



République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

UNIVERSITÉ D'ORAN 2 MOHAMED BEN AHMED

معهد الصيانة والأمن الصناعي

INSTITUT DE MAINTENANCE ET DE SECURITE INDUSTRIELLE

Département Maintenance En Instrumentation

MÉMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : génie industriel

Spécialité : ingénierie de la maintenance en instrumentation

THEME

**Développement et amélioration d'un système non polluants
vert destinés à améliorer la production électrique**

Présenté et soutenu par :

LEDDAOUI MOHAMED EL AMINE

HAMDACH MOHAMED HICHAM

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
GUENDOZ lila	Professeur	Université d'Oran 2	Président
BELABBES Abdallah	MCA	Université d'Oran 2	Encadreur
BENFEKIR Abderrahim	MCB	Université d'Oran 2	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace :

J'ai le plaisir de dédier ce travail à:

Mes très chers parents et toutes ma famille pour leur Soutien, affection et amour, leur confiance et patience et pour leur sacrifice infini, je le dédie à toute ma famille pour laquelle j'exprime mon amour et mon et mon respect le plus Dévoué.

Tous mes amis(e) et collègues, puisse ce travail vous exprime mes souhaits de succès, et mes sincères sentiments envers vous.

Toutes les personnes qui me reconnaissent et qui mon aidé et contribué à la réalisation de ce travail.

Remerciements :

En préambule à ce mémoire et avant tout nous tenons à remercier ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage Durant Ces longues années d'étude et c'est grâce à lui que ce modeste travail a pu être réalisé. Nous voudrions profiter d'exprimer notre gratitude et notre reconnaissance.

Nous tenons tout d'abord à remercier sincèrement à notre encadreur docteur ABDALLAH BELABBES surtout pour sa patience et les conseils avisés qu'il nous a prodigués, témoignant de ses qualités scientifiques et humaines, Nous voudrions remercier spécialement Mr. OUSSAMA OMAIR Co-encadreur de cette mémoire, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et , pour le suivi continue tout au long de la réalisation de cette thèse .Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de génie industriel de l'institut IMSI et Nos sincères remerciements à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant au jugement de ce travail.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément à nos familles, amis et collègues qui nous ont encouragés et nous ont remonté le moral pour terminer ce travail de la meilleure façon et aussi à tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire

Résumé:

L'émergence de nouveaux concepts de production d'électricité et le développement des sources d'énergie renouvelables suscitent un grand intérêt pour les technologies de stockage de l'énergie. Les énergies renouvelables sont considérées parmi les meilleurs candidats, mais l'interruption de leur production nécessite de trouver des méthodes de stockage efficaces et respectueuses de l'environnement. Le système photovoltaïque et l'électrolyseur permettent de stocker l'électricité en la stockant sous forme de gaz qui est consommé par la pile à combustible.

Ce mémoire présente les résultats du dimensionnement d'un système de production d'hydrogène obtenu au moyen d'un électrolyseur, alimenté par des modules solaires PV. Pour répondre aux besoins en hydrogène de la pile à combustible PEMFC (système hybride).

Dans ce contexte, nous avons étudié l'énergie photovoltaïque en modélisant la cellule photovoltaïque, ses caractéristiques et l'effet de l'éclairage et de la température sur la cellule photovoltaïque. Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'étude de et la modélisation d'Électrolyseur d'eau PEM (membrane échangeuse de protons) en tenant compte de l'effet de pression et la température sur ce dernier comme source de production d'hydrogène gazeux, et nous avons également réalisé la même étude et modélisation sur une pile à combustible de type PEMFC.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : généralité sur les systèmes hybrides

I	Introduction :	4
I.1	Définition d'un système hybride :	4
I.2	Importance de l'hybridation :	5
I.3	Les principaux composants d'un système hybride :	6
I.3.1	Le générateur photovoltaïque :	6
I.3.2	Pile à combustible :	6
I.3.3	Les batteries de stockage :	7
I.3.4	Les convertisseurs :	7
I.3.5	Le système de supervision :	8
I.4	Classification des systèmes d'énergie hybride :	9
I.4.1	Le régime du fonctionnement :	9
I.4.2	La structure du système hybride :	10
I.5	Architectures d'un système hybride :	11
I.5.1	Architecture série :	11
I.5.2	Architecture parallèle :	12
I.5.3	Avantages et inconvénients de chaque architecture:	13
I.6	Etudes des structures de systèmes hybrides :	14
I.6.1	Système hybride avec source d'énergie conventionnelle :	14
I.6.2	Systèmes hybrides sans source conventionnelle :	16
I.7	Les Avantages et les inconvénients d'un système hybride :	17
I.7.1	Les Avantages :	17
I.7.2	Les inconvénients :	17
I	Conclusion :	17

Chapitre II : photovoltaïque

II	Introduction :	19
II.1	Système photovoltaïque :	19
II.1.1	Définition :	19
II.1.2	Différents types de systèmes photovoltaïques:	20
II.1.3	Les principaux composants d'un système photovoltaïque :	21
II.1.4	Les Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques:	24
II.2	Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque :	25
II.2.1	Caractéristique courant-tension :	25
II.2.2	Caractéristique puissance-tension :	26
II.3	Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :	27
II.3.1	Caractéristique courant - tension (I-V) :	27
II.4	Paramètres externes de cellule photovoltaïque:	28
II.4.1	Courant de court-circuit I_{cc} (pour $V=0$) :	28
II.4.2	Tension de circuit ouvert V_{oc} (pour $I=0$) :	28
II.4.3	La puissance crête d'une cellule photovoltaïque :	28
II.4.4	Le facteur de forme :	28
II.4.5	Le rendement η :	29
II.5	L'influence de l'ensoleillement et la température sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque :	29
II.5.1	Influence de l'ensoleillement :	29
II.5.2	Influence de température:	30
II.6	Association des cellules Photovoltaïque :	31
II.6.1	Association en série :	31
II.6.2	Association en parallèle :	31
II.6.3	Association série-parallèle :	32
II.7	Connexion directe GPV-Charge :	32
II	Conclusion :	33

Chapitre III : l'électrolyseur

III	Introduction :	35
III.1	Définition d'électrolyseur :	35
III.2	Les différentes technologies d'électrolyseurs d'eau :	35
III.2.1	Electrolyseurs alcalins :	35
III.2.2	Electrolyseurs PEM :	36
III.2.3	Electrolyseurs à haute température :	37
III.3	Principe de fonctionnement et éléments technologiques électrolyseur PEM :	37
III.4	Modélisation électrique de l'Electrolyseur de type PEM :	39
III.5	Production de Gaz :	40
III.6	L'influence de la température et la pression en oxygène sur l'électrolyseur :	42
III.6.1	L'influence de la température :	42
III.6.2	L'influence de la pression :	44
III.7	Avantages et inconvénients d'électrolyseur PEM :	46
III.7.1	Les avantages :	46
III.7.2	Les inconvénients :	46
III	Conclusion :	46
Chapitre IV : la pile à combustible		
IV	Introduction :	48
IV.1	Historique de la pile à combustible :	48
IV.2	L'hydrogène :	49
IV.3	PAC et batterie :	50
IV.4	Définition de la pile à combustible:	50
IV.5	Structure générale de PAC :	51
IV.5.1	Les électrodes (anode et cathode) :	51
IV.5.2	L'électrolyte :	52
IV.5.3	Les plaques bipolaires :	52
IV.5.4	Les couches de diffusion :	53
IV.6	Principe de fonctionnement de PAC :	53
IV.7	Les différents types de piles à combustible :	55

IV.7.1	La pile alcaline (AFC) :	55
IV.7.2	La pile à carbonate fondu (MCFC) :	55
IV.7.3	La pile à oxyde solide (SOFC) :	56
IV.7.4	La pile à acide phosphorique (PAFC) :	56
IV.7.5	La pile à méthanol direct (DMFC) :	56
IV.7.6	La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) :	56
IV.8	Principe de fonctionnement de la PEMFC :	58
IV.9	Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM :	60
IV.9.1	Avantages :	60
IV.9.2	Inconvénients :	60
IV.10	Caractéristiques tension-densité de courant de la pile à combustible (PEMFC) :	61
IV.11	Modélisation électrique de la PAC de type PEMFC :	62
IV.12	Caractéristiques tension- densité de courant et densité de puissance - densité de courant :	63
IV.12.1	Impact de la température :	63
IV.12.2	Impact de la Pression :	65
IV.13	Couplage PAC-Charge :	67
IV.14	Connexion directe pile a combustible(PAC)-charge :	68
IV.15	Calcul du rendement :	69
IV	Conclusion :	69

Conclusion générale

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients de chaque architecture.....	13
Tableau (II.2) : Les Différents types de cellules photovoltaïques	23
Tableau (III.3): Paramètres de l'électrolyseur PEM	39
Tableau (IV.4) : Comparaison des différents types des piles à combustible	57
Tableau (IV.5) : Paramètres de la pile à combustible PEM.....	63
Tableau (IV.6) : Modularité d'un stack: 3exemples de conception d'une PAC de 5KW.....	68

Liste des Figures

Figure (I.1) : système hybride solaire	5
Figure (I.2) : Générateur Photovoltaïque	6
Figure (I.3) : pile à combustible.....	7
Figure (I.4) : Convertisseur 150 W	8
Figure (I.5) : Système de supervision.	8
Figure (I.6) : Configurations d'un système hybride.....	9
Figure (I.7) : Classification des systèmes d'énergie hybride.	10
Figure (I.8) : Configuration d'un système hybride à bus CC.....	11
Figure (I.9) : Configuration d'un système hybride à bus CA.	12
Figure (I.10) : Configuration d'un système hybride à connexion parallèle.	13
Figure (I.11) : Système hybride avec connexion série.....	14
Figure (I.12) Système hybride à commutation.....	15
Figure (I.13) : Système hybride à connexion parallèle.	15
Figure (II.14) : Installation photovoltaïque.....	20
Figure (II.15) : Systèmes photovoltaïque autonome.....	20
Figure (II.16) : représente un système PV connecté au réseau électrique.	21
Figure (II.17) : cycle photovoltaïque.	22
Figure (II.18): Principe de fonctionnement de la cellule PV.	22
Figure (II.19) : Types de Cellules photovoltaïque.	24
Figure : bloc Simulink d'un générateur photovoltaïque	
Figure (II.20) : Caractéristique courant-tension du GPV.....	26
Figure (II.21) : Caractéristique puissance-tension du GPV.	26
Figure (II.22): Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	27
Figure (II. 23): Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV en fonction de différents ensoleillements à T=25°C.....	29
Figure (II .24) : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV en fonction de différentes températures à Es=1000W/m2.....	30
Figure (II.25) : Modules en série avec diodes by-pass	31
Figure (II. 26) : Modules en parallèle avec diodes anti-retour.....	32
Figure (II.27) : Montage série-parallèle de modules photovoltaïques	32
Figure (II.28) : Principe du couplage direct.....	33
Figure (III. 29) : Principe de l'électrolyse alcaline.....	36

