

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 :

HAMIDATOU Taha

KHENNOUR Sallah eddine

Thème:

**Etude d'un système de pile à combustible
alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque**

Soutenu publiquement

Le : 10/06/2018

Devant le jury :

M ^f Ider Zahir	MAA	Président	UKM Ouargla
M ^f Djafour Ahmed	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^f Gougui Abdelmoumen	Doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla
M ^f Bouhafs Ali	MAA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2017/2018



Dédicace

Nous dédions ce modeste travaille a :

A nos chers parents

Pour leur soutien, leur patience, leur sacrifice et leur amour,
vous méritez tout éloge, vous qui avez fait de nous ce que nous
sommes maintenant.

Nous espérons être l'image que vous êtes fait de nous, que dieu
vous garde et vous bénisse.

Nous dédions aussi ce travail à nos chers frères et sœurs, pour
leur affection et leur encouragement qui on toujours été pour
nous des plus précieux.

Que ce travail soit pour vous le gage de notre profond amour

A tout nos amis

A tous ceux qui nous ont aidés.

A tous ceux que nous aimons.

Taha HAMIDATOU ^ ^





Dédicace

*A mon Très cher père Rachid qui m 'a donné la vie allah
yarhmou*

*A mon Très cher oncle Dr. Djamel Eddine qui est devenu
mon père et mon destin dans la vie*

A ma très Chère Mère

A ma Très Chère Frère Majdi, Omar

Chère sœur Ftihal

Ma chère famille

Mon cher binôme Taha Hamidatou

Pour nos très chers amis

A tous les étudiants de électrotechniques

A tous les enseignants du département génie électrique

A tous les travailleurs de l' université kasdi merbah

Sallah eddine



Remerciement

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

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

*Nous voudrions remercier spécialement **Mr.GOUGUI A.abdelmoumen**, chercheur à l'université d'Ouargla, Co-encadreur de cette mémoire, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et sa qualité humaine.*

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté. D'examiner et d'évaluer notre travail

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tout l'équipe de centre de recherche **DANOUNE Mohammed Bilal, SACI A.abdelmoumen, BEN SID Khaled** pour ses conseils et son aides.*

*Nous tenons à remercier **Prof.KHENNOUR Salah** Directeur de Laboratoire de recherche Le Français des Ecrits Universitaires chez Faculté des Lettres et Langues Université Kasdi Merbah Ouargla ,Ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité et sa qualité humaine ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.*

Et tous les professeurs de département de Génie électrique.

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

Liste des acronymes

❖ *Acronymes*

PV	Photovoltaïque
STC	Standard Test Conditions
GPV	Générateur Photovoltaïque
KOH	Hydroxyde de potassium
K⁺	Potassium
OH⁻	Ion hydroxyde
Pt	Points triples
PAC	Pile à combustible
PEM	Proton Exchange Membrane
AFC	Alcaline Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
AM	Masse d'air
SOEC	Solid Oxyde Electrolyser Cell
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NASA	National Aeronautics and Space Administration
UV	Ultra-violet
IR	Infrarouge
FT	feux tricolores
ONM	Office National de Météorologie

Sommaire

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Liste des Acronymes	
Liste des figures	
Liste des Tableau	
Introduction générale	11
CHAPITRE I : Gisement solaire et l'énergie photovoltaïque	
I.1. Introduction	4
I.2. L'énergie du soleil	4
I.2.1 La ressource solaire	4
I.2.2 Rayonnement solaire hors atmosphère	5
I.2.3. Distribution spectrale de rayonnement solaire	5
I.2.4. Déclinaison du soleil	6
I.2.5. Trajectoire apparente du Soleil	7
I.3. Le rayonnement solaire au niveau de sol	8
I.3.1. L'atmosphère	8
I.3.2. Masse d'air	8
I.4. Composants de la radiation solaire dans un plan incliné	9
I.4.1. Le rayonnement direct	9
I.4.2. Le rayonnement diffus	9
I.4.3. Le rayonnement dû à l'albédo	10
I.4.4. Le rayonnement global	10
I.5. L'énergie solaire en Algérie	10
I.6. L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface Inclinée	11
I.7. La conversion de la lumière en électricité	12
I.8. Technologie des cellules solaires	13
I.9. Fabrication des cellules photovoltaïques	14
I.10. L'effet et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	14
I.11. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque	15
I.11.1. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode	15
I.11.2. Courant de court circuit (I_{sc})	16
I.11.3 Tension en circuit ouvert (V_{oc})	16
I.11.4 Point de puissance maximale (P_{max})	17
I.11.5. Rendement maximum	17

I.12.	Le panneau solaire.....	18
I.12.1.	Montage en série.....	18
I.12.2.	Montage en parallèle.....	19
I.13.	Différents types de systèmes photovoltaïques	19
I.13.1.	Les systèmes autonomes	19
I.13.2.	Les systèmes hybrides	20
I.13.3.	Les systèmes connectés au réseau	20
I.14.	Les batteries dans les systèmes photovoltaïques.....	21
I.14.1.	Stockage par systèmes hydrauliques.....	21
I.14.2.	Couplage avec un stockage de gaz naturel	21
I.14.3.	Stockage sous forme thermique	22
I.14.4.	Stockage sous forme d'hydrogène.....	22
I.15.	Production d'hydrogène à partir d'énergie solaire	22
I.16.	Conclusion	22

CHAPITRE II : Production d'hydrogéné solaire

II.1.	Introduction	24
II.2.	Définition et Propriété de l'hydrogène	24
II.3.	Différents procédés de production d'hydrogène	25
II.3.1.	Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures	25
II.3.1.1.	Produit de l'hydrogène à partir la vaporeformage.....	25
II.3.1.2.	Produit de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle.....	26
II.3.2.	Produit de l'hydrogène à partir la gazéification	26
II.3.3.	Produit de l'hydrogène à partir algues vertes et bactéries (biologique)	26
II.3.4.	Produit de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire	27
II.3.5.	Technique de production de l'hydrogène solaire	27
II.4.	Electrolyse de l'eau.....	28
II.4.1.	Effet de la température sur la tension d'électrolyse	29
II.4.2.	Effet de la pression sur la tension d'électrolyse	29
II.4.3.	Le rendement de l'électrolyseur.....	30
II.4.4.	Les différentes technologies d'électrolyseurs	30
II.4.4.1.	Electrolyseurs Alcaline	31
II.4.4.2.	Electrolyseurs PEM (Proton Exchange Membrane)	32
II.4.4.3.	Electrolyseurs à haute température (SOEC, SolidOxydeElectrolyserCell)	33
II.5.	Les types des couplages de l'électrolyseur.....	35
II.5.1.	Couplage direct du générateur photovoltaïque avec un électrolyseur PEM.....	35
II.5.2.	Couplage du générateur photovoltaïque avec un électrolyseur PEM via un MPPT	36
II.6.	Stockage d'Hydrogène	36

II.6.1.	Sous forme gazeuse.....	36
II.6.2.	Sous forme liquide	36
II.6.3.	Sous forme basse pression	37
II.6.4.	Sous forme solide (hydrure métallique)	37
II.7.	Les domaines d'utilisation d'hydrogène.....	37
II.7.1.	Applications stationnaires	37
II.7.2.	Applications mobiles.....	38
II.7.3.	Applications industrielles.....	39
II.8.	Transport de l'hydrogène	39
II.8.1.	Le transport par gazoducs	39
II.8.2.	Transport routier ou ferroviaire.....	40
II.8.3.	Le transport maritime	40
II.9.	La Future d'utilisation d'hydrogène.....	40
II.10.	Conclusion.....	41

CHAPITRE III : Système de pile à combustible

III.1.	Introduction.....	42
III.2.	Qu'est-ce qu'une pile à combustible.....	42
III.3.	Historique des piles à combustible.....	42
III.4.	Le renouveau de la pile à combustible.....	43
III.5.	Structure de la pile à combustible	44
III.5.1.	Les électrodes.....	44
III.5.2.	L'électrolyte	45
III.5.3.	Les plaques bipolaires	45
III.6.	Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	46
III.7.	Expression du débit d'Hydrogène et d'Oxygène	48
III.8.	Les différentes piles à combustible	49
III.8.1.	La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).....	49
III.8.2.	La pile à combustible alcaline AFC (Alkaline Fuel Cell).....	51
III.8.3.	La pile à combustible à acide phosphorique PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) ..	52
III.8.4.	La pile à combustible à carbonates fondus MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) .	53
III.8.5.	La pile à combustible à oxyde solide SOFC (Solid oxide fuel cells).....	54
III.9.	Caractéristiques de technologie des piles à combustible	55
III.9.1.	Densité de courant.....	55
III.9.2.	Tension réelle.....	55
III.9.3.	Récapitulatif des différentes technologies des piles à combustible.....	56
III.10.	Dimensionnement d'un stack.....	57

III.11.	Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible.....	57
III.12.	Les applications des piles à combustibles.....	58
III.12.1.	Applications portables.....	59
III.12.2.	Applications de type transport	59
III.12.3.	Applications stationnaires	60
III.13.	Conclusion	61
CHAPITRE IV : Expérimentations sur un système de pile à combustible		
IV.1.	Introduction.....	62
IV.2.	Expérimentation.....	62
IV.3.	Description du système	63
IV.3.1.	Bouteille métal hydrure.....	63
IV.3.2.	Détendeur et manomètres.....	63
IV.3.3.	Débitmètre.....	64
IV.3.4.	Module de la pile à combustible	64
IV.3.5.	Accessoire de la pile.....	64
IV.3.6.	Module de Feu de circulation.....	64
IV.3.7.	Système de refroidissement.....	64
IV.3.8.	Vanne de purge	65
IV.3.9.	Convertisseur DC/DC	65
IV.3.10.	Système d'acquisition	65
IV.4.	Logiciel d'acquisition	65
IV.5.	Caractéristiques et performances	66
IV.5.1.	Caractéristique tension-Courant (V-I).....	67
IV.5.2.	Caractéristique puissance-Courant (P-I)	67
IV.5.3.	Caractéristique de la consommation d'hydrogène (ml/min).....	68
IV.5.4.	L'influence de la température sur les caractéristiques électriques de la pile	69
IV.5.5.	L'influence de la ventilation sur les caractéristiques électriques de la pile	69
IV.6.	Consommation propre de la pile	70
IV.7.	Pertes de la pile au niveau du convertisseur.....	71
IV.8.	Rendement électrique du stack.....	72
IV.9.	Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/ pile à combustible.....	73
IV.9.1.	Détermination de la charge (feu tricolore)	74
IV.9.2.	Organigramme temporel de fonctionnement d'un système hybride PV/Pile à combustible étudié dans les deux cas.....	75
IV.9.3.	Dimensionnement de système photovoltaïque.....	79
IV.9.3.1.	Estimation de la durée d'insolation.....	79
IV.9.3.2.	L'énergie consommée par jour (E_c).....	80

IV.9.3.3.	L'énergie nécessaire produite (E_p).....	80
IV.9.3.4.	Nombre de panneaux pour produire l'énergie nécessaire (P_c).....	81
IV.9.3.5.	Dimensionnement des batteries.....	81
IV.9.3.6.	Dimensionnement des régulateurs	81
IV.9.3.7.	Electrolyseur	82
IV.9.3.8.	Dimensionnement d'une installation de système d'une pile à combustible.....	82
IV.10.	Résultats de dimensionnement	82
IV.10.1.	Les résultats de dimensionnement dusystème hybride Pile/PV cas des batteries alimentant les feux tricolores et l'électrolyseur durant l'autonome	82
IV.10.2.	Les résultats de dimensionnement du système hybride Pile/PV cas des batteries alimentant seulement les feux tricolores durant l'autonome	83
IV.11.	Conclusion	83
	Conclusion générale	85
	Références Bibliographiques	
	Annexes	

Liste des figures

CHAPITRE I

Fig. (I.1) Echanges énergétiques entre la surface terrestre, l'atmosphère et l'espace en $[\text{W}/\text{m}^2]$.

Fig. (I.2) Spectre d'irradiante solaire.

Fig. (I.3) Mouvement de la terre autour du soleil.

Fig. (I.4) Définition de la position du soleil (hauteur(h) et azimut(a)).

Fig. (I.5) Définition de masse d'air.

Fig. (I.6) Différents types de rayonnement.

Fig. (I.7) Conversion de l'énergie solaire en électricité.

Fig. (I.8) Principe de la conversion photovoltaïque.

Fig. (I.9) Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode.

Fig. (I.10) Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque.

Fig. (I.11) Branchement des modules en séries.

Fig. (I.12) Branchement des modules en parallèles.

Fig. (I.13) Systèmes photovoltaïque autonome.

Fig. (I.14) Systèmes photovoltaïque hybride.

Fig. (I.15) Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

CHAPITRE II

Fig. (II.1) Système synoptique de production de l'hydrogène solaire.

Fig. (II.2) L'électrolyse de l'eau.

Fig. (II.3) Principe de l'électrolyse Alcalin.

Fig. (II.4) Principe schématique de l'électrolyse PEM.

Fig. (II.5) Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

Fig. (II.6) système de production d'hydrogène.

Fig. (II.7) Voiture à hydrogène.

Fig. (II.8) Générateur d'hydrogène d'oxygène pour l'industrie pharmaceutique.

Fig. (II.9) Procédés de production et applications d'hydrogène.

CHAPITRE III

Fig. (III.1) Schéma de principe de conversion directe en électricité.

Fig. (III.2) L'expérience de Sir William, inventeur historique de la Pile à Combustible.

Fig. (III.3) Projet de Gemini.

Fig. (III.4) Catalyseur du côté cathode.

Fig. (III.5) Vue éclatée d'une pile à combustible.

Fig. (III.6) Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

Fig. (III.7) Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

Fig. (III.8) Structure d'un empilement de cellule PEMFC.

Fig. (III.9) Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC.

Fig. (III.10) Principe de la pile à combustible alcaline.

Fig. (III.11) Principe de la pile à combustible à acide phosphorique.

Fig. (III.12) Principe de la pile à combustible MCFC.

Fig. (III.13) Principe de la pile à combustible SOFC.

Fig. (III.14) Equivalent électrique d'une pile à combustible.

Fig. (III.15) Influence de la polarisation sur la tension.

Fig. (III.16) Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g.

Fig. (III.17) L'utilisation de la pile à combustible aux transports.

Fig. (III.18) Pile MCFC 250 kW baptisée CELLIA et mise en place par Dalkia dans un HLM à Paris.

CHAPITRE IV

Fig. (IV.1) Système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire Photovoltaïque.

Fig. (IV.2) Maquette d'expérimentations.

Fig. (IV.3) Interface de logiciel de fuel Cell trainer.

Fig. (IV.4) Schéma électrique du branchement de la pile (PEMFC) à alimentation extérieure.

Fig. (IV.5) Courbe de caractérisation $V = f(I)$.

Fig. (IV.6) Courbe de la puissance en fonction de courant de la pile $P = f(I)$.

Fig. (IV.7) Courbe de consommation d'hydrogène en fonction du courant.

Fig. (IV.8) Courbe de caractérisation $V = f(I)$ avec différentes température.

Fig. (IV.9) Courbe de la tension en fonction du courant $U = f(t)$ avec différentes gestion d'air.

Fig. (IV.10) Schéma électrique du branchement de la pile (PEMFC) à auto alimentation.

Fig. (IV.11) Courbe de caractéristique de consommation propre de la pile.

Fig. (IV.12) Schéma électrique du branchement de la pile (PEMFC) à travers le convertisseur.

Fig. (IV.13) Courbe de caractérisation $V = f(I)$ avec et sans convertisseur.

Fig. (IV.14) Rendement électrique de la PAC.

Fig. (IV.15) Système de quatre feux tricolores placé dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla.

Fig. (IV.16) Système hybride photovoltaïque/ pile à combustible alimentant des feux tricolores.

Fig. (IV.15) Puissance utile d'un intervalle du feu tricolore.

Fig. (IV.16) Organisation temporelle de fonctionnement d'un système hybride PV/ Pile à combustible étudié (Cas les batteries alimentée la charge et l'électrolyseur durant l'autonome).

Fig. (IV.17) Organisation temporelle de fonctionnement d'un système hybride PV/ Pile à combustible étudié (Cas les batteries alimentée seulement la charge durant l'autonome).

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tab. (I.1) La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde.

Tab. (I.2) Potentiel Solaire de L'Algérie.

Tab. (I.3) Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium.

CHAPITRE II

Tab. (II.1) Synthèse sur les électrolyseurs alcalins.

Tab. (II.2) Synthèse sur les électrolyseurs PEM.

Tab. (II.3) Synthèse sur les électrolyseurs à haute température.

CHAPITRE III

Tab. (III.01) Tableau récapitulatif des différentes technologies de piles à combustible.

Tab. (III.02) Modularité d'un stack : 3 exemples de conception d'une PAC PEM de 5 kW.

CHAPITRE IV

Tab. (IV.1) l'irradiation solaire journalière et la durée d'insolation de (2004-2017) de l'ONM d'Ouargla.

Tab. (IV.2) Résultats de dimensionnement système hybride PV/Pile (batteries fonctionne 8.9h dans les jours d'autonomies).

Tab. (IV.3) Résultats de dimensionnement d'un système hybride PV/Pile (batteries fonctionne 24h dans les jours autonomes).

Introduction générale

Introduction générale

Face aux prix pétroliers contradictoires, les ressources énergétiques fossiles ne sont pas une solution permanente aux sources d'énergie, pour faire face à l'épuisement et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer à l'être. Une énergie renouvelable est une énergie utilisant des éléments naturels, renouvelés plus rapidement qu'ils ne sont consommés. Ainsi, le solaire, l'hydraulique, la géothermie, l'éolien sont des énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement, le recours aux énergies renouvelables apparaît comme une des meilleures alternatives aux énergies fossiles.

L'Algérie, de par sa situation géographique, bénéficie des conditions favorables à l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, l'une des possibilités de l'exploitation de l'énergie solaire est sa transformation directe en une énergie électrique, au moyen des convertisseurs photovoltaïques. La plupart de l'électricité produite dans le monde (82 %) provient de la décomposition de combustibles fossiles (pétrole, charbon ou gaz naturel) ou de combustibles nucléaires. Bien que le gisement planétaire des combustibles fossiles soit très large, il est néanmoins limité. De plus, son renouvellement n'est pas observable à l'échelle temporelle de l'homme. Enfin, l'impact environnemental de ces modes de production d'électricité est notable, comme la production de gaz à effet de serre tel que le gaz carbonique (CO₂) ou de déchets radioactifs. [1]

Au niveau environnemental les piles à combustibles apparaissent comme d'excellents moyens de production d'électricité car elles sont non polluantes. Il faut néanmoins émettre une réserve sur l'origine de l'hydrogène (hydrocarbures fossiles, énergie renouvelable...) et son mode de production. [2] L'hydrogène peut apporter une réponse aux enjeux climatiques en permettant de rationaliser l'utilisation des énergies renouvelables par nature dispersées et aléatoires. L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut en effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Outre sa fonction de vecteur énergétique, est alors exploitée son caractère stockable permettant d'une part, de s'affranchir du côté aléatoire de ces modes de production, et d'autre part, de répondre aux exigences fixées par les consommateurs d'énergie. La pile à combustible s'impose alors naturellement comme le chaînon manquant en transformant l'énergie chimique en énergie électrique pouvant être manipulée avec des rendements élevés.

Dans ce travail on s'intéresse au système de piles à combustibles de type PEMFC et leurs caractéristiques électriques ainsi qu'aux différentes technologies utilisées. Par la suite nous allons établir une méthodologie de calcul pour le dimensionnement de générateur photovoltaïque qui assure l'alimentation de l'électrolyseur pour la production d'hydrogène utile pour le fonctionnement de système des piles à combustible, en introduisant les caractéristiques techniques nécessaires des composants de système

Le mémoire est divisé en quatre chapitres, dans le premier chapitre nous avons étudié les ressources de l'énergie solaire et l'origine de cette source commençant par quelques notions sur le rayonnement solaire, hors atmosphère et au niveau de sol, et nous avons présenté la technologie photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule solaire photovoltaïque et nous expliquons les différents types de couplage des systèmes photovoltaïques.

Ensuite dans le deuxième chapitre nous avons abordé quelque méthode de la production d'hydrogène (hydrocarbures, solaire, biologique...) Et alors les types de stockages d'hydrogène et puis nous avons appris le moyen le plus important de produire l'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau, et les différents types de L'électrolyseur d'eau.

Le troisième chapitre présente une source de production de l'énergie électrique à travers la conversion de l'énergie chimique en électricité par l'utilisation d'une pile à combustible, et on distingue six types de piles à combustible et leurs caractéristiques dans un second temps nous allons les domaines d'applications de la pile à combustible.

Enfin dans le quatrième chapitre nous avons présenté une étude expérimentale sur les caractéristiques de notre système de pile à combustible et l'étude des performances de ce système par détermination de la relation entre le débit d'hydrogène consommé et la puissance fournie à la charge, par la suite nous allons établir deux stratégies de dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/ Pile à combustible qui assure l'alimentation sans interruption d'un feu tricolore placé dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla, pour ce la nous établis un programme dans le logiciel MATLAB pour déterminer les caractéristiques techniques nécessaires des composants de système en tenant compte des données climatiques du site d'Ouargla et les besoins en énergie électrique de notre charge, dans le but de bonne gestion de l'énergie électrique.

CHAPITRE I

*Gisement solaire et l'énergie
Photovoltaïque*

I.1. Introduction

Aujourd'hui dans le monde entier, L'énergie solaire est un besoin fondamental au développement économique, en plus de ça l'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. Elle est à plusieurs avantages : il s'agit d'une énergie inépuisable puisqu'elle est issue des rayons du soleil et, de ce fait, elle fiable et respecte la nature et l'environnement. Par ailleurs, l'intégration des panneaux photovoltaïques est simple et l'installation est facile d'emploi. Le coût de fonctionnement est faible.

I.2. L'énergie du soleil

I.2.1 La ressource solaire

Le soleil est une immense sphère de plasma de diamètre 109 fois supérieur à celui de la terre, de densité 1,41 fois; la pression qui y règne à sa surface est de plusieurs milliards de fois plus forte que celle observée au niveau de la surface terrestre. Le constituant principal du soleil est l'hydrogène, des réactions thermonucléaires se produisent alors en permanence provoquant la fusion de l'hydrogène en Hélium. La température à la surface du soleil est de 5800°K et peut atteindre 20.10^6 à son centre. A chaque seconde, le soleil perd $4,5.10^6$ tonnes de matières sous forme de rayonnement électromagnétique se propageant à la vitesse de 300.000 km/s . notons toutefois que la perte de matière est infime vis-à-vis de la masse totale du soleil. Ce rayonnement solaire est équivalent au rayonnement qui serait émis par un corps noir à 5800°K . [3] En d'autres termes, c'est un rayonnement électromagnétique, dont le spectre couvre toutes les fréquences possibles et dont l'intensité est maximum dans la gamme visible. [4]

La puissance rayonnée à la surface du soleil est à peu près égale $3,79.10^{26}$ Watt, la quantité interceptée par la terre est de $1,7.10^{17}$ Watt, 30 % est réfléchi vers l'espace, 47 % absorbé et réémis vers l'espace sous forme de rayonnement dans l'infrarouge, 23 % sert de source d'énergie au cycle d'évaporation et précipitation de l'atmosphère et 0,5 % se trouve sous forme de photosynthèse dans les plantes Fig. (I-1)

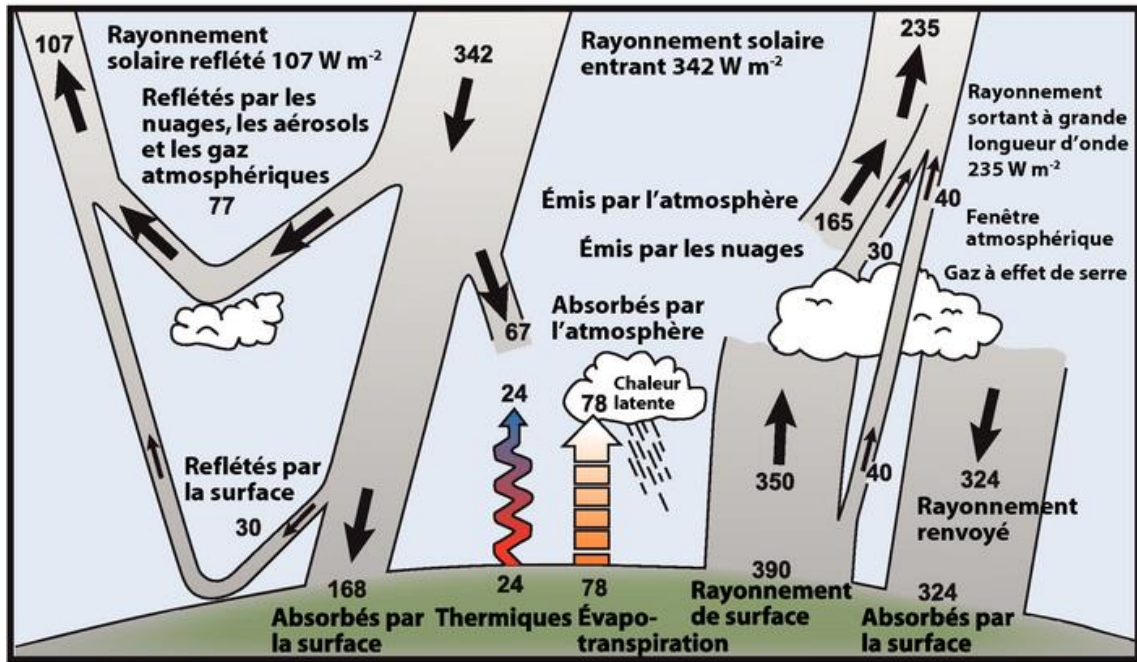


Fig. (I.1) Echanges énergétiques entre la surface terrestre, l'atmosphère et l'espace en W/m² [5]

I.2.2 Rayonnement solaire hors atmosphère

Le rayonnement solaire parvient à la limite de l'atmosphère terrestre après un trajet dans l'espace d'environ 150.000.000 km, effectué en 8 minutes. Le flux de rayonnement intercepté par un récepteur plan perpendiculaire à la direction du soleil produit sur celle-ci un éclairement énergétique de l'ordre de 1367 [W/m²]. Ceci est connu sous le nom de « constante solaire ». Cependant, la distance de la terre au soleil n'est pas constante tout au long de l'année, il en résulte que le rayonnement extraterrestre oscille par un pourcentage de 3 % [6].

I.2.3. Distribution spectrale de rayonnement solaire

Le spectre du soleil est sa décomposition en longueurs d'onde ou en couleurs comme on l'a vu plus haut. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Sa relation est.

$$E = h.\gamma = \frac{hC}{\lambda} \tag{I.1}$$

E : énergie du photon en [ev] (électron-volt)

h: La constante de Planck $h \approx 6.626070040 \cdot 10^{-34}$ [J.s] (Joule.seconde)

γ : La fréquence.

C : La vitesse de la lumière 300.000.000 m/s

λ : La longueur d'onde en μm

La courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre AM0[5], compilée selon les données recueillies par les satellites, est répartie comme sui:

Tab. (I.1) La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde [7]

	Longueur d'onde en micron	Energie (Solaire) en %
Ultra-violet (UV)	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu m$	6.4 %
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu m$	48.0 %
Infrarouge (IR)	$0.78 < \lambda < 10 \mu m$	45.6 %

La figure I.2 montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1.5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 41.8° au niveau de la mer.

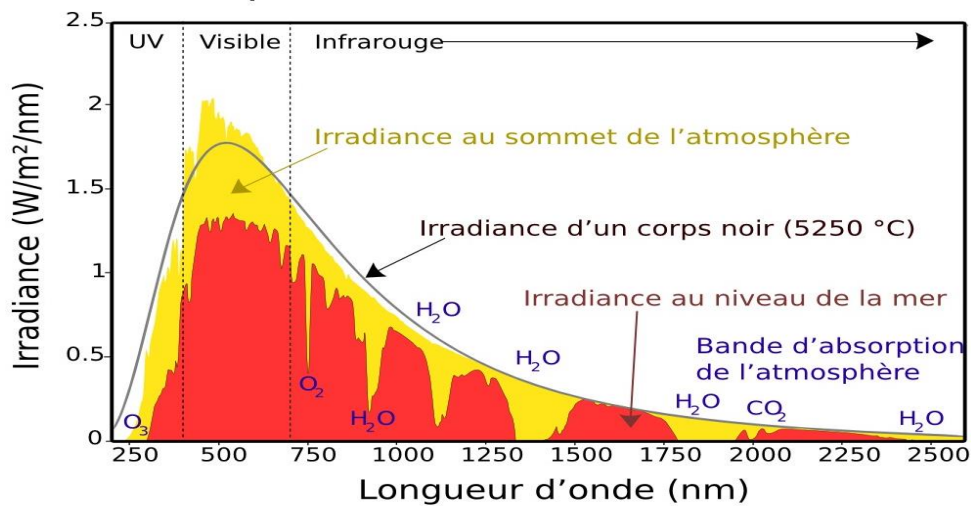


Fig. (I.2) Spectre d'irradiance solaire [7]

I.2.4. Déclinaison du soleil

La Terre décrit autour du Soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le Soleil occupe (Figure I.3). En fait la distance qui les sépare varie de $\pm 1.65 \%$ au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre ($e=0.017$).

