficace et largement utilisé dans tels cas par les concepteurs, appelé HOMER, est adopté pour dimensionner effectivement l'unité de la production proposée tenant en compte les enjeux technicoéconomiques, ainsi qu'écologiques.

III.2 Présentation du système hybride

Le terme «Système Hybride» fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables et ou conventionnelles, différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.

Le schéma global de notre système hybride est présenté dans la Figure. (III.1). L'unité de production d'énergie électrique est constituée de groupes des panneaux PV, batteries, et des pile à combustible PEM avec électrolyseur.

• Générateur photovoltaïque

Le générateur PV est utilisé comme une source principale, Est une source d'énergie continue, constitué d'un ensemble des modules photovoltaïques reliées entre elles électriquement. Une partie cette d'énergie entrant est directement fournie à la charge, et une partie passe par l'unité du stockage.

• Électrolyseur

L'énergie surplus est transformé en hydrogène par l'électrolyseurs d'eau. L'électrolyseur est un dispositif basé sur le principe inverse des piles à combustible PEM. Ils génèrent une série de

réactions électrochimiques pour séparer l'hydrogène des molécules d'eau en utilisant l'énergie électrique.

- **Pile à combustible**

La pile à combustible représenté comme système de secoure dans notre système, il consomme l'hydrogène et transforme en courant électrique en cas de manque d'énergie.

- **Batteries**

Est un système de stockage destiné à stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques. Le courant qui y entre ou qui en sort est continu et non alternatif.

- **Réservoir d'hydrogène**

Le réservoir d'hydrogène est notre unité de stockage principale d'énergie. Le réservoir doit être capable d'emmagasiner l'énergie surplus généré au cours de l'année.

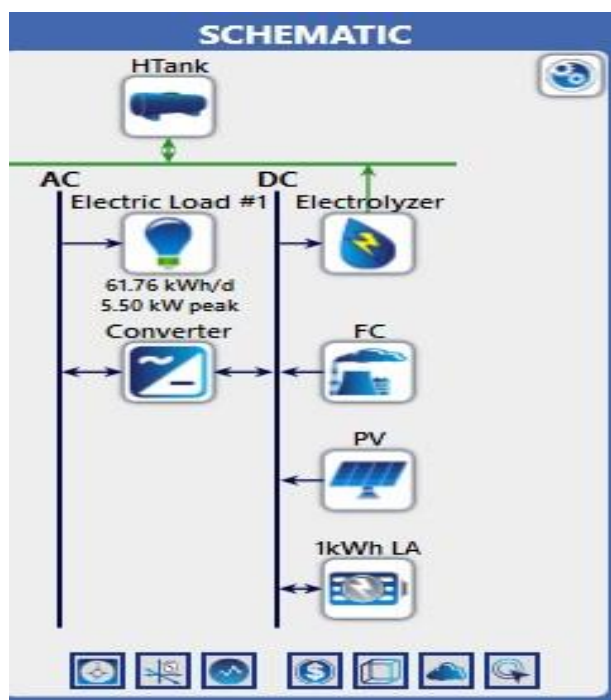


Figure III.1 : Schéma du système hybride.

L'objectif de l'étude est d'assurer une alimentation en permanence pour une charge donnée et au cours de l'année. Dans cette étude nous avons choisi une charge l'habitat résidentiel autonome de consommation présentée dans le tableau suivant :

Les charges	Puissance(W)	Durée de fonctionnement(h)
Fer à repasser	1200	01
Climatiseur	1760	15
Télévision	190	18
Machine à laver	240	02
Frigidaire	398	24
Lave-vaisselle	1200	02
Pompe	250	08
Four électrique	1200	01
Les lampes	459	13
computer	60	03
congélateur	300	24

Tableau III.1 : Charge et temps de fonctionnement.

Cette consommation énergétique de la charge proposée varie d'une saison à une autre. Cela est dû à la variation de consommation des dispositifs électriques durant l'année.

Comme nous l'avons dit précédemment, la modélisation précise des systèmes photovoltaïques a apporté beaucoup d'attention afin de concevoir des systèmes hybrides de haute qualité. Pour cela dans l'étape suivante, nous concentrons sur l'identification des paramètres optimaux d'un panneau photovoltaïque.

III.3 Identification de paramètres du module PV

La méta-heuristique est une branche de l'optimisation et mathématiques appliquées liées aux algorithmes et la théorie de calcul stochastique. Ces méthodes sont principalement utilisés pour minimiser ou maximiser une fonction donnée appelé fonction objectif. Les méthodes méta-heuristiques ont été appliquées dans nombreux de problèmes d'ingénierat tels que, la maximisation de puissance des panneaux photovoltaïques, identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque, dimensionnement de nombres optimale des sources dans une installation électriques [48].

III.4 Principe de la méthode algorithme d'optimisation des baleines

La méthode WOA (Whale Optimizaton Algorithm) est une technique de recherche probabiliste, basée sur la population ou un groupe de solutions probables pour trouver la solution

désirable. Elle a été proposée en 2016 par Seyedali [49]. Pour simuler le comportement social des baleines à bosse. La procédure d'optimisation par le WOA peut être effectuée en utilisant trois étapes principales, comme décrit ci-dessous :

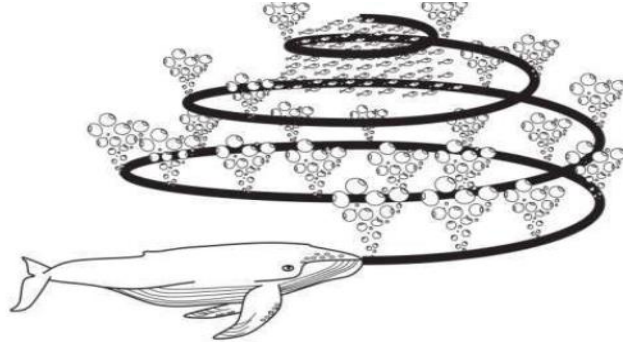


Figure III.2 : Stratégie d'alimentation au filet à bulles des baleines à bosse.