Figure (III.30) : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.....	37
Figure (III.31) : Principe schématique de l'électrolyse PEM.....	38
Figure (III.32) : Schéma de fonctionnement d'une cellule.....	40
Figure (III. 33): Courbe de simulation de production du gaz H2 d'un électrolyseur.....	41
Figure (III.34): Courbe de simulation de production du gaz O2 d'un électrolyseur.....	42
Figure (III.35): Courbes de simulation de V-J d'électrolyseur PEM (influence de la température) .	43
Figure (III.36): Courbes de simulation de P-J de l'électrolyseur de type PEM (influence de la température)	44
Figure (III.37): L'influence de la pression sur la caractéristique V-J de l'électrolyseur PEM.....	45
Figure (III 38): L'influence de la pression sur caractéristique P-J de l'électrolyseur PEM.	45
Figure (IV.39): L'expérience de Sir William Grove.....	48
Figure (IV.40) : Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible.....	51
Figure (IV.41) : Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible.....	54
Figure (IV. 42) : schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC.....	58
Figure (IV.43) : Caractéristiques courant-tension de la PEMFC.....	61
Figure (IV.44) : Résultat obtenu de la simulation de la caractéristique $V = (f(J))$ sous l'influence de la température.....	64
Figure (IV.45) : courbe de simulation de la densité de puissance en fonction de la densité de courant avec des variations de la température $p=1.4$ bars.....	65
Figure (IV.46) : simulation de la caractéristique $V = (f(J))$ sous l'influence de la pression, $T=35^{\circ}C$	66
Figure (IV.47) : Courbe de simulation de la densité de puissance en fonction de la densité de courant avec des variations de la pression.	67
Figure (IV 48) : Connexion directe STACK DE PACS-charge.	68

Introduction générale

Depuis le début du siècle dernier, la consommation mondiale d'énergie a connu une très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que la consommation d'énergie va continuer à augmenter, tirée par la croissance économique et la révolution technologique en matière d'électrotechnique, en plus de l'augmentation de la consommation électrique individuelle.

Aujourd'hui, 74 % de la production énergétique mondiale provient des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz), 20 % des énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien) et 6 % du nucléaire [1], ce qui n'est pas une bonne chose. Car l'épuisement des ressources fossiles conduit au résultat suivant : la quantité d'énergie fossile disponible va diminuer avec le temps, et elle va expirer avant la fin de ce siècle (crise énergétique), en plus de ses effets néfastes sur l'environnement. Changement climatique et pollution de l'air, ainsi que émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est pourquoi il est important de réduire notre dépendance aux énergies fossiles en investissant dans des énergies nouvelles, renouvelables et propres comme l'énergie solaire, qui représente la solution appropriée pour faire face aux problèmes du changement climatique.

L'énergie solaire est caractérisée par la chaleur et la lumière. La chaleur peut être utilisée et transformée en énergie mécanique, puis en électricité dans les centrales thermiques, grâce au rayonnement solaire grâce à l'effet photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie solaire à diverses fins. Il est extrêmement fiable, silencieux et efficace dans les zones reculées.

L'hydrogène est un moyen de produire de l'énergie, car il peut remplacer le carburant pétrolier pour les véhicules et représente une source d'électricité intéressante pour les collectivités dont la consommation ne produit ni polluants ni émissions de carbone. Il peut également être produit sans générer de pollution grâce à la technique de l'électrolyse de l'eau (une réaction « redox », un procédé simple qui ne nécessite pas de pièces mobiles) à l'aide d'un appareil appelé électrolyseur.

Les électrolyseurs sont des appareils électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique directement en énergie chimique d'hydrogène et d'oxygène. Ils utilisent l'électricité pour décomposer l'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et oxygène (O_2).

De plus, des sources d'énergie supplémentaires telles que des générateurs sont utilisées en cas de pénurie d'énergie renouvelable. Il existe plusieurs types de systèmes de production d'énergie hybrides autonomes tels que les piles à combustible photovoltaïques (PV FC). L'hydrogène produit par l'électrolyseur est idéal pour être consommé par une pile à combustible.

Une pile à combustible est un convertisseur d'énergie capable de convertir une quantité d'énergie chimique stockée en courant électrique.

Il présente l'utilisation de la pile à combustible PAC dans le contexte de la consommation énergétique interne moyenne de l'hydrogène. Cette batterie a une efficacité électrique et énergétique élevée, de très faibles émissions de gaz nocifs, une faible pollution sonore et une production localisée, n'émettant que de la vapeur d'eau, et occupe une position très importante dans ce domaine. [2]

Dans ce mémoire, nous présentons une étude technico-économique du système de production d'énergie électrique hybride. Le système consiste essentiellement en un générateur photovoltaïque qui fournit de l'énergie électrique à l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène utile au fonctionnement de la pile à combustible .et particulièrement pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre nous présentons aperçu des systèmes hybrides.
- Le deuxième chapitre, nous étudions le système photovoltaïque et les principaux composants de ce système. Nous fournirons une description de la cellule photovoltaïque, de ses courbes de courant et de ses caractéristiques de puissance en fonction de la tension sous l'influence de l'éclairement. Température et propriétés électriques.
- Le troisième chapitre, nous présenterons les différents types d'électrolyseurs et leur fonctionnement avec la production de gaz (hydrogène). Avec une sélection minutieuse du type d'électrolyseur (PEM) et des courbes d'effet de température et de pression d'oxygène sur l'électrolyseur.
- Le chapitre quatre On va présenter description générale et aperçu complet sur la pile à combustible et particulièrement la pile à combustible de membrane échangeuse de proton (PEMFC) et leur Principe de fonctionnement et la modélisation électrique en plus les courbes de L'influence de la température et la pression sur une cellule PEM (tension-densité de courant et densité de puissance - densité de courant).

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralité sur les systèmes hybrides

I Introduction :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles, qui représente une énergie qui n'est pas mise en œuvre et inépuisable qui provient de ressources naturelles, et qui est fondamentalement différente de l'énergie non renouvelable en plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride.

Et afin d'amortir le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné, on peut multiplier les sources de natures différentes. On obtient alors un système dit multi-sources, même s'il est très complexe en termes d'utilisation et de stockage, il reste la solution idéale pour préserver l'environnement et la santé humaine.

I.1 Définition d'un système hybride :

Un système hybride est un système associe une ou plusieurs sources d'énergies classiques et au moins une source d'énergie renouvelables comme un panneau photovoltaïque, une éolienne, une pompe hydraulique, etc. Souvent, ces sources renouvelables sont associées à une source conventionnelle. En plus des sources d'énergies renouvelables, les systèmes hybrides associent des dispositifs de stockage comme les batteries, les super condensateurs, les piles à combustible, etc. Les systèmes hybrides dits "isolés" fonctionnent en autonomie par rapport aux réseaux de distribution électriques [1]. L'objectif principal d'un système hybride est de répondre à la demande de la charge en favorisant l'énergie produite par les sources renouvelables par rapport à celle fournie par les sources auxiliaires. En plus des sources d'énergie, un système hybride peut également comprendre un système de distribution continue, un système de distribution de courant, un système alternatif, un système de stock, des convertisseurs, des charges et une option de réception de charges ou un système de supervision. La performance d'un système hybride en termes de rendement et de durée de vie, est influencée d'une part par la conception, c'est-à-dire par le dimensionnement des différentes composantes qui le constitue, la technologie de ces composantes, l'architecture,...etc. D'autre part, cette performance dépend aussi du choix de la stratégie de gestion considérée [1]. Les systèmes hybrides peuvent varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petits

villages. Ainsi, les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à courant continu. Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100kW, connectés sur le bus à courant alternatif, sont conçus pour être connectés aux grands réseaux interconnectés. [2].



Figure (I.1) : système hybride solaire

I.2 Importance de l'hybridation :

Aujourd'hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autre des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie [3,4].

La combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif. De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.

I.3 Les principaux composants d'un système hybride :

L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ainsi que l'énergie hydraulique sont des énergies renouvelables souvent utilisées dans les systèmes hybrides. Ces systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs, les batteries pour le stockage de l'énergie, les charges principales et les charges de délestage. La majorité de ces éléments fonctionnent en parallèle pour avoir un système équilibré qui permet d'atteindre un but précis

I.3.1 Le générateur photovoltaïque :

L'énergie solaire est une énergie très abondante sur la surface de la terre. De ce fait, le photovoltaïque est considéré comme la plus importante source d'énergie renouvelable et la plus prometteuse avec un potentiel inépuisable. Un générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules assemblées en série et/ou en parallèle. Ces cellules convertissent la lumière (les photons) qu'elles captent du rayonnement solaire en électricité. En effet, sous des conditions de tests standards (Eclairement = 1000W/m^2 , température = 25°C), la puissance maximale délivrée par une cellule est d'environ 2.3W sous une tension de 0.5V . Cette puissance reste, en effet, faible et insuffisante pour la plupart des applications. De ce fait, une association en série et/ou en parallèle de plusieurs cellules permet d'obtenir un générateur photovoltaïque avec une puissance adaptée aux besoins de l'utilisation [5].



Figure (I.2) : Générateur Photovoltaïque

I.3.2 Pile à combustible :

Parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse. Ce convertisseur d'énergie, à la fois propre et efficace, permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique en énergie électrique, utilisable directement, et une énergie thermique qu'il est possible de valoriser. L'utilisation de cette cogénération permet d'atteindre des rendements très intéressants, jusqu'à 80% dans certains cas. Les piles à combustibles (PAC), générateurs statiques d'électricité et de chaleur [6].

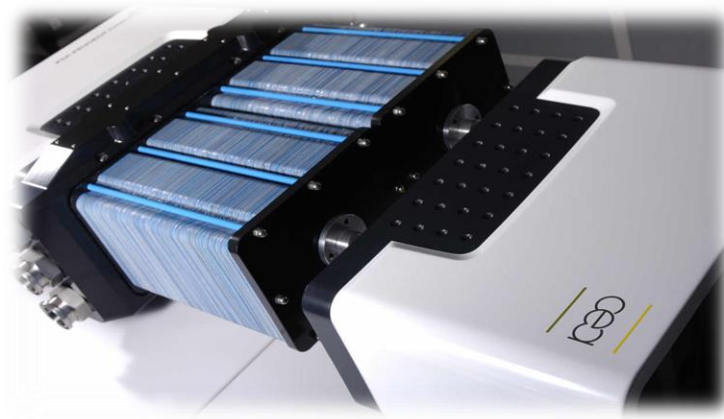


Figure (I.3) : pile à combustible.

I.3.3 Les batteries de stockage :

Un dispositif de stockage est un élément essentiel dans un système multi-sources. Sans lui, la garantie de l'autonomie du site ne peut pas être assurée. Ce dispositif sert de réservoir d'énergie lorsque les sources produisent en excédent et la restitue lorsque les sources ne produisent pas assez. Mais au-delà de cet aspect de réservoir d'énergie, un dispositif de stockage est essentiel pour l'équilibre des puissances dans un réseau. Il existe plusieurs technologies et types de stockage qui peuvent être utilisés dans un système hybride autonome, nous citons : les batteries électrochimiques, les super condensateurs, les piles à combustible [1].

I.3.4 Les convertisseurs :

Dans un SEH (système électrique hybride), des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH: les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs. Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources [6].