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de $23^\circ 27'$ par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison α l'angle formé par l'axe Terre-Soleil avec un plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison vaut donc $+23^\circ 27'$ au solstice au solstice d'été, $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Cette déclinaison est responsable des saisons, car dans

l'hémisphère Nord, les rayons nous parviennent avec un angle plus élevé en été et plus bas sur l'horizon en hiver (c'est le contraire dans l'hémisphère sud). Elle explique aussi que les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes.

On sait également que l'activité solaire n'est pas constante et subit des éruptions solaires, mais leurs conséquences ne dépassent pas 4% de variation d'intensité du rayonnement émis [9].

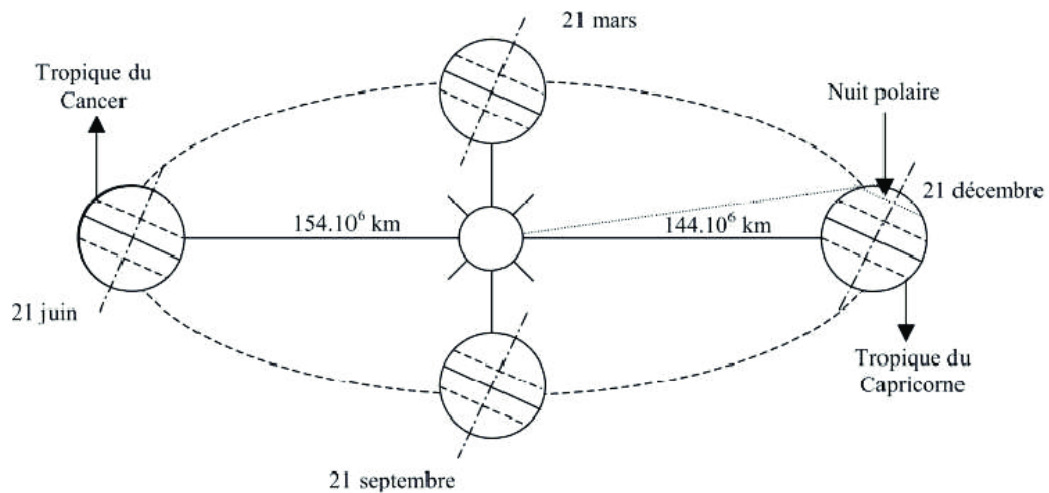


Fig. (I.3) Mouvement de la terre autour du soleil. [9]

I.2.5. Trajectoire apparente du Soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la Terre, le Soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90° dans l'hémisphère nord). Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich (arc de cercle passant par les 2 pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'Est. La position du Soleil est définie par deux angles sa hauteur angulaire h l'angle entre la direction du Soleil et le plan horizontal du lieu et son azimut a l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le Soleil, compté négativement vers l'est (figure I.4). [8]

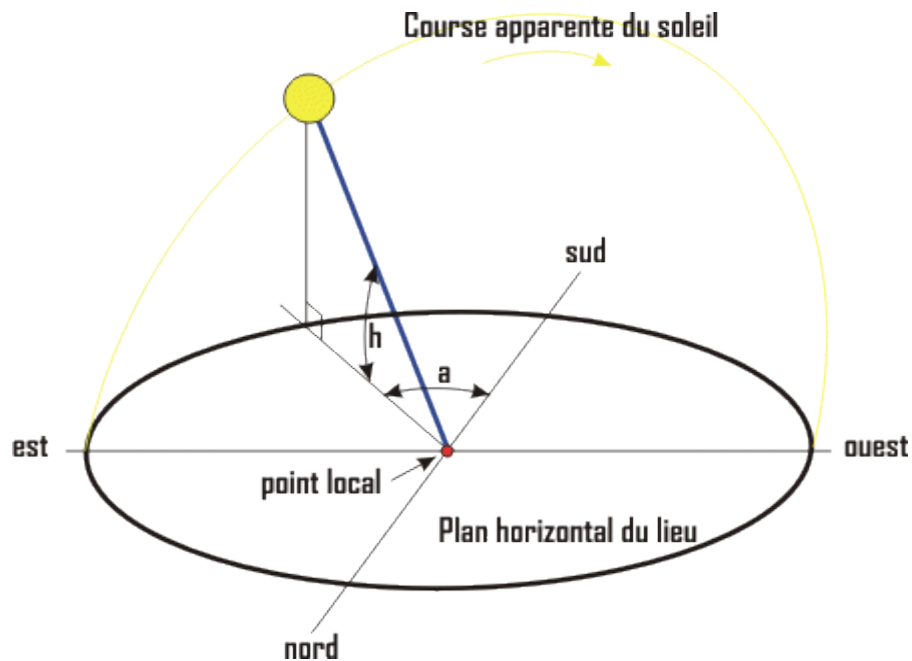


Fig. (I.4) Définition de la position du soleil (hauteur(h) et azimut(a)) [10]

I.3. Le rayonnement solaire au niveau de sol

Le rayonnement arrivant au sol dépend de la réluctance de la surface terrestre et des effets de l'atmosphère qui interviennent dans le double trajet (soleil-terre et terre-satellite) que fait le rayonnement à travers l'atmosphère. Pour connaître l'énergie reçue à un site donné, il est nécessaire de repérer ce site sur la surface terrestre, de connaître la position et la trajectoire du soleil dans la voûte céleste et les mouvements de la terre autour du soleil.

I.3.1. L'atmosphère

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (Les poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelette, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10 μ m). Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.

I.3.2. Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié. On appelle « masse d'air », la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversé vertical au niveau de la mer. Cela dépend de la hauteur

angulaire du soleil (h). à l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère voir la figure (I.5). [10]

$$OM = \frac{OA}{\text{Sin}h} \quad (\text{I.2})$$

On appelle m le rapport :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\text{Sin}h} \quad (\text{I.3})$$

$$M = \frac{p}{1030 \cdot \text{Sin}h} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad (\text{I.4})$$

A une pression p différente de 1013 mbar et à altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air M le nombre :

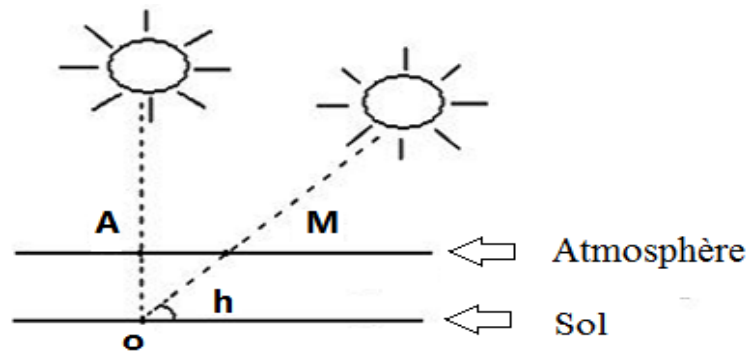


Fig. (I.5) Définition de masse d'air

I.4. Composants de la radiation solaire dans un plan incliné

I.4.1. Le rayonnement direct

C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair.

I.4.2. Le rayonnement diffus

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

I.4.3. Le rayonnement dû à l'albédo

L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

I.4.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure (I.6). [11]

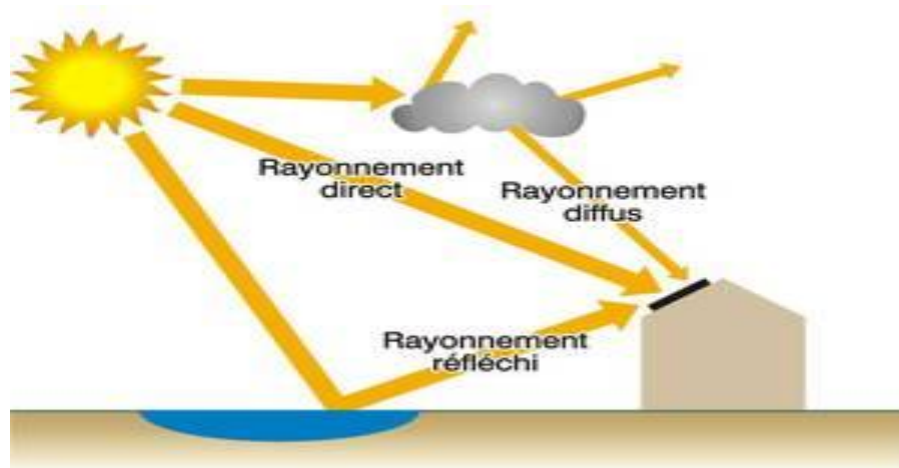


Fig. (I.6) Différents types de rayonnement

I.5. L'énergie solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde 2200 KWh/m²/an. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays. [12]

Tab. (I.2) Potentiel Solaire de L'Algérie. [12]

Région	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

I.6. L'irradiation globale journalière mensuelle sur une surface Inclinée

Les panneaux solaires peuvent être installés au sol ou sur la toiture orientés vers le sud et à l'écart des zones ombragées. Ils devraient présenter un angle de telle sorte que la surface de captation soit perpendiculaire au rayonnement solaire.

Pour la conception des systèmes solaires, nous avons besoins de la moyenne journalière Mensuelle de l'irradiation incidente sur un plan du capteur H_T . [13]

$$H_T = H_b R_b \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (I.5)$$

Avec :

R_b : Facteur de conversion donné par :

$$R_b = \frac{\cos(a - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_s + \omega'_s \cdot \sin(a - \beta) \sin \delta}{\cos(a) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \omega_s \cdot \sin(a) \cdot \sin \delta} \quad (I.6)$$

H_b : La composante directe :

$$H_b = H - H_d \quad (I.7)$$

H_d : La composante diffuse :

$$\frac{H_d}{H} = K_d = a' + b \times K_T \quad (I.8)$$

Pour le Sahara Algérienne $\begin{cases} a' = 0.91 \\ b = 0.98 \end{cases}$

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (I.9)$$

K_T : Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté journalière.

β : L'angle d'inclinaison

H : La moyenne mensuelle de l'irradiation journalière sur un plan horizontal

ρ : L'albédo au sol

ω_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan horizontal

ω'_s : L'angle horaire du coucher de soleil sur le plan incliné

$$\omega'_s = \text{Min}[\omega_s \text{Cos}^{-1}(-\tan(\alpha - \beta) \tan \delta)] \quad (\text{I.10})$$

$$\omega_s = \text{Cos}^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\varphi)) \quad (\text{I.11})$$

I.7. La conversion de la lumière en électricité

Le mot « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

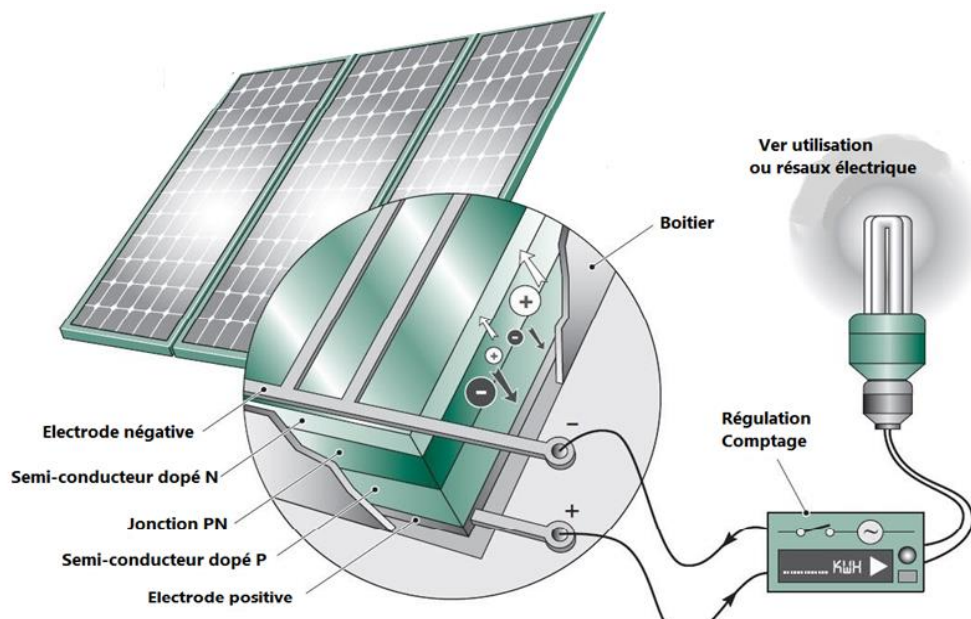


Fig. (I.7) Conversion de l'énergie solaire en électricité.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. Ceci établi, Elle met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

L'absorption de la lumière dans le matériau.

Le transfert d'énergie des photons aux charges électrique.

La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

Les charges élémentaires qui vont produit le courant électrique sous illumination sont des électrons, charge négatives élémentaires, contenus dans la matière semi-

conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) et un ensemble gravitant autour.

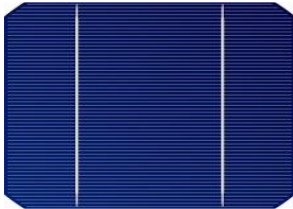


Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les «attire» ensuite vers l'extérieur.

En régime permanent, l'électron libéré laisse un «trou» qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trou dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique. [8]

I.8. Technologie des cellules solaires

Le Silicium est l'un des matériaux le plus courant sur terre, c'est le sable, mais un haut degré de pureté est requis pour en faire une cellule photovoltaïque et le procédé est coûteux. Selon les technologies employées, on retrouve le Silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, le Silicium Poly cristallin de rendement de 13 à 15%, le silicium amorphe présente une efficacité entre 5 et 10%. D'autres matériaux tels que l'Arséniure de Galium et le Tellure de Cadmium qui sont en court de test dans les laboratoires est présentent un rendement de (38%). [14]

Tab. (I.3) Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium [15].

	Silicium monocristallin	Silicium poly cristallin	Silicium amorphe
Types			
Rendement	16 à 18%	13 à 15%	5 et 10%
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

I.9. Fabrication des cellules photovoltaïques

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées Cours Energie Solaire Photovoltaïque « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type **P** ou **N**, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques. [14]

I.10. L'effet et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **n** et dopée de type **p**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériau **p**. La zone initialement dopée **n** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **p** chargée négativement.

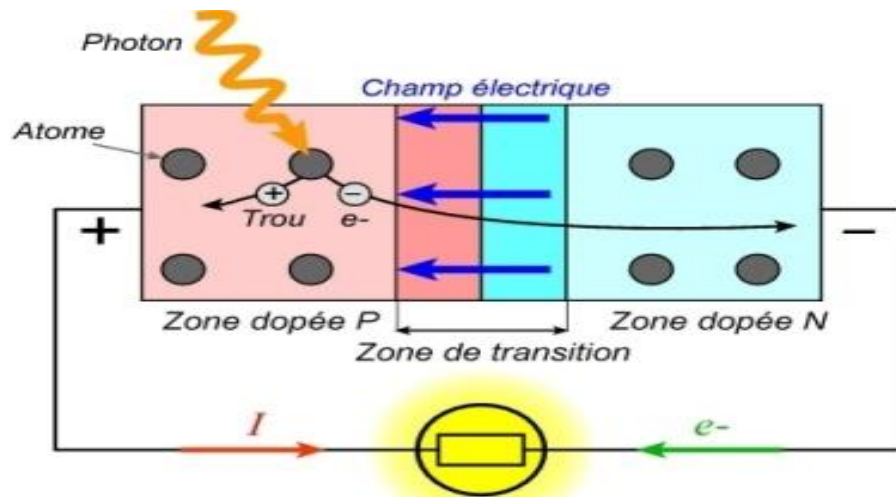


Fig. (I.8) Principe de la conversion photovoltaïque

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **n** et les trous vers la zone **p**. Une jonction (dite **p-n**) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones **n** et **p**, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **n** rejoignent les trous de la zone **p** *via* la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule (voir figure I.8). [14]

I.11. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

I.11.1. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances. [16], [17]

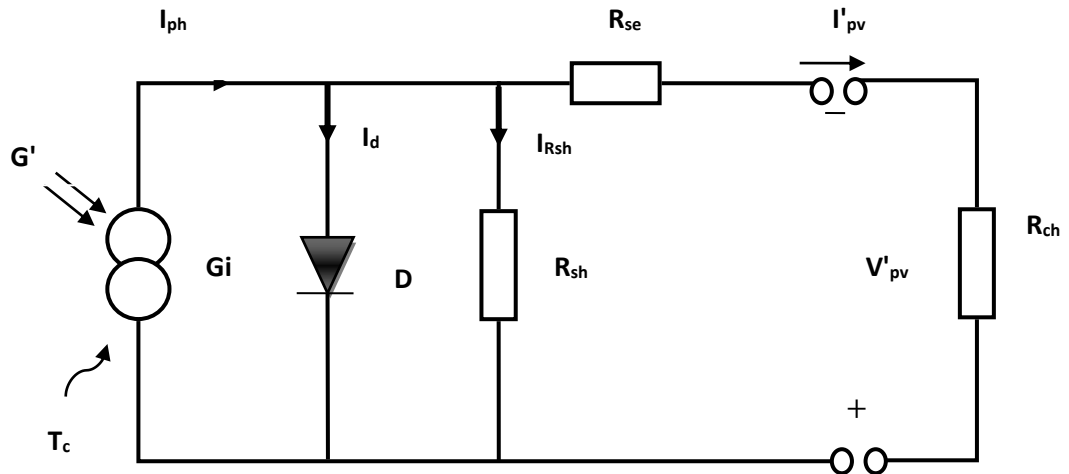


Fig. (I.9) Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode

Avec :

G' : Eclairement

T_c : La température absolue mesurée en K (Kelvin)

G_i : Source de courant parfaite.

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

R_{se} : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

R_{ch} : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré.

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants:

I.11.2. Courant de court-circuit(I_{sc})

C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ($V'_{pv}=0$).

I.11.3 Tension de circuit ouvert(V_{oc})

Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photocourant I_{ph} ($I_d = I_{ph}$) quand ($I'_{pv}=0$).

La tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par:

$$V_{oc} = \frac{mk T_c}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (\text{I.12})$$

Où :

$$V_t = \frac{mk T_c}{e} \quad (\text{I.13})$$

Avec :

V_t : La tension thermique. V/K

m : Facteur idéal de la jonction. $1 < m < 2$

k : Constante de Boltzmann ($K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k)

e : Charge de l'électron ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

I.11.4 Point de puissance maximale (P_{max})

Le point de puissance maximale (P_{max}) est le point M (V_{opt} , I_{opt}) de la figure (I.10) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (\text{I.14})$$

Avec :

V_{opt} : La tension optimale.

I_{opt} : Le courant optimale.

I.11.5. Rendement maximum

Rendement maximum est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{V_{opt} I_{opt}}{A_{pv} \cdot G} \quad (\text{I.15})$$

Avec :

G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

A_{pv} : Surface effective des cellules en [m^2].

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de 1000W/m^2 d'une température ambiante de 25°C et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que

la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées **STC** (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort. [14]

La figure (I.10) présente la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérise.

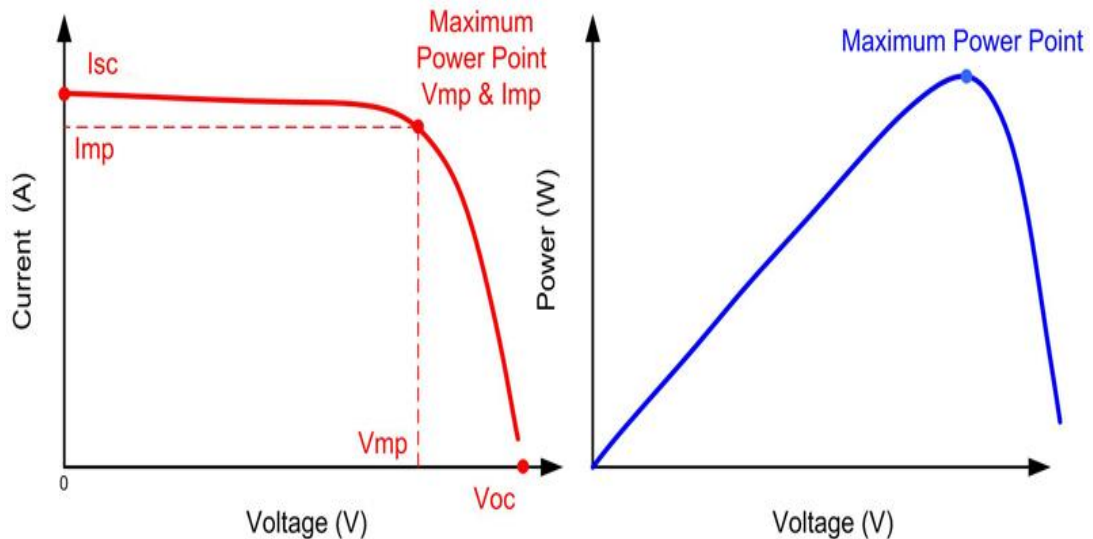


Fig. (I.10) Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque.

I.12. Le panneau solaire

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

I.12.1. Montage en série

Les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique, lorsque les panneaux sont montés en série l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si l'ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible. L'intensité restant faible, les sections de câbles sont moins importantes [18].

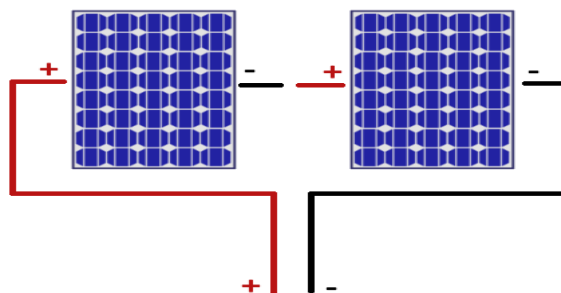


Fig. (I.11) Branchement des modules en séries

I.12.2. Montage en parallèle

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

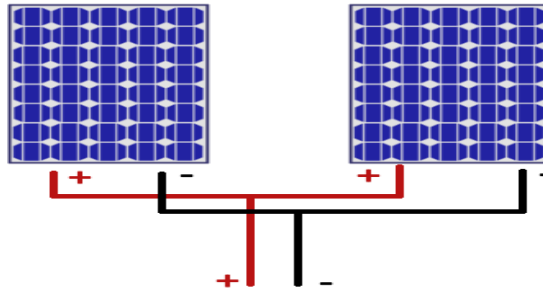


Fig. (I.12) Branchement des modules en parallèles.

I.13. Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau [19]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

I.13.1. Les systèmes autonomes

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

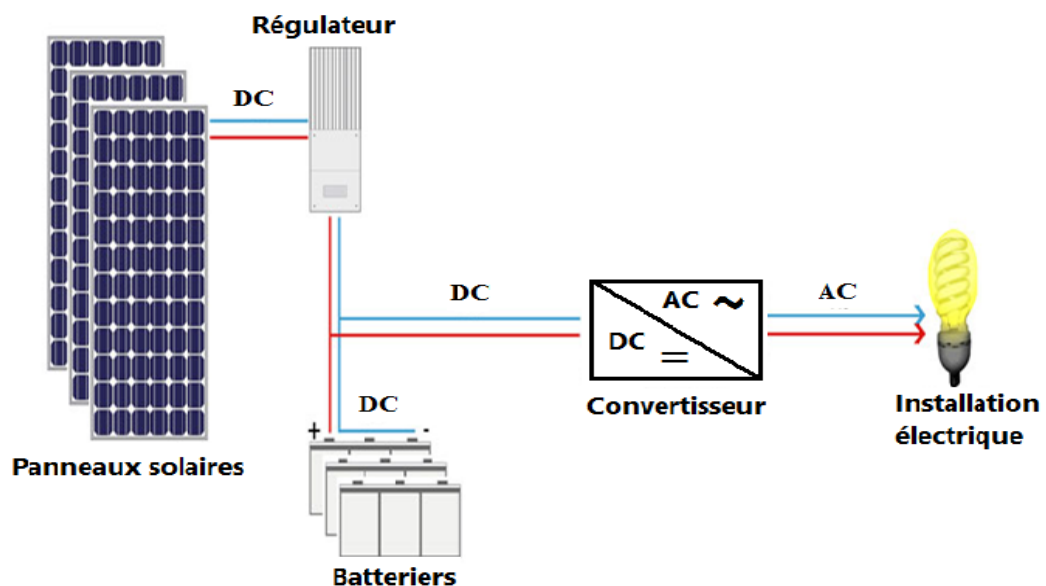


Fig. (I.13) Systèmes photovoltaïque autonome [20]

I.13.2. Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

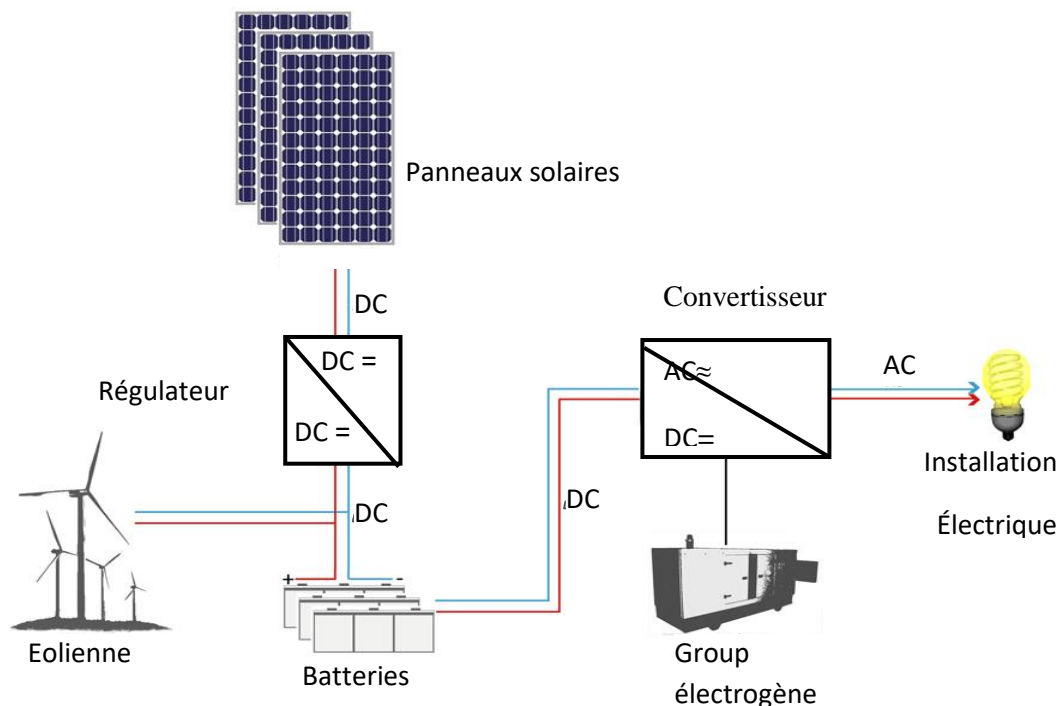


Fig. (I.14) systèmes photovoltaïque hybride [20]

I.13.3. Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.6) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Ils produisent leur propre électricité et acheminent leur excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel ils s'approvisionnent au besoin, ce qui élimine le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

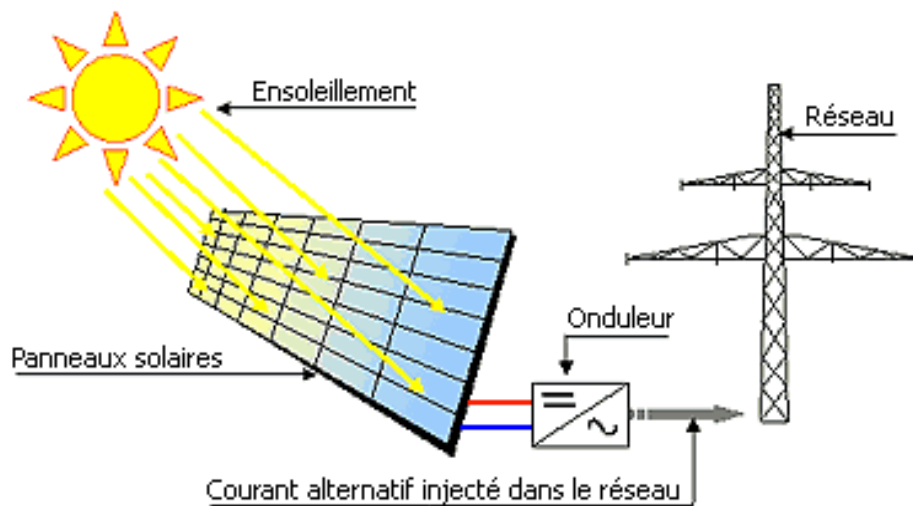


Fig. (I.15) Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

I.14. Les batteries dans les systèmes photovoltaïques

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques en général assuré par des batteries, ces composants utilisés dans la majorité des cas.