III.4.1 Encerclement de la proie

La distance entre la particule et la meilleure la particule est calculée par l'équation (III.1). Les particules restantes doivent maintenant suivre la cible exprimée en (III.2). Ici, il convient de noter que $\vec{X}^*(i)$ doit être ajusté à chaque itération s'il existe une meilleure solution [48-49].

$$\vec{X}(i + 1) = \vec{X}^*(i) - \vec{A} \cdot \vec{D} \tag{III.1}$$

Où, $\vec{X}^*(i)$ est la meilleure particule trouvée, $\vec{X}(i)$, et $\vec{X}(i + 1)$ sont, respectivement, l'ancien et le nouveau vecteur de position. D représente le vecteur de distance entre les particules et la meilleure position.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(i) - \vec{X}(i)| \tag{III.2}$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \tag{III.3}$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \tag{III.4}$$

Où, \vec{a} est un nombre linéaire décroissant de 2→0 au cours des itérations, et \vec{r} est une valeur aléatoire qui est entre $0 \leq \vec{r} \leq 1$.

\vec{A} et \vec{C} sont des constantes calculées par les deux équations :

III.4.2 Attaqué par le filet à bulles

Les baleines à bosse ont un mécanisme de chasse spécial appelé filet à bulles "9", voir la **Figure III.3**. Ce comportement peut être simulé à l'aide de l'équation **(III.5)** [49].

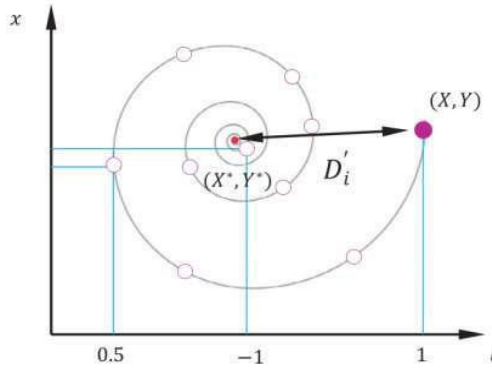


Figure III.3: Stratégie de « bubble-net feeding ».

$$\vec{X}(i + 1) = \begin{cases} \vec{X}^* - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{"if } p < 0.5\text{"} \\ \vec{X}^* + \vec{D}' \cdot e^{b \times l} \cdot \cos(2\pi l) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

P est un numérique aléatoire $\in [0,1]$ \vec{D}' et représente la distance entre la baleine actuelle et la meilleure solution, De plus, b est un chiffre fixe (b=1), et l est un nombre aléatoire entre $-1 \leq l \leq 1$.

III.4.3 Recherche de la proie

Dans la méthode de recherche WOA, toutes les particules doivent contribuer au processus de recherche. Pour s'assurer qu'une recherche globale est effectuée dans tout l'espace, les agents sont obligés de s'éloigner de la baleine de référence, comme il est décrit mathématiquement dans l'équation **(III.6)** [48-49].

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand}(i) - \vec{X}(i)| \quad \text{(III.6)}$$

$$\vec{X}(i + 1) = \vec{X}_{rand}(i) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad \text{(III.7)}$$

Où, $\vec{X}_{rand}(i)$ est la position, qui est tirée au hasard de l'essaim actuel.

III.5 Fonction objectif

Le modèle mathématique est dit précis si les données I-V expérimentales et estimées correspondent les unes aux autres, ce qui signifie que la différence entre elles est négligeable. Sur la base de ce qui précède, l'erreur quadratique moyenne RMSE entre les points I-V expérimentaux

et estimés donnés dans l'équation. (1) est généralement considérée comme la fonction objectif (OF). Dans l'éq. (2), tous les paramètres sont connus sauf I_{ph} , I_s , n , R_s et R_p . Le but ultime est maintenant d'ajuster les valeurs des paramètres de manière aléatoire en fonction de l'algorithme jusqu'à ce qu'un bon accord soit atteint.

$$OF(V, I, x) = RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (I_{exp} - I_{est})^2}{N}} \quad (III.8)$$

$X = (I_{ph}, I_s, n, R_s \text{ et } R_p)$

Avec N est le nombre d'échantillons. I_{exp} et I_{est} sont respectivement le courant expérimental et estimé du panneau.

III.6 Application de la méthode algorithme d'optimisation des baleines

Pour tester l'efficacité de la méthode de WOA (Whale Optimizaton Algorithm), un panneau PV polycristalline de puissance crête 220W est employé. La fiche technique dès ce panneaux PV est donnée dans Tableau 2. Un analyseur solaire VA 220 est utilisé pour collecter les mesures nécessaires et pour valider les résultats de la technique proposée. Un capteur de température et un pyranomètre sont employés pour obtenir la température de la cellule et le rayonnement solaire incident, respectivement. La plateforme utilisée pour le test est illustrée sur la Figure III.4.



Figure III.4: Maquette d'expérimentations.

Ce tableau représente les données graphiques une panneaux PV polycristalline de puissance crête 220W est employé.

Paramètre	Valeur
P_{MPP}	220W _P (-0W _P /+4.99W _P)
U_{OC}	33.3V
U_{mpp}	27.3V
I_{SC}	8.67A
IP	65
IEC	61215 & 61730

Tableau III.2 : Données graphiques un panneau PV polycristalline

Après avoir appliqué la méthode, les résultats sont collectés et listés au tableau suivant :

Paramètre	Valeur
N	1.3
R_s	0.0670
R_p	481.25
I_{ph}	6.4518
I_s	1.4581e-07
RMSE	0.0282

Tableau III 3 : Résultats de l'optimisation.