Figure (I.4) : Convertisseur 150 W

I.3.5 Le système de supervision :

La commande d'un système hybride nécessite l'application d'un système de supervision. Un système de supervision est une entité dotée d'une intelligence lui permettant de gérer d'une manière efficace les interactions entre les différents éléments d'un système hybride. Il représente le cerveau du système hybride, il décide de l'entité à activer (générateur photovoltaïque, éolien, charge ou décharge de batteries, générateur diesel) en fonction de la demande de la charge et en fonction de la disponibilité des énergies renouvelables

Dans le système considéré est un système multi-sources composé de panneaux PV, un banc de batteries et d'une pile à combustible montés sur un bus continu à travers des convertisseurs adéquats. Le principe de fonctionnement de ce système consiste à charger les batteries lorsque la production des panneaux PV est supérieure à la consommation de la charge. À l'inverse, lorsque la consommation est plus élevée que la production, les batteries se déchargent pour compenser le manque d'énergie [7].

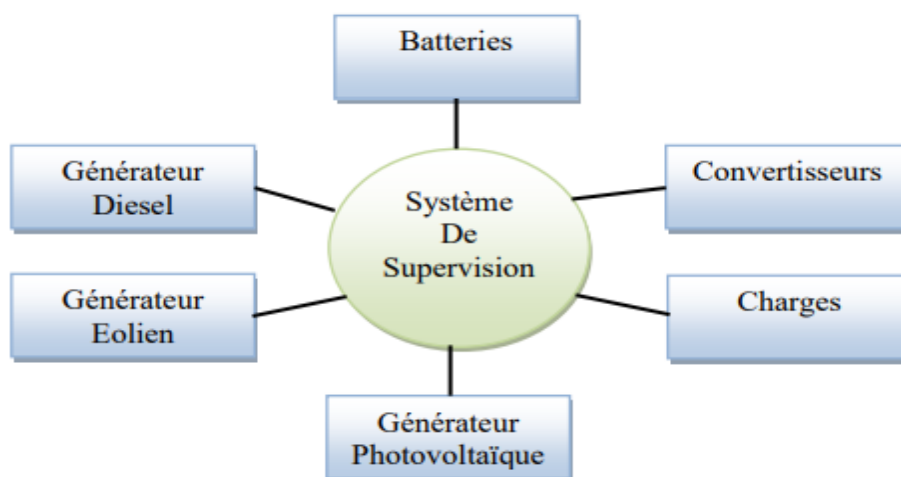


Figure (I.5) : Système de supervision.[1]

I.4 Classification des systèmes d'énergie hybride : [8, 9,10]

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite on va présenter les classifications les plus répandues. Les systèmes hybride seront classier selon :

I.4.1 Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, fonctionnent en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

Presque tous les systèmes d'alimentation qui sont conçus et optimisés pour répondre à la demande de puissance de zones éloignées sont des systèmes d'énergie non connectés au réseau (système autonome). Les systèmes autonomes varient considérablement en taille selon leurs applications.

Un système connecté au réseau (typiquement le réseau d'électricité publique) peut injecter ou s'alimenter en énergie directement dans le réseau. Ces opérations nécessitent la transformation de courant continue en courant alternatif et vice versa par un convertisseur (aussi appelé onduleur interactif).



Figure (I.6) : Configurations d'un système hybride[8]

I.4.2 La structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique, comme un générateur diesel ou une micro turbine à gaz. [11,10].

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc... [11].

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle [12].

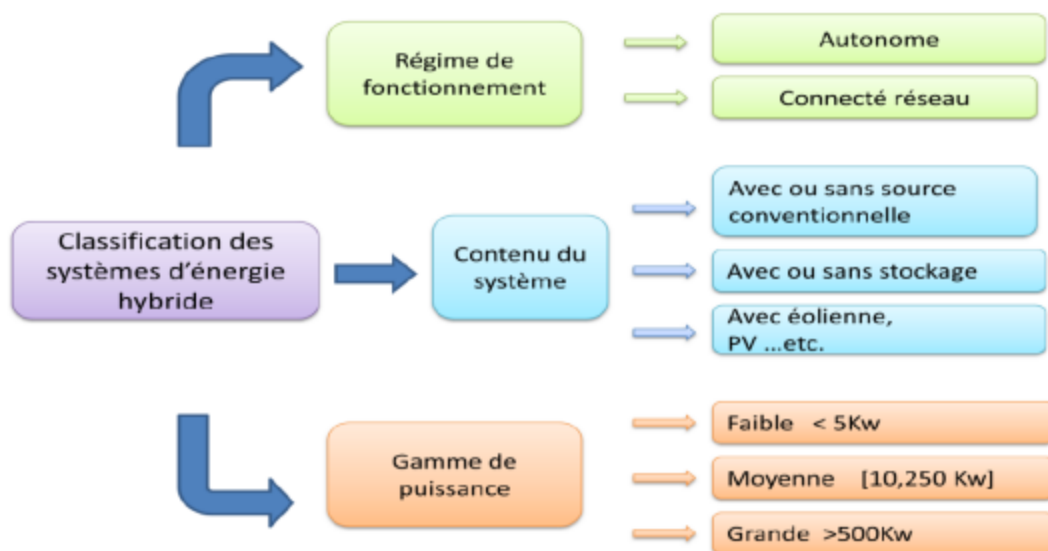


Figure (I.7) : Classification des systèmes d'énergie hybride.[14]

I.5 Architectures d'un système hybride :

Afin de présenter les différentes architectures d'un système hybride autonome, nous considérons dans ce travail, un système composé d'un générateur photovoltaïque, d'une éolienne, de batteries de stockage et d'un groupe diesel. Les différentes architectures d'un système hybride se divisent en deux grandes familles : l'architecture série et l'architecture parallèle.

I.5.1 Architecture série :

I.5.1.1 Configuration bus à courant continu :

Dans le cas d'une architecture série, toutes les sources sont connectées à un même bus à courant continu (CC) comme l'indique la Figure (I.8). Pour cette architecture, les tensions délivrées par les modules à courant alternatif (générateur éolien et groupe Diesel) sont redressées en tension continue grâce à des convertisseurs AC/DC. La charge est alors alimentée par un onduleur (convertisseur DC/AC).

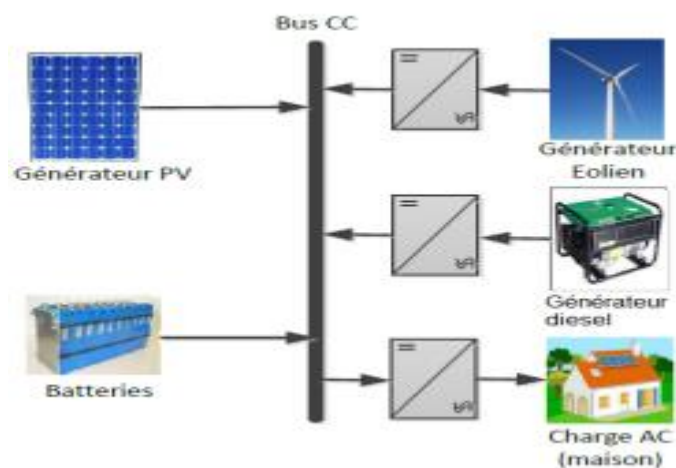


Figure (I.8) : Configuration d'un système hybride à bus CC.[1]

I.5.1.2 Configuration bus à courant alternatif :

L'architecture à bus à courant alternatif (CA) s'est développée grâce à l'émergence de l'électronique de puissance et de l'apparition des onduleurs plus performants. Cette architecture dispose d'un seul bus CA sur lequel sont connectés tous les modules du système hybride Figure (I.9).

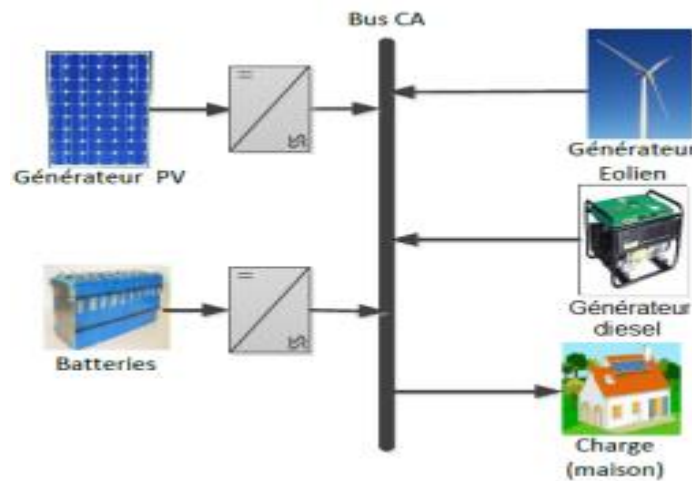


Figure (I.9) : Configuration d'un système hybride à bus CA.[1]

Le choix de cette structure est judicieux car celle-ci fournit directement une tension alternative et assure continuellement l'alimentation de la charge. Le groupe électrogène démarre automatiquement dès qu'un manque de puissance apparaît au niveau du bus. Néanmoins, l'inconvénient réside dans la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus.

Le choix de cette structure est judicieux car celle-ci fournit directement une tension alternative et assure continuellement l'alimentation de la charge. Le groupe électrogène démarre automatiquement dès qu'un manque de puissance apparaît au niveau du bus. Néanmoins, l'inconvénient réside dans la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus [1].

I.5.2 Architecture parallèle :

La configuration parallèle utilise deux bus : un bus CC (courant continu) où sont connectées les sources à courant continu (batterie et panneaux photovoltaïque), et un bus CA (courant alternatif) sur lequel sont connectés l'éolienne, le groupe diesel et la charge (maison). Les deux bus sont reliés à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel. Le convertisseur bidirectionnel travaille soit en mode redresseur lorsque le générateur diesel couvre complètement la demande de la charge et participe à charger la batterie, soit en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par les panneaux et/ou les batteries. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. [12] L'architecture d'un tel système est représenté par la Figure (I.10).

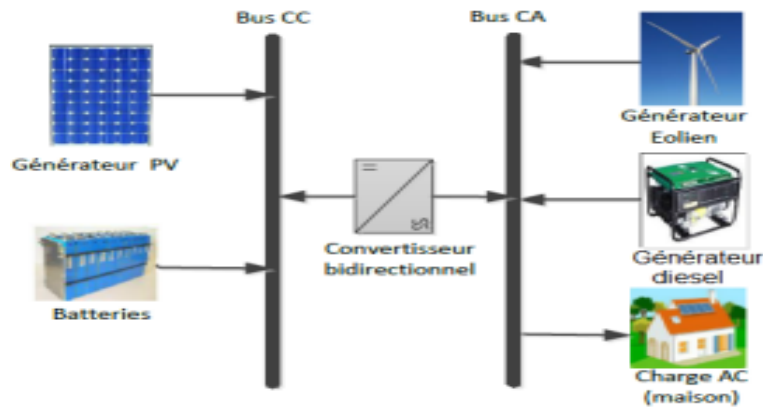


Figure (I.10) : Configuration d'un système hybride à connexion parallèle.[1]

I.5.3 Avantages et inconvénients de chaque architecture: [13,10]

Couplage du bus	Avantages	Inconvénients
DC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Synchronisme n'est pas nécessaire. 2. Moins de pertes de transmission 3. Connexion à un seul câble 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Des problèmes de compatibilité de tension 2. Problèmes de corrosion avec les électrodes DC. 3. Connexion non standard nécessite des coûts élevés dans l'installation et la maintenance
AC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Il peut être facilement isolé à partir du système en cas où des sources tombent en panne. 2. Connexion au réseau facile. 3. Interface standard et la structure modulaire. 4. Multi-tension facile. 5. Bien d'établir dans le côté économique 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Synchronisme nécessaire. 2. Le facteur de puissance et le facteur des harmoniques de distorsion sont nécessaires. 3. Les pertes de transmission sont plus élevées. (Spécialement pour les longues distances)

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients de chaque architecture.