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires sont général de type plomb-acide (Pb). Les batteries cadmium-nickel(NiCd) ne sont plus que rarement utilisées car leur prix est beaucoup plus élevé elles contiennent du cadmium (toxique).Leur remplaçantes, les batteries nickel-métal-hydrure (NiMH) sont intéressantes et on en donnera quelques typiques, leur emploi étant plus fréquent dans les applications professionnelles haut de gamme. Aussi il y a beaucoup d'autres façons pour stocker l'électricité produite par les panneaux solaires. [8]

I.14.1. Stockage par systèmes hydrauliques

Dans ces installations l'électricité disponible durant les heures creuses sert à comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Le poids des terrains au-dessus de la caverne permet de résister à la pression de l'air. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz.

I.14.2. Couplage avec un stockage de gaz naturel

En faisant des réserves d'eau dans le barrage, on accumule ainsi de l'énergie qui ne sera transformée en électricité qu'en fonction des besoins instantanés.

Il est possible d'aller plus loin en utilisant l'électricité produite durant les heures creuses pour pomper de l'eau depuis la vallée et remplir à nouveau le barrage. On parle alors de Station de Transfert d'Énergie par Pompage, ou STEP.

I.14.3. Stockage sous forme thermique

On peut parfaitement imaginer de stocker l'électricité sous forme thermique. Pour ce faire, il faut:

Transformer l'électricité en chaleur dans des résistances électriques.

Stocker la chaleur produite dans des réfractaires.

Transformer la chaleur en électricité grâce à une turbine à gaz.

I.14.4. Stockage sous forme d'hydrogène

Dans un futur plus lointain, lorsque l'hydrogène sera largement employé comme vecteur d'énergie, il pourra par exemple être produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine renouvelable. Son stockage souterrain à grande échelle pourra être envisagé en reprenant les techniques connues pour le gaz naturel (rappelons en effet que les premiers stockages souterrains ont été développés pour le gaz de ville, qui contenait une grande proportion d'hydrogène). L'électricité pourra ensuite être produite, par exemple à l'aide de piles à combustibles. [21]

I.15. Production d'hydrogène à partir d'énergie solaire

Pour la production de l'hydrogène il ya plusieurs techniques existent. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation. Les cycles thermochimiques purs et hybrides par exemple sont à l'échelle de Recherche et développement, tandis que les procédés photochimiques et photo biologiques sont encore au premier stade de la recherche. L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement. [22]

I.16. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la ressource de l'énergie solaire et l'origine de cette source (gisement solaire), commençant par quelques notions sur le rayonnement solaire, rayonnement solaire hors atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de sol.

Nous avons également présenté la technologie photovoltaïque par l'étude de principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque et nous avons expliqué les différents types de couplage des systèmes photovoltaïques.

L'électricité solaire est obtenue par la conversion photovoltaïque de sorte que la transformation du rayonnement solaire en énergie électrique ce fait par l'utilisation des modules photovoltaïques.

CHAPITRE II

Production d'hydrogène solaire

II.1. Introduction

L'hydrogène est considéré comme un carburant vert, Actuellement cette vecteur énergétique pouvons assure le fonctionnement des avions, voitures, trains, bateaux, usines, hôpitaux, écoles, maisons etc. L'hydrogène peut être dans son état gazeux transporter de l'énergie comme l'électricité sur de longues distances et à travers des pipelines, efficacement et au coût le plus bas possible. , elle est capable de dépendre de la technologie du carburant énergétique ou d'autres machines génératrices d'énergie Fournir aux consommateurs l'électricité, et l'eau potable.

Est-il possible de produire de l'hydrogène à partir de ressources renouvelables ? Oui, il y a plusieurs méthodes et le plus facile est de le faire à partir d'électrolyse de l'eau. Mais c'est là que les choses peuvent se compliquer au niveau environnemental : le procédé peut être propre à la condition que l'électricité nécessaire à sa production soit d'origine renouvelable (éolien, photovoltaïque, etc.). On peut d'ailleurs imaginer utiliser l'hydrogène-énergie comme moyen pour lisser la production électrique intermittente, d'origine renouvelable.

II.2. Définition et Propriété de l'hydrogène

L'hydrogène est l'un des Eléments plus abondant dans l'univers, elle est classé la première dans le tableau périodique. Il s'agit de l'atome le plus simple et le plus léger et il est constitué d'un noyau contenant un proton et d'un électron périphérique. L'hydrogène est un élément stockable, peut être considéré un moyen efficace de stocker l'électricité pendant longues durées.

Elle est l'élément chimique le plus simple ; son isotope le plus commun est constitué seulement d'un proton et d'un électron. De ce fait, c'est un atome univalent. La masse de l'électron étant négligeable devant celle des protons et des neutrons, ce sont ces derniers qui déterminent la masse des atomes (donc leur poids). L'hydrogène est ainsi le plus léger atome existant. L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers : 75 % en masse et 95 % en nombre d'atomes. Cet élément se trouve en grande quantité dans les étoiles et les planètes gazeuses. Relativement à son abondance dans l'univers, l'hydrogène est très rare dans l'atmosphère terrestre. Sur Terre, l'hydrogène est néanmoins très abondant mais sous forme d'eau et dans la plupart des matières organiques. Sa molécule est la plus énergétique : 120MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel. L'hydrogène a un contenu énergétique de 39,4kWh/kg tandis que le charbon, selon sa forme, oscille dans la fourchette 7,8 - 8,7 kWh/kg, soit environ 5 fois moins par unité de

masse. Il n'est ni polluant, ni toxique et sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau. C'est le plus léger des gaz, ce qui est un facteur positif vis-à-vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air). En conséquence, en dehors d'une situation dite "confinée" (c'est-à-dire emprisonné avec de l'air dans un volume fermé), l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. Néanmoins, la faible densité de l'hydrogène implique aussi une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple). L'hydrogène a un large domaine d'inflammabilité dans l'air: 4 à 75% (contre de 5 à 15% pour le méthane), ce qui augmente les risques pour un gaz riche en hydrogène. Sa combustion thermique à haute température, en présence d'air, génère des oxydes d'azote. La flamme de l'hydrogène est à peine visible à l'œil nu, ce qui peut représenter un danger pour les secours intervenant en cas d'incendie, sa température est de 2300°C dans l'air. Ces conditions sont valables à températures et pression ambiantes, et varient en fonction de la pression, de la température et de la présence d'autres constituants inertes dans le mélange gazeux. L'énergie d'inflammation est très faible (10 fois plus faible comparativement aux autres hydrocarbures). Dans certains cas de confinement, on peut assister à une explosion. Il y a deux types d'explosions: la déflagration et la détonation, on peut parfois assister à une transition de la déflagration à la détonation. Néanmoins, l'hydrogène a pour avantage de se diffuser très vite dans l'air: de ce fait, en cas de fuite, l'hydrogène s'échappe vers le haut et sa concentration diminue très rapidement, passant sous la limite inférieure. [47]

II.3. Différents procédés de production d'hydrogène

Bien que l'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, cependant cet élément n'existe pas à l'état naturel sur la terre mais se retrouve lié à d'autres atomes (C, O, N), pour l'exploiter, il faut donc la produire en extrayant l'atome H de composés qui en contiennent, c'est à dire essentiellement l'eau, espèces biologiques et les combustibles fossiles.

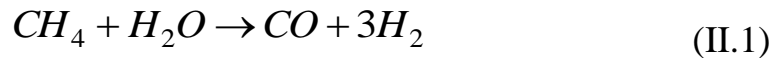
II.3.1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures

II.3.1.1. Produit de l'hydrogène à partir la vaporeformage

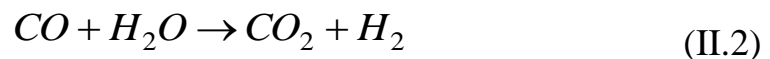
La production actuelle d'hydrogène repose essentiellement sur le vapocraquage du gaz naturel ou vaporeformage.

Aujourd'hui, c'est le cas de 95% de l'hydrogène produit. Le procédé le plus courant est le vaporeformage de Méthane:

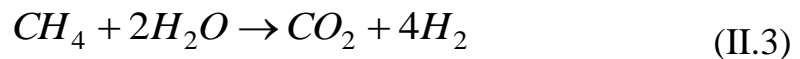
On fait réagir le gaz naturel sur de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 900°C et à une pression de 20 à 30 bar, et à $\Delta H=206$ KJ/mol, en présence d'un catalyseur au nickel. Après la réaction :



On obtient un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le processus continue par la conversion du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone CO_2 et hydrogène additionnel à une température de 200 à 400°C et à $\Delta H=-41$ KJ/mol, selon la réaction :



Au total, pour une molécule de CH_4 , on obtient par ce procédé quatre molécules d'hydrogène à $\Delta H=165$ KJ/mol, selon la réaction :



II.3.1.2. Produit de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle

L'oxydation partielle d'hydrocarbures est la deuxième méthode utilisée pour produire de l'hydrogène, via la production de gaz de synthèse (mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène). Cette méthode s'applique aux résidus pétroliers lourds ainsi qu'au charbon. Elle met en œuvre des températures très élevées (1200 à 1500°C), des pressions importantes (de 20 à 90 bar ou plus), de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

Ces conditions techniques difficiles et coûteuses se justifient par le prix de la matière première peu élevé.

II.3.2. Produit de l'hydrogène à partir la gazéification

Dans le procédé de gazéification, du charbon de bois est brûlé dans un réacteur. À très haute température (entre 1200 et 1500°C), les gaz libérés se reforment pour donner du H_2 et du monoxyde de carbone (CO).

II.3.3. Produit de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique)

Les algues seraient une autre possibilité pour produire de l'hydrogène. En effet, au cours de la photosynthèse, les plantes vertes dissocient l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène est combiné au CO_2 pour construire des tissus végétaux tandis que l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. On peut espérer que ce type de procédé pourra être techniquement au point d'ici 2 ans, et sur le marché d'ici 5 à 8 ans. [27]

II.3.4. Produit de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO₂ est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

- L'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire
- Des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale Nucléaire.

Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur : de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis. [23]

II.3.5. Technique de production de l'hydrogène solaire

La production d'hydrogène à partir l'énergie solaire dépend d'électrolyse de l'eau. Ce qui se produit est le cassage des molécules d'eau en hydrogène et en oxygène, en utilisant le courant électrique produit par un panneau photovoltaïque. L'hydrogène propre peut utiliser comme un carburant, ou pour produire de l'énergie électrique ou puis stocker. [24]

La production d'hydrogène par l'électrolyse connectée au panneau photovoltaïque s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement.

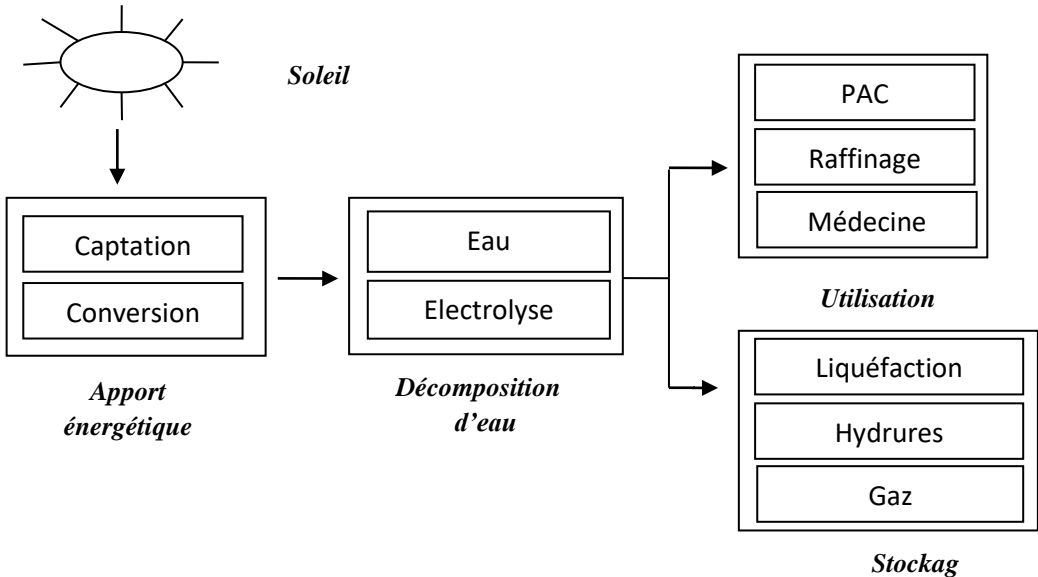


Fig. (II.1) Système synoptique de production de l'hydrogène solaire

II.4. Electrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une **réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène**. Pour ce processus nous appliquons une différence de potentiel entre les deux électrodes immergées au l'eau, qui crée un champ orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement figure (II.2).

La dissociation de l'eau en hydrogène et oxygène nécessite un apport d'énergie électrique. Elle peut provenir d'énergies renouvelables : solaire, éolienne, hydraulique et biomasse, sachant que l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285 KJ/mole. Cela correspond à un potentiel théorique de 1.481 V à 25 °C. Dans la pratique, le potentiel nécessaire au processus se situe entre 1.7 à 2.3 V. Ceci correspond à des rendements de l'électrolyse de 70 à 85%. [25]

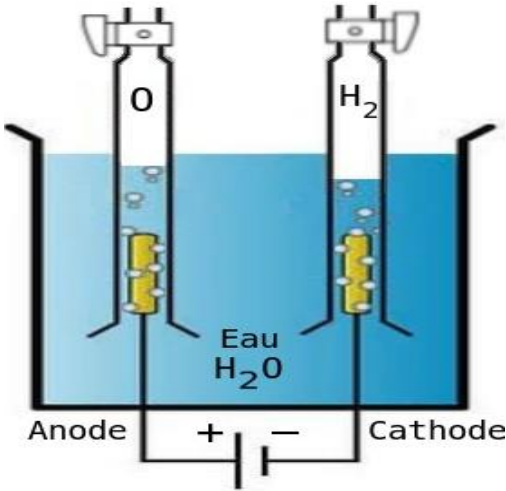
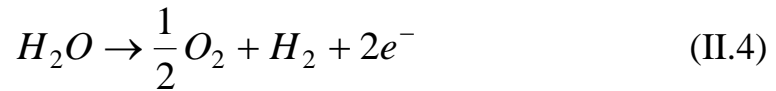


Fig. (II.2) L'électrolyse de l'eau.

Quand la tension appliquée est suffisante des réactions se produisent aux interfaces électrolyte électrodes : [26].

À l'anode : Oxydation avec émission d'électrons

L'anode est l'électrode positive. Le processus qui s'y produit est l'oxydation : la molécule subit une perte en électrons. Chaque molécule se divise en oxygène (O_2) et produit un cation hydrogène (H^+) en libérant des électrons qui se déplacent dans le circuit vers la cathode.



À la cathode : Réduction avec capture d'électrons

La cathode est l'électrode négative. Le processus qui s'y produit est la réduction : les protons, passent à travers la membrane, se recombinent avec les électrons pour donner l'hydrogène.

Réaction de la réduction à la cathode :



La réaction globale est :



II.4.1. Effet de la température sur la tension d'électrolyse

Des études expérimentales menées sur l'électrolyse montrent que l'ensemble des irréversibilités présentes dans une cellule d'électrolyse diminue lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente. La résistance ionique, qui est prépondérante, diminue alors, permettant de diminuer la tension pratique de l'électrolyseur et donc sa consommation énergétique.

En outre les réactions comme l'oxydation de l'eau en oxygène nécessitant d'être catalysées en raison de leur forte irréversibilité sont de même favorisées par un accroissement de la température, L'augmentation de température est limitée par la tenue des matériaux de l'électrolyseur. Au-delà d'une certaine température, il est nécessaire d'opérer l'électrolyse sous pression afin de réduire les pertes d'eau par évaporation.[28]

II.4.2. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse

Une augmentation de pression augmente la tension réversible avec un rapport de ~ 43 mV pour chaque augmentation de dix fois de la pression. Les surtensions sont

considérablement réduites à des pressions supérieures et les économies d'énergie en raison de cela sont considérées comme plus élevées que l'énergie supplémentaire nécessaire pour surmonter la tension théorique. Les avantages de fonctionnement à des pressions plus élevées sont les suivantes:

- Densité de courant plus optimale par rapport à des cellules avec de pression de fonctionnement inférieure à la même tension.
- Permettant le fonctionnement avec des températures plus élevées.
- Suppression de la formation de bulles à fortes densités de courant.
- Élimination de l'équipement et de son énergie utilisée pour mettre sous pression l'hydrogène, nécessaire pour des applications pratiques.
- la prévention de la perte d'eau par évaporation à partir de cellules d'exploitation supérieure à 80 ° C.

Toutefois, une analyse récente montre une consommation globale d'énergie électrique plus élevée dans les électrolyseurs sous pression par rapport à ceux fonctionnant à la pression atmosphérique. En outre des problèmes tels que la corrosion, et autres instabilités dans les composants cellulaires sont pires dans les électrolyseurs sous pression. Une source de l'inefficacité et les pertes de pureté dans l'électrolyse à haute pression est la recombinaison de l'hydrogène et l'oxygène dissous dans l'électrolyte qui traverse, respectivement, dans les compartiments de l'anode et la cathode de la cellule [28].

II.4.3. Le rendement de l'électrolyseur

Le rendement de l'électrolyseur est donné par l'équation suivante [29].

$$\eta_e = \frac{Q \times Eh}{I_f \times V_f} \quad (\text{II.7})$$

Eh: Le pouvoir calorifique d'H₂ [J/ml]

Q : Le débit d'hydrogène, [ml/s]

I_f: Le courant de fonctionnement, [A]

V_f : La tension de fonctionnement, [V]

II.4.4. Les différentes technologies d'électrolyseurs

Aujourd'hui, il existe trois principales technologies d'électrolyseurs peut-être utilisées : alcalines, PEM (ProtonExchangeMembrane) et SOEC (SolidOxideElectrolyserCell).

II.4.4.1. Electrolyseurs Alcalin

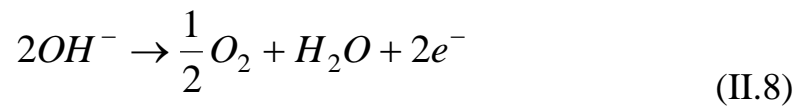
a. Principe de fonctionnement

L'électrolyse alcalin 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.

Dans un électrolyseur à technologie alcalin, 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⁺ (figure II.3). [26]

Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous :

À l'anode : Oxydation



À la cathode : Réduction

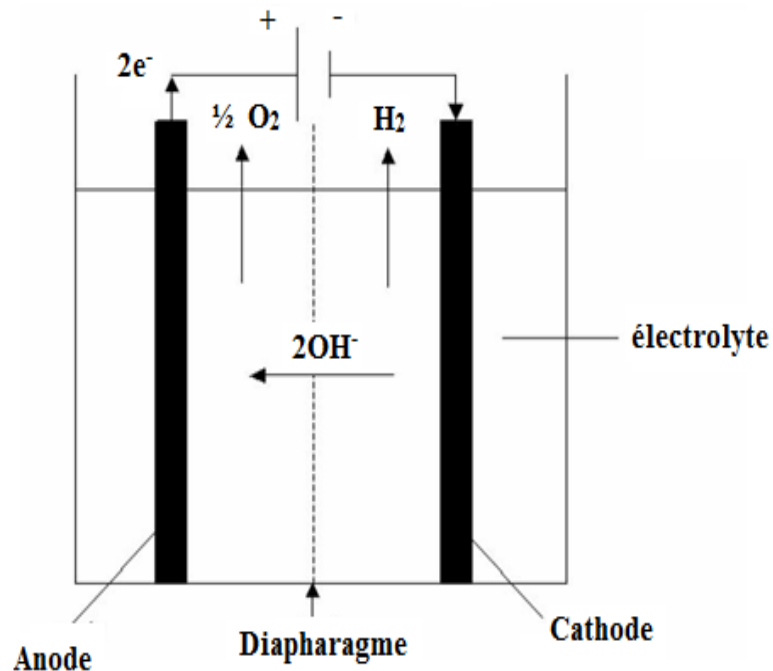


Fig. (II.3) Principe de l'électrolyse Alcalin

b. Les avantages et les inconvénients d'Électrolyseurs Alcalin

Tab. (II.1) Synthèse sur les électrolyseurs alcalins [27]

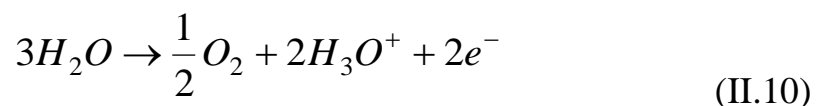
Electrolyseurs Alcalin	
Spécificité	30% de KOH
Pression	1 à 50 bar
Température	60 à 90°C
Avantages	Inconvénients
Technologie mature	Electrolyte liquide corrosif KOH. Risque important de fuite de KOH
Durée de vie importante (50 000 à 60000 heures)	Pression de fonctionnement (50 bar maximum) plus faible que pour le PEM
Gaz de haute pureté	Faible intolérance aux impuretés dans l'eau
Catalyseurs à base de nickel (coût faible par rapport au PEM)	Par rapport à l'électrolyseur PEM, plage de fonctionnement réduite (20 à 110%) et temps de réponse important pour le démarrage à froid
Actuellement le coût le plus bas par rapport aux autres électrolyseurs, avec de bons rendements	Faible densité de courant

II.4.4.2. Electrolyseurs PEM (Proton Exchange Membrane)

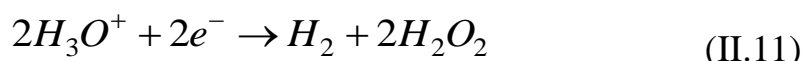
a. Principe de fonctionnement

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:

À l'anode : Oxydation



À la cathode : Réduction



Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure (II.4) suivante : [26].

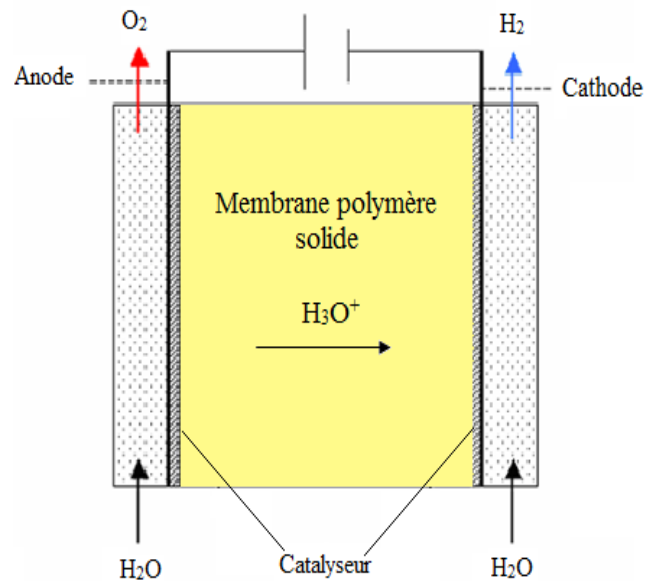


Fig. (II.4) Principe schématique de l'électrolyse PEM.

b. Les avantages et les inconvénients d'Electrolyseurs PEM

Tab. (II.2) Synthèse sur les électrolyseurs PEM [27]

Electrolyseurs PEM	
Spécificité	membrane solide échangeuse d'électron
Pression	1 à 80 bar
Température	55 à 80°C
Avantages	Inconvénients
Gaz de haute pureté	Cher (catalyseur à base de métaux nobles (Pt, Ir) et membrane en polymère)
Fonctionnement sous pression	Faible durée de vie
Faible temps de réponse au démarrage à froid	Faible tolérance aux impuretés dans l'eau
Large plage de fonctionnement (5 à 130%)	Technologie « jeune »
Fort potentiel d'évolution	Le coût élevé des membranes polymères et des catalyseurs en métal noble

II.4.4.3. Electrolyseurs à haute température (SOEC, Solid Oxide ElectrolyserCell)

a. Principe de fonctionnement

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition

dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions superoxydes O^{2-} figure (II.5).

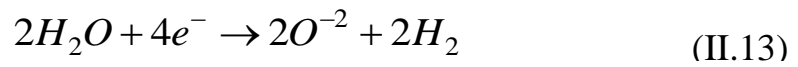
Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte : [26]

Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :

À l'anode :

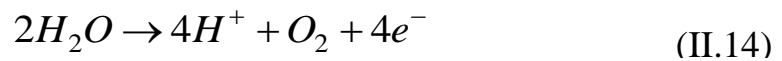


À la cathode :



Electrolyte à conduction protonique :

À l'anode :



À la cathode :

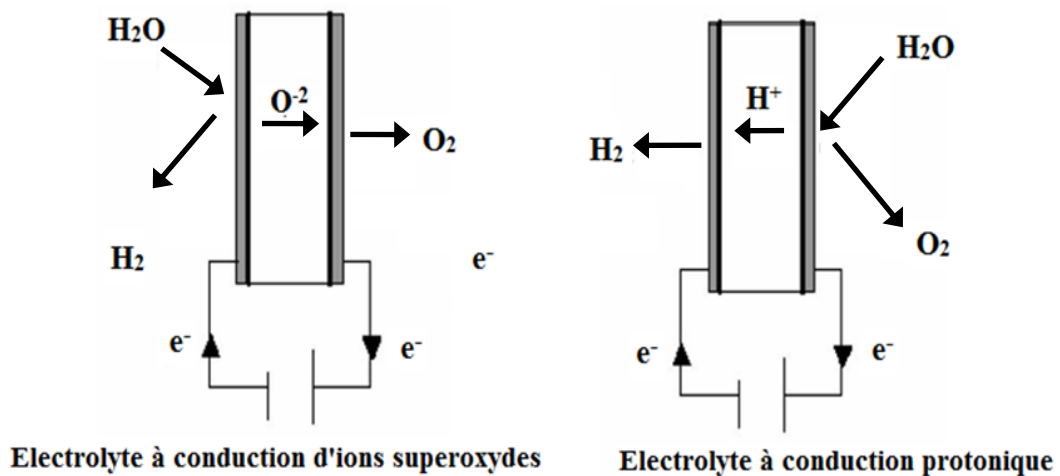


Fig. (II.5) Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte

b. Les avantages et les inconvénients d'Electrolyseurs haute température

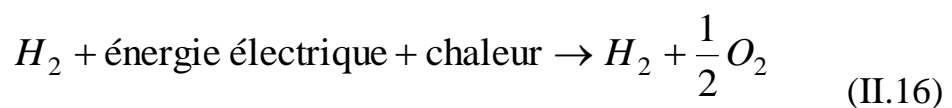
Tab. (II.3) Synthèse sur les électrolyseurs à haute température [27]

Electrolyseurs à haute température	
Spécificité	Electrolyte et électrodes en céramique
Pression	5 à 30 bar
Température	600 à 800°C
Avantages	Inconvénients
Rendement important	Fragilité des matériaux
	Nécessité d'un apport de chaleur important
Gaz de haute pureté	Temps de démarrage à froid long
	Pression de fonctionnement limitée
Réversibilité possible : fonctionnement en mode pile à combustible	Durée de vie limitée des céramiques
	Technologie en cours de développement

II.5. Les type des couplages de l'électrolyseur

II.5.1. Couplage direct du générateur photovoltaïque avec un électrolyseur PEM

Le couplage du générateur PV à un électrolyseur débitant dans des réservoirs permet de stocker l'énergie électrique fournie par le générateur photovoltaïque, pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène par l'électrolyseur selon la réaction de décomposition de l'eau :



Il y a deux choix pour connecter l'électrolyseur : soit par couplage direct, soit par couplage via un MPPT.

En couplage direct sans MPPT active, il faut déterminer le nombre de cellules photovoltaïques nécessaires en série et en parallèle pour alimenter correctement l'électrolyseur avec une conversion photovoltaïque proche de l'optimum. Dans notre cas, pour un stack électrolyseur de sept cellules en série avec une puissance de 50W, nous avons besoin d'environ 30 cellules en série. En effet, chaque cellule de

l'électrolyseur PEM nécessite quatre ou cinq cellules photovoltaïques en série pour assurer la tension de fonctionnement de la cellule de l'électrolyse. [31]

II.5.2. Couplage du générateur photovoltaïque avec un électrolyseur PEM via un MPPT

Avec les variations d'éclairement et de température la caractéristique utile du générateur Photovoltaïque est variable. Ces variations influencent le niveau de production de l'hydrogène et de l'oxygène.

Suivant les conditions de fonctionnement, la puissance maximum délivrée par le générateur photovoltaïque ne se situe pas au même point de fonctionnement. Pour optimiser la puissance fournie par le champ photovoltaïque, il faut donc rajouter un convertisseur statique muni d'une commande qui adapte le point de fonctionnement du générateur pour toujours conserver une puissance maximale : c'est le système MPPT (Maximum Power Point Tracking). [31]

II.6. Stockage d'Hydrogène

II.6.1. Sous forme gazeuse (haut pression)

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses. Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Des progrès ont été faits : de 200 bars, pression des bouteilles distribuées dans l'industrie, la pression est passée à 350 bars aujourd'hui et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de 700 bars. De plus, l'hydrogène est l'élément le plus petit de l'univers, il faut donc trouver des matériaux pouvant contenir l'hydrogène sans risque de fuite. [32]

II.6.2. Sous forme liquide

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

L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de -252.87°C et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3 . À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres. Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés.

II.6.3. Sous forme basse pression

La méthode la plus simple permettant de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression.