Les Figures (III.5 et III.6) montrent les courbes courant-tension et courant-puissance estimé et mesuré dans la température $T=42^{\circ}\text{C}$ et rayonnement $G=655\text{W}/\text{m}^2$. On peut constater que les courbes expérimentales et prédit sont en très bon accordance avec $\text{RMSE}=0.0282$. Ce que signifie que méthode de WOA est une technique d'extraction des paramètres très efficace.

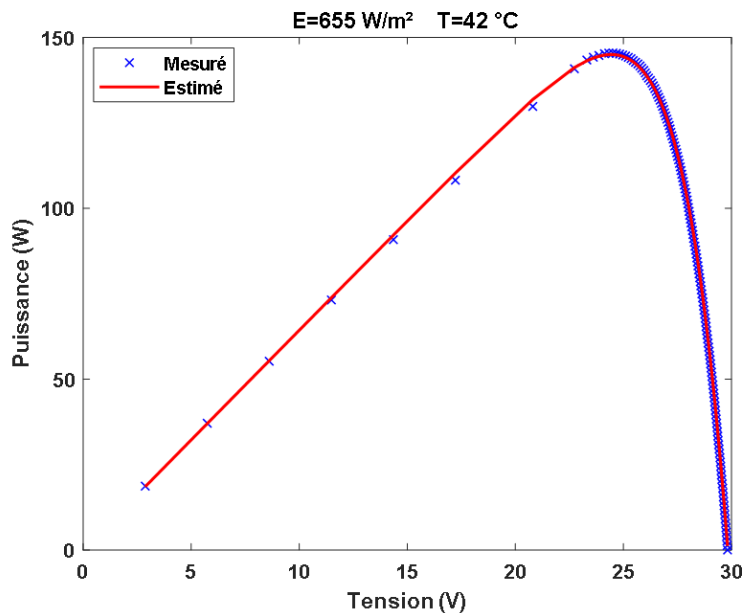


Figure III.6: Courbe tension-puissance.

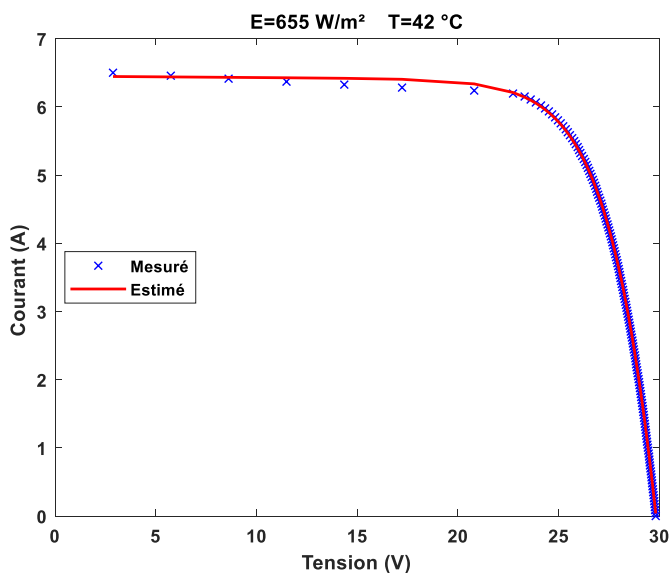


Figure III.5: Courbe courant-tension.

III.7 Analyse d'un système hybride autonome

Comme mentionné précédemment, le but d'utilisation l'logiciel HOMER est pour trouver la puissance optimale demandé pour chaque composant. Les variables de dimensionnement introduites dans l'étude sont : La puissance de l'installation PV ; La puissance nominale de piles à

combustible ; La taille de l'électrolyseur ; La taille de l'unité de stockage ; La puissance nominale des convertisseurs.

III.7.1 Présentation du logiciel HOMER

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources) est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il se présente sous la forme d'un exécutable complètement autonome, capable de faire le dimensionnement, l'optimisation et la simulation des systèmes avec des énergies renouvelables ou avec des énergies fossiles [50]. Un des grands atouts de ce logiciel est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou non pour une variété d'applications. La première version a été développée en 1992 pour NREL (US National Renewable Energy Laboratory), il a ensuite subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions.

Parmi les caractéristiques et les utilisations du programme Homer, nous les mentionnons comme suit :

- Langue : français ou anglais
- Simulez des systèmes hybrides en réseau ou hors réseau
- L'évaluation des coûts et l'optimisation des systèmes.
- Simulation de systèmes dans plusieurs pays.

III.7.2 Données relatives à l'ensoleillement moyen au site de Ouargla

Selon la Figure IV.1, le rayonnement solaire à Ouargla varie entre 2.250 KWh/m2/j au mois de Décembre et 7.570 KWh/m2/j au mois de Juin.



Figure III.6: Radiation globale horizontale mensuelle à Ouargla.

III.7.3 Configuration du système

Dans le programme HOMER, nous avons défini chaque composant de notre installation : panneaux solaires, électrolyseur, onduleur, pile à combustible, réservoir d'hydrogène, batterie de stockage et charge utile à exploiter.

D'autres données sont particulièrement nécessaires telles que les coordonnées de localisation, la durée de conservation des composants ainsi que leurs coûts.

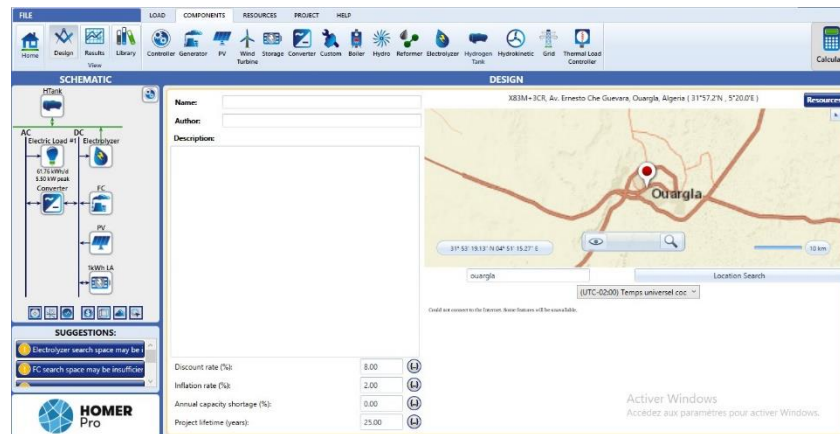


Figure III.7 : Montage du système hybride.