I.6 Etudes des structures de systèmes hybrides : [1]

I.6.1 Système hybride avec source d'énergie conventionnelle :

C'est une structure dotée d'une source d'énergie conventionnelle définie généralement par un générateur diesel et une autre source d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne, etc).

I.6.1.1 Système photovoltaïque/source conventionnelle :

C'est un système doté d'une source photovoltaïque et un générateur diesel défini comme source conventionnelle. Il est utilisé très souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud où le potentiel solaire est important.

La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. Et peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie.

Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la Figure (I.11) suivant :

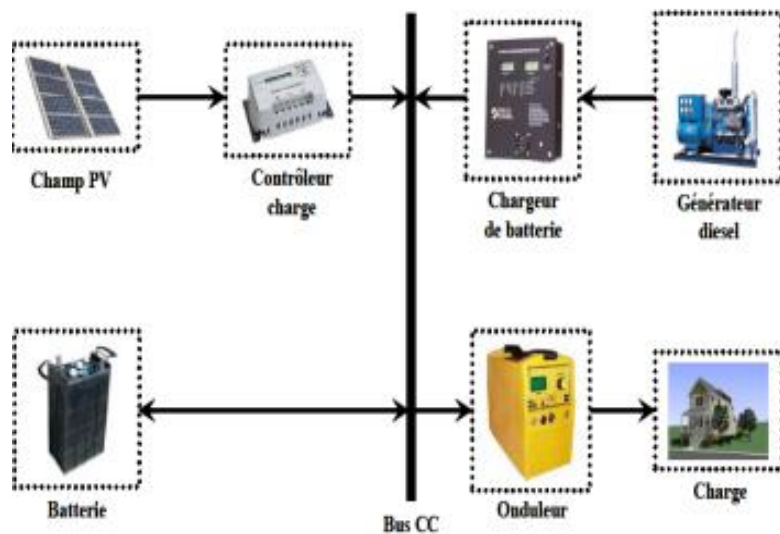


Figure (I.11) : Système hybride avec connexion série.[1]

La deuxième configuration possible est à commutation. Elle est souvent utilisée malgré quelques inconvénients. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur.

Le schéma du système est présenté sur la Figure (I.12) suivant :

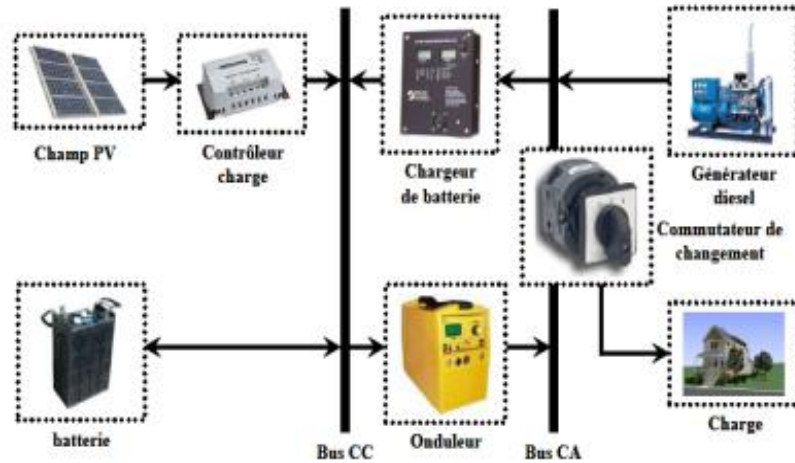


Figure (I.12) Système hybride à commutation.[1]

La dernière configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif.

L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel.

Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure (I.13) suivant :

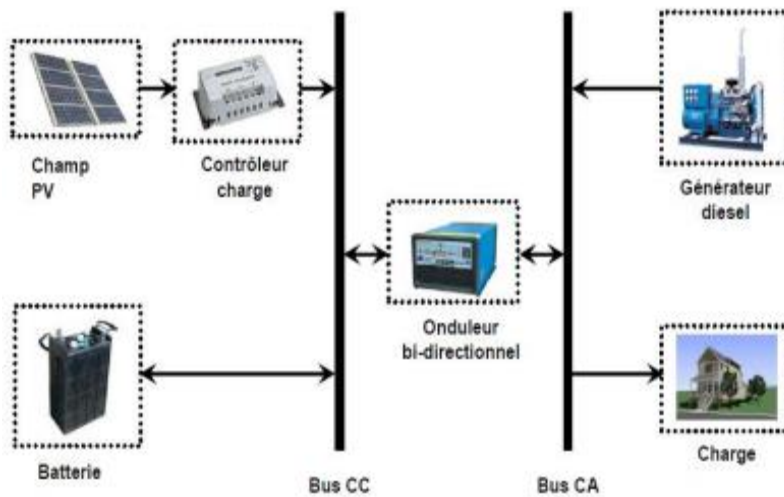


Figure (I.13) : Système hybride à connexion parallèle. .[1]

I.6.1.2 Système éolien/source conventionnelle :

C'est un système doté d'une source éolienne et un générateur diesel défini comme source conventionnelle. Les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui

produit par le générateur diesel, Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité.

I.6.1.3 Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel :

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergies renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie.

I.6.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle :

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage sont présentées

I.6.2.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage :

Dans ces systèmes, l'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, afin de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons soit des villages. Les travaux de traitent la modélisation et l'analyse de ces systèmes, ceux de traitent le dimensionnement et optimisent les composants de ces systèmes.

I.6.2.2 Système hybride éolien/stockage :

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : d'une part, il peut jouer le rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne , d'autre part il peut jouer le rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent.

I.6.2.3 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage :

L'inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs inconvénients comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie

I.6.2.4 Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage :

Ce type de système hybride s'utilisent très rarement, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares.

I.7 Les Avantages et les inconvénients d'un système hybride :

I.7.1 Les Avantages :

- Assurer la continuité énergétique.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Rentabilité, faible coût lié au cycle de vie des composants du système hybride
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.

I.7.2 Les inconvénients :

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu généralité sur les systèmes hybrides et ses composants et étalé la définition et les différentes structures de ce système de génération de l'énergie électrique, où nous avons constaté que l'avantage principal de l'utilisation des sources renouvelables dans la construction d'un système hybride peut aider à résoudre plusieurs problèmes qui apparaissent au niveau de l'impact de l'utilisation des ressources classiques sur l'environnement.

Chapitre II :

Photovoltaïque

II Introduction :

L'énergie solaire fait appel à la ressource la plus abondante sur terre (Le rayonnement solaire) qui atteint la haute atmosphère de la terre, sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil Une partie de cette énergie solaire incidente est diffusée, cette énergie est absorbée par : les molécules d'air, couverture nuageuse, l'atmosphère, etc. Le reste du rayonnement qui n'est pas dispersée et absorbée qui atteint la surface de la terre est estimé à environ 1000W/m² à midi par ciel clair. Cette énergie peut être récupérée Et exploiter par la Procédé photovoltaïque pour la production d'électricité. Cette installation doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages

II.1 Système photovoltaïque :

II.1.1 Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en Série/Parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble décomposant qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et sont régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

[1]



Figure (II.14) : Installation photovoltaïque.

II.1.2 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

II.1.2.1 Les systèmes autonomes :

C'est un système dont l'énergie produite est utilisée dans un site isolé ou non isolé et ayant un système de stockage d'énergie. L'énergie produite par les modules est en courant continu et comme on touche à l'habitat où la plus part d'appareils fonctionnent en courant alternatif, il y a nécessité de la convertir.

La batterie servant de stockage, se charge le jour. L'alimentation des applications par la Batterie se fait par l'intermédiaire d'un régulateur de charge pour éviter qu'elle souffre de surcharge et d'un onduleur (convertisseur du courant continu à celui alternatif).

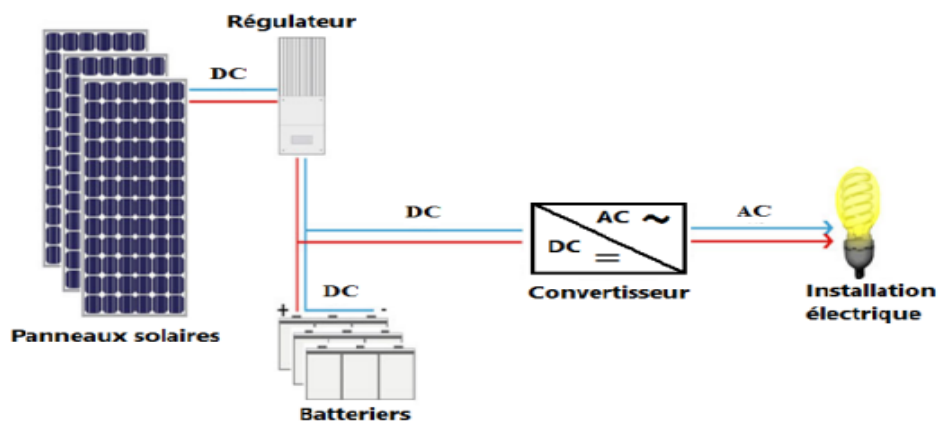


Figure (II.15) : Systèmes photovoltaïque autonome.

II.1.2.2 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 valeurs 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. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [2].

II.1.2.3 Les systèmes connectés au réseau:

Un système photovoltaïque connecté au réseau, est un système raccordé directement au réseau électrique à l'aide de convertisseurs. Ce type de système offre beaucoup de facilités pour le (producteur/consommateur) puisque c'est le réseau qui se charge du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité [3]



Figure (II.16) : représente un système PV connecté au réseau électrique.[3]

II.1.3 Les principaux composants d'un système photovoltaïque :

Cycle photovoltaïque :

Semi-conducteur (silicium) est le matériau principal dans l'industrie une cellule photovoltaïque, l'ensemble de cellule connecté on parallèle ou série donné module photovoltaïque, et l'ensemble ce dernière donné panneau solaire, plusieurs panneaux dans le même site représente ce qu'on appelle un champ photovoltaïque. [4]



Figure (II.17) : cycle photovoltaïque.