Ainsi, à 700 bar, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m^3 contre 0.090 kg/m^3 à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres. Aujourd'hui la majeure partie des constructeurs automobiles a retenu la solution du stockage sous forme gazeuse à haute pression. Cette technologie permet de stocker la quantité d'hydrogène nécessaire à une voiture alimentée par une pile à combustible pour parcourir de 500 à 600 km entre chaque plein. [33]

II.6.4. Sous forme solide (hydrure métallique)

C'est une forme de stockage d'hydrogène qui permet à celui-ci de s'insérer dans le réseau cristallin d'un métal avec lequel l'hydrogène a la propriété de former des liaisons covalentes ou ioniques. Ce type de métaux ou alliages peuvent donc stocker l'hydrogène entre leurs atomes. Le procédé d'adsorption est exothermique et celui de désorption est endothermique et nécessite un apport de chaleur. [34]

II.7. Les domaines d'utilisation d'hydrogène

Aujourd'hui, l'hydrogène est quasi-exclusivement utilisé pour des usages industriels dans la chimie et le raffinage. Demain, ses capacités en tant que vecteur d'énergie pourraient jouer un rôle majeur dans le domaine des transports, dans les filières gaz, dans la production d'électricité et de chaleur.

II.7.1. Applications stationnaires

D'autres besoins relèvent également d'un usage stationnaire, bien que non couverts par les besoins résidentiels ou industriels. Il s'agit notamment des petites activités commerciales génératrices de revenus (qui requièrent une alimentation énergétique), de l'éclairage public, et des alimentations de secours sur des secteurs sensibles (hôpitaux dans un premier lieu, puis télécom). [35]

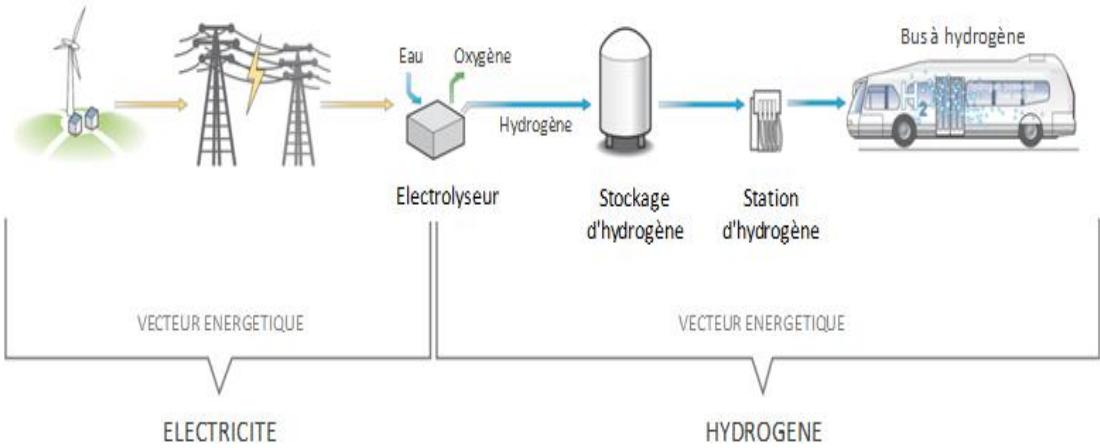


Fig. (II.6) système de production d'hydrogène

II.7.2. Applications mobiles

Enfin, l’hydrogène peut constituer une solution intéressante pour les besoins de type mobile. Cette catégorie recouvre d’une part les alimentations électriques mobiles (événementiel typiquement), et d’autre part les besoins modernes de faible puissance liés à des postes de consommation eux-mêmes mobiles, tels que les téléphones et ordinateurs portables. Ces derniers besoins, s’ils peuvent paraître moins fondamentaux pour les pays en développement que l’accès à l’énergie, n’en sont pas moins des sujets à prendre en considération, compte tenu de la forte diffusion de ces technologies dans les pays en développement et de l’importance de l’image sociale qui leur est attachée. [35]

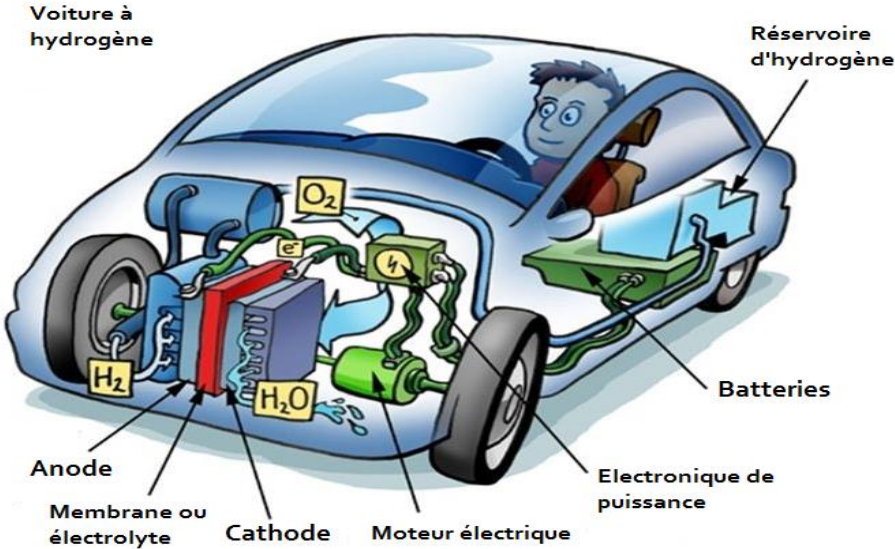


Fig. (II.7) Voiture à hydrogène

II.7.3. Applications industrielles

Dans ce contexte, on fait essentiellement référence aux petites activités industrielles, génératrices de revenus. Dans cette optique, on peut concevoir une utilisation directe de l'hydrogène en tant que combustible (sans conversion en électricité dans une PAC), ainsi qu'une consommation dans des industries dont le procédé requiert une source d'hydrogène (raffinage, production d'engrais " ammoniac notamment", métallurgie, industrie verrière, hydrogénation des huiles, électronique, laboratoires,...). [36]



Fig. (II.8) Générateur d'hydrogène d'oxygène pour l'industrie pharmaceutique

II.8. Transport de l'hydrogène

Lorsque l'hydrogène est produit, il doit être stocké ou transféré au site d'utilisation, mais Le transport d'hydrogène est un handicap car c'est un gaz très léger, on utilise en général des bouteilles ou des pipelines dans lesquels il voyage sous forme comprimée

II.8.1. Le transport par gazoducs

Le transport par gazoducs ; ce mode est ancien puisqu'il a été mis en œuvre, pour la première fois, en 1938 par les allemands dans la Ruhr pour alimenter des sites industriels. Aujourd'hui, le réseau de l'Europe de l'Ouest mesure 1 600 km ; il est exploité essentiellement par Air Liquide. D'autres réseaux du même type existent sur d'autres continents.

Le transport par gazoducs est le plus adapté, car c'est le moyen :

- le plus économique (une fois l'infrastructure mise en place),
- permettant le transport de gros volumes,
- ayant une grande sécurité d'approvisionnement (débit régulier),
- le plus sûr (plus que le rail, la route, ect). [37]

II.8.2. Transport routier ou ferroviaire

L'hydrogène est habituellement transporté par la route ou par rail, sous forme de bouteilles en acier sous pression (200 bars), soit sous forme cryogénique. L'inconvénient de ce mode de stockage sont l'encombrement seulement 14 kg/m³ à 200 bars et à température ordinaire (21°C), et le problème ici est le poids.

Mais la technologie en bouteilles composites, beaucoup plus légère, est en train d'être mise en place pour un transport sous 400 bars, ce qui augmente la capacité par camion et donc diminue sensiblement le prix de ce transport. [38]

II.8.3. Le transport maritime

Il y a une autre moyenne se transporter l'hydrogène, qui est à bord des transporteurs d'hydrogène essentiellement pour des raisons d'encombrement pour lequel on utilise la forme cryogénique à très basse température de -196 à -253 °C

Par exemple l'Australie, a décidé, début 2014, d'exporter ainsi une partie de sa production. [39]

II.9. La Future d'utilisation d'hydrogène

L'utilisation d'hydrogène comme vecteur énergétique, notamment dans le secteur des transports et la production d'électricité, constitue un défi important. Le marché des piles à combustible et le secteur des transports constituent deux perspectives majeures en vue d'une utilisation plus importante de l'hydrogène.

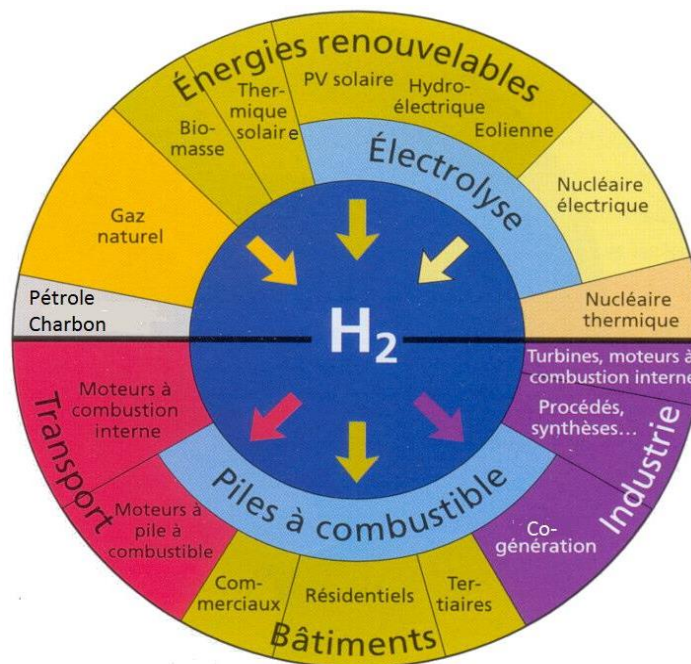


Fig. (II.9) Procédés de production est applications d'hydrogène

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la production d'hydrogène à partir des énergies fossiles, pétrole, gaz ou charbon et à partir d'eau grâce aux énergies renouvelables hydraulique, solaire ou éolien ou grâce au nucléaire, ensuite nous avons présenté les procédés les plus importantes pour produire l'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau, et les différents types de l'électrolyseur d'eau. L'hydrogène est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur utilisé comme vecteur d'énergie pour les transports et la production propre d'électricité.

CHAPITRE III

Systeme de pile à combustible

III.1. Introduction

L'hydrogène peut réagir avec l'oxygène pour libérer de l'énergie électrique et de la chaleur selon le procédé inverse de l'électrolyse de l'eau, il suffit de cet dites cela la pile à combustible, ce processus intervient dans la génération d'une source d'énergie électrique, Une pile à combustible (P.A.C.) est une machine électrochimique qui transformel' énergie chimique stockée dans l'hydrogène et l'air en énergie électrique. Cette transformations' accompagne d'une production d'eau, de chaleur et de travail.

III.2. Qu'est-ce une pile à combustible

Une pile à combustible est un appareil qui converti l'énergie chimique d'un combustible en électricité au travers une réaction chimique contrôlée avec l'oxygène ou d'un autre oxydant. Les piles à combustibles se distinguent des batteries et des piles par le fait qu'elles ont besoin d'un apport constant de combustible pour fonctionner, mais que leur production d'électricité est constante tant que le combustible est approvisionné.

La pile à combustible est un générateur de courant à haut rendement énergétique. Celui-ci est généralement proche de 50%. [40] [2]

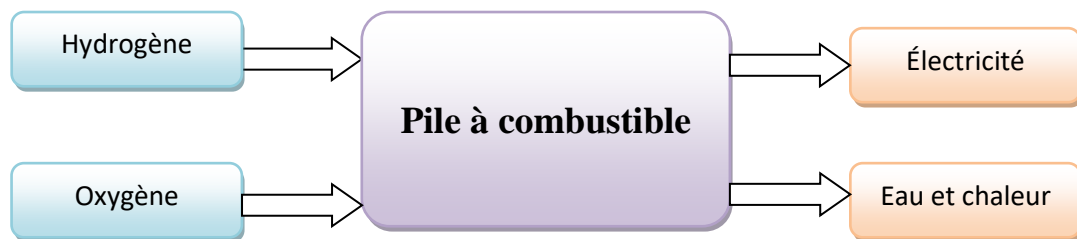


Fig. (III.1) Schéma de principe de conversion directe en électricité

III.3. Historique des piles à combustible

La première démonstration pile à combustible a été faite en 1839 par William Grove. Il s'agissait d'une pile hydrogène/oxygène à basse température avec des électrodes en platine et d'un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Ce n'est qu'à partir des années 1930 que les piles à combustible devinrent pertinentes grâce aux travaux de l'ingénieur anglais Francis T. Bacon, à Cambridge sur une pile à combustible hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux (température de 80 à 200°C, pression de gaz de quelques atmosphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses de nickel et d'oxydes de nickel). En 1953, la réalisation d'un premier prototype de puissance notable a eu lieu. Le programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) conduisit, à la fin des années cinquante, à une série de réalisations

technologiques concernant des piles à électrolyte polymère solide (SPEFC de General Electric), pour le programme GEMINI, et, à partir des années soixante, à la fabrication de piles alcalines de type Bacon par Pratt et Whitney (devenu United Technologies Corporation), pour les missions lunaires APOLLO et maintenant pour les navettes spatiales. Parallèlement, Justi et Winsel, en Allemagne, développèrent des piles alcalines (AFC) de quelques kilowatts, avec des électrodes de nickel de Raney de grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK. [41]

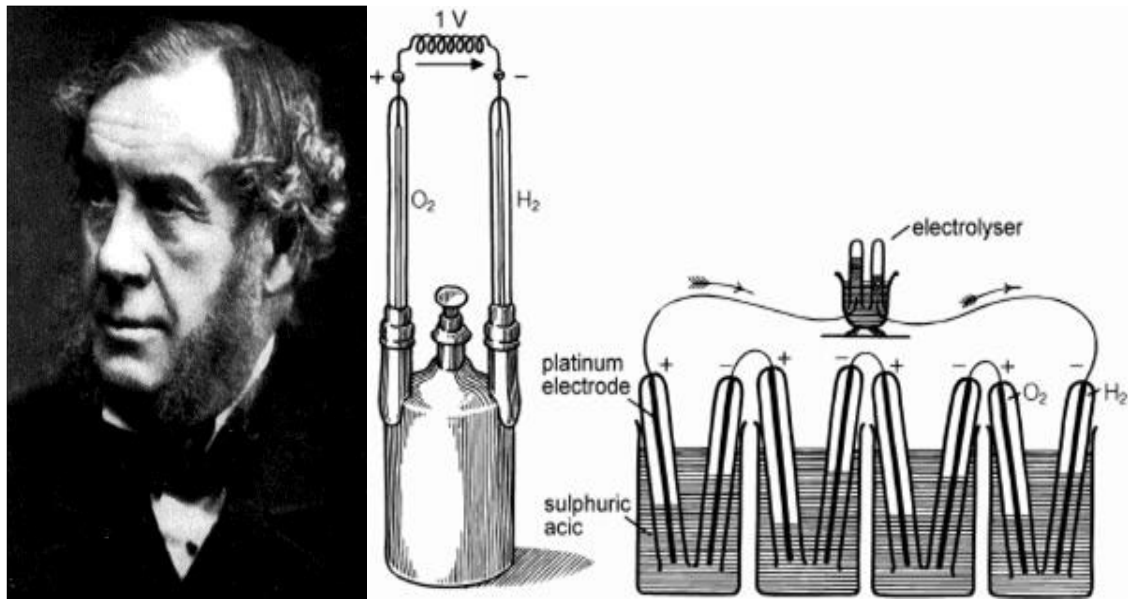


Fig. (III.2) L'expérience de Sir William, inventeur historique de la Pile à Combustible [42]

III.4. Le renouveau de la pile à combustible

Après l'invention la pile à combustible elle est restée plus ou moins en latence durant près d'un siècle et après quelques légères améliorations par différents scientifiques du début du 20^e siècle, c'est Francis T. Bacon qui en 1935 enclenche le progrès le plus important en réalisant un prototype de pile à combustible remplaçant l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes. Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d'un premier générateur électrique de 1kW.

Le principe physique est établi et des dizaines de laboratoires et d'industriels vont se lancer dans les piles à combustible. Néanmoins les coûts restant très élevés, ils sont un obstacle important à son utilisation, hormis pour la NASA qui peut se permettre de tels investissements. Ainsi elle l'utilise, avec succès, comme générateur électrique pour les missions Gemini et Apollo en 1963 et 1968.

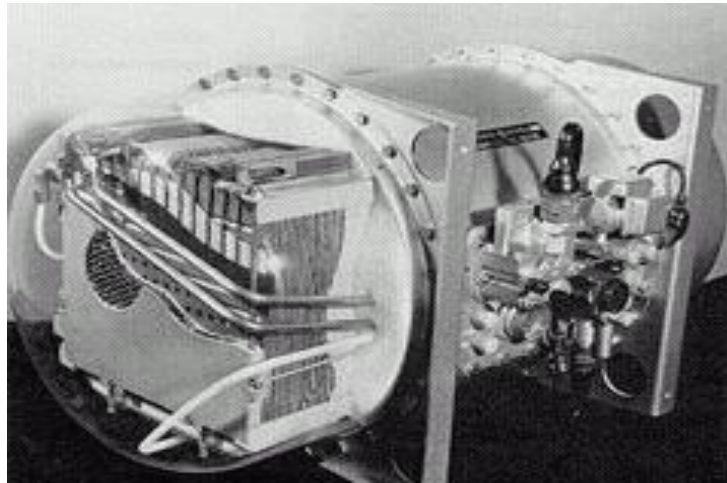


Fig. (III.3) Projet de Gemini.

Dans les années 1980 alors que les Etats-Unis et le Japon vont poursuivre de manière très active leurs recherches, l'Europe (à l'exception de l'Allemagne) va se désintéresser de ces travaux.

Ainsi, depuis sa découverte la pile à combustible a connu de nombreuses améliorations (perfectionnement des électrodes par Monde et Langer en 1899, optimisation de la température de fonctionnement ...), mais le principe lui n'a pas changé. [40]

III.5. Structure de la pile à combustible

La pile à combustible se compose de deux électrodes (anode et cathode), d'un électrolyte et d'un circuit électrique. Chaque type de pile a sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes.

Le cœur de la pile est constitué : d'une anode (électrode chargée positivement) et une cathode (électrode chargée négativement), séparées par un électrolyte (un matériau qui bloque le passage des électrons). L'assemblage de ces composants ainsi que leur nature dépend du type de pile. Ils ont cependant le même rôle.

III.5.1. Les électrodes

Les réactions électrochimiques se passent au niveau des électrodes : une oxydation à l'anode (où l'espèce chimique capte un ou plusieurs électrons) et une réduction à la cathode (où l'espèce chimique cède un ou plusieurs électrons).

Ces réactions sont normalement très lentes. Pour que l'hydrogène soit oxydé, il faut un catalyseur. Celui-ci qui permet alors de faciliter les échanges électroniques. De

même pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques (l'étape lente) et est spécifique à la réaction et au niveau de la température de la pile.

Les deux réactions d'oxydoréductions se font dans la zone dite de « **contact triple** » où se trouvent les réactifs gazeux, les ions et les électrons. Dans cette zone se trouvent l'électrolyte (à travers lequel passent les espèces ioniques), les électrodes (ou plus précisément le catalyseur avec un apport ou un départ d'électrons) et l'arrivée des réactifs gazeux. Cette zone est primordiale pour le bon fonctionnement de la pile.

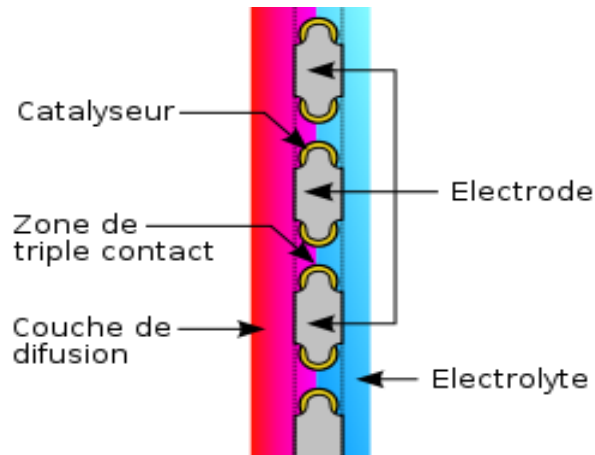


Fig. (III.4) Catalyseur du côté cathode.

III.5.2. L'électrolyte

L'électrolyte varie en fonction du type de pile : par exemple pour la pile utilisée dans l'automobile, une membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC est utilisée. Elle permet que les espèces ioniques (et non pas les électrons) passent de l'anode vers la cathode.

En solution ou à l'état liquide, l'électrolyte est conducteur et se dissocie en anions et en cations par l'action d'un courant électrique. L'électrolyte est un élément de l'électrolyse.

III.5.3. Les plaques bipolaires

Ces plaques sont collées aux supports de l'anode et de la cathode. Elles permettent de :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur
- Collecter le courant
- Gérer les flux

Généralement en graphite, ces plaques doivent conduire le courant, mais aussi permettre de diffuser des gaz jusqu'aux électrodes (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent résister aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique). Situées au cœur des piles à combustible, les plaques bipolaires assurent la conduction des électrons, ce qui permet l'alimentation en gaz et l'évacuation de l'eau formée.

Des canaux sont gravés dans ces plaques pour permettre le passage des réactifs.

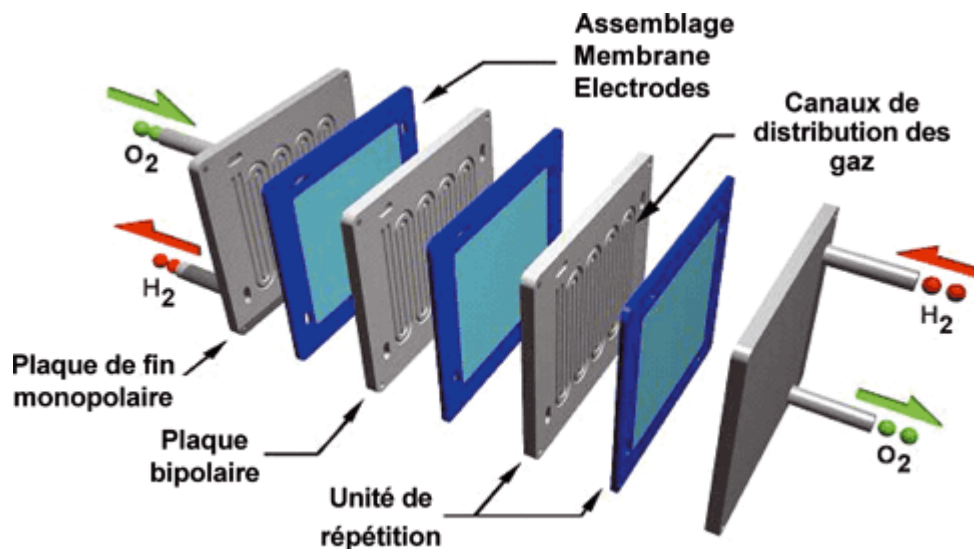


Fig. (III.5) Vue éclatée d'une pile à combustible.

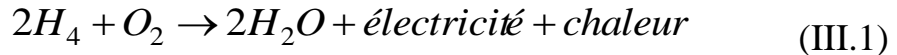
Pour le bon fonctionnement de la pile, il est indispensable d'ajouter d'autres composants. Il s'agit des réservoirs pour l'hydrogène et l'eau, du compresseur pour l'air, de l'humidificateur, des échangeurs de chaleur pour refroidir la pile et de l'onduleur pour transformer le courant continu en sortie de pile. [43] [44]

III.6. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation Chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait

réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante : [45]

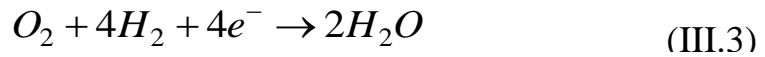


Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux Électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électroniques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :

À l'anode : couple H^+ / H_2 (électrolyte acide)



À la cathode : couple O_2 / H_2O



Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la Cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés « points triples ». Voir la figure (III.6) en ces points, on trouve, autour de la particule de catalyseur :

- Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons H^+ .
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons e^- .
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la Cathode
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction.

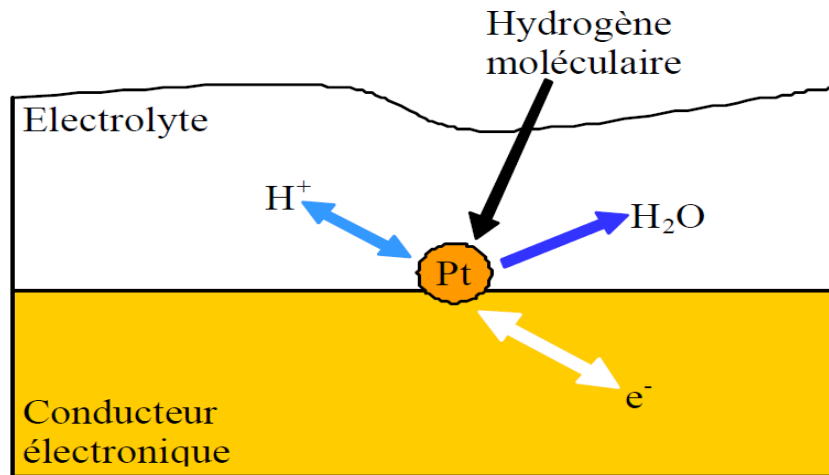


Fig. (III.6) Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

La pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8 volt par cellule, selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur. Leur température de fonctionnement varie de 60 à 200 °C selon les modèles. L'eau est généralement évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène. [46]

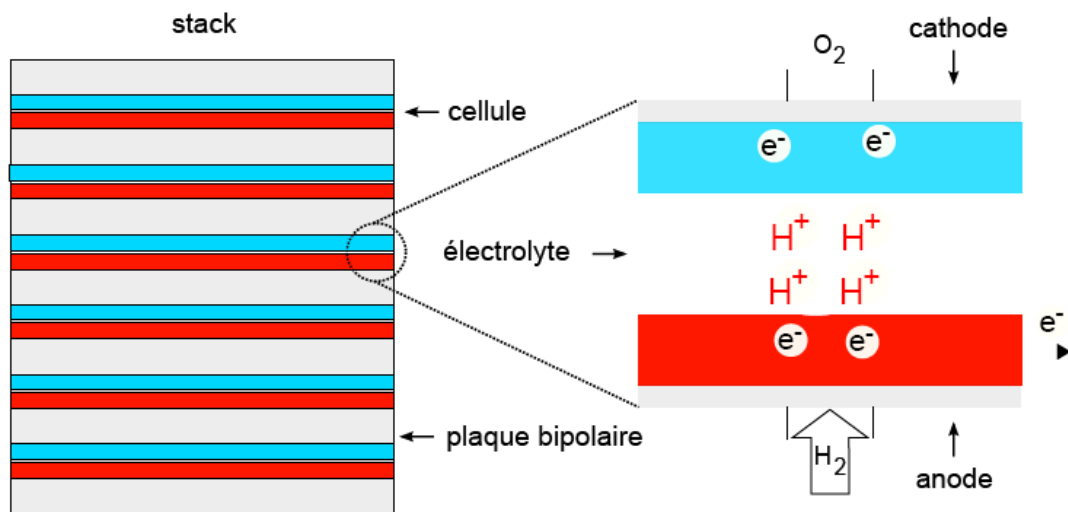


Fig. (III.7) Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

Pour fonctionner correctement, une pile à combustible a besoin de circuits auxiliaires comme un circuit de refroidissement, d'hydratation des gaz, de contrôle de pression (absolue et différentielle) des gaz et autres circuits de sécurité.

III.7. Expression du débit d'Hydrogène et d'Oxygène

La loi de Faraday exprime le débit massique d'hydrogène en fonction du courant I :

$$V_{H_2}^{\bullet} = \alpha I = \frac{NV_m}{zF} I \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$N = 10$: nombre de couches (couples anode/cathode) de la pile.

$Z = 2$: nombre d'électrons impliqués dans la réaction d'une molécule de dihydrogène.

$F = 96368 \text{ C/mol}$ [A.s/mol] constante de Faraday.

$V_m = 22.4 \text{ l/mol}$ volume molaire de H_2 . [51]

III.8. Les différentes piles à combustible

Il existe différents types de pile à combustible, suivant la nature de l'électrolyte et la température de fonctionnement les piles à Combustible sont regroupées en cinq catégories :

III.8.1. La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Le cœur d'une pile à combustible est constitué d'un empilement de cellule électrochimiques élémentaires EME qui assemblées en série permettent d'obtenir les caractéristiques en tension de la pile et donc le niveau de puissance souhaité. Cette modularité constitue un atout important pour l'intégration d'une pile à combustible dans un véhicule (augmentation de la puissance par simple ajout de cellules), puisque l'efficacité énergétique d'un stack est peu influencée par la taille du dispositif.