III.7.4 Résultats optimisés

Grâce à la simulation, HOMER peut visualiser le comportement horaire de chaque appareil de l'installation pour toutes les configurations simulées. Sur la base de ces résultats, HOMER fournit une analyse financière et classe les différents paramètres par ordre croissant de paiements nets.

Pour chaque solution possible, HOMER fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants installés (panneaux solaires, électrolyseur, onduleurs, piles à combustible, réservoirs d'hydrogène, batteries) et propose plusieurs configurations. Par exemple dans notre cas cela nous donne la solution suivante :

The screenshot shows the HOMER software interface with the 'RESULTS' window open. The 'Optimization Results' section is active, displaying a table of system parameters and their values for an optimal configuration. The table includes columns for Architecture, Cost, System, and FC. The values are as follows:

Architecture		Cost			System			FC								
PV (kW)	FC (kW)	1kWh LA (#)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (kg/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (kg)	Dis
47.7	1.50	92	14.5	10.0	7.25	LF	\$241,016	\$0.828	\$4,520	\$182,590	100	425	5,079	7,083	425	76

Figure III.8 : Configuration proposée par le logiciel HOMER.

La figure ci-dessus montre le regroupement optimal de notre système en termes de coût et de technologie.

Pour notre étude, nous avons choisi une charge de 61,76 kWh/jour, qui a une charge de pointe d'environ 5,5 kWh.

Sur la base des résultats présentés à la Figure III.9, la configuration optimale des agrégats pour alimenter la charge est la suivante :

Composants	Capacités
Panneau photovoltaïque	47.7 KW _C
Pile à combustible	1.5 KW
Convertisseur	7.25 KW
Électrolyseur	14.5 KW
Stockage	92 kWh
H Réservoir	10 g

Tableau III.4: Architecture du système PV-Hydrogène.

III.7.5 Production et consommation d'énergie électrique

La production et la consommation annuelles d'énergie sont détaillées dans les tableaux III.5 et III.6.

Production	kWh/an	%
PV	77900	91.7
Pile à combustible	7083	8.3
Total	84983	100

Tableau III.5: Energie annuelle produite.

Consommation	kWh/an	%
Charge principale AC	22.527	53.6
Consommation d'électrolyseur	19.54	46.4
Total	42.066	100

Tableau III.6: Energie annuelle consommée



Figure III.9: Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.

Le tableau III.5 présente la quantité d'énergie électrique produite par le système sur le site de Ouargla (résumé de production). Ainsi, pour une charge de 61,76 kWh/jour, on constate que 91,7% des besoins énergétiques du site sont assurés par le générateur photovoltaïque et le reste par la pile à combustible. Dans la Figure III.9, nous donnons la puissance mensuelle moyenne produite par chaque source

III.7.6 Puissance de sortie du générateur photovoltaïque

Les tableaux ci-dessous résume tous les paramètres de fonctionnement des générateurs PV étudiés.

Quantité	Valeur	Unités
Sortie maximale	48.8	KW
Heures d'ouverture	4375	Hrs/an
Facteur de capacité	18.6	%
Sortie minimale	0	KW

Tableau III.7: Caractéristique de fonctionnement du panneau photovoltaïque.

D'après les résultats, nous avons constaté que le nombre total d'heures annuelles durant lesquelles les panneaux solaires fonctionnent réellement est de 48,8 kW (4375 heures/an).

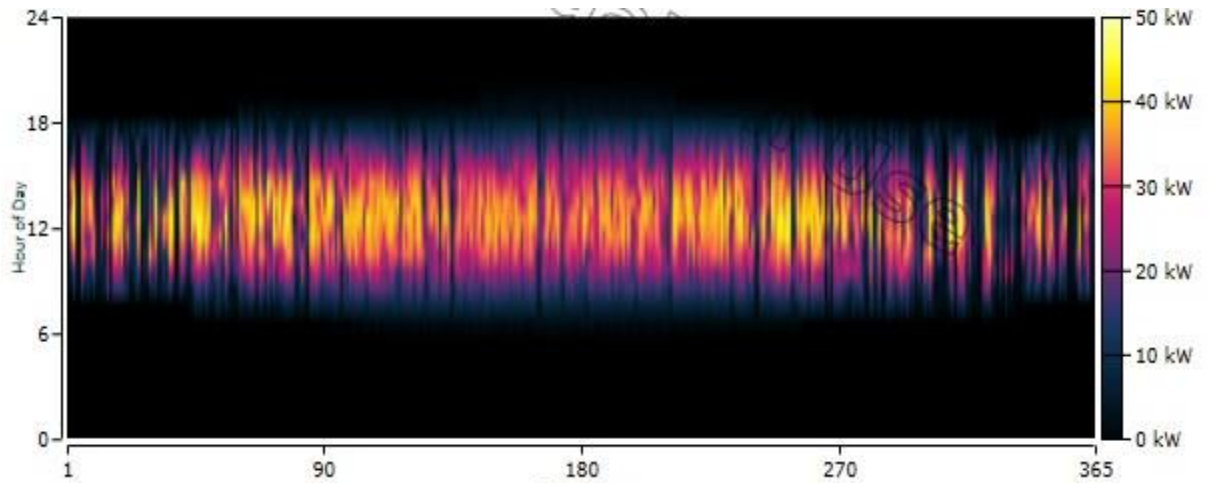


Figure III.10: Production journalière de panneau photovoltaïque.

La figure ci-dessous montre la production quotidienne des panneaux solaires tout au long de l'année. Le noir représente les périodes d'absence de production. Le jaune représente les pics. La production moyenne est indiquée en violet.