II.1.3.1 Cellule photovoltaïque:

Appelé aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu par un processus appelé effet photovoltaïque. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la cellule [5]

II.1.3.1.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent une énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [6]

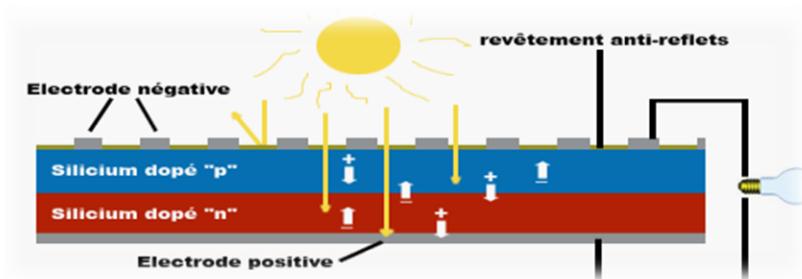


Figure (II.18): Principe de fonctionnement de la cellule PV.[6]

II.1.3.1.2 Différents types de cellules photovoltaïques :

Il existe trois principaux types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible. [7]

Matériaux	Rendements	Longévités	Caractéristiques	Principales Utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18 % (24,7 % en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Très performant. • Stabilité de production d'énergie • Méthode de production coûteuse et laborieuse 	Aérospatiale, modules pour toits, façade...
Silicium poly cristallin	11 à 15 % (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté à la production à grande échelle ; • Stabilité de production d'énergie ; • Représente plus de 50 % de la production mondiale. 	Modules pour toits, façades, générateurs, ...
Amorphe	5 à 8 %	15 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Peut fonctionner sous la lumière fluorescente • Fonctionnement avec faible luminosité • Fonctionnement par temps couvert • Fonctionnement avec ombrage partielle 	Appareils électroniques (montres, calculatrices, ...), intégration dans les bâtiments.

Tableau (II.2) : les Différents types de cellules photovoltaïques

La Figure (II.19) suivant représente les photos de trois Types de Cellules photovoltaïque :

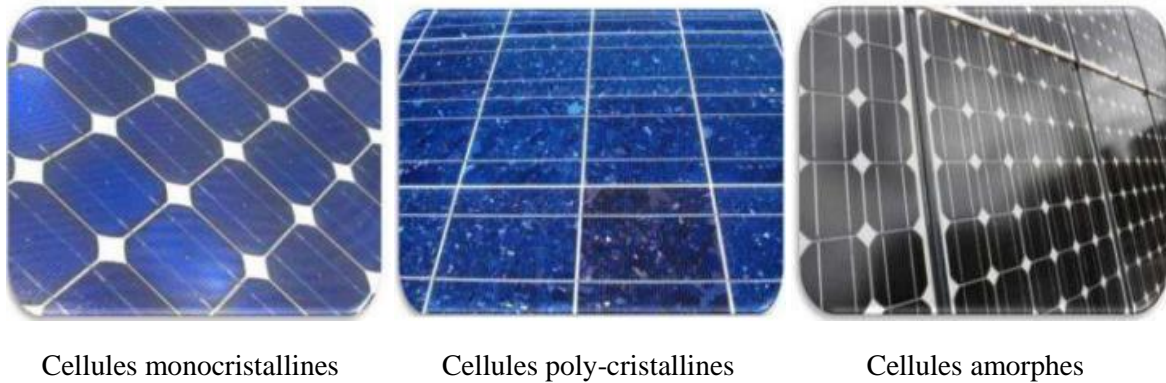


Figure (II.19) : Types de Cellules photovoltaïque.

II.1.3.2 Les Panneaux photovoltaïque:

L'ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elle constitue le module ou le panneau photovoltaïque, ce dernier est chargé de capter les rayons solaires et les convertir en électricité [8]

II.1.3.3 Générateur Photovoltaïque :

Pour assurer les exigences de la charge, il est parfois nécessaire de brancher plusieurs modules photovoltaïques en série et/ou parallèle. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV ou le générateur photovoltaïque (GPV). [9,10]

II.1.4 Les Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques:

II.1.4.1 Les avantages :

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel. [11]

2.4.2 Les inconvénients:

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication

II.2 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique du module photovoltaïque varie selon l'ensoleillement E_s et la température T . Nous avons élaboré sous environnement Matlab (Simulink) les programmes pour étudier le comportement du GPV.

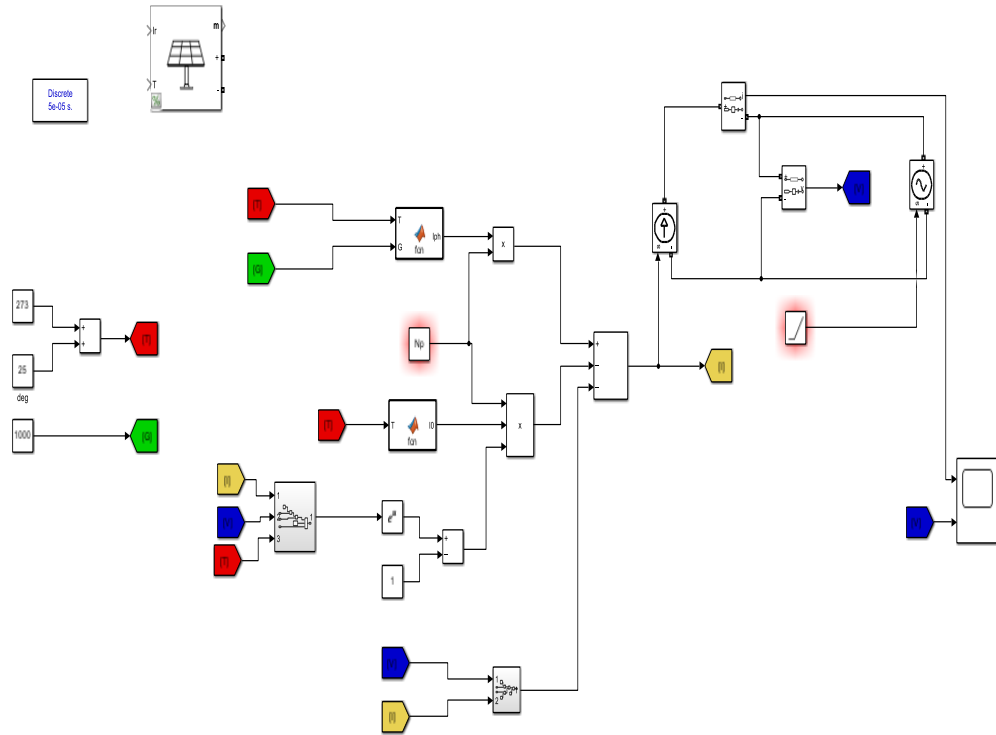


Figure : bloc Simulink d'un générateur photovoltaïque

II.2.1 Caractéristique courant-tension :

Nous avons étudié la caractéristique (courant, tension) tracée pour un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$ et une température ambiante $T = 25^\circ\text{C}$. On constate que la caractéristique se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension dans la partie verticale. On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale, située sur le coude de la caractéristique.

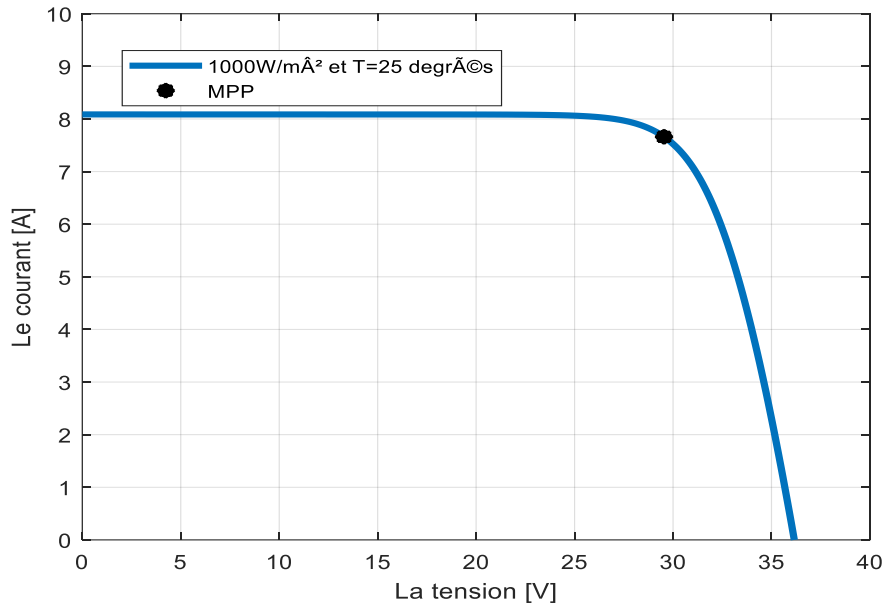


Figure (II.20): Caractéristique courant-tension du GPV.

II.2.2 Caractéristique puissance-tension :

Nous avons étudié la caractéristique (puissance, tension) tracée pour un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$ et une température ambiante $T = 25^\circ\text{C}$. On constate que la caractéristique (P, V) On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale, située sur le coude de la caractéristique

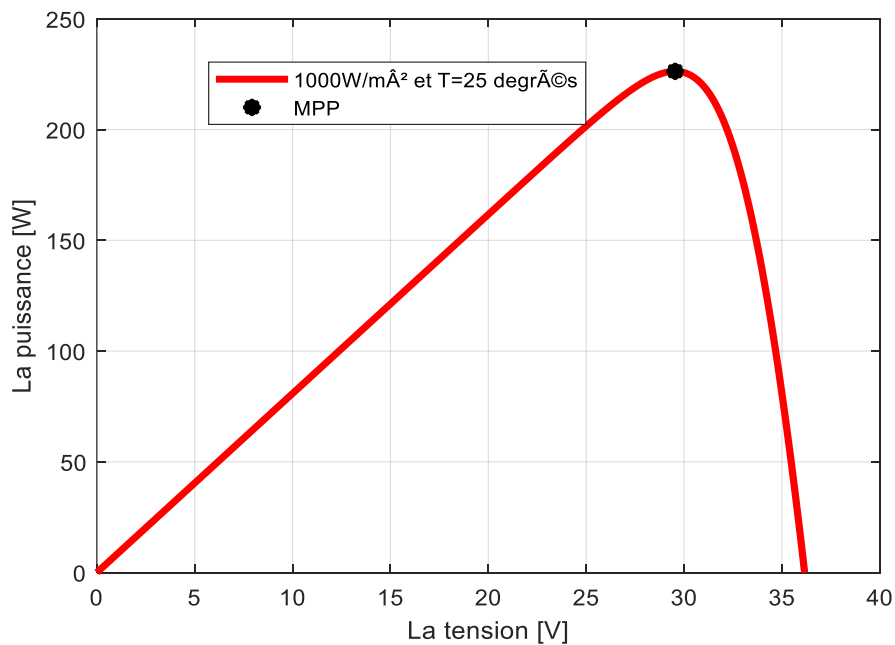


Figure (II.21) : Caractéristique puissance-tension du GPV.

Les conditions d'opération ne sont pas toujours standards. Elles varient suivant la température et l'ensoleillement observés. V_{oc} , I_{cc} , V_{opt} , I_{opt} sont sensibles à ces changements. Il faut donc disposer d'équations permettant de décrire la courbe I-V pour n'importe quelles conditions climatiques. Plusieurs modèles ont été élaborés [12].