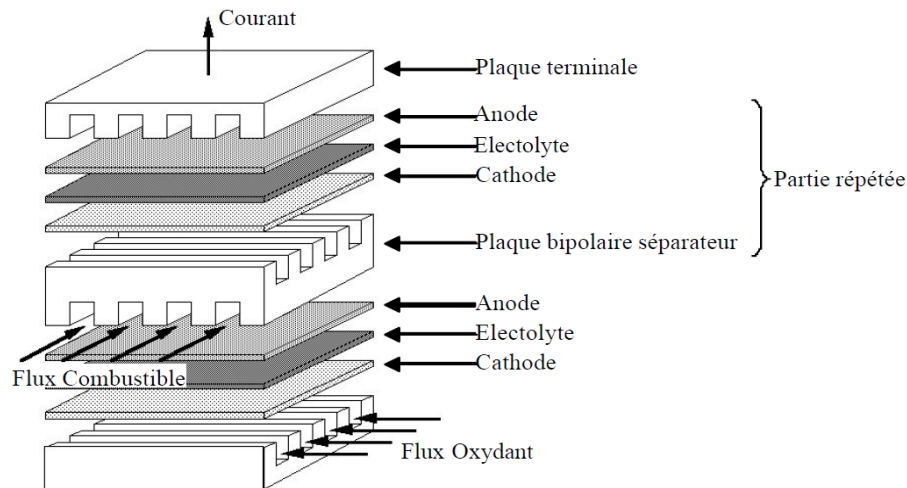


Fig. (III.8) Structure d'un empilement de cellule PEMFC [26]

Dans une pile PEMFC, les électrodes de chaque cellule sont en contact avec une membrane en matériau polymère assurant la fonction d'électrolyte, et les faces des électrodes en carbone sont recouvertes par un catalyseur à base de platine (côtés anodique et cathodique). L'ensemble EME est alimenté en réactifs par des plaques

bipolaires de distribution, qui permettent également la mise en série électrique des cellules, la collecte des électrons et la circulation du liquide de refroidissement. L'oxygène et l'hydrogène circulent respectivement dans les canaux cathodiques et anodiques et se diffusent dans les couches de diffusion afin d'atteindre les zones actives des électrodes de façon homogène. Ces zones actives sont le siège des réactions d'oxydoréduction, le principe général étant de convertir directement en énergie électrique et thermique l'énergie libre de la réaction électrochimique.

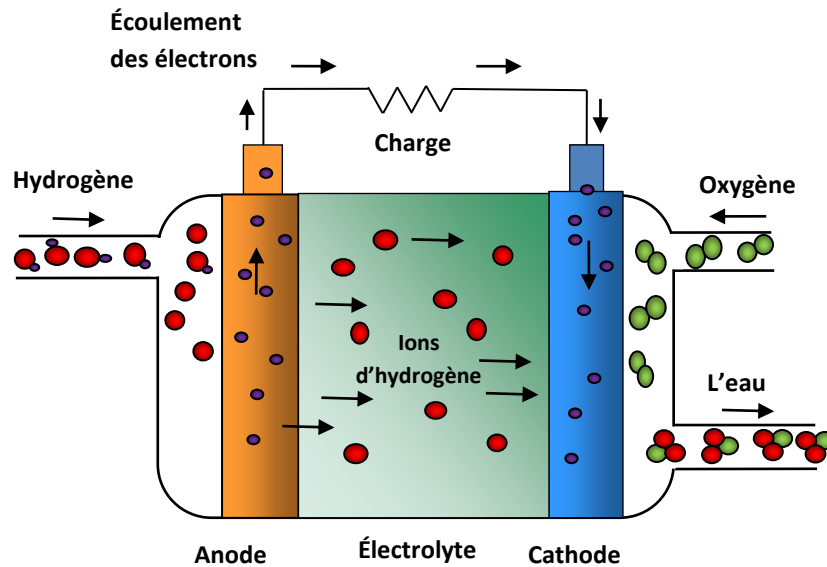
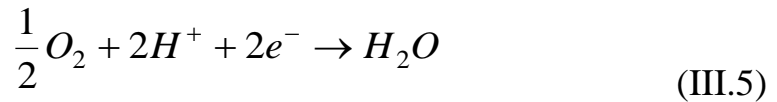


Fig. (III.9) Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC

L'hydrogène H_2 alimente le côté anode (électrode négative) : ses atomes sont dissociés en électrons et en protons. Les protons traversent la membrane, tandis que les électrons circulent de l'anode vers la cathode (électrode positive) par les électrodes et le circuit électrique extérieur dans lequel une partie de leur énergie potentielle est convertie en travail utile. L'oxygène O_2 (pur ou de l'air) alimente le côté cathode et se combine aux protons qui ont traversé la membrane et aux électrons venant du circuit électrique pour donner de l'eau. Cette eau issue de la réaction électrochimique doit être évacuée, souvent par un débit d'air en excès. La pile à combustible constitue donc un dispositif de transformation de matière et de conversion d'énergie fortement hétérogène [47]. Le résultat net des réactions simultanées au sein de ce dispositif de conversion électrochimique est une production d'eau accompagnée de production d'électricité à courant continu et de chaleur suivant les réactions :

À la cathode (électrode positive), réduction de l'oxygène :



À l'anode (électrode négative), oxydation de l'hydrogène :



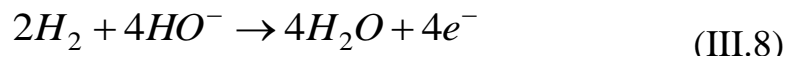
La réaction d'oxydoréduction totale s'écrit :



III.8.2. La pile à combustible alcaline AFC (Alkaline Fuel Cell)

Elles utilisent un électrolyte liquide constitué d'une solution d'hydroxyde de potassium Concentrée (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (OH⁻) dont la température reste comprise entre 80 et 200°C. les réactions mises en jeu sont les suivantes :

À l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction :



À la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction :



Les catalyseurs employés dans ce type de pile ne nécessitent pas de métaux précieux. On utilise un alliage à base de nickel (nickel de Raney ou borure de nickel) pour l'anode et de charbon actif, seul ou argenté, pour la cathode.

Un inconvénient majeur de la pile alcaline est la sensibilité de l'hydroxyde de potassium au dioxyde de carbone. Il est donc nécessaire d'utiliser de l'hydrogène très pur lorsque celui-ci est obtenu par vaporeformage d'un combustible hydrocarboné. Il faut aussi éliminer ce dioxyde de carbone de l'air fourni à la cathode afin d'éviter la carbonatation de la potasse.

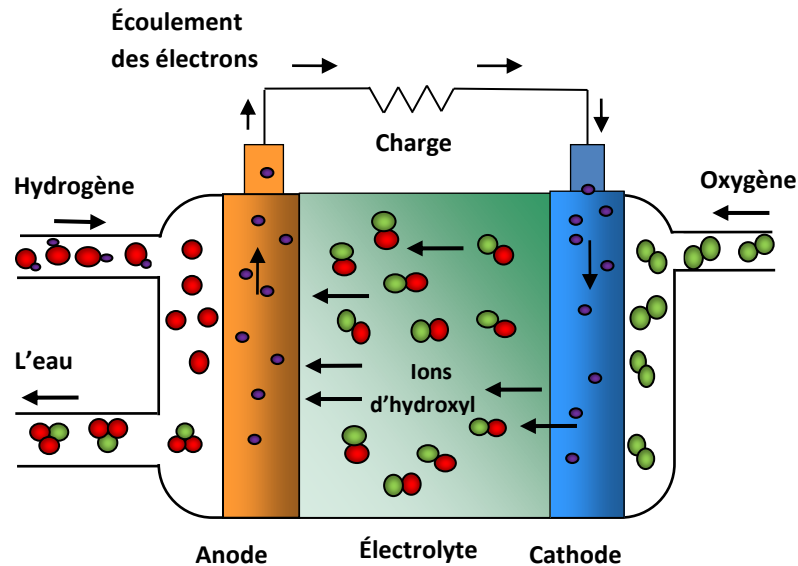
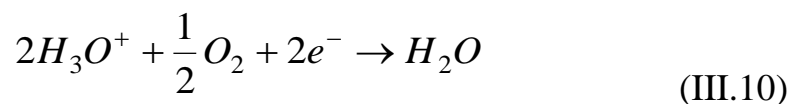


Fig. (III.10) Principe de la pile à combustible alcaline.

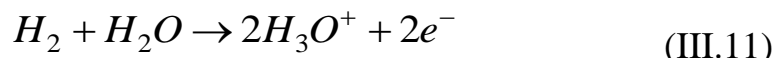
III.8.3. La pile à combustible à acide phosphorique PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

L'électrolyte est de l'acide phosphorique très concentré (97%) qui a une très faible Tension de vapeur et permet un fonctionnement jusqu'à 250°C. Les électrodes, destinées à séparer le gaz de la solution, sont hydrophobes (en général un tissu de carbone comprenant du PTFE). On a les demi-réactions suivantes :

À la cathode :



À l'anode :



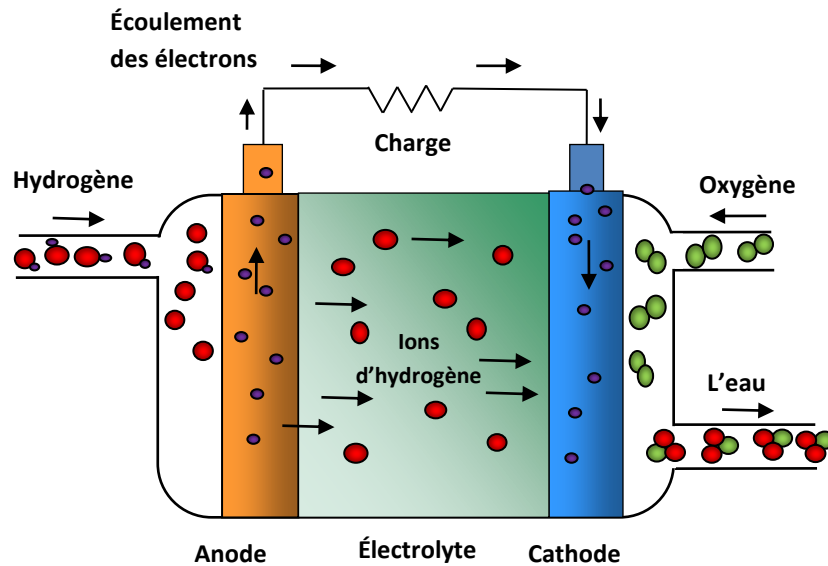
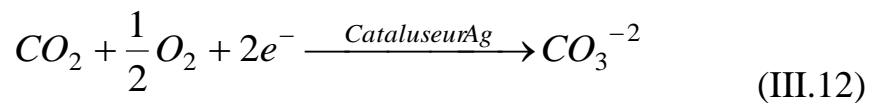


Fig. (III.11) Principe de la pile à combustible à acide phosphorique.

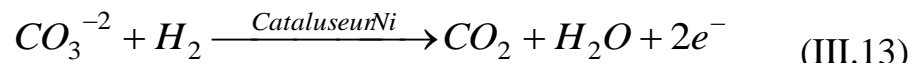
III.8.4. La pile à combustible à carbonates fondus MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)

Dans une pile à combustible à carbonates fondus l'électrolyte est un mélange eutectique de carbonate (X_2CO_3 , avec $X = K, Na$ et Li) fondu à haute température (500-750°C) qui transporte l'oxygène de la cathode à l'anode sous forme CO_3^{-2} , à l'aide du gaz carbonique présent dans le comburant. Les demi-réactions s'écrivent donc ainsi, sur catalyseurs non nobles :

À la cathode :



À l'anode :



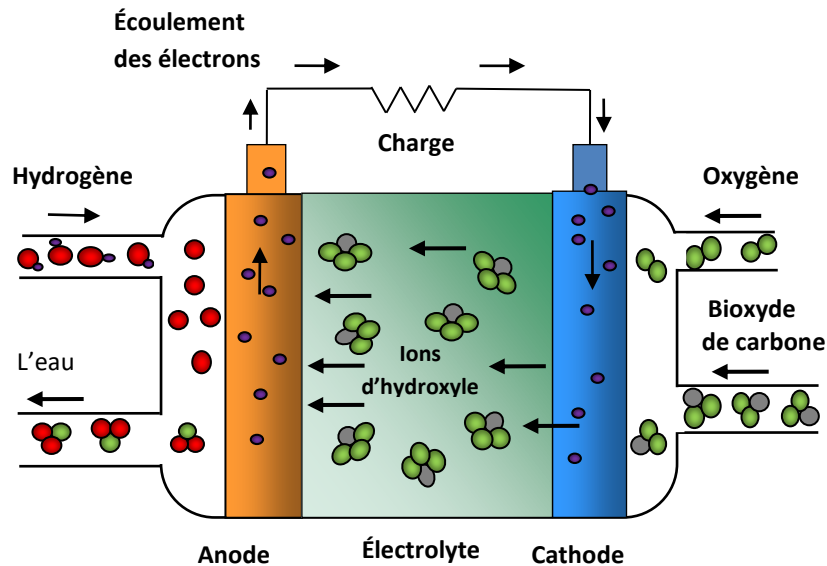


Fig. (III.12) Principe de la pile à combustible MCFC.

Ce type de pile a pour principal avantage, en plus du reformage interne, un rendement technologique, calculé en tenant compte du système entier, assez élevé (54%). En plus des remarques générales évoquées en introduction de cette partie, les inconvénients principaux sont une instabilité de l'électrolyte, qui est très corrosif, ce qui peut entraîner une durée de fonctionnement abrégée (quelques milliers d'heures). [47]

III.8.5. La pile à combustible à oxyde solide SOFC (Solid oxide fuel cells)

Les piles de type SOFC actuelles fonctionnent de façon optimale à très haute température (850 à 1000 °C), dans ce type de pile à combustible, ce sont les ions O^{2-} qui circulent dans l'électrolyte voir la (figure III.13)

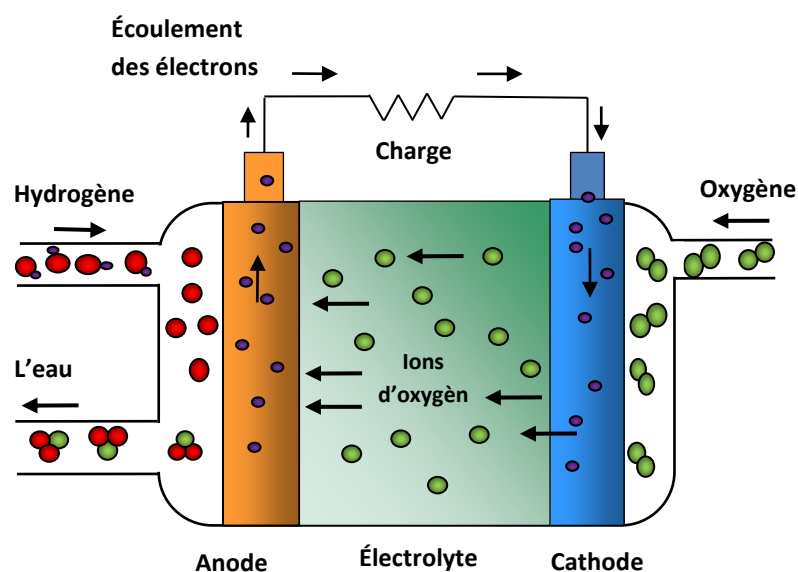


Fig. (III.13) Principe de la pile à combustible SOFC.

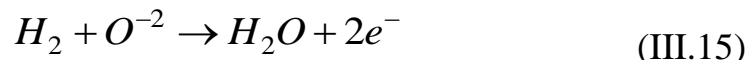
En circuit ouvert, la tension délivrée par une pile à combustible de type SOFC (solid oxide fuel cell) est dépendante, entre autres, de la température de fonctionnement, de la pression et du rapport des pressions partielles d'oxygène aux électrodes.[40]

Les demi-réactions s'écrivent donc ainsi :

À la cathode :



À l'anode :



III.9. Caractéristiques de technologie des piles à combustible

III.9.1. Densité de courant

La réaction électrochimique étant des réactions de surface, la densité de courant est donc une grandeur caractéristique d'une pile à combustible. Elle est exprimée en ampères par centimètre carré (ramenée à la surface physique de l'électrode).

Elle est fonction de nombreux paramètres (type de pile à combustible, débit de combustible, ect).

III.9.2. Tension réelle

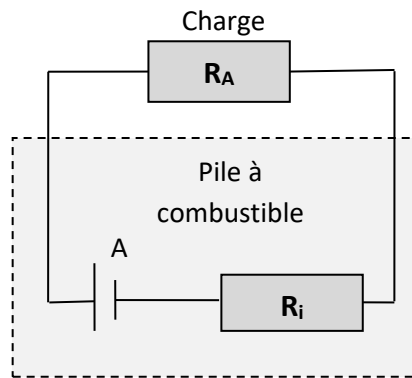


Fig. (III.14) Equivalent électrique d'une pile à combustible.

La tension théorique est celle d'une pile à combustible en circuit ouvert ne débitant pas. Lorsque l'on relie les bornes de la pile à combustible à la charge, elle sera traversée par un courant d'intensité i , la tension aux bornes de la pile diminue par rapport à la tension théorique suite aux phénomènes de polarisation dont on distingue trois formes :

Polarisation d'activation qui concerne la diffusion des ions à l'interface électrode /électrolyte (transfert de charges) ; **polarisation de résistance** qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte ;

polarisation de concentration qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes. Les trois différentes zones illustres dans la figure (III.15).

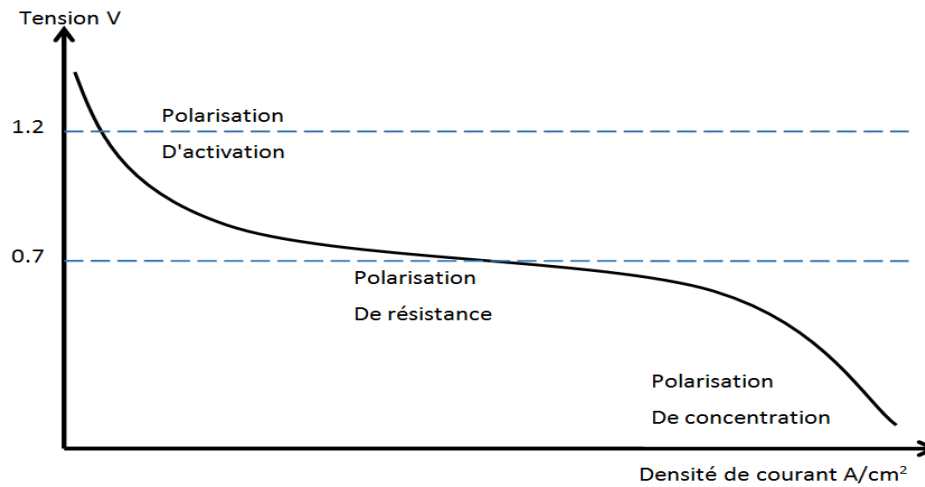


Fig.(III.15) Influence de la polarisation sur la tension.

La courbe [tension]/ [densité de courant] caractérise une pile à combustible. [40]

III.9.3. Récapitulatif des différentes technologies des piles à combustible

Tab. (III.01) Tableau récapitulatif des différentes technologies de piles à combustible [48]

Description	Électrolyte	Gaz à l'anode	Gaz à la cathode	Gamme de puissance	Température de fonctionnement	Rendement électrique	Domaine D'application
AFC Alcaline Fuel Cell	Hydroxyde de potassium	Hydrogène	Oxygène	10 à 100 KW	De 60 à 90 °C	Stack 60 à 70%	Portable, Transport
PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Membrane Polymère	Hydrogène	Oxygène	0,1 à 500 KW	De 70 à 200 °C	Stack 50 à 70%	Portable, Transport, Stationnaire
DMFC Direct Méthanol Fuel Cell	Membrane Polymère	Hydrogène	Oxygène	Du mW à 100 KW	De 90 à 120 °C	Stack 20 à 30%	Transport, Stationnaire
PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell	Acide Phosphorique	Hydrogène	Oxygène	Jusqu'à 10 MW	~ 200 °C	Stack 55 %	Transport, Stationnaire
MCFC Molten Carbonate Fuel Cell	Carbonate de Métaux alcalins	Hydrogène méthane, gaz de synthèse	Oxygène	Jusqu'à 100 MW	~ 650 °C	Stack 55 %	Stationnaire
SOFC Solid Oxide Fuel Cell	Céramique	Hydrogène méthane, gaz de synthèse	Oxygène	Jusqu'à 100 MW	De 800 à 1050 °C	Stack 60 à 65%	Stationnaire

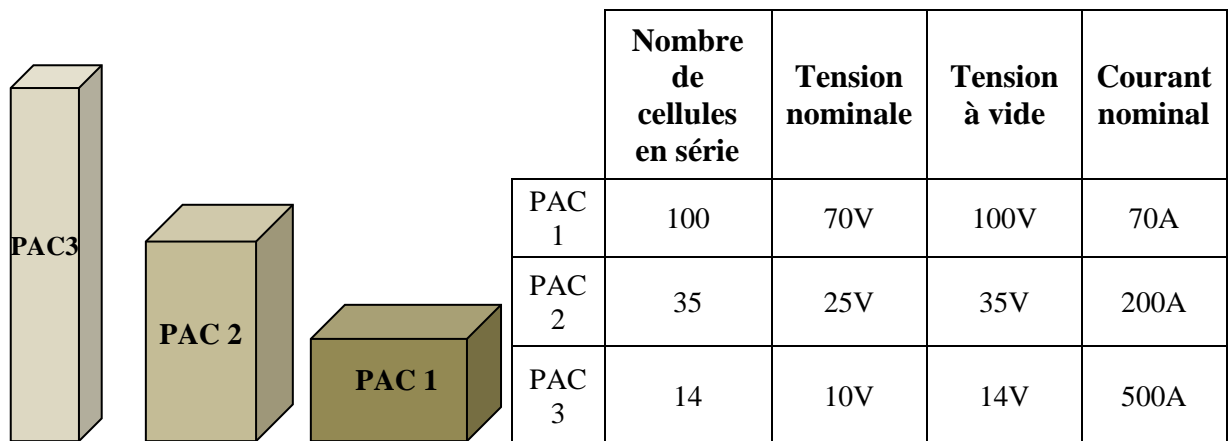
III.10. Dimensionnement d'un stack

Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un projet donné, le concepteur dispose de deux degrés de liberté :

- Le nombre N de cellules mises en série qui fixe la tension du stack.
- La surface S d'une cellule qui fixe le courant du stack.

Le tableau(III.02) illustre cette notion de modularité dans la conception d'un stack. [52]

Tab. (III.02) Modularité d'un stack : 3 exemples de conception d'une PAC PEM de 5 kW. [52]



	Nombre de cellules en série	Tension nominale	Tension à vide	Courant nominal
PAC 1	100	70V	100V	70A
PAC 2	35	25V	35V	200A
PAC 3	14	10V	14V	500A

III.11. Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

Dans la mesure où il est produit de façon écologique, par exemple par électrolyse de l'eau (en supposant que l'électricité est elle aussi produite par des énergies renouvelables), le dihydrogène est un combustible « propre ». Lors de son utilisation, il n'entraîne que le rejet de vapeur d'eau, évitant ainsi toute production de gaz carbonés comme le Monoxyde de carbone (CO) ou encore le dioxyde de carbone (CO₂), des gaz en partie responsables du réchauffement climatique.

- L'Hydrogène est une énergie inépuisable : c'est l'élément le plus présent dans l'univers. Malgré que l'on ne trouve que très peu de dihydrogène (H₂) sur Terre, il est possible de le produire à partir d'autres sources comme l'eau, les hydrocarbures et autres matières organiques puisque l'hydrogène est présent dans de nombreux composés terrestres. Cette énergie ne présente donc pas l'inconvénient d'être « fossile » contrairement au pétrole par exemple.
- Les rendements du dihydrogène sont presque trois fois supérieurs à celui de l'essence. En effet, 1 Kg de dihydrogène permet de produire autant d'énergie que 2,75 Kg d'essence.

- Les voitures utilisant une pile à combustible (ou plus précisément une pile à hydrogène) sont beaucoup plus silencieuses que celles utilisant un moteur à explosions. L'utilisation de ces piles à hydrogène pourrait donc constituer une alternative durable aux pollutions sonores engendrées par les transports dans les villes.
- Cependant, la pile à combustible a aussi un gros inconvénient. L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel sur notre planète. C'est-à-dire que contrairement aux carburants fossiles, l'hydrogène ne peut pas être extrait mais doit être produit. Bien entendu la production d'hydrogène nécessite de l'énergie.
- Le dihydrogène est un gaz très inflammable et explosif. Plus le dihydrogène (combustible) et le dioxygène (comburant) se trouvent dans les proportions stœchiométriques (deux molécules de dihydrogène pour une molécule de dioxygène), plus cette explosion n'est intense. C'est notamment ce problème d'inflammabilité qui a donné mauvaise réputation à l'hydrogène. En effet, en 1937, le Zeppelin Hindenburg, un dirigeable allemand gonflé au dihydrogène s'était enflammée provoquant la mort de 37 passagers. Il faut donc produire des réservoirs de dihydrogène assez étanches pour éviter toute fuite, bien qu'en cas d'accident, ceux-ci doivent laisser s'échapper rapidement le gaz (plus léger que l'air) pour éviter tout risque d'explosion.
- La pile à combustible permettant de produire de l'électricité à partir de dihydrogène contient du platine, un métal rare et très cher, utilisé ici comme catalyseur. Il faut donc tenter de remplacer ce platine par un autre métal moins coûteux. Aujourd'hui, il semblerait que l'alternative la plus prometteuse soit l'utilisation de palladium, un métal parfois utilisé comme catalyseur pour l'industrie chimique en remplacement du platine. Il permettrait ainsi de réduire de 25 % le coût de la pile à combustible.
- Le Prix très élevé (à cause des matériaux qui la compose) par exemple Catalyseur composé en platine, ces membranes et ces plaques d'interconnexion [52].

III.12. Les applications des piles à combustibles

Comme cela a été souligné, la forte modularité de la PAC introduit un vaste champ d'applications potentielles. On distingue trois grands types d'applications :

- Portables (de quelques milliwatts à quelques kilowatts),
- Transport (de la dizaine à quelques centaines de kilowatts),

- Stationnaires (de quelques centaines de kilowatts au mégawatt).

III.12.1. Applications portables

Dans cette famille, on inclut essentiellement la téléphonie mobile (100 mW-1 W), l'ordinateur portable (30-50 W) ainsi que les générateurs autonomes portables (500 W-2 kW). Les deux premières applications connaissent actuellement une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même les plus performantes au Lithium Ion. Ces dernières atteignent aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 140 W/kg, qui n'augmentera plus significativement [47]. La pile à combustible est plus intéressante que les batteries actuelles compte tenu de son autonomie, mais aussi parce qu'aucun système de recharge n'est requis. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à 100°C).



Fig. (III.16) Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g.

III.12.2. Applications de type transport

Historiquement, les premières PAC furent développées dans ce contexte, notamment par la NASA mais aussi dans les sous-marins de l'US Navy. C'est actuellement la voie qui engage le plus de moyens techniques et financiers sous l'importante pression des pouvoirs publics. La cible privilégiée de cette application concerne les véhicules particuliers dont le marché mondial croît d'environ 2,5% par an.

Parmi les produits les plus aboutis, il convient de citer le projet Nekar [50], fruit de la collaboration entre les firmes Daimler-Benz et Ballard. Basée sur une architecture de Mercedes Classe A, la voiture fonctionne au méthanol, l'hydrogène étant produit par reformage. La PAC de 75 kW (100 Ch. DIN) autorise 600 kilomètres d'autonomie à une vitesse de 150 km/heure. Tous ces constructeurs prévoient des préséries à partir de 2004-2005 : Ford (FCV), Opel (Zafira HydroGen3), Honda (FCX).

Malgré l'existence de plusieurs prototypes présentés avec de l'hydrogène stocké à bord (sous forme liquide, gazeuse ou absorbé dans un hydrure), le combustible utilisé sera très probablement, pour des raisons de sûreté, de réglementation et de logistique de distribution, un combustible liquide de type méthanol alimentant un reformeur embarqué.



Fig. (III.17) L'utilisation de la pile à combustible aux transports.

III.12.3. Applications stationnaires

Les piles à combustibles peuvent constituer d'excellentes sources d'énergie délocalisées. Compte tenu des nouvelles lois sur la déréglementation et des tendances vers la décentralisation de la production électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels. Les applications stationnaires mettant en jeu un apport exclusif d'électricité ou un processus de cogénération constituent l'une des alternatives les plus commercialement prometteuses et scientifiquement matures. Le marché stationnaire décentralisé est relativement vaste puisqu'il englobe conjointement :

- Les applications domestiques pour un particulier ou un secteur résidentiel avec chauffage collectif,
- Les applications industrielles en moyenne industrie ou pour des PME,
- Le secteur tertiaire pour des bâtiments spécifiques type administrations, hôpitaux, piscines...