Pour connaître le nombre de panneaux solaires pouvant couvrir la quantité d'énergie produite par les panneaux solaires 47700 watts, et selon les paramètres techniques du panneau, sa capacité

est estimée à 220 watts, et nous concluons que le nombre de panneaux est 217. La surface totale du générateur photovoltaïque 317.9484 m².

III.7.7 Puissance de sortie du Pile à combustible

Dans le cas où la production du panneaux photovoltaïques est faible, c'est la pile à combustible qui prend le relai et assure la production de puissance. Ainsi, elle est appelée à fonctionner à n'importe quel moment de la journée d'une manière optimisée selon le besoin de la charge. Les paramètres de fonctionnements sont donnés sur les tableaux ci-dessous :

Quantité	Valeur	Unités
Sortie maximale	1.50	KW
Sortie minimale	0.00157	KW
Facteur de capacité	53.9	%
Consommation de carburant	0.0600	Kg/Kwh
Plein apport d'énergie	14.167	KWh/an
Production électrique	7083	KWh/an

Tableau III.8 : Paramètres de fonctionnement de la pile à combustible.

La figure ci-dessous montre la production quotidienne du tas tout au long de l'année. Le noir représente les périodes de très faible production. La couleur rouge représente les pics. La production moyenne est indiquée en vert.

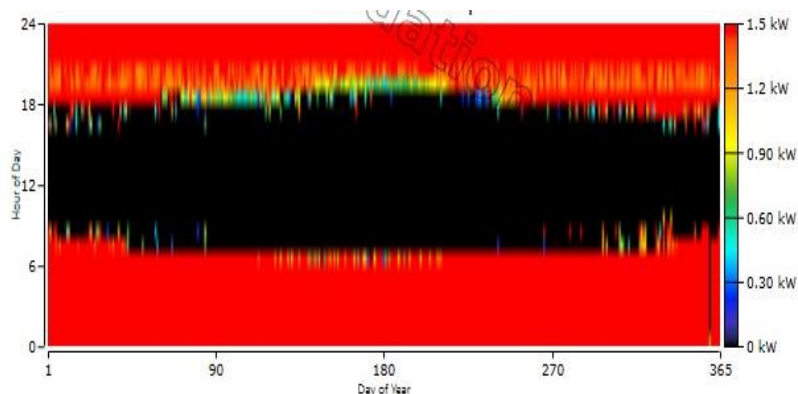


Figure III.11: Production journalière de la pile.

III.7.8 Consommation de l'électrolyseur

La figure ci-dessous montre les paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur. Sa production annuelle est estimée à 421kg/an et sa consommation est de 46,4 kWh/kg. L'électrolyseur fonctionne 1824 h/an.

Quantité	Valeur	Unités
Sortie maximale	0.312	KW/an
Entrée maximale	14.5	KW
Facteur de capacité	15.4	%
Consommation spécifique	46.4	kWh/kg
Production totale	421	Kg/an
Heures d'ouverture	1824	h/an

Tableau III.9: Paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur.

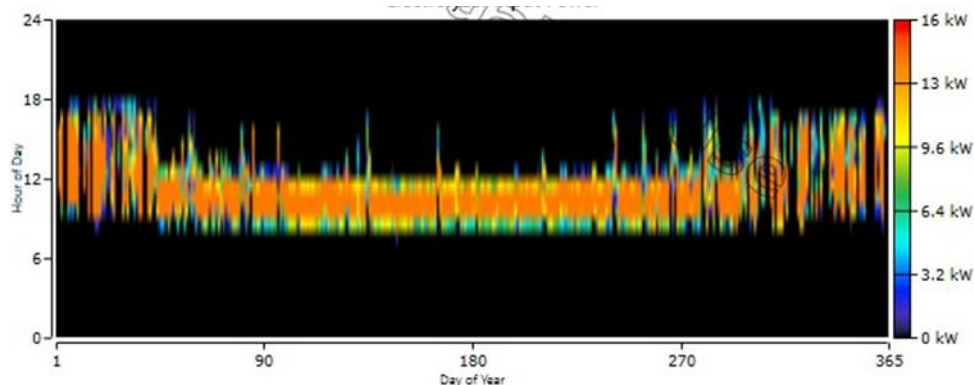


Figure III.12: Production journalière de l'électrolyseur

La figure ci-dessous montre la production journalière d'un électrolyseur au cours d'une année. Le noir représente les périodes d'absence de production d'hydrogène. L'orange représente les sommets. La production moyenne est indiquée en vert.

III.7.9 Convertisseur

Le convertisseur a une capacité de 35.5 kW, son énergie d'entrée est de 23712 kWh/an, son énergie de sortie est de 22527 kWh/an et ses pertes sont de 1186 kWh/an. Le convertisseur fonctionne 8 760 h/an et a une capacité de 35,5 %.

Quantité	Onduleur	Unités
Sortie maximale	1.10	KW
Sortie minimale	5.50	KW
Sortie d'énergie	22527	kWh/an
Energie d'entrée	23712	kWh/an
Facteur de capacité	35,5	%.
Pertes	1186	kWh/an
Heures d'ouverture	8 760	h/an

Tableau III.10 : Paramètres de fonctionnement du convertisseur.

III.7.10 Réservoir d'hydrogène

La capacité du réservoir de stockage d'hydrogène est de 10 kg, la capacité de stockage d'énergie est de 333 KWh et une autonomie de 130 heures.

Quantité	Valeur	Unités
Capacité de stockage d'hydrogène	10	kg
Capacité de stockage d'énergie	333	kwh
Autonomie du réservoir	130	h

Tableau III.11 : Paramètres de fonctionnement du stockage d'hydrogène.

III.7.11 Batteries

Les Batteries à une capacité de 92.1kWh, son énergie d'entrée est de 7258 kWh/an, son énergie de sortie est de 5822 kWh/an et ses pertes sont de 1453 kWh/an. Vie de la batterie 10ans et a débit à vie 65095 kWh.