Ils donnent le moyen de passer à des conditions quelconques d'opération, certains coefficients devant être connus. Pour notre part, nous avons utilisé les équations suivantes pour un module photovoltaïque [13]

$$I_2 = I_1 + I_{cc} \left(\frac{E_2}{E_1} - 1 \right) + (T_2 - T_1) \alpha_0 \quad (\text{II.1})$$

$$V_2 = V_1 + (T_2 - T_1) \beta - R_s (I_2 - I_1) - K_c \cdot I_2 (T_2 - T_1) \quad (\text{II.2})$$

V_2 , I_2 , E_2 , T_2 sont respectivement la tension, le courant de sortie, l'ensoleillement, la température à la condition désirée. V_1 , I_1 , E_1 , T_1 sont respectivement la tension, le courant de sortie, l'ensoleillement, la température à la condition mesurée.

I_{cc} est le courant de court-circuit à la condition mesurée

β Est le coefficient tenant compte de l'effet de la température sur la tension ; [12]

$$\beta = -7.8 \cdot 10^{-2} \text{V}/^\circ\text{C}.$$

$$\alpha_0 = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{A}/^\circ\text{C}.$$

K_c est le facteur de correction de courbe; [13]

$$K_c = 5.5 \cdot 10^{-3} \Omega / ^\circ\text{C}$$

II.3 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :

II.3.1 Caractéristique courant - tension (I-V) :

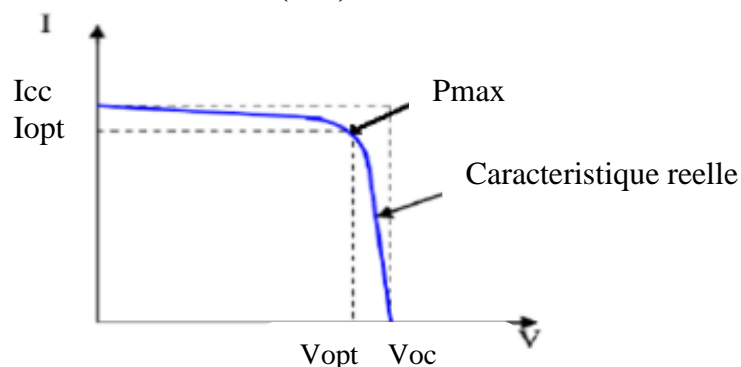


Figure (II.22): Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

La figure (II.22) montre la caractéristique courant-tension (I-V). La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondante au courant maximum I_{cc}) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule V_{oc}).

II.4 Paramètres externes de cellule photovoltaïque:

II.4.1 Courant de court-circuit I_{cc} (pour $V=0$) :

Lorsqu'on place la cellule solaire en court-circuit, elle débite son courant maximal, mais aucune tension. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule

II.4.2 Tension de circuit ouvert V_{oc} (pour $I=0$) :

Si l'on place une cellule solaire sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit ouvert V_{co} ou V_{oc} . On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

II.4.3 La puissance crête d'une cellule photovoltaïque :

Dans le cas d'utilisation de cellule photovoltaïque avec le rayonnement solaire, sa puissance crête notée P_{max} , représente la puissance électrique maximale délivrée dans les conditions suivantes dites Conditions Standard de Test.

-Eclairement solaire de 1000 W / m^2 (correspondant à peu près à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil à midi par temps clair d'été).

-Température de la cellule PV égale à $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} , idéale correspond à la tension de circuit ouvert V_{oc} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{max, opt} = V_{oc} \cdot I_{cc} \quad (\text{II.3})$$

$P_{max, opt}$ (W) : La puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V_{oc} (V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A) : Le courant de court-circuit mesuré aux bornes de la cellule PV.

En pratique, la tension au point de puissance maximale $V_{P_{max}}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{oc} .

II.4.4 Le facteur de forme :

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} , dans des conditions d'éclairement, de température et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{oc} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

$$F = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.4})$$

FF : Facteur de forme.

P_{max} (W) : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV.

V_{oc} (V) : Tension de circuit ouvert.

I (A) : Courant de court-circuit.

II.4.5 Le rendement η :

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses

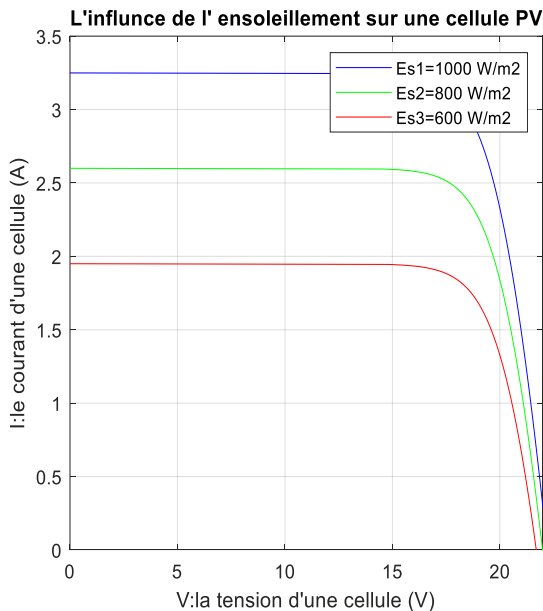
Où : P_{in} la puissance d'entrée au niveau de la cellule PV

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{P_{in}} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (II.5)$$

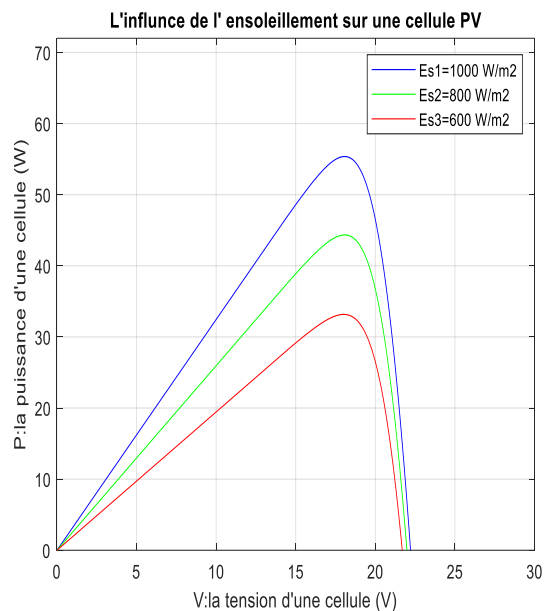
II.5 L'influence de l'ensoleillement et la température sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque :

II.5.1 Influence de l'ensoleillement :

Nous avons étudié en utilisant environnement Matlab (Simulink) d'un exemple de courbes pour différents niveaux de rayonnement à une température constante,



a. Caractéristiques I-V



b. Caractéristiques P-V

Figure (II. 23): Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV en fonction de différents ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$

En faisant varier l'ensoleillement entre 800 w/m² et 1000 w/m², la caractéristique ($I=f(V)$) est donnée par les figures. On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairément.

On peut conclure que :

-La puissance optimale de la cellule (PV) est pratiquement proportionnelle à l'ensoleillement. -Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25°C

II.5.2 Influence de température:

Nous avons étudié en utilisant l'environnement Matlab (programme) les caractéristiques I-V et P-V pour différentes températures de fonctionnement de générateur photovoltaïque à une irradiation constante.

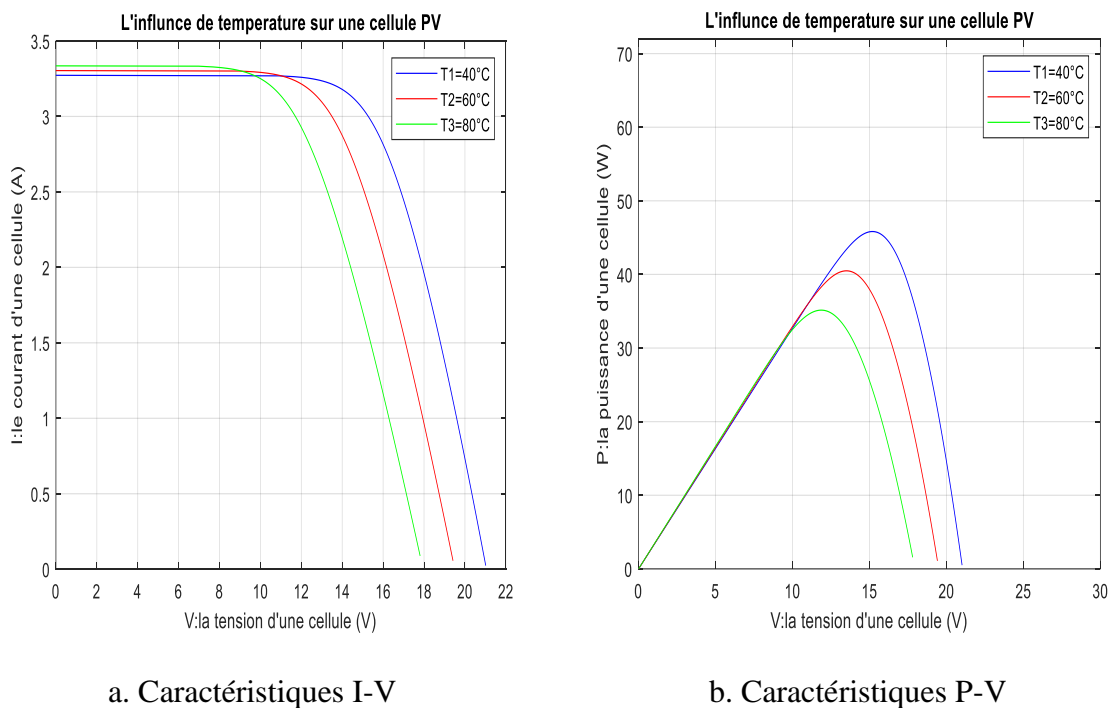


Figure (II .24) : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V d'un générateur PV en fonction de différentes températures à $E_s=1000W/m^2$

En faisant varier la température (80°,60°,40°), la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (II.24). On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la

température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

II.6 Association des cellules Photovoltaïque :

II.6.1 Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente au nombre de cellules (modules) en série. Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée. Les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse importante et la puissance qu'elle devra dissiper sera trop grande. En fonctionnant ainsi, on provoque l'échauffement de la cellule (hot spot), ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module.

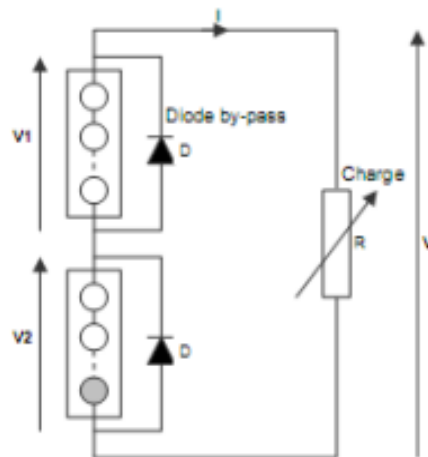


Figure (II.25) : Modules en série avec diodes by-pass

II.6.2 Association en parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Les modules les moins performants peuvent devenir récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de du

bloc le plus faible de ces modules. Le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante

Il est donc préférable de disposer d'une diode anti-retour. Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. Cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche.