Ainsi, depuis quelques années, de nombreuses piles de faible puissance (quelques kW) sont apparues et ont été placées en test dans des habitations, des sites isolés et des bâtiments administratifs. Parallèlement, d'autres prototypes de moyenne puissance utilisés en mode de cogénération (quelques centaines de kW) ont été installés aux USA,

au Japon et en Europe. Les unités d'une puissance supérieure à 1 MW restent encore rares à l'heure actuelle, ce qui restreint l'impact des piles à combustible sur la production centralisée. Cependant, les coûts sont encore bien trop élevés pour que les piles puissent actuellement avoir une pénétration conséquente dans le marché stationnaire. Les coûts d'investissement se situent entre 3500 et 10000 €/kW (pile, auxiliaires et production d'hydrogène) alors que le seuil financier pour que la filière devienne concurrentielle est d'environ 1000 €/kW.[49]



Fig. (III.18) Pile MCFC 250 kW baptisée CELLIA et mise en place par Dalkia dans un HLM à Paris.

III.13. Conclusion

Malgré que l'on n'utilise pas son potentiel à 100% la pile à combustible grâce à ses nombreux atouts ne peut que se développer au fil du temps. Le champ d'applications vaste, s'appuyant sur un procédé électrochimique simple, elle est surtout portée par l'espoir que suscite l'hydrogène. Car, il est élément le plus abondant sur Terre, son exploitation au moyen de la pile à combustible présente de nombreux avantages, notamment celui non négligeable de ne rejeter que de l'eau pure et être ainsi un générateur totalement propre.

La pile à combustible est capable d'alimenter tout type de secteur en énergie. Nous pouvons la retrouver aussi bien dans le secteur automobile, dans les téléphones, les ordinateurs que dans l'application stationnaire ou encore le domaine spatial en ferait un enjeu incontournable. Et c'est probablement ce qui finira par arriver, car la pile à combustible peut alimenter tous ces secteurs, affichant un excellent rendement énergétique, sans utiliser le moindre combustible fossile. Énergie dite « durable », elle permettrait de se sortir de la dépendance vis-à-vis du pétrole.

CHAPITRE IV

*Expérimentation sur un système de pile
à combustible*

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une étude expérimentale d'un système de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) qui est alimenté par l'hydrogène solaire photovoltaïque, et l'intégration du système de pile à combustibles pour assurer l'alimentation en électricité d'une charge conçue, : un feu de circulation. Par la suite nous allons établir une méthodologie de calcul pour le dimensionnement de générateur photovoltaïque qui assure l'alimentation de l'électrolyseur pour la production d'hydrogène utile pour le fonctionnement du système de pile à combustible, en introduisant les caractéristiques techniques nécessaires des composants de système ainsi que les données climatiques du site de Ouargla et les besoins de l'énergie électrique de la charge finale, dans le but d'une bonne gestion de l'énergie électrique.

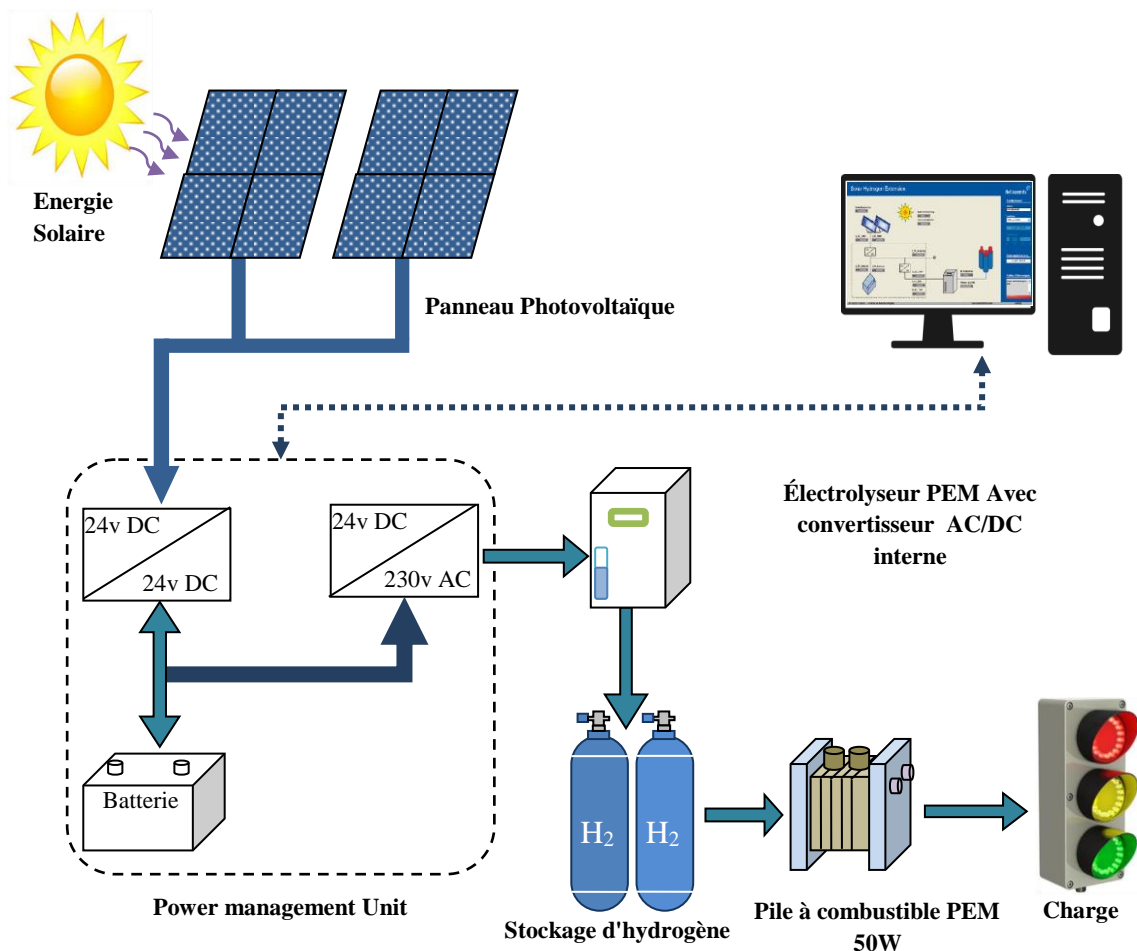


Fig. (IV.1) Système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque

IV.2. Expérimentations

Afin de connaître les caractéristiques et les dimensions du système de la pile à combustible alimenté par hydrogène solaire, nous avons effectué des expériences au

niveau du labo de génie électrique LAGE au centre de recherche scientifique à l'université KASDI Merbah Ouargla.

IV.3. Description du système

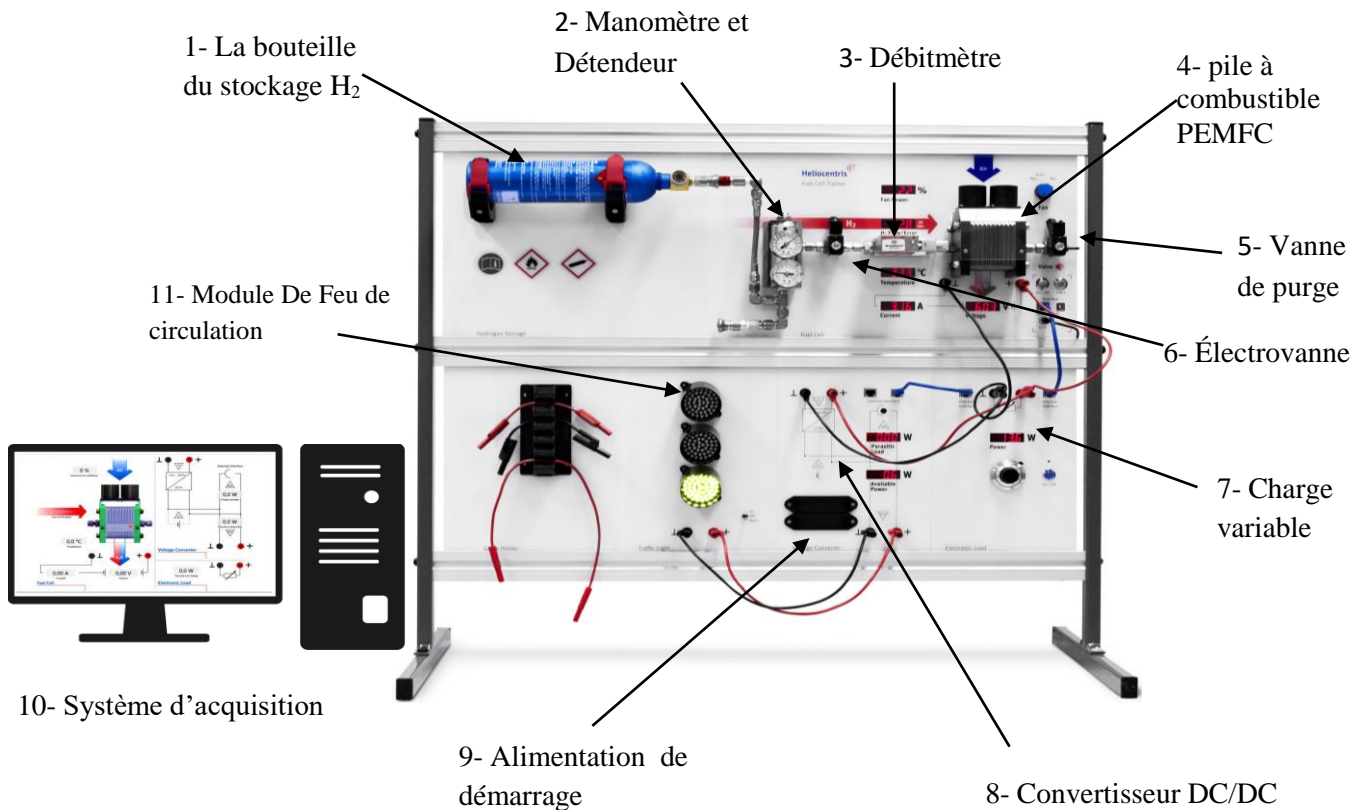


Fig. (IV.2) Maquette d'expérimentations

Le système qui a été présenté dans la figure(IV.2) est une maquette mobile conçue pour la production de l'énergie électrique à l'aide d'une pile à combustible PEMFC de 50W. Cette dernière est alimentée par l'hydrogène solaire. Les différents dispositifs et d'auxiliaires de cette maquette seront présentés en détail dans les points ci-dessous.

IV.3.1. Bouteille métal hydrure

La bouteille qui a été utilisé dans notre expérimentation, stocke l'hydrogène produit par l'intermédiaire de l'énergie solaire sous forme métal hydrure, cette bouteille sous pression de 10 bar (145 pis) à une température de 50°C (122°F), occupe un volume de 225 L. Lors du déchargement de l'hydrogène de la bouteille, la température de la bouteille diminue contrairement à ce qui se passe dans le remplissage ou l'on observe une élévation de la température.

IV.3.2. Détendeur et manomètres

Le détendeur est un dispositif qui ajuste le débit d'hydrogène entre la bouteille et la pile à combustible, ce détendeur limite la pression à l'entrée de la pile de 0 à 1bars. Le

détendeur a deux possibilités d'entrée, la première par l'entrée de bouteille et la deuxième par le couplage de l'électrolyseur d'eau, ce dispositif contient également deux manomètres, le premier consiste à mesurer la pression d'entrée (0 à 20 bar), et le deuxième c'est pour mesurer la pression de l'hydrogène entrant dans la pile à combustible (0 à 1 bar).

IV.3.3. Débitmètre

L'alimentation de la pile en hydrogène est équipée d'un débitmètre volumique permettant de déterminer la consommation du combustible qui rentre dans la pile en **ml/min**.

IV.3.4. Module de la pile à combustible

La pile à combustible est le cœur de la maquette, cette dernière est de type membrane échangeuse de proton PEMFC, inclut dix membranes. La puissance de cette pile est de 50W.

Cette pile est équipée par des ventilateurs pour l'entrée d'air nécessaire pour le refroidissement, elle est accélérée quand la pile a besoin de plus d'oxygène pour interagir avec la quantité de carburant. Nous pouvons le commander par deux modes, mode automatique et mode manuel.

IV.3.5. Accessoire de la pile

Pour le bon contrôle de la pile à combustible, nous devons utiliser des accessoires auxiliaires, telles que les piles chimiques pour l'alimentation de démarrage des auxiliaires en cas de l'auto-alimentation de la pile, ou, aussi, deux électrovannes où cinq afficheurs à LED sont inclus pour surveiller la température, le courant, la tension et le débit d'hydrogène.

IV.3.6. Module de Feu de circulation

Dans notre expérimentation, nous avons utilisé une charge qui conçoit un feu rouge bien entendu, ce dernier contient trois lumières (vert, ambre et rouge) avec une tension 12 V et puissance maximal de 08 W.

IV.3.7. Système de refroidissement

Deux ventilateurs alimentent la pile en air, mais permettent également le refroidissement du stock durant l'expérience. Un système de pilotage permet d'ajuster la vitesse de rotation des ventilateurs.

IV.3.8. Vanne de purge

Afin d'assurer le bon fonctionnement de la pile elle doit être pure à l'intérieur du stock, quand il est nécessaire, il y a une purge de divers gaz dans l'air tels que l'azote, le dioxyde de carbone, l'argon et d'autres, parce que nous avons besoin seulement d'oxygène. Dans notre cas la vanne de purge s'ouvre automatiquement quand les impuretés sont logées dans les électrodes.

IV.3.9. Convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC adapte la tension variable de la sortie de la pile, dont est issue la tension variable de la pile (de 4.5 à 10V) en une tension fixe de 12V. Ainsi il est possible d'alimenter tous les auxiliaires du banc grâce à ce module.

IV.3.10. Système d'acquisition

Un logiciel d'acquisition et de contrôle réalise le traitement des données et le pilotage du banc d'essai. Il assure l'affichage et le stockage des différents paramètres : tension PAC, courant PAC, température PAC, débit d'hydrogène. Bien entendu, il assure également un rôle de contrôle en pilotant le courant de la charge électronique, toutes ces données ont été réalisées à partir de l'interface LabVIEW, Aussi, cette interface permet donc de réaliser des essais dynamiques sur la pile. [53]

IV.4. Logiciel d'acquisition

Le logiciel que nous utilisons dans notre travail fourni par la société **Heliocentris**, ce dernier suivant le système **Fuel Cell trainer**, basé sur LabVIEW, est conçu pour faciliter le contrôle du système d'acquisition de données et de représentation graphique des données collectées.

Les principales caractéristiques du logiciel comprennent:

- Une représentation graphique du système physique.
- Capacités étendues d'enregistrement de données et de graphique.
- Acquisition de données: alimentation en air, température, tension, courant, approvisionnement en hydrogène.
- Tracé des courbes caractéristiques et des courbes d'efficacité.
- Des expériences entièrement automatisées et une recherche dirigée par l'enseignant possible.

L'interface du logiciel est composée sur des afficheurs des valeurs :

- débit d'hydrogène (ml/min)

- la température de la pile à combustible en °C
- courant (A)
- Tension (V)
- Les puissances (W)
- La vitesse de ventilo de la pile en %

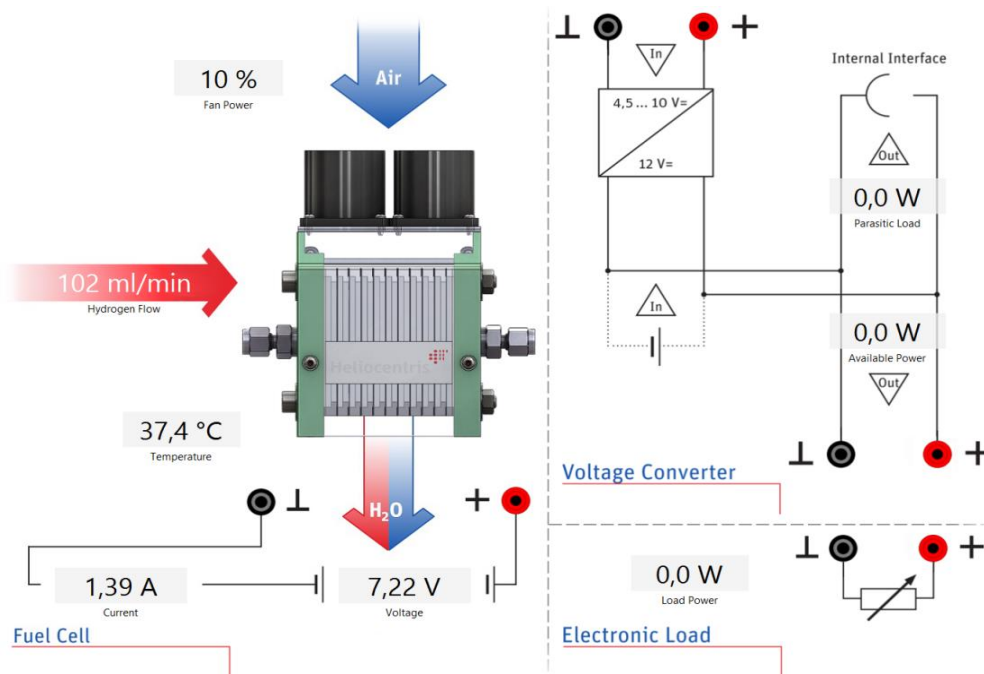


Fig. (IV.3) Interface de logiciel de fuel cell trainer [53]

IV.5. Caractéristiques et performances

Afin que nous puissions obtenir les courbes des caractéristiques de PAC, on a relié la pile directement à la charge variable comme le montre la figure (IV.4) suivant :

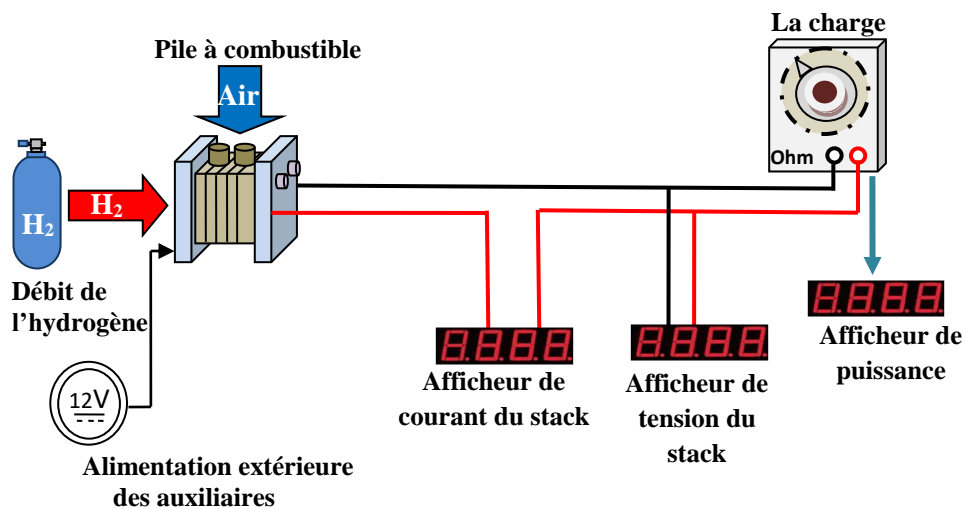


Fig. (IV.4) Schéma électrique du branchement de la pile (PEMFC) à alimentation extérieure

Pour la partie expérimentale, nous allons réaliser plusieurs manipulations afin de comprendre le fonctionnement d'une pile PEMFC. Ainsi on a déterminé l'influence des conditions opératoires sur les performances des piles, et constitué une base de données expérimentale pour donner une conclusion des résultats obtenus.

IV.5.1. Caractéristique tension-Courant (V-I)

Avec l'utilisation des données stockées dans le système d'acquisition, les caractéristiques de tension -courant (V-I) de la pile à combustible (Heliocentris FC50), sont tracées comme il est montré dans la Fig. (IV.5).

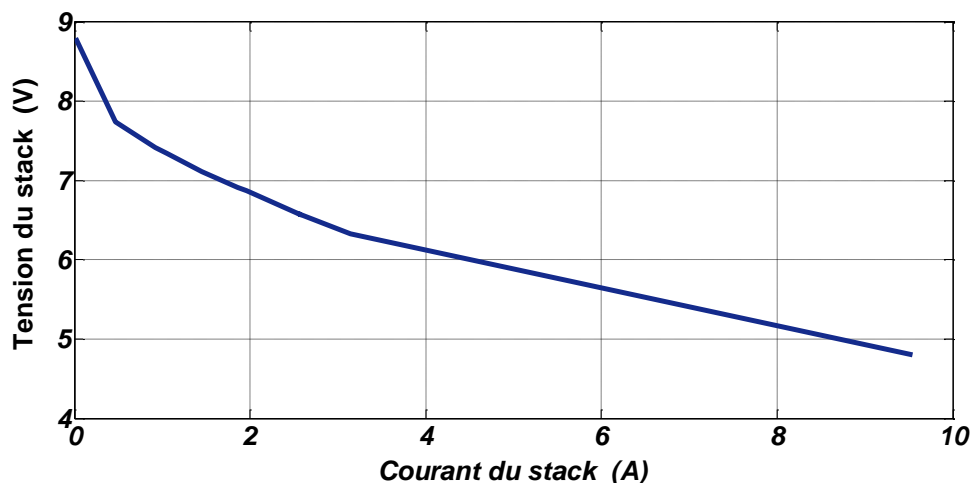


Fig. (IV.5) Courbe de caractérisation $V = f(I)$

La courbe caractéristique de la pile à combustible présente une tension à vide dans l'ordre de 8,8 V; nous remarquons que la tension de la pile est inversement proportionnelle à la densité du courant à cause des pertes internes dans la pile. Cette courbe fait apparaître trois zones distinctes. De 0 à 0,6 A environ, la chute de potentiel est due à la surtension d'activation de 0,5 à 8 A environ, elle est due à la chute ohmique localisée essentiellement dans l'électrolyte solide, et au-delà de 8 A apparaissent les problèmes de diffusion des réactifs vers les sites catalytiques. La valeur maximale atteinte lors de cette étude est 9,5 A. Cette valeur correspond presque au courant limite que peut débiter la pile.

IV.5.2. Caractéristique puissance-Courant (P-I)

Avec l'utilisation des données stockées dans le système d'acquisition, les caractéristiques de puissance-courant (P-I) de la pile à combustible (Heliocentris, FC50), est tracé comme le montre la Fig. (IV.6).

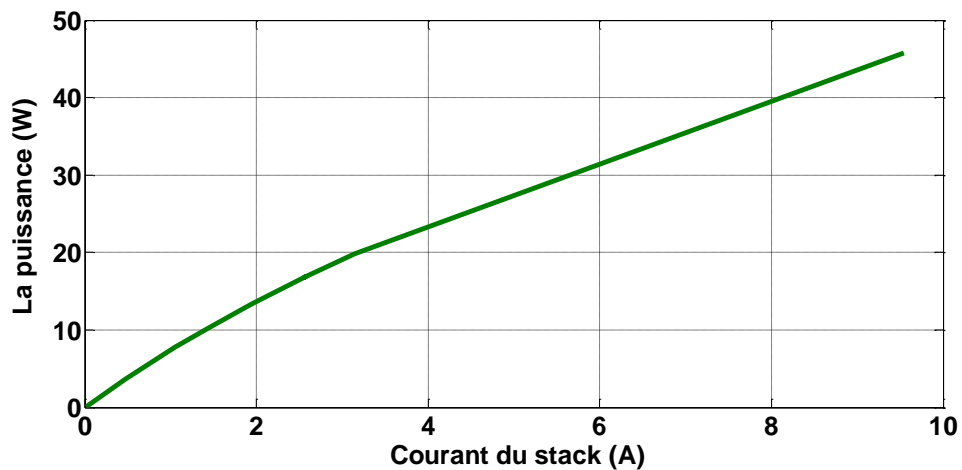


Fig. (IV.6) Courbe de la puissance en fonction de courant de la pile $P = f(I)$

Dans la courbe de caractéristique puissance-courant, nous notons un courant de 9.5A, de la pile à combustible produit avec environ 45 W. Nous notons également qu'il ya une différence entre la puissance à la sortie et la puissance du Stack à cause des pertes de consommation des auxiliaires de la pile.

IV.5.3. Caractéristique de la consommation d'hydrogène (ml/min)

Les données stockées sont employées pour déterminer le rapport entre le courant de la pile à combustible et la consommation d'hydrogène, comme montré dans Fig. (IV.7).

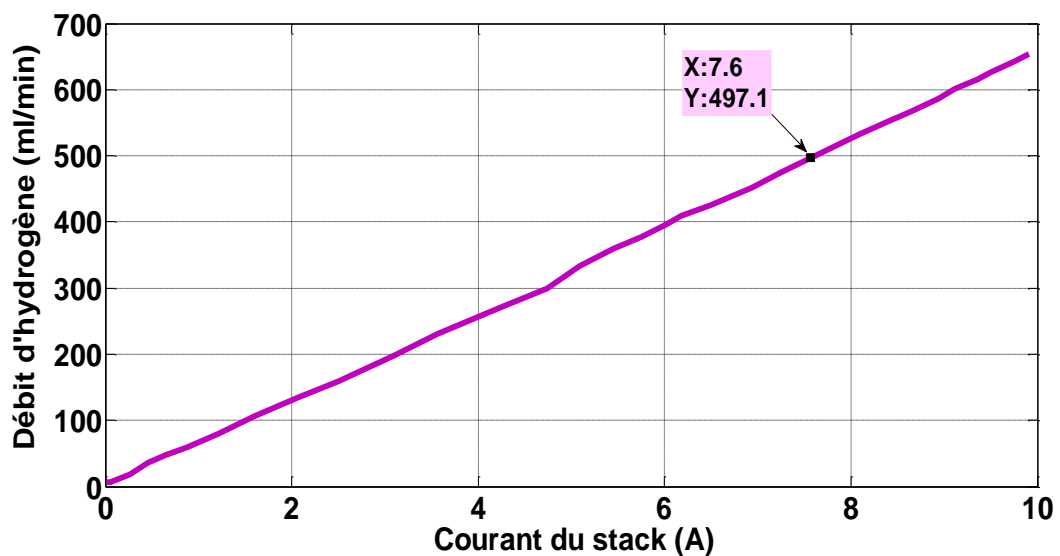


Fig. (IV.7) Courbe de consommation d'hydrogène en fonction du courant

D'après la courbe de consommation d'hydrogène, nous observons que la relation entre le débit d'hydrogène et le courant de la pile est presque linéaire, courant produit qui est expliqué par la loi de Faraday. Équation (III.4)

IV.5.4. L'influence de la température sur les caractéristiques électriques de la pile

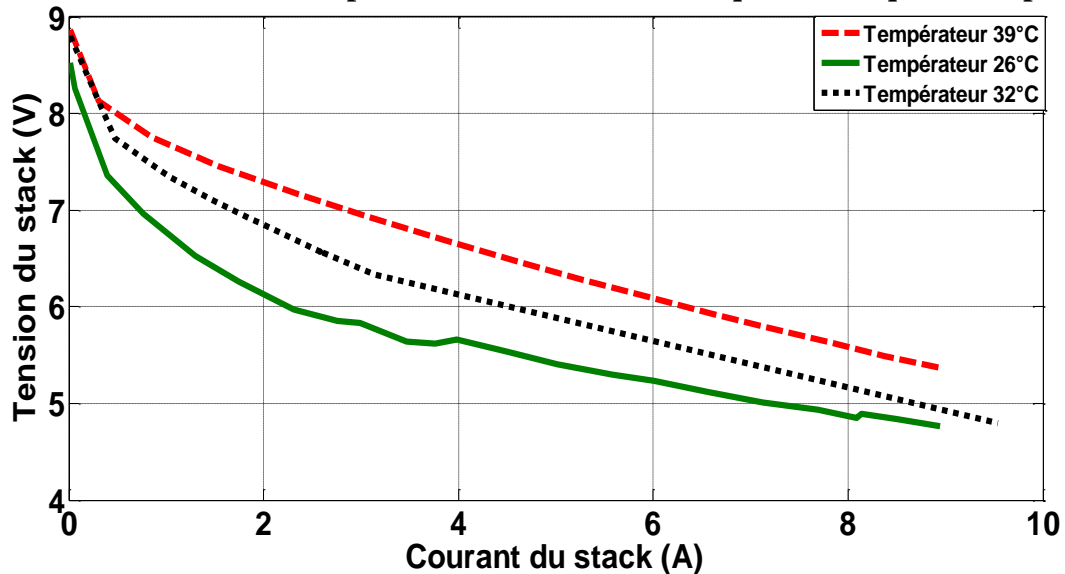


Fig. (IV.8) Courbe de caractérisation $V = f(I)$ avec différentes température

Parmi les paramètres qui influent sur la dynamique de la pile, est la température du stack, pour les trois valeurs de températures qui ont été testés ; 26°C, 32°C et 39°C. La figure (IV.8) montre que lorsque la température augmente, les performances de la pile s'améliorent, mais dans des conditions de travail dans notre cas la température ne dépasse pas 50 °C.