Quantité	Valeur	Unités
Sortie d'énergie	5822	kWh/an
Energie d'entrée	7258	kWh/an
Capacité	92.1	kW
perdes	1453	kWh/an
Epuisement du stockage	18.2	Kwh/an
Durée des vie du batteries	10	ans
Débit à vie	65095	kwh

Tableau III.12 : Paramètres de fonctionnement du Batteries.

III.7.12 Coût du système

Cette Figure représente le prix de chaque équipement séparément, car elle présente le coût total du système avec le prix approprié.

Composante	Capitale (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)	Sauvetage (\$)	Totale (\$)
Batteries acide 1kW	27600.00\$	24382.88\$	11893.32\$	3305.90\$	60570.30\$
Electrolyseur	29000.00\$	11073.55\$	5623.47\$	2084.15\$	43612.86\$
Photovoltaïque	119314.03\$	0.00\$	6169.79\$	0.00\$	125483.82\$
Pile à combustible	4500.00\$	3353.25\$	984.88\$	413.69\$	8424.44\$
Convertisseur	2175.75\$	923.11\$	0.00\$	173.74\$	2925.12\$
Système	182589.78\$	39732.79\$	246671.45\$	5977.48\$	241016.54\$

Figure III.13: Tarifs des équipements.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir mené une étude expérimentale sur des panneaux solaires et en utilisant le programme de simulation MATLAB, ainsi que le programme HOMER PRO, nous obtenons des résultats qui permettent d'obtenir un système de production d'énergie selon une configuration optimisée basé sur des critères de la satisfaction de la demande de la charge. Et le prix des composants de système suivant une banque de données fournis par HOMER.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ces dernières années, l'utilisation d'énergies renouvelables, telles que La production d'énergie photovoltaïque se développe rapidement. Pour assurer une production continue, ces systèmes doivent être mélangés à d'autres sources d'énergie, comme l'hydrogène, qui peut être produit par électrolyse, puis stocké et éventuellement réutilisé par des piles à combustible pour produire de l'électricité vert.

Il existe un besoin croissant de produire de l'électricité via des systèmes à hydrogène, c'est pourquoi la production d'hydrogène par des moyens autonomes tels que le couplage avec des sources d'énergie renouvelables offre une réponse propre, fiable et plus économique.

Notre travail de simulation sur le logiciel HOMER nous a permis d'obtenir une production annuelle d'électricité de 84 983 kWh, soit 77 900 kWh issus des systèmes photovoltaïques (91,7% de la production totale) et 7 083 kWh issus des piles à combustible (8,3 % de la production totale), et à ce stade nous pouvons dire que nous sommes en mesure de répondre aux demandes de la charge, dont la consommation est estimée à 61,76 kWh par jour.

Au début de ce travail nous avons mené une étude générale sur la position du soleil tout au long de l'année et sur le mouvement du soleil. Nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire, l'étendue de ses utilisations, et la modélisation des modules photovoltaïques.

Ensuite nous avons penché sur l'hydrogène, ses propriétés, ses modes de production et de transport, et nous avons donné un aperçu complet de la définition de la pile à combustible, de ses types et domaines d'utilisation, ainsi que de ses équations mathématiques.

A la fin de ce mémoire, nous avons fait une étude expérimentale sur des modules photovoltaïques installés au laboratoire afin d'identifier les paramètres de ces modules par l'utilisation d'une méthode d'optimisation et avec la programmation sous MATLAB, ensuite, nous avons mené une étude de simulation d'un système hybride qui alimente une charge domestique en utilisant le programme HOMER PRO, à travers lequel nous avons obtenu un système avec un coût optimisé et l'utilisation des modules que nous avons identifiés et des autres équipements existants dans la banque de données de HOMER. Bien sûr en ce basons sur le critère de la satisfaction de la demande de la charge et avoir un prix modéré de l'installation.

CONCLUSION GENERALE

L'outil que nous avons utilisé pour développer notre système, pourra être utilisé pour configurer et optimiser d'autres installations avec des multitudes de sources d'énergies pour des charges et sites donnés.

Références bibliographiques

- [1] MEZZAI Sonia, TADJINE Katia « Étude D'un Système Hybride (Eolien – Photovoltaïque) »Mémoire de fin Cycle, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
- [2] La production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire (2019 / 2020).
- [3] A. Ricaud, ‘‘ Photopiles solaires ‘‘ de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés presse polytechnique et Universitaires Romandes 1997.
- [4] l'absorption des UV par l'ozone Article rédigé par Hagop Demirdjian <http://culturesciences.chimie.ens.fr> ,Consulté le 16/10/2020.
- [5] <http://www.astroclubnarsan.net/mvscite/coordomees.htm>
- [6] énergie solaire PV modélisation directionnelle de l'éclairement.
- [7] Christian PERRIN DE BRICHAMBAUT, Christian VAUGE, ‘‘Le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique’’ .Paris, France, 1982.
- [8] Catalogue, ‘‘ L'électricité solaire ‘‘ Généralité sur l'énergie solaire Techno solaire systèmes SPA. 1998.
- [9] M. Capderou, ‘‘ Atlas solaire de l'Algérie ‘‘ Office des publications universitaire Tome1, Tome2. Algérie, 1986.
- [10] <https://www.planete-energies.com>. Consulté le 17/10/2020
- [11] Romdhane Ben Slama « Essais sur la production de l'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau », <https://hal.archives-ouvertes.fr> ,Consulté le 17/10/2020.
- [12] Chapitre 04 présentation du système et élaboration de modèles de simulation.
- [13] Mohamed lakhdar LOUAZENE. Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes- application zone d'Ouargla, thèse de doctorat en science, UEHLB ,2015.
- [14] [Lenntech info@lenntech.com](mailto:info@lenntech.com) Consulté le 03/08/2020
- [15] Peu difficile, nouvelles technologies, l'hydrogène, Article : 058, oct.-2015.