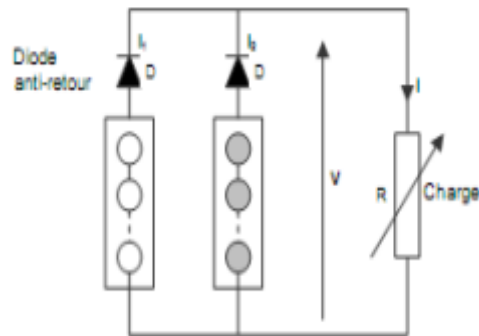


Figure (II. 26) : Modules en parallèle avec diodes anti-retour

II.6.3 Association série-parallèle :

Généralement, on utilise un montage série-parallèle qui nous permet de régler à la fois la tension et le courant selon les caractéristiques de la charge. Les cellules photovoltaïques sont associées entre elles en série, et les modules sont associés en parallèle. On utilise alors les diodes by-pass pour éviter que les cellules les moins performantes deviennent consommatrices, et les diodes anti-retour pour éviter le retour du courant des autres modules lors d'un dysfonctionnement [

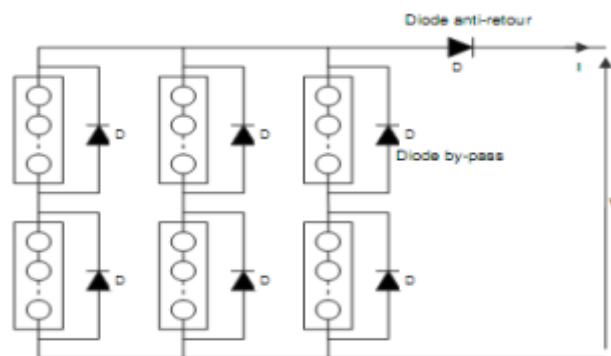


Figure (II.27) : Montage série-parallèle de modules photovoltaïques

II.7 Connexion directe GPV-Charge :

La connexion directe GPV-CHARGE est le système le plus simple auquel on a fait recours au départ. C'est le système minimal, le plus économique (en termes de nombre et de la complexité des

éléments constituant notre système) qu'on peut envisager. Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération due fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de « réglage » de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [14]

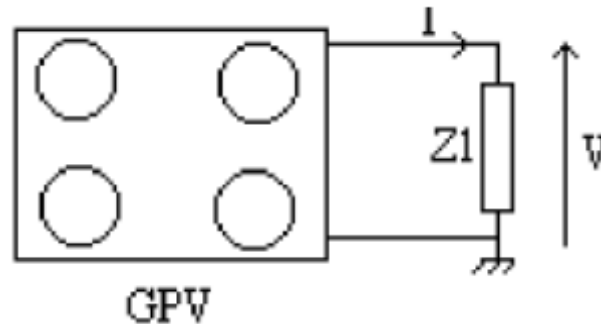


Figure (II.28) : Principe du couplage direct

Le principe du couplage direct GPV-CHARGE repose sur le transfert de la puissance de sortie de la source photovoltaïque vers l'équipement à alimenter, sans aucun système intermédiaire

Ce fonctionnement est reconnu sous la nomination "fonctionnement au fil du soleil". Le point de fonctionnement est particulièrement dominé par plusieurs facteurs à savoir: [15]

- la charge
- les conditions de fonctionnement: ensoleillement, température,
- les types de connexions établies des modules photovoltaïques (parallèle, série, mixte).

II.8 Conclusion :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité, rendue possible par un système PV. Dans ce chapitre, nous sommes intéressés au principe de fonctionnement d'une cellule PV ainsi que l'étude de son schéma équivalent. Puis, nous avons considéré les différents paramètres du circuit équivalent qui permettent de tracer la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque. Nous avons remarqué que les performances d'un GPV sont fortement influencées par les conditions météorologiques (température, éclairage). Les modules PV peuvent être associés en série pour augmenter la tension, en parallèle pour augmenter le courant.

Chapitre III :

L'électrolyseur

III Introduction :

Dans ce premier chapitre on va présenter d'une manière introductive un outil de production d'hydrogène avec de l'énergie électrique un outil très importants qui se dit l'électrolyseur, qui considéré une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Elle permet par ailleurs, dans l'industrie chimique, la séparation d'éléments ou la synthèse de composés chimiques [1]. Est utilisée lorsque l'on désire obtenir de l'hydrogène extrêmement pur.

L'intérêt de la production d'hydrogène par électrolyse réside dans les grands avantages qu'elle représente pour l'environnement à condition que l'on utilise de l'électricité d'origine renouvelable pour alimenter l'électrolyseur. Si l'on utilise de l'électricité d'origine photovoltaïque par exemple nous obtiendrons de l'hydrogène à émission zéro, une énergie totalement propre, zéro émission. Les électrolyseurs sont de plusieurs type mais on va se concentrer sur l'un qui se dit : l'électrolyseur PEM (protons exchange membrane) et qui a une composition intéressante et spécial aussi avec un fonctionnement conduit par un principe très précis [2].

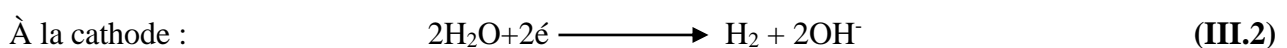
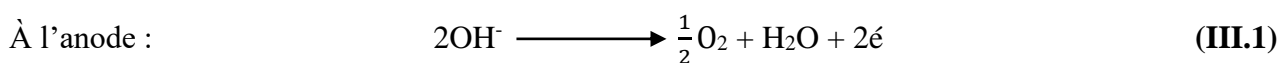
III.1 Définition d'électrolyseur :

Un électrolyseur est l'appareil inverse de la pile à combustible. Il décompose l'eau en hydrogène et oxygène lorsqu'il est électriquement alimenté [3]. Ce mode de production consiste à décomposer les composants de la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène par le passage d'un courant électrique entre deux électrodes immergées dans un électrolyte aqueux. L'hydrogène produit par ce procédé de production est plus pur que celui du reformage à la vapeur [4].

III.2 Les différentes technologies d'électrolyseurs d'eau :

III.2.1 Electrolyseurs alcalins :

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle. Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+). Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous [5] :



L'électrolyse est réalisée généralement à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration variable en fonction de la température de fonctionnement est:

- De 25 % en masse pour une température de 80 à 90°C
- De 30 à 35 % à 120°C
- De 40 % à 160°C

Ces concentrations correspondent à la conductivité électrique maximale de la solution à la température considérée. Le choix se porte de préférence sur des solutions de potasse au lieu de solutions de soude, car:

- Pour une température donnée, leur conductivité est supérieure à celle des solutions de soude
- Elles ont en général une teneur plus faible en impureté chlorure liée à la fabrication de l'hydroxyde
- Leur pression de vapeur saturante est inférieure pour une même température, ce qui permet de réduire le débit d'eau de réfrigération destinée à condenser la vapeur entraînée par l'hydrogène [6]

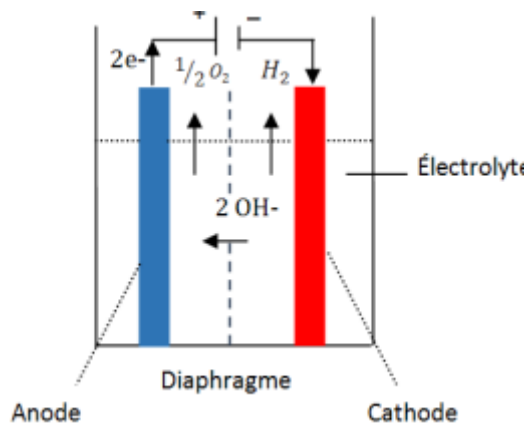
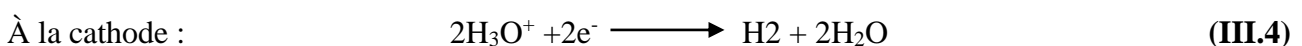
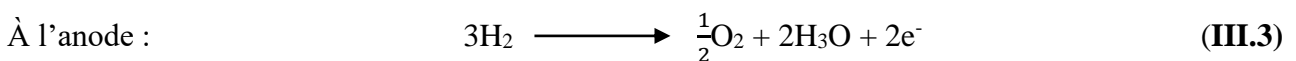


Figure (III. 29) : Principe de l'électrolyse alcaline.[20]

III.2.2 Electrolyseurs PEM :

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



III.2.3 Electrolyseurs à haute température :

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 super oxydes O_2 . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes [8], sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte :

- Electrolyte à conduction d'ions super oxydes :



- Electrolyte à conduction protonique :

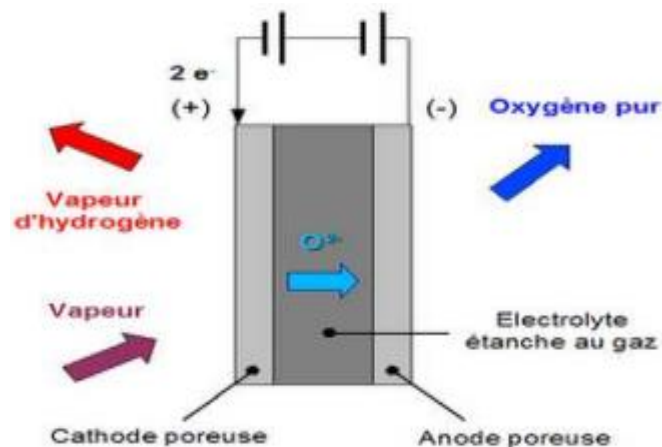


Figure (III.30) : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte[20]

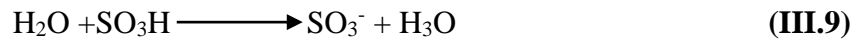
III.3 Principe de fonctionnement et éléments technologiques électrolyseur

PEM :

Le principe de l'électrolyseur PEM est décrit schématiquement par la figure (III.31). Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyseur PEM [5].

L'anode est constituée d'un composite graphite-PTFE collé à un treillis métallique en laiton, le collecteur de courant étant composé pour sa part de titane. Le catalyseur est constitué d'oxydes de métaux nobles à base de ruthénium (Ru) et d'iridium (Ir). La cathode est constituée de graphite

poreux avec un dépôt catalytique de platine ou d'oxyde métallique. Mais le coût du platine étant élevé, les recherches actuelles visent à remplacer ce catalyseur. L'électrolyte de l'électrolyseur PEM joue à la fois le rôle de conducteur protonique et de diaphragme. Il est constitué d'une membrane composée de fluor polymère solide comprenant des groupements acides sulfoniques (SO₃H). Ces groupes se transforment aisément en leur base conjuguée, selon la réaction suivante, sous l'action d'un champ électrique :



La membrane joue donc le rôle d'un conducteur protonique puisque la migration des ions H⁺ est assurée par la transformation des groupements sulfoniques en ions SO₃⁻. Elle nécessite d'être constamment humidifiée sous peine de voir sa conductivité diminuer. Actuellement, la membrane la plus utilisée est la membrane dite nafion (échangeur d'ions) commercialisée par Dupont de Nemours (société de science). De nombreuses recherches sont en cours afin de trouver un matériau de substitution au nafion en raison de son prix élevé [7].