IV.5.5. L'influence de la ventilation sur les caractéristiques électriques de la pile

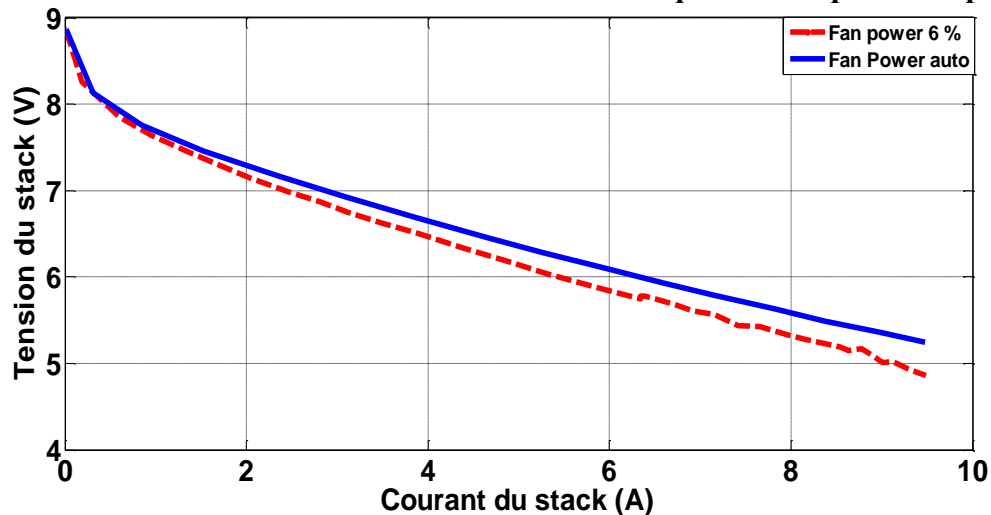


Fig. (IV.9) Courbe de la tension en fonction du courant $U = f(t)$ avec différentes gestion d'air

Les ventilations assurant l'entrée de l'air dans la pile, permettent le refroidissement de celle-ci. Un système de pilotage permet d'ajuster la vitesse de rotation des ventilateurs. Dans une première expérience, nous avons ajusté l'air de 6% et dans la deuxième nous avons assuré la gestion d'air automatiquement. Nous remarquons que la chute de tension dans la courbe de tension-courant avec ventilation de 6% est supérieure à la courbe avec ventilation auto, Cette chute de tension s'explique par le manque de la

quantité d'air nécessaire, lors de la génération d'un courant plus important, une plus grande quantité d'hydrogène entre dans la pile à combustible où la pile a besoin de plus d'air pour réagir avec cette quantité.

IV.6. Consommation propre de la pile

La pile à combustible a des auxiliaires comme (les ventilateurs de la pile, le débitmètre, les électrovannes...), ces composants ont une consommation propre plus la consommation propre de la pile à combustible.

Dans cette expérience, nous avons réalisé le Schéma électrique suivant pour savoir la consommation propre de la pile en fonction du courant électrique.

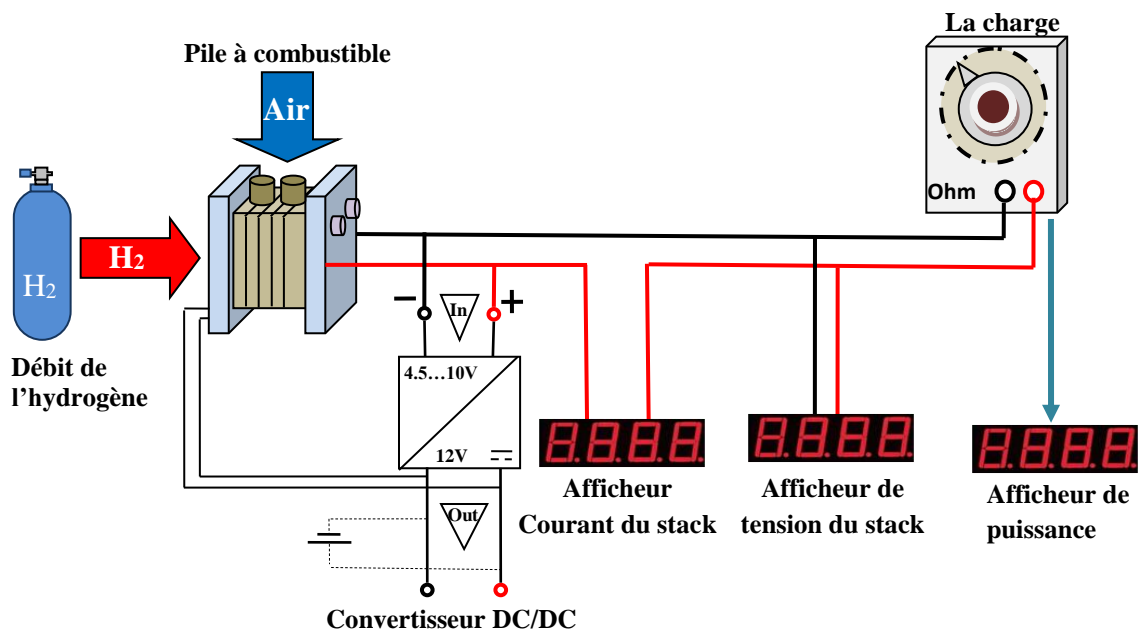


Fig. (IV.10) Schéma électrique du branchement de la pile (PEMFC) à auto-alimentation

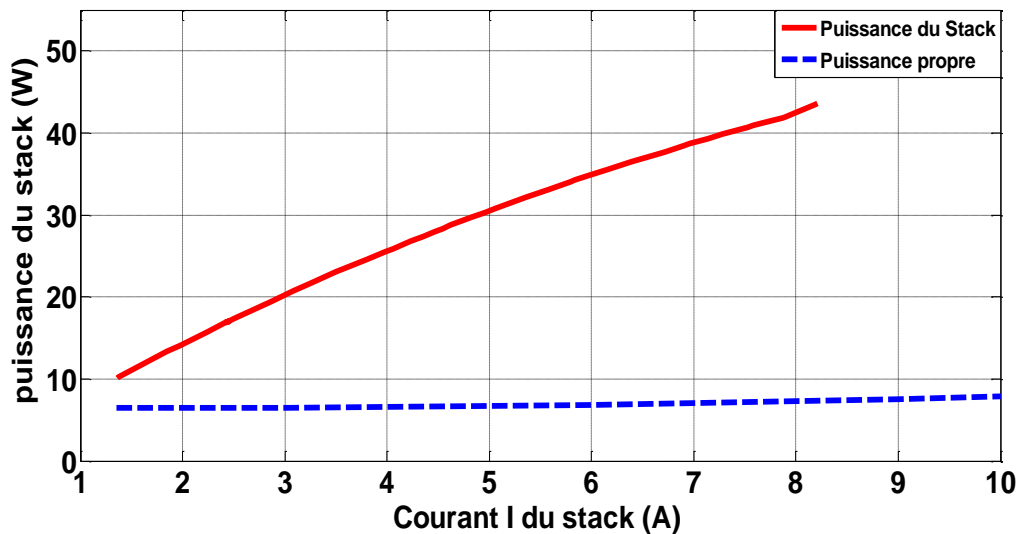


Fig. (IV.11) Courbe de caractéristique de consommation propre de la pile

La puissance des caractéristiques des auxiliaires internes (système de ventilation, électrovannes, débité mater) du système de pile à combustible en fonction du courant de pile augmente continuellement dans la gamme considérée, ayant un gradient ascendant avec un courant croissant.

IV.7. Pertes de la pile au niveau du convertisseur

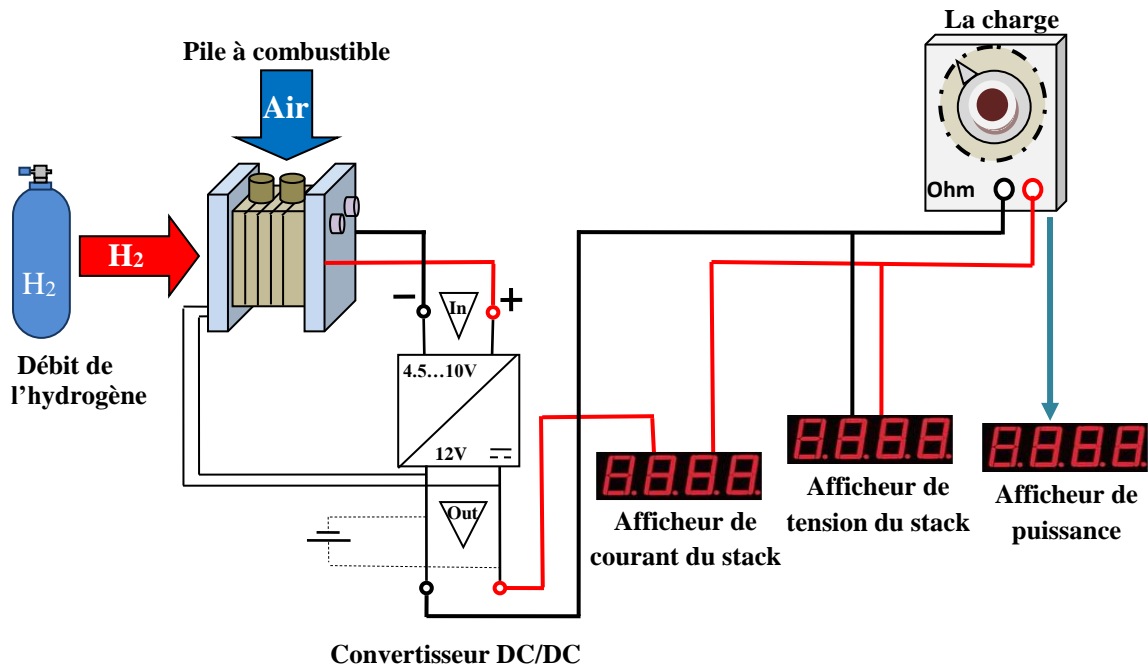


Fig. (IV.12) Schéma électrique du branchement de la pile (PEMFC) à travers le convertisseur

Dans la première expérience (Fig. IV.10), nous avons relié la charge électrique directement à la pile à combustible sans convertisseur DC/DC. Le convertisseur est habitué à alimenter la consommation propre de la pile. Dans la deuxième expérience (Fig. IV.12) nous avons relié la charge électrique à la pile par le convertisseur de DC/DC. Pour les deux cas, en donnant l'instruction de démarrage, la pile à combustible commence à fonctionner, avec le changement de la valeur de la charge, les valeurs mesurées sont stockées par le système d'acquisition. Les résultats de mesure pour les deux expériences sont présentés dans Fig. (IV.13).

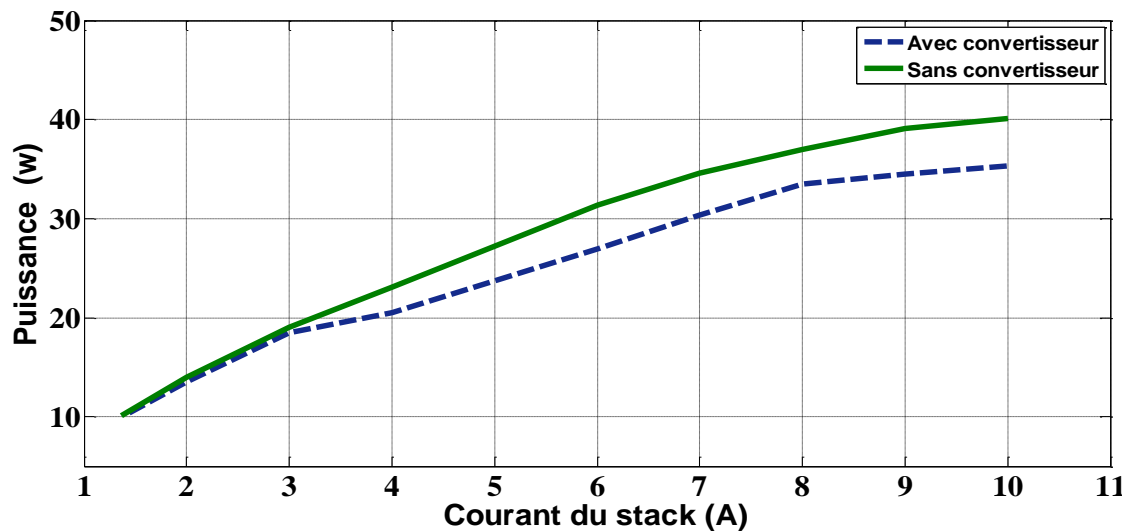


Fig. (IV.13) Courbe de caractérisation $V = f(I)$ avec et sans convertisseur

Dans les courbes de puissances courant de la pile sans et avec convertisseur, nous notons qu'il y a une différence de puissance, au cours des pertes qui se produisent lors de la conversion de la tension. L'augmentation des pertes de conversion se manifeste par la divergence des courbes avec des courants croissants.

IV.8. Rendement électrique du stack

Le rendement électrique η_{elec} d'une pile à combustible PEM est défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite sur l'énergie chimique consommé, dans la théorie, Le rendement maximal d'une PEM, à 25°C, est donc de 83% si l'eau formée est liquide et de 95% dans le cas de la vapeur d'eau. Dans notre travail l'évolution typique de ce rendement électrique est donnée sur la Fig.(IV.12). Sur cette figure, on constate que le rendement électrique le plus élevés est obtenu pour un courant inférieur à 1A, et donc pour une puissance électrique faible. Pour obtenir les plus fortes puissances électriques, il faut travailler sur des valeurs de courant plus élevées au détriment du rendement électrique. Pour obtenir les meilleures performances, en termes de puissance et de rendement électrique, Ces dernières sont de trois origines principales qui permettent le découpage des courbes de performance en trois zones qui sont mentionnées dans le chapitre III.

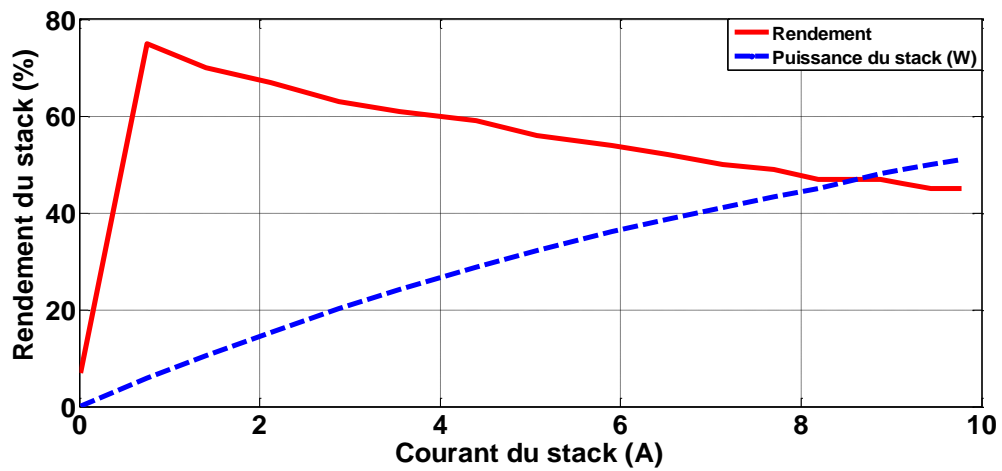


Fig. (IV.14) Rendement électrique de la PAC

IV.9. Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/ pile à combustible

Le dimensionnement de notre système qui sert à alimenter quatre feux tricolores placés dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla à l'aide d'un système hybride photovoltaïque à pile à combustible alimentée par hydrogène solaire.

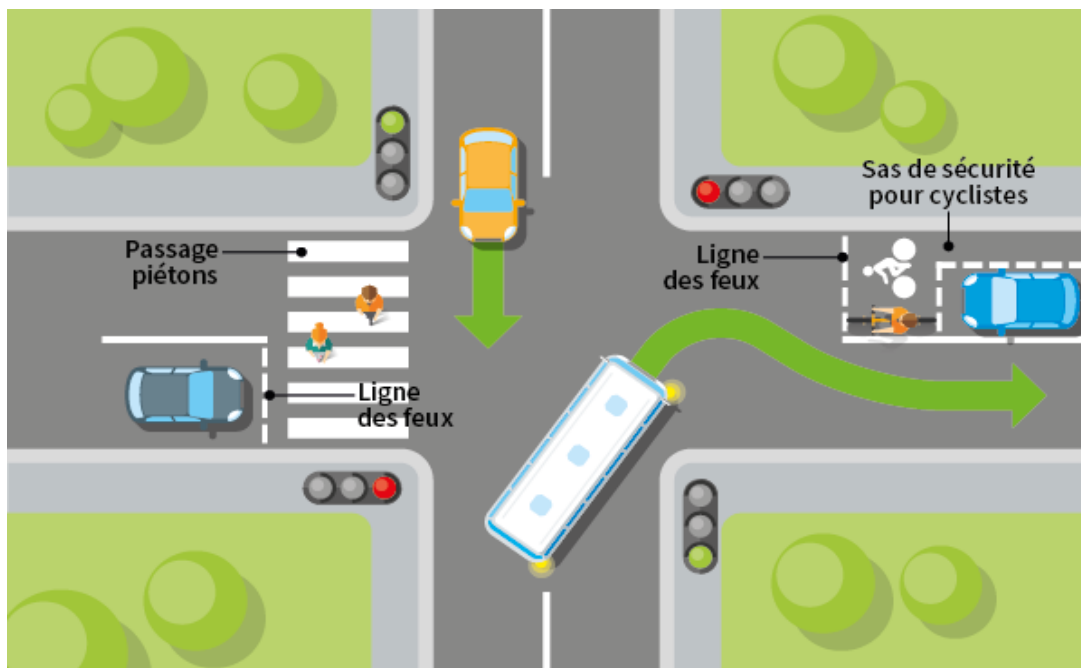


Fig. (IV.15) Système de quatre feux tricolores placés dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla

Les hypothèses qui nous ont été proposées pour faire le dimensionnement comme suite :

- Les feux tricolores fonctionnent de toute la journée 24h/24h.
- dans les heures ensoleillées (le jour) l'alimentation de ces FT avec les panneaux solaires.
- les heures de fonctionnement pendant la nuit, les FT sont alimentés par système de pile de 50W.
- la puissance moyenne consommée par chaque feu rouge égal 2.28 W (donc pour quatre feux tricolores 9.12W).
- la puissance moyenne consommée par électrolyseur est 120 W.

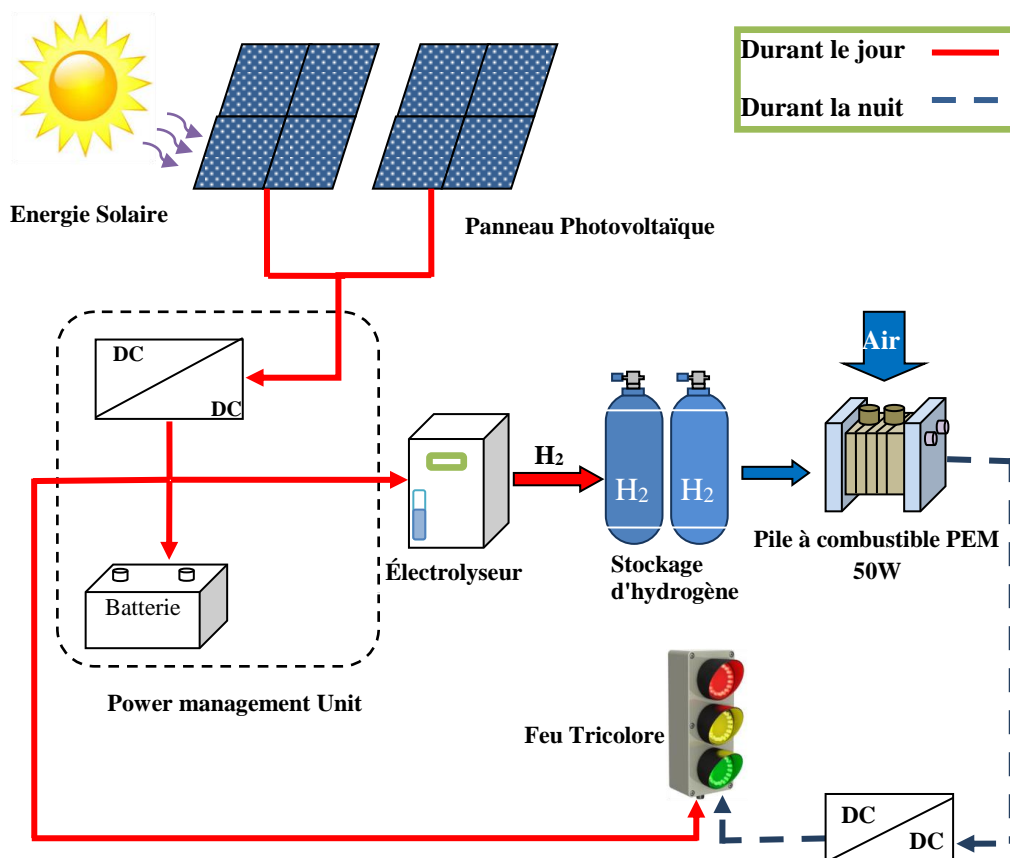


Fig. (IV.16) Système hybride photovoltaïque/ pile à combustible pour alimenter feu tricolore

IV.9.1. Détermination de la charge (feu tricolore)

La charge est un feu tricolore placé dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla. Elle est alimentée sans interruptions, le feu tricolore est une charge variable qui change comme le montre le diagramme suivant Fig. (IV.15).

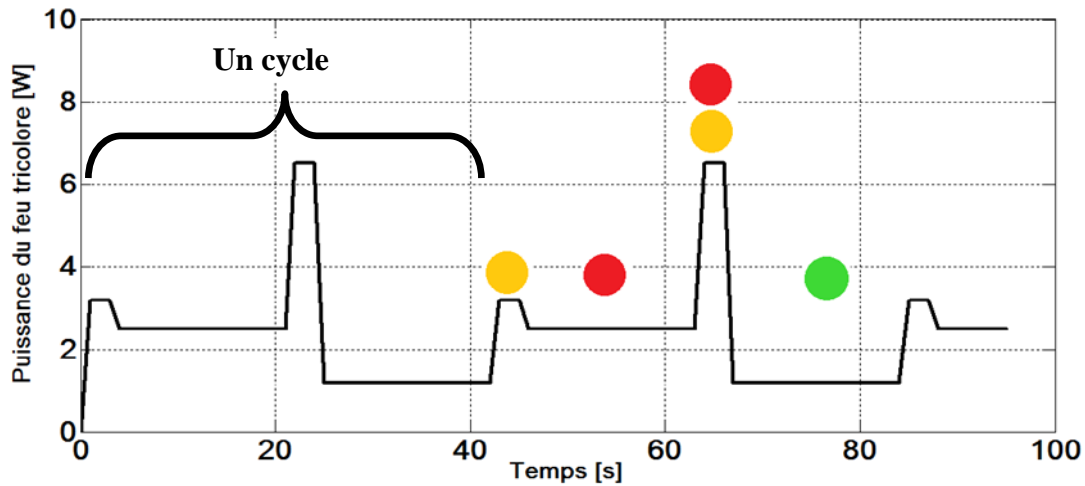


Fig. (IV.15) Puissance utile d'un intervalle du feu tricolore

Les valeurs suivantes sont obtenues pour chaque phase du feu

$$T_{\text{jaune}} = 3 \text{ s} \quad P_{\text{jaune}} = 2.3 \text{ W}$$

$$T_{\text{rouge}} = 18 \text{ s} \quad P_{\text{rouge}} = 2.5 \text{ W}$$

$$T_{\text{rouge-jaune}} = 3 \text{ s} \quad P_{\text{rouge-jaune}} = 6.5 \text{ W}$$

$$T_{\text{vert}} = 18 \text{ s} \quad P_{\text{vert}} = 1.2 \text{ W}$$

La durée d'un cycle est de :

$$T_{\text{cyc}} = \sum T = 42 \text{ s.}$$

En additionnant les valeurs mesurées, on obtient la puissance moyenne \bar{P}_{utile} :

$$\bar{P}_{\text{utile}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = 2.28 \text{ W} \quad (\text{IV.1})$$

Il est possible de calculer le travail électrique accompli à l'aide de la puissance moyenne absorbée \bar{P}_{utile} et de la durée du cycle T_{cyc} :

$$W_{\text{utile}} = \bar{P}_{\text{utile}} \cdot T_{\text{cyc}} = 95.76 \text{ Ws} \quad (\text{IV.2})$$

IV.9.2. Organigramme temporel de fonctionnement d'un système hybride

PV/Pile à combustible étudié dans les deux cas

Nous avons proposé deux stratégies de fonctionnement de notre système étudié, sachant que chacun possède un dimensionnement qui assure le fonctionnement sans interruption des feux tricolore à l'aide d'un système contenant (photovoltaïque, pile à combustible, batteries, électrolyseur). Les deux stratégies qui ont été proposées se présentent comme suivant :

- **Premier cas**

Durant la matinée les panneaux solaires alimentent les feux tricolores, l'électrolyseur et les batteries si le $Soc < Soc_{Max}$, et dans la période de la nuit la pile à combustible consomme l'hydrogène qui est produit par l'électrolyseur dans la matinée pour assurer le fonctionnement des feux tricolores.

Dans les journées d'automne où les nuages sont importants dans la matinée, les batteries alimentent les feux et l'électrolyseur, et durant de la nuit la pile alimente les feux tricolores.

- **Deuxième cas**

Durant la matinée les panneaux solaires alimentent les feux tricolores, l'électrolyseur et les batteries si le $Soc < Soc_{Max}$, et dans la période de la nuit la pile à combustible consomme l'hydrogène produit par l'électrolyseur dans la matinée pour assurer le fonctionnement des feux tricolores.

Dans les jours d'automne où les nuages sont importants dans la matinée, les batteries alimentent seulement les feux pendant 24h.