REFERENCES

- [16] <http://www.echoslogiques.com/carburants1.php>, consulté le : 13/09/2013.
- [17] www.ifpenergiesnouvelles.fr, Consulté le 20/09/2020.
- [18] energies.airliquide.com, Consulté le 20/09/2020.
- [19] www.futura-sciences.com, 2019, Consulté le 20/09/2020.
- [20] <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-hydrogene-enfin-facon-economique-produire-8495>.
- [21] Mounir SAHLI, 2010 « Etude de la production d'hydrogène par l'électrolyse et pile à combustion », Mémoire de Magister, Université de Mensouri de Constantine, Page 17 18 19 20 22 23 25 26 27 28.
- [22] Y.n. Morozov et V.B. Aleskovskiii, soviet Electro hem, 7, 9, p. 1220-1222 (1971).
- [23] J. Labbe, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école des mines de Paris spécialité énergétique, 2006.
- [24] M. Sahli, Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible, mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [25] R. Momirlan et T. Veziroglu, " Recent directions of world hydrogen production", Ren. Sust. EnergyRev. 3 (1999) 219. DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE Soutenu le 03 OCTOBRE 2008.
- [26] Ben messaud Muhammed Tarik, "Système d'énergie hybride YSTÈME PV-SOFC Étude de cas de réalisation stationnaire à l'USTO", Thèse de Doctorat de l'université de Mohamed Boudiaf ORAN, 03.07.2012.
- [27] "pile à combustible stationnaire", Rapport d'étude n° DRA-17-156712-00653A, Contexte réglementaire et net normatif international et national risques potentiels, 31.01.2017.
- [28] Boudellal, Méziane, "La pile à combustible structure, fonctionnement, applications", DUNOD, 2007.

REFERENCES

- [29] Boudellal, Méziane, “La pile à combustible: L’hydrogène et ses applications”, 2e édition, DUNOD 2007,2012.
- [30] K. KORDESCH et G. SIMADER, Fuel Cells and Their Applications, ed VCH, Fuel Cell Handbook (5ième edition) EG&G services, Parson, Inc. Science Applications, International Corporation (CD ROM). 1996.
- [31] EL H. AGLZIM, « Caractérisation par spectroscopie d’impédance de l’impédance complexe d’une pile à combustible en charge ». Thèse de doctorat de l’Université Henri Poincare-Nancy1, 2009.
- [32] E.FRAPPÉ (2012) : Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW, thèse de doctorat, Université Paris-Sud.
- [33] Y.ABDERRAHIM et R.BELBACHIR (2014) : Contribution à l’étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d’une pile à combustible de type PEMFC, thèse de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [34] N.MEDDOUR (2010) : simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide, thèse de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [35] F.BREQUE(2008) : modélisation du transport de masse dans une pile à combustible de type pem et étude de l'humidification interne de la pile, thèse de doctorat, l'Université du Québec A Trois-Rivières.
- [36] BLUNIER (B.) et MIRAOUI (A.). - Piles à combustible : Principes, modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés. ELLIPSES (2007).
- [37] BOILLOT (M.). – Validation expérimentale d’outils de modélisation d’une pile à combustible de type PEM. Thèse de doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France (2005).
- [38] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel, and H. J. R. d. é. r. Benmoussa, "Modélisation d’une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation

REFERENCES

expérimentale," vol. 8, no. 2, pp. 109-121, 2005.

[39] A. Boucetta, "Modélisation 2D d'une pile à combustible type PEMFC pour une application embarquée," , Thèse de Doctorat , Université mohamed khider Biskra, 2019.

[40] M. Danoune, A. Djafour, Y. Wang, and A. J. I. J. o. H. E. Gougui, "The Whale Optimization Algorithm for efficient PEM fuel cells modeling," vol. 46, no. 75, pp. 37599-37611, 2021.

[41] M. Boudellal, "La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications", Dunod, 2007.

[42] W. Gong and Z. J. E. A. o. A. I. Cai, "Parameter optimization of PEMFC model with improved multi-strategy adaptive differential evolution," vol. 27, pp. 28-40, 2014.

[43] V. Reguillet, "Caractérisation d'un système pile à combustible en vue de garantir son démarrage et fonctionnement à température ambiante négative," Université de Franche-Comté, 2013.

[44] A. J. R. E. El-Fergany, "Extracting optimal parameters of PEM fuel cells using Salp Swarm Optimizer," vol. 119, pp. 641-648, 2018.

[45] A. Z. KOUACHE and A. DJAFOUR, "Mathematical Modeling and Characterization of the PEM Fuel Cell," (IEEEES-13) Conference paper, 2022.

[46] El-Fergany, A. A. (2018). Extracting optimal parameters of PEM fuel cells using Salp Swarm Optimizer. *Renewable Energy*(119,641–648). doi:doi:10.1016/j.renene.2017.12.051

[47] A. Z KOUACHE, L. RAHOUMA "Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type PEM par utilisation des méthodes méta-heuristiques", Mémoire de Master 2, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, 2020.

[48] Mirjalili S, et Lewis A, ‘‘ The whale optimization algorithm’’ *Eng Software* 95:51-67 (2016).

[49] M.B. Danoune, A. Djafour, Yue Wang, et A. Gougui, ‘‘ The Whale Optimization Algorithm for efficient PEM fuel cells modeling’’ *Int J Hydrogen Energy* (2021).

[50] Mohamed DEKKICHE. Modélisation et simulation d'un système hybride autonome (PV/ EOLIENNE/DIESEL) pour alimenter un site isole a Chlef, Algérie, thèse de doctorat,UHBC, 2017.

Annexes

Algorithme 1 : Pseudo-code de minimisation par WOA [55].

01: Initialiser le population (x) aléatoirement dans l'espace de recherche (1, 2, ...Pop)

02: Calculer la FObj de tout les particules .

03: Mettez \vec{X}^* comme la position correspondent au meilleur solution (minimum).

04: It=1

05: Max_It=1000

06:For1 (pour chaque itération, It)

07 :For2 (pour chaque individuelle)

08:If1 [FObj ($\vec{X}(i)$) < FObj (\vec{X}^*)]

09: Alors, $\vec{X}^* = \vec{X}(i)$

10: End if1

11 : Calculer les coefficients A, a, l, et P

12:If2 (P<0.5)

13:If3 (|A|<1)

14 : Ajuster le particule ($\vec{X}(i)$) actuelle par l'équation (III.1)

15 : Elseif3 (|A| ≥1)

16 : Sélectionner un individu $\vec{X}_{rand}(i)$ aléatoirement de la population actuelle

17 : Ajuster le particule ($\vec{X}(i)$) actuelle par l'équation (III.7)

18: End if3

19 :Else if2 (P≥0.5)

20 : Ajuster le particule ($\vec{X}(i)$) actuelle par l'équation (III.5)

21 : End if2

22 : End for2

23 : Si un agent sort de l'espace de recherche, rectifiez-le

Annexes

24: End for1

25: Returner à \vec{X}^*

الملخص

نظرا لخطر إنتاج الطاقة من الوقود الأحفوري (النفط والغاز) ، باعتبارها طاقة غير متجددة ، فإنها تسبب مشاكل محددة للبيئة من خلال استخدامها المتكرر ، لذلك تحولنا إلى الطاقة البديلة ، وهي الطاقة المتجددة ، بما في ذلك الطاقة الشمسية . ومع ذلك ، يحتاج الأخير إلى مساعدة في التقلبات والمزيد من الطاقة. في استمرارية وتحسين نظامنا ، قمنا بإضافة طاقة الهيدروجين إليه ، والتي من خلالها تصبح أنظمتنا هجينة. لقد اعتمدنا على خوارزمية تحسين الحوت في الخطوة الأولى لاستخراج المعلمات المثلى للوحدة الكهروضوئية. تعتمد تقنية البحث الاحتمالي هذه على السكان أو مجموعة من الحلول المحتملة لإيجاد الحل المطلوب. من خلالها ، توصلنا إلى تطابق جيد بين المنحنيات التجريبية والمنحنية المقدره مع $RMSE = 0.0282$ ، مما يعني أن طريقة WOA هي تقنية فعالة للغاية لاستخراج المعلمات. في الجزء الثاني ، استخدمنا برنامج HOMER للتصميم الأمثل لنظام هجين قائم بذاته. حصلنا على إنتاج سنوي للكهرباء يبلغ 84,983 كيلوواط ساعة ، أي 77,900 كيلوواط ساعة من الأنظمة الكهروضوئية (91.7% من إجمالي التوليد) و 7,083 كيلوواط ساعة من خلية الوقود (8.3% من إجمالي التوليد) ، لذلك يمكننا القول أنه يمكننا تلبية متطلبات الحمل 61.76 كيلو واط ساعة في اليوم.

الكلمات الرئيسية: قائمة بذاتها ; نظام هجين ; PV / FC ; تحديد المعلمات الكهروضوئية ; التصميم الأمثل ; HOMER .

Résumé

En raison du danger de produire de l'énergie à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz), considérée comme une énergie non renouvelable, elle cause des problèmes spécifiques à l'environnement par son utilisation fréquente, nous nous sommes donc tournés vers les énergies alternatives, qui sont des énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire . Cependant, ce dernier a besoin d'aide pour les fluctuations et de plus d'énergie. Dans la continuité et pour améliorer notre système, nous y avons ajouté de l'énergie hydrogène, grâce à laquelle nos systèmes deviennent hybrides. Nous nous sommes appuyés sur l'algorithme d'optimisation Whale dans la première étape pour extraire les paramètres optimaux du module PV. Cette technique de recherche probabiliste s'appuie sur la population ou un ensemble de solutions potentielles pour trouver la solution souhaitée. Grâce à cela, nous avons atteint une bonne correspondance entre les courbes expérimentales et estimées avec $RMSE = 0,0282$, ce qui signifie que la méthode WOA est une technique d'extraction de paramètres très efficace. Dans la deuxième partie, nous avons utilisé le logiciel HOMER pour la conception optimale d'un système hybride autonome. Nous avons obtenu une production annuelle d'électricité de 84 983 kWh, soit 77 900 kWh des systèmes photovoltaïques (91,7 % de la production totale) et 7 083 kWh de la pile à combustible (8,3 % de la production totale), nous pouvons donc dire que nous pouvons répondre à l'exigence de charge de 61,76 kWh par jour.

RESUME

Mots clés : Un stand-alone ; Système hybride PV/FC ; identification des paramètres PV ; Conception optimale ; HOMER Pro.

Abstract

Due to the danger of producing energy from fossil fuels (oil, gas), considered non-renewable energy, it causes specific problems to the environment by its frequent use, so we have turned to alternative energy, which is renewable energy, including solar energy. However, the latter needs help with fluctuations and more energy. In continuity and to improve our system, we have added hydrogen energy to it, through which our systems become hybrid. We relied on the Whale Optimization Algorithm in the first step to extract the PV module's optimal parameters. This probabilistic search technique relies on the population or a set of potential solutions to find the desired solution. Through it, we reached a good match between the experimental and estimated curves with $RMSE = 0.0282$, which means that the WOA method is a very efficient parameter extraction technique. In the second part, we used HOMER Software for the optimal design of a stand-alone hybrid system. We obtained an annual electricity production of 84,983 kWh, i.e., 77,900 kWh from photovoltaic systems (91.7% of total generation) and 7,083 kWh of the fuel cell (8.3% of total generation), so we can say that we can meet the load requirement of 61.76 kWh per day.

Keywords: A stand-alone; PV/FC Hybrid system; PV parameter identification; Optimal design; HOMER Pro.