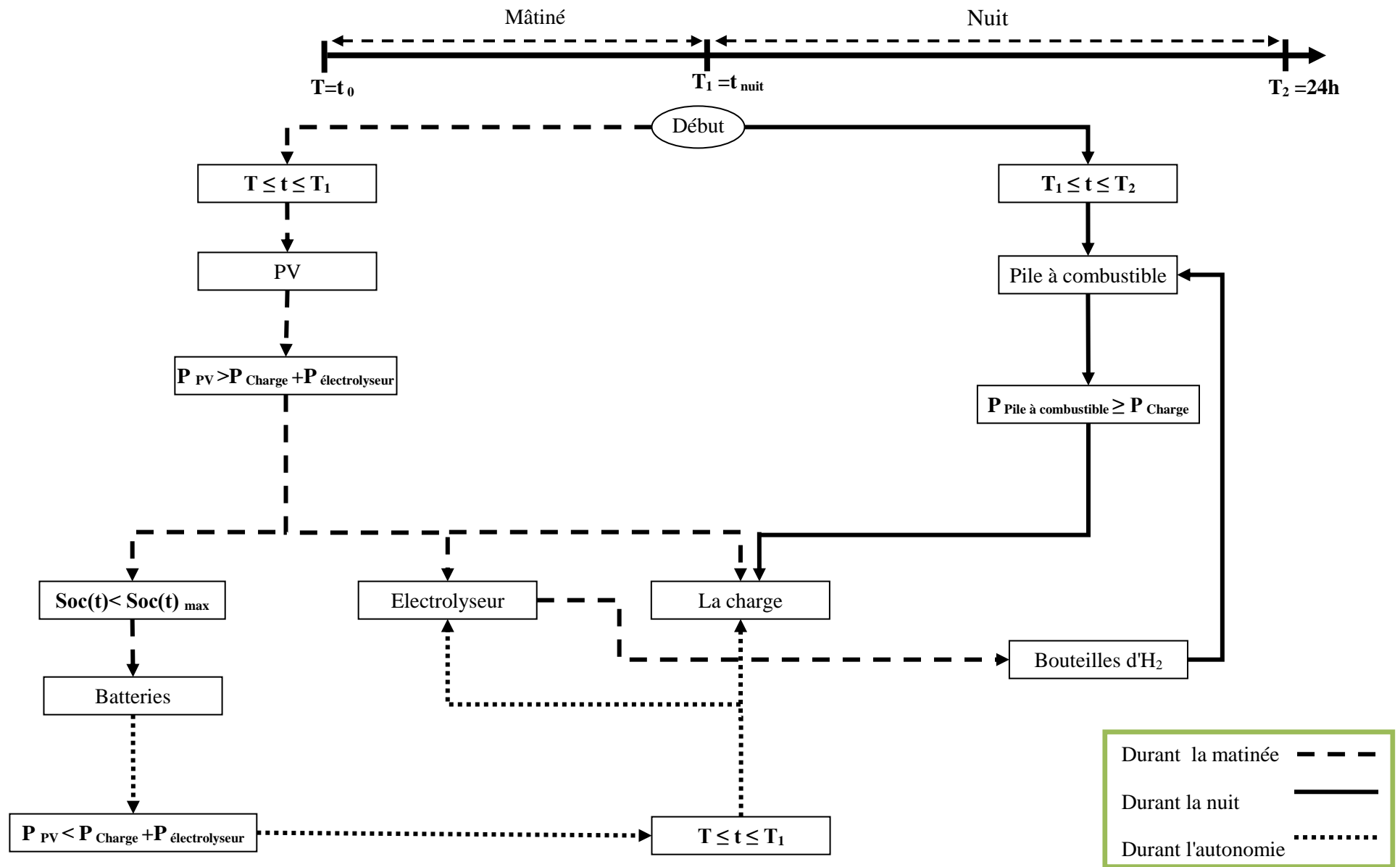


Fig. (IV.16) Scénarios de fonctionnement d'un système hybride PV/ Pile à combustible étudié

(Cas: les batteries alimentent la charge et l'électrolyseur durant les jours d'autonomies)

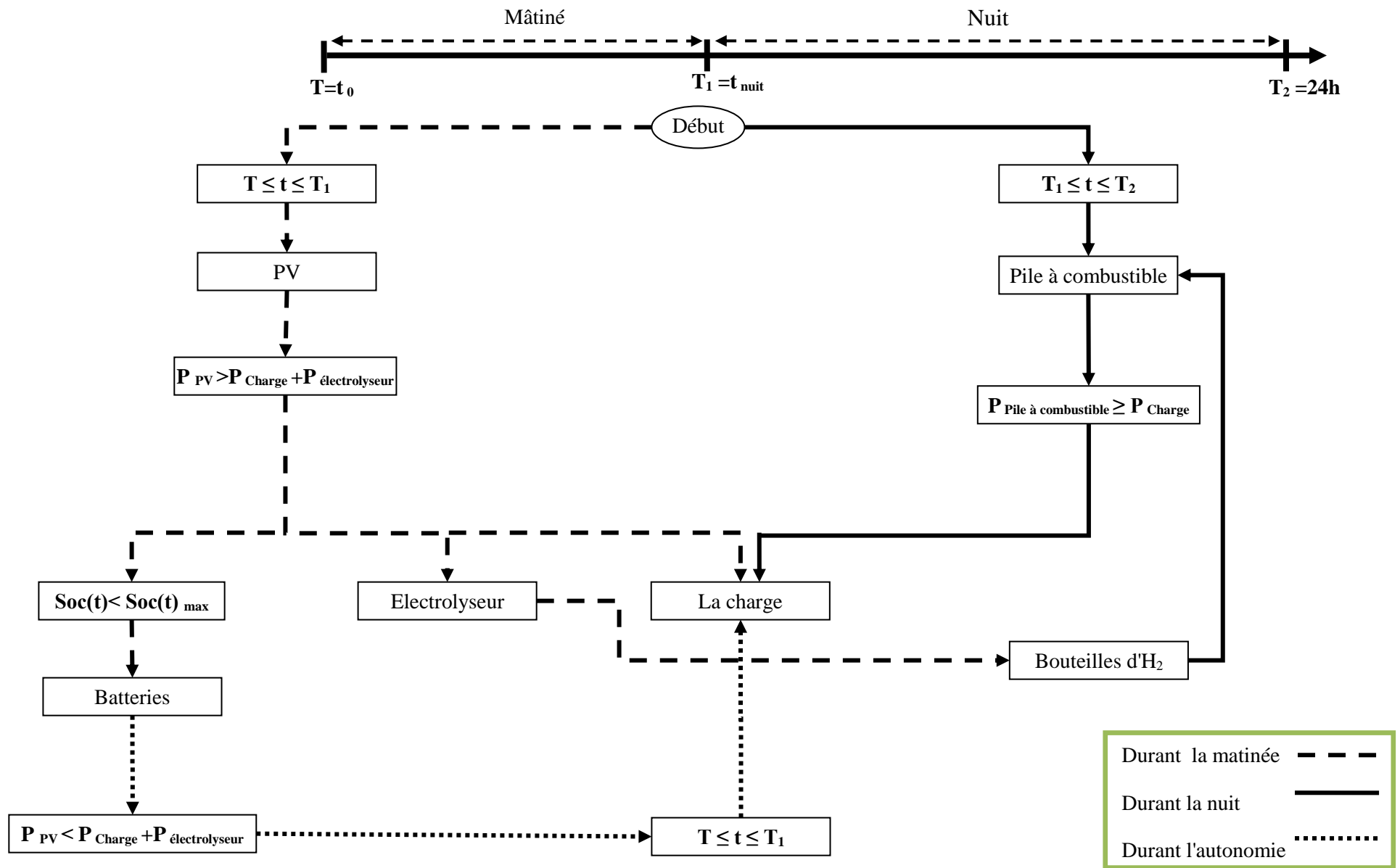


Fig. (IV.17) Scénarios de fonctionnement d'un système hybride PV/ Pile à combustible étudiée (Cas : les batteries alimentent seulement la charge durant les jours d'autonomies)

- La politique énergétique de notre installation implantée consiste à exploiter au maximum la ressource PV durant le jour ($T \leq t \leq T_1$) et à utiliser l'éventuel excès d'énergie PV stockée dans les batteries et alimenter l'électrolyseur d'eau, durant la nuit la mise en œuvre utilise la pile à combustible de 50 W qui exploite l'hydrogène stockée durant ($T \leq t \leq T_1$) si le solaire n'est pas disponible.
- Dans le premier cas, pendant les jours d'autonome où il y a beaucoup de nuages, les batteries alimentent la charge et l'électrolyseur dans la durant le jour ($T \leq t \leq T_1$), durant la nuit ($T_1 \leq t \leq T_2$) seulement la pile à combustible alimente la charge.
- Dans le deuxième cas, pendant les jours d'autonomies les batteries alimentent la charge pendant 24h ($T \leq t \leq T_2$).

IV.9.3. Dimensionnement de l'installation de système photovoltaïque

Le dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque a pour but de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque et la capacité de batterie associée à installer, à partir des données d'ensoleillement du lieu d'Ouargla

On peut résumer la démarche en ces étapes :

- Estimation de la durée d'insolation
- L'énergie consommée par jour
- L'énergie nécessaire produite
- Nombre des panneaux pour produire l'énergie nécessaire
- Dimensionnement des batteries
- Dimensionnement du régulateur

IV.9.3.1. Estimation de la durée d'insolation

Sur la base des données climatiques de station de METO (2004-2017) et les équations de calcul de l'irradiation solaire globale journalière dans une surface inclinée et horizontale, nous avons développé un programme sous Matlab pour calculer l'irradiation globale journalière I_r [kW/m/j] et la durée d'insolation $T(x)$ [h/j] sur une surface incline et horizontale, dont on considéré l'angle d'inclinaison égale à l'angle de latitude de lieu les résultats obtenus dans le tableau suivant:

Tab. (IV.1) L'irradiation solaire journalière et la durée d'insolation de (2004-2017) de l'ONM d'Ouargla. [57]

Le mois	Jan	Fév	mars	Avr	Mai	Jun	Juil	août	Sep	Oct	Nov	déc
B₀	L'angle d'inclinaison annuel qui est égale 31.95°											
La durée d'insolation moyenne de (2004-2017)	8.00	8.50	8.60	9.33	9.68	8.14	10.56	11.11	8.60	8.86	8.03	7.40
(H)Inclinée (Kwh/m²/j)	3.60	4.39	5.30	6.52	7.41	7.07	7.91	7.44	5.60	4.72	3.74	3.30
(H) en plan Horizontal (Kwh/m²/j)	3.56	4.36	5.28	6.51	7.40	7.07	7.91	7.43	5.58	4.68	3.71	3.26

La valeur moyenne annuelle de la durée d'insolation pendant (2004/2017) :

$$T(x) = 8.9 \text{ h/jour}$$

La valeur moyenne annuelle d'irradiation inclinée pendant (2004/2017) est :

$$I_r = 5.5625 \text{ (KWh/m}^2\text{/j)}$$

IV.9.3.2. L'énergie consommée par jour (E_c)

$$E_c = T(\text{élec}) \times C(\text{élec}) + T(\text{FT}) \times C(\text{FT}) \quad (\text{IV.3})$$

T (élec) : Nombre d'heures d'utilisation par l'électrolyseur par heure

C (élec) : Consommation de l'électrolyseur en watt

T (FT) : Nombre d'heures d'utilisation par Feux Tricolores par heure

C (FT) : Consommation de Feux Tricolores en watt

IV.9.3.3. L'énergie nécessaire qui produit (E_p)

$$E_p = \frac{E_c}{K} \quad (\text{IV.4})$$

Le coefficient k prend en compte l'incertitude météorologique, l'inclinaison non corrigée des modules, la non optimalité du point de fonctionnement des modules (vieillessement, poussières,...), le rendement de charge et de décharge des batteries, le rendement du régulateur et de l'onduleur, et des pertes dans les câbles et les connexions.

Pour notre type d'installation, le coefficient k est en général compris entre 0.55 et 0.65.

Nous prendrons pour valeur $k = 0.65$ [58]

IV.9.3.4. Nombre de panneaux pour produire l'énergie nécessaire (P_c)

Pour produire cette énergie, il sera nécessaire d'installer un générateur (panneaux solaires) d'une puissance égale à P_c . Cette puissance, dénommée puissance crête, dépend de l'irradiation de la région où est située l'installation. On applique la formule suivante : [58]

$$P_c = \frac{E_c}{I_r} \quad (IV.5)$$

I_r : La valeur moyenne annuelle de l'irradiation solaire

La puissance unitaire des panneaux solaires que nous avons choisie est de 220 (W), pour calculer le nombre des panneaux on applique la formule suivante :

$$N_p = \frac{P_c}{220} \quad (IV.6)$$

IV.9.3.5. Dimensionnement des batteries

La capacité totale des batteries peut être approchée par la formule suivante :

$$Cap = \frac{E_c \times N}{D \times U} \quad (IV.7)$$

N: Nombre de jours d'autonomie, Dans la zone d'Ouargla , nous prendrons le nombre des jours d'autonomie $N = 2$ jours

D: Coefficient de décharge, La profondeur de décharge maximale acceptable pour les batteries est de $D = 0.5$

U: Tension des batteries 12 (V)

La capacité des batteries que nous avons choisie est 200 Ah, pour calculer le nombre des batteries on applique la formule suivante : [58]

$$N_b = \frac{Cap}{200} \quad (IV.8)$$

IV.9.3.6. Dimensionnement des régulateurs

Pour assurer le bon fonctionnement du système, nous avons choisi un régulateur qui régule la charge et adapte la batterie, Il y a deux éléments principaux à prendre en compte:

-**la tension entre les panneaux et les batteries:** le régulateur doit pouvoir accepter cette tension 12 V

-**l'intensité maximale du régulateur:** l'intensité du régulateur (en ampères, A) doit être supérieure à l'intensité du court-circuit du ou des panneaux solaires auxquels il est connecté. Une marge de sécurité de 10% à 20% n'est pas inutile.

Les caractéristiques du régulateur que nous avons choisi, voir la fiche technique dans l'annexe(Tab.3).

IV.9.3.7. Electrolyseur

L'électrolyseur utilise pour produire de l'hydrogène nécessaire pour faire fonctionner la pile à combustible pour alimenter les feux tricolores pendant la nuit.

IV.9.3.8. Dimensionnement d'une installation de système d'une pile à combustible

La pile à combustible doit être d'une puissance suffisante pour alimenter le maximum de la demande énergétique de la charge.

Dans notre cas pendant la nuit, la pile de 50W qui assure le besoin de l'énergie pour le fonctionnement du système. La pile génère une courant de 1.9 A pour alimenter un seul panneau de feu tricolore, donc pour quatre panneau de feux tricolore le courant est 7.6 A, la pile dans ce cas consomme 497.2 ml/min donc 29.832 l/heure d'après la courbe Fig. (IV.7). À partir de ces valeurs nous avons choisi l'électrolyseur, voir la fiche technique dans l'annexe(Tab.6).

IV.10. Résultats de dimensionnement

IV.10.1. Les résultats de dimensionnements système hybride Pile/PV cas des batteries alimentant les feux tricolores et l'électrolyseur durant l'autonome

Tab. (IV.2) Résultats de dimensionnement système hybride PV/Pile (batteries fonctionne 8.9h pendant les jours d'autonomies)

Paramètres	Résultats
La consommation E_c [Wh/j]	1149.17
Puissance du champ P_c (W)	317
Nombre des modules	2
Modules en parallèles	2
Modules en séries	-
Capacité de stockage des batteries [Ah]	383.05
Nombre des branches des batteries	2

IV.10.2. Les résultats de dimensionnement du système hybride Pile/PV cas les batteries alimentant seulement les feux tricolores durant l'autonomie

Tab. (IV.3) Résultats de dimensionnement système hybride PV/Pile (batteries fonctionne 24h pendant les jours d'autonomies)

Paramètres	Résultats
La consommation E_c [Wh/j]	3098.88
Puissance du champ P_c (W)	857.08
Nombre des modules	4
Modules en parallèles	4
Modules en séries	-
Capacité de stockage des batteries [Ah]	1032.96
Nombre des branches des batteries	6

IV.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimental sur les caractéristiques de notre système de pile à combustible et l'étude des performances de ce système par détermination de la relation entre le débit d'hydrogène consommé et la puissance fournie à la charge, par la suite; nous avons établi deux stratégies de dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/ Pile à combustible qui assure l'alimentation sans interruption d'un quatre feux tricolores placés dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla. pour cela nous avons établis un programme dans le logiciel MATLAB pour le dimensionnement des composants de système à l'aide des données climatiques de la région d'Ouargla et les besoins en énergie électrique de notre charge ainsi que les caractéristiques techniques des composants de système dans le but d'une bonne gestion de l'énergie électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons commencé notre travail par étude théorique d'un système pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque, l'objectif principal dans ce mémoire est orientée vers l'étude et la caractérisation expérimentale d'une pile à combustible de membrane échangeuse de proton (PEMFC) dans le but d'utiliser cette pile dans un système hybride (pile à combustible/photovoltaïque).

Au niveau de labo de génie électrique LAGE d'Ouargla nous avons fait une étude expérimentale sur les caractéristiques notre système de pile à combustible PEMFC de 50 watt et l'étude des performances de ce système.

On remarque que La tension de sortie de la pile à combustible instable pour cette raison, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur DC/ DC, le rendement de la pile est la plus élevée à courant faible Pour obtenir les plus fortes puissances électriques, il faut travailler sur des valeurs de courant plus élevées au détriment du rendement électrique.

La pile à combustible a des auxiliaires comme (les ventilateurs de la pile, le débitmètre, les électrovannes...), La puissance des caractéristiques des auxiliaires internes du système de pile à combustible en fonction du courant de pile augmente continuellement dans la gamme considérée, ayant un gradient ascendant avec un courant croissant. Grâce aux résultats que nous avons obtenus à travers les expériences que nous avons faites nous établis deux stratégies de dimensionnement d'un système hybride Photovoltaïque/ Pile à combustible qui assure l'alimentation sans interrompre d'un quatre feux tricolores placé dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla, pour ce la nous établis un programme dans logiciel MATLAB pour déterminer les caractéristiques techniques nécessaires des composants de système à l'aide des données climatiques de la région d'Ouargla et les besoins en énergie électrique de notre charge, dans le but d'une bonne gestion de l'énergie électrique.

Nous pouvons dire que les résultats que nous avons obtenus grâce à d'expériences réelles dans notre laboratoire de recherche, nous ont permis de développer un système de génération d'électricité propre grâce à une source d'énergie solaire gratuite, et de l'eau.

Comme perspectives, cette installation sera améliorée à l'avenir en ajoutant d'autres sources renouvelables pour s'hybrider avec la pile à combustible telles que l'énergie éolienne et d'autres éléments de gestion et de contrôle de l'énergie, ce système peut alimenter une grande charge.

Références Bibliographiques

- [1] LABBÉ, Julien, « *L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés* », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [2] CANDUSSO, Denis. « *Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport* » Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2013.
- [3] Besse moulin, Pierre et Jean Olivieri « *Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette* », Société météorologique de France, Paris (FRA), septembre 2000.
- [4] Radvanyi, Pierre « *La découverte de la radioactivité artificielle* », Bibnum, Textes fondateurs de la science, 2009.
- [5] Thibault, Janine, *L'air au quotidien « approche théorique et expérimentale*». Livre Odile Jacob, 2003.
- [6] LOUAZENE, Mohamed Lakhdar, « *Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes–Application zone de Ouargla* », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Fév 2015.
- [7] Labouret, Anne et Viloz, Michel, « *Installations photovoltaïques-5e éd, Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau* » Dunod, 2012.
- [8] Labouret, Anne et Michel viloz, « *Energie solaire Photovoltaïque* » 3eme edition DUNOD, Paris, 2006.
- [9] Chabane, Foued, « *Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire*», Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [10] H. MAAMAR, « *Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa* »: Mémoire Magister, Université ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEM, 2011.
- [11] de la Casinière, Alain Chiron, « *Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre*», Editions Publibook, 2003.
- [12] Hania, AMARDJIA-ADNANI, « *Algérie énergie solaire et hydrogène développement durable* », Edition OPU 2007.
- [13] J. A. Duffie, A. Wiley and W.A. Beckman, « *Solar Engineering of Thermal Processes*», Second Edition. -Interscience Publication, 1991.
- [14] Dr. Sofia, BELAID LALOUNI, « *Energie Solaire Photovoltaïque* » Cours Université A.MIRA de BEJAIA 2015.
- [15] C.H.Cox, III, D.J.Silversmith « *Reduction of photovoltaic cell reverse breakdown by a peripheral bypass diode*», Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory (IEEE 1982).
- [16] Lalouni Sofia, Etude, « *commande et simulation d'une chaine hybride photovoltaïque-éolienne*» de production d'énergie électrique, Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.
- [17] K.Nishioka, N.Sakitani, K.Kurobe, Y.Yamamoto, Y.Ishikawa, Y.Uraoka, T.Fuyuki, « *Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cells*

using modified equivalent circuit model», Journal Appliqué de physique, vol. 42, pp: 7175-7179,2003.

[18] A.Mefti, H.Mimouni « *Evaluation du potentiel énergétique solaire* » Journal Bulletin des énergies renouvelables No 2, Décembre 2002.

[19] BENCHERIF, Mohamed, « *Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension* »,Thèse de doctorat ,Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen,2014.

[20] Site web <https://www.systemespv.com> Systèmes PV (Site consulté en février 2018)

[21] Blunier, Benjamin, and Abdellatif Miraoui. « *20 questions sur la pile à combustible: l'hydrogène, vecteur énergétique de demain?* », Éditions Technip, 2009.

[22] B. Arnason et T. I. Sigfúson, « *Iceland_ A future Hydrogen Economy* », International Journal of Hydrogen Energy, 25(5), 389-394.2000.

[23] J. K. Dahl, K. J. Buechler, A. W. Weimer, A. Lewandowski, C. Bingham, «*Solar-thermal dissociation of methane in a fluid-wall aerosol flow reactor*» International Journal of Hydrogen Energy, 29 (2004) 725-736.

[24] R. Momirlan et T. Veziroglu, «*Recent directions of world hydrogen production*», Ren. Sust. Energy Rev. 3 (1999) 219, Doctorat de l'université de Toulouse Soutenu le 03 Octobre 2008.

[25] COUPAN, Frédéric, « *Stockage pour les énergies renouvelables: évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide*», Thèse de doctorat, Université de Guyane. 2017.

[26] SAHÈI, Mounir. «*Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible*».Mémoire de magister Université Mentouri de Constantine 2010.

[27] DE DIANOUS, Valérie, SYLVAINÉ, PIQUE, et WEINBERGER, « *Etude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène*» RAPPORT D'ETUDE 15/03/2016.

[28] JEAN, Dominique, « *Étude du comportement d'une pile à combustible alimentée avec différents alcools*». Thèse de doctorat, Université Laval canada ,2006.

[29] Ahmed, DJAFOUR; « *Etude d'un système de production d'hydrogène solaire* »; Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah de Ouargla 2013.

[30] AFH2 Th. Alleau ; « *Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau* », Mémento de l'hydrogène, fiche 3.2.1. Révision, mai 2011.

[31] Rabih, Samer , « *Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques* »,Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT (FRANCE) , 2008.

[32] JONCHERE, Jean-Pierre et BAUDOUIN, Colin; « *Production d'hydrogène à grande échelle à partir des hydrocarbures* », Société Chimique de France, 2001.

[33] GHOUAOULA, ABDELHAMID. «*Simulation du comportement mécanique de la partie cylindrique d'un réservoir de stockage d'hydrogène soumis à un chargement quasi statique* ». Thèse de doctorat, Université de Hassiba Benbouali Chlef, 2011.

- [34] Kréhi Serge AGBLI, « *Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM–Pile à Combustible PEM en vue d'une application stationnaire* » Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2012.
- [35] Beermann, Martin et Jungmeier, Gerfried ; « *Quo vadis Elektroauto* », Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich. TU Graz, Johanneum Research. Graz, 2010.
- [36] FRITZ DUFOUR, « *Les coûts et implications de notre demande d'énergie: une analyse comparée et complète des ressources énergétiques disponibles: La crise d'énergie imputable aux combustibles fossiles/Exploration de nos options/L'avenir de l'énergie* », Fritz Dufour, MBA, DESS, 2018.
- [37] Bobin, Jean-Louis, Elisabeth Huffer, and Hervé Nifenecker. « *L'énergie de demain: Techniques, environnement, économie* », EDP Sciences, 2005.
- [38] CANDUSSO, Denis. « *Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport* », Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan. 2013.
- [39] MOYSSON, J. « *La logistique verte* ». Journal Aperçu des nouvelles technologies et des pratiques, 2011.
- [40] Boudellal, Méziane, « *La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications* », Dunod, 2007.
- [41] Philippe Stevens, Frédéric Novel-Cattin, Abdel Hammou, Claude Lamy et Michel Cassir « *Pile à Combustible* », Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, Août 2000.
- [42] LACHICHI, Amel, « *Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant-Application aux convertisseurs pour pile à combustible* », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2005.
- [43] SAISSET, Rémi. « *Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire* », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2004.
- [44] FRIEDE, Klaus Wolfgang. « *Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM* ». Thèse de doctorat, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL. 2003.
- [45] Labbé, Julien « *L'Hydrogène 'électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés* » thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [46] J. Labbé, « *L'Hydrogène 'électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés* », Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris 2006.
- [47] Maker, « *Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super condensateurs* » Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [48] Lefèvre, Guillaume, « *Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible* » thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble, 2004.
- [49] Guillaume LEFEVRE « *Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible* » thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble, 2004.
- [50] Rouault, H, Bloch, « *Le stockage de l'électricité: les batteries* » Clefs CEA 44, (2000).

- [51] REGUILLET, Vincent, « *Caractérisation d'un système pile à combustible en vue de garantir son démarrage et fonctionnement à température ambiante négative* », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2013.
- [52] TIGREAT, Delphine, « *Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés* », Rapport d'étude DRA-08-95313-07833B, INERIS, 2008.
- [53] Site web <http://www.fuelcellstore.com/heliocentris-academia> , Heliocentris Academia (Site consulté en Mai 2018)
- [54] Site <https://www.solaris-store.com> Régulateur solaire STECA PR 2020 (Site consulté en Mai 2018)
- [55] Site web <https://www.dhgate.com/product/12v-hydrogen-car-carbon-cleaning-machine/397932685.html> DHgate (Site consulté en Mai 2018)
- [56] Site web <http://www.heckertsolar.com/en/products/solar> Heckert Solar (Site consulté en Mai 2018)
- [57] Station Météo Ouargla, l'ONM. 2004-2017
- [58] I. Irradiation and A.B. Faso, « *Dimensionnement d'une Installation Solaire Autonome En Site Isolé (montagne, Burkina-Faso,...)* » ,2 p., 2001.

Annexe

Les propriétés d'hydrogène :

Tab.1. Propriétés physique et chimique d'hydrogène. [53]

Propriétés physique et chimique d' H ₂	Valeurs numériques
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119930 kJ/kg (50020 kJ/kg)
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	141860 kJ/kg
Densité gazeuse à 20.3 K	1.34 kg/m ³
Densité liquide à 20.3 K	70.79 kg/m ³
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/m. K
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112 kJ/kg
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante de gaz	4124.5 J/kg K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K (813 K)
Température de flamme dans l'air à 300 K	2318 K (2148 K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4 - 75 (5.3 - 15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13 - 65 (6.3 - 13.5)
Energie minimale d'inflammation (J)	20 (290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³)	2.02 (7.03)
Surpression de détonation	14.7 (16.8)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm/s (0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 km/s (7 fois le G. Naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (1.8 km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air	29.53 % (9.48 %)

Spécifications de la pile à combustible PEMFC 50W:

La pile à combustible utilisée est **Fuel Cell Traine** de type **PEMFC**, les caractéristiques techniques sont données dans le tableau suivant :

Tab.2. Caractéristique technique de La pile à combustible 50 W. [53]

La pile à combustible PEMFC	
Poids	19 kg
Puissance nominale	40 W
Puissance maximale	50 W
Tension à vide	9 V
Courant à la sortie nominale	8 A
La consommation d'hydrogène puissance nominale	580 sml/min
Pureté de l'hydrogène pour le fonctionnement	(99.99%)
Pression permise d'hydrogène	0.4 ... 0.8 bar
La température ambiante permise lors du fonctionnement	+5 ... +35°C

Régulateur solaire PR2020 :

Les caractéristiques de Régulateur solaire utilisé est PR 2020, il se présente comme suit:

Tab.3. Caractéristique technique de Régulateur PR2020. [54]

Module Régulateur Solaire	
Tension de service	12 V ou 24 V; reconnaissance Automatique
Zone de tension 12 V	6,9 V – 17,2 V
Zone de tension 24 V	17,3 V – 43 V
Températures de service tolérées	-10 °C bis +50 °C
Courant de panneau maximal à température constante de 25 °C	20 A
Courant sous charge maximal à température constante de 25 °C	20 A
Tension d'entrée maximale	47 V
Tension de batterie minimale	6.9 V

Electrolyseur PEM 1000(Stainless Steel shell):

L'électrolyseur qui a été choisi pour l'installation est de type PEM, **Model 1000(Stainless Steel shell):**

Tab.6. Caractéristique technique d'Electrolyseur PEM. [55]

Electrolyseur PEM	
Puissance nominale	120 W
Tension nominale	12 V
Courant de fonctionnement	10 A
Température du fonctionnement	30°C-50°C
Taux de production de H_2	60l/h
Dimension (cm)	9×17×25

Panneau photovoltaïque NeMo54P :

Le module photovoltaïque a été choisi est NeMo54 P

Tab.7. Caractéristique technique de Panneau photovoltaïque NeMo54P. [56]

Le module photovoltaïque	
Type de panneau	Polycrystalline
Puissance maximale	220 W
Tension à Puissance maximale	24V
Courant à Puissance maximale	8.08 A
Tension de circuit ouvert	33.77 V
Courant du Court-circuit	8.62 A
Dimensions	990mm × 1480mm × 38 mm
Rendement (%)	12%

ملخص

في مشروع نهاية دراستنا ، نقدم دراسة نظرية وتجريبية للنظام الهجين للخلايا الضوئية و خلايا الوقود ، في تجربتنا خلية الوقود تعمل بطاقة الهيدروجين الكهروضوئي المخزن في أسطوانات الهيدروجين في شكل معدني صلب ، تم إنتاج هذا الأخير بواسطة المحلل الكهربائي ذو غشاء التبادل البروتوني، وبعد ذلك وضعنا إستراتيجيتين لنظام خلايا وقود وخلايا ضوئية / هجين الذي يوفر إمدادات الطاقة دون انقطاع لأربعة إشارات مرورية موضوعة في مفترق طرق لمدينة ورقلة ، حيث قمنا بإنشاء برنامج في تطبيق ماتلاب لتحديد أبعاد مكونات النظام باستخدام البيانات المناخية لمنطقة ورقلة واحتياجات الطاقة الكهربائية للمحولة النهائية والخصائص التقنية لمكونات النظام ، لغرض الإدارة الجيدة للطاقة الكهربائية.

كلمات مفتاحية : الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، المحلل الكهربائي ، الهيدروجين ، خلية الوقود ، تحديد الأبعاد

Résumé

Dans ce projet de fin d'étude nous avons présenté une étude théorique et expérimentale d'un système hybride Photovoltaïque/ Pile à combustible , dont la pile à combustible dans notre expérience alimentée par hydrogène solaire photovoltaïque stockée dans des bouteilles d'hydrogène sous forme métal d'hydrure, ce dernier a été produit par l'électrolyseur PEM , Par la suite nous avons établis deux stratégie de dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/ Pile à combustible qui assure l'alimentation sans interruption de quatre feux tricolores placé dans une intersection de route dans la ville d'Ouargla , pour cela nous avons établis un programme dans le logiciel MATLAB pour le dimensionnement des composants de système à l'aide des données climatiques du site d'Ouargla et les besoins de l'énergie électrique de la charge finale ainsi que les caractéristiques techniques des composants, dans le but d'une bonne gestion de l'énergie électrique.

Mots clés : Energie solaire photovoltaïque, Electrolyseur, hydrogène, pile à combustible, Dimensionnement

Abstract

In this work of end-study, we present a theoretical and an experimental study of a hybrid photovoltaic/fuel cell system, the used fuel cell in our experience powered by solar hydrogen stored in hydrogen bottles in hydride metal form, this one was produced by PEM electrolyser, furthermore we establish two sizing strategy of a hybrid photovoltaic/ fuel cell to full system which ensures the uninterrupted power to supply a four traffic lights located in a road intersection in Ouargla City. For this reason we develop a program under MATLAB software to sizing the main system components using the climatic data of Ouargla region and the needs for the electrical energy of the final load and the technical characteristics of the main system components for the purpose of a good management of electrical energy.

Keywords: photovoltaic solar energy, Electrolyser, Hydrogen, Fuel cell, Sizing.