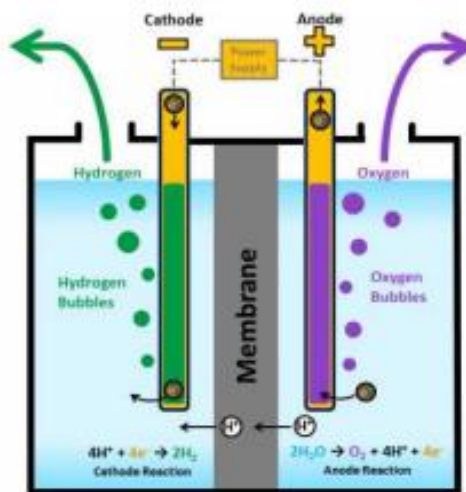


Figure (III.31) : Principe schématique de l'électrolyse PEM.[20]

III.4 Modélisation électrique de l'Electrolyseur de type PEM :

Le modèle électrique est le même que celui utilisé pour la pile à combustible. Les coefficients du modèle électrique que nous avons adopté sont avancés dans le tableau suivant : [9]

Paramètres	L'Electrolyseur		
J_d en $A.m^{-2}$	$J_{d1} = 0.868$	$J_{d2} = -1.762e^{-3}$	$J_{d3} = 4.9e^{-4}$
E_{oc} en V	$E1 = 0.7$	$E2 = 1.062 e^{-3}$	$E3 = -3.22e^{-4}$
b en V	$b1 = -1.0926$	$b2 = .616e^{-3}$	$b3 = .489e^{-3}$
Δ en $\Omega.m^2$	$\Delta1 = -2.8822$	$\Delta2 = -7.447e^{-3}$	$\Delta3 = 2.696e^{-4}$

Tableau (III.3): Paramètres de l'électrolyseur PEM

Dans l'électrolyseur et la pile à combustible, la même réaction électrochimique se déroule et le modèle électrique de ces composants est identique, mis à part quelques ajustements de paramètres. L'équation caractéristique est donnée ici : [10]

$$V_{cell} = E_{oc} + \frac{b}{\ln\left(\frac{J}{J_d * e^2}\right)} + \left(\frac{b}{4 * J_d} - \Delta\right) * J \quad (III.10)$$

Avec :

V : Potentiel d'une cellule (V).

J : Densité de courant (A/cm^2).

E_{oc} : Tension de circuit ouvert de la cellule (V), paramètre du modèle.

J_d, b, Δ Paramètres du modèle dépendant de la température et de la pression partielle en oxygène.

Cette équation prend en compte une partie des problèmes de diffusion qui existent pour de fortes densités de courant. Mais la zone où les problèmes de diffusion existent, n'est pas modélisée par ce modèle [11]. Les paramètres E_{oc} , b , d , J et Δ dépendent de la température T et de la pression partielle en oxygène P_{O2} . Chaque paramètre est dissocié en trois composantes selon l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} E_{oc} \\ J_d \\ b \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E1 & E2 & E3 \\ Jd1 & Jd2 & Jd3 \\ b1 & b2 & b3 \\ \Delta1 & \Delta2 & \Delta3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ T \\ T * \ln(P_{O2}) \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

J_d En $A.m^{-2}$, E_{0c} en V, b en V, Δ en $\Omega.m^2$, T en $^{\circ}k$, P_{O_2} en bar.

Le modèle d'électrolyseur dépend de deux paramètres importants (température, pression en O_2) qui influent directement sur le comportement de ce dernier.

III.5 Production de Gaz :

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène et l'oxygène. Certaines de ces techniques arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale [12]. Dans toute production d'hydrogène et l'oxygène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

- La matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau
- L'énergie nécessaire pour la production : énergie renouvelable (solaire).
- Le procédé de production : plusieurs procédés existent, telle que l'énergie électrique [13]

L'électrolyse de l'eau est un processus qui utilise un courant électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Cela se fait dans une cellule électrolytique contenant une solution d'eau avec un électrolyte. Lorsque le courant passe à travers la cellule, des réactions chimiques se produisent aux électrodes. À l'anode, l'oxydation de l'eau produit de l'oxygène, des ions hydrogène et des électrons. À la cathode, les ions hydrogène captent les électrons et forment de l'hydrogène. Ainsi, l'électrolyse de l'eau permet d'obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux, qui peuvent être utilisés à diverses fins. La réaction de décomposition s'écrit :

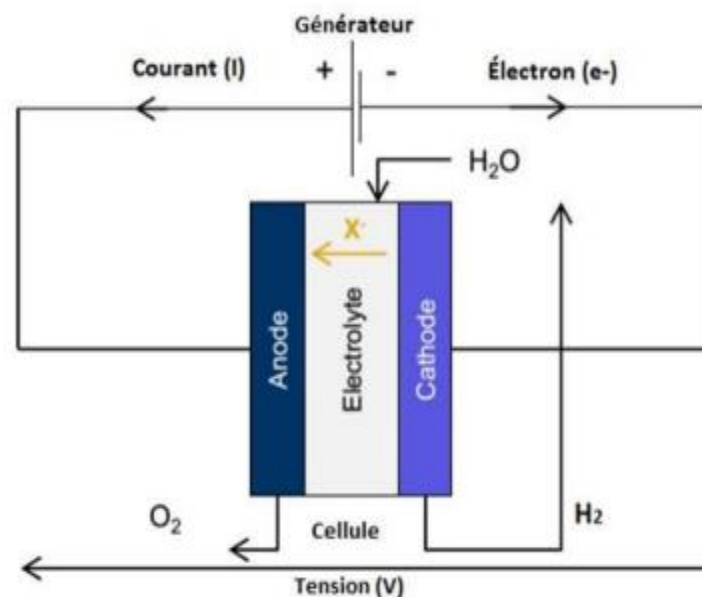
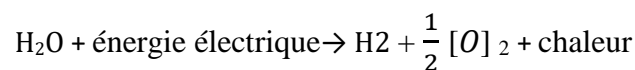


Figure (III.32) : Schéma de fonctionnement d'une cellule.[21]

La production de la quantité gazeuse de l'oxygène et l'hydrogène par l'électrolyseur est Directement proportionnelle à l'intensité du courant :

$$F_{\text{gaz}} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \frac{1}{\eta F} \quad \text{(III.12)}$$

Avec :

- F_{gaz} : Flux de gaz (mole/s).
- n_c : Nombre de cellules.
- I : intensité de courant de l'appareil (A).
- ηF : Rendement Faradique (%).
- n : Le nombre de moles d'électron échangés par mole d'eau
($n=2$ Pour l'hydrogène, $n= 4$ pour l'oxygène.)

Le Gaz concerné pour cette simulation est l'hydrogène H_2 avec les données suivantes :

- $n_c=16$
- $F = 96485$
- $n = 2$

Cette figure (III.33) montre le débit de gaz H_2 en fonction de l'intensité du courant, car cette intensité augmente à mesure que le débit de gaz augmente [14].

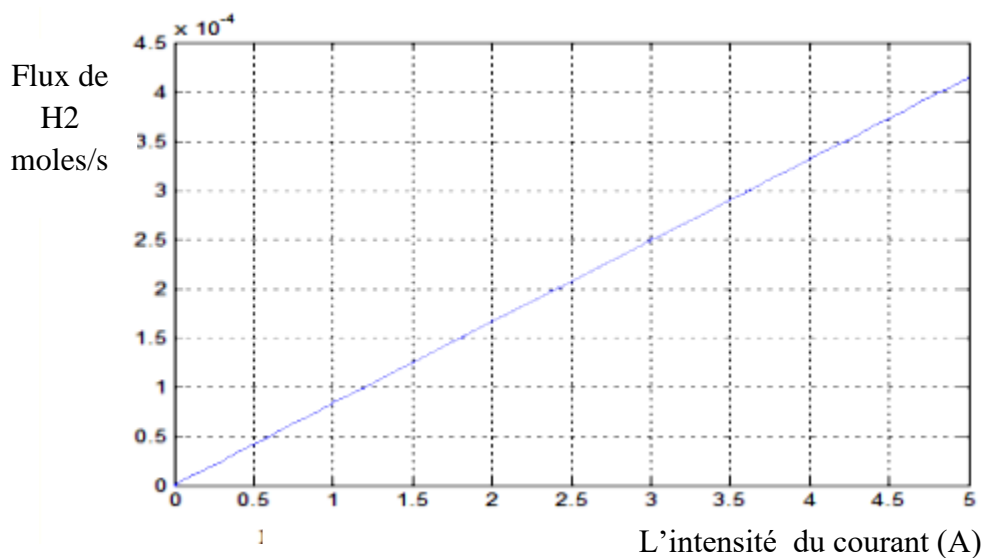


Figure (III. 33): Courbe de simulation de production du gaz H_2 d'un électrolyseur.

Il y a toujours une augmentation de la production de gaz CO₂ avec l'augmentation de l'intensité de la cotation comme le montre la figure (III.34). La variation est linéaire.

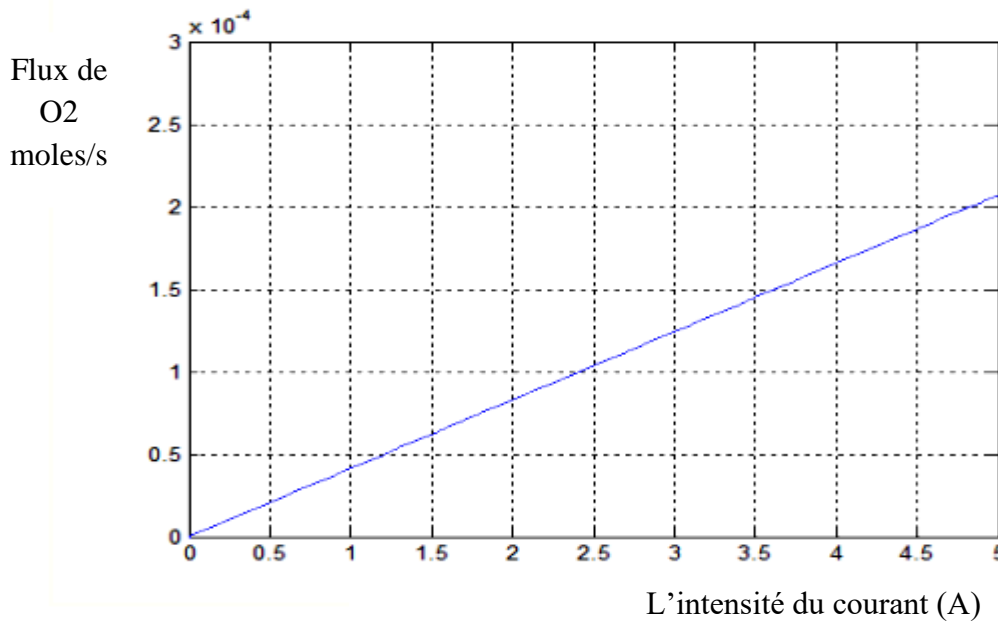


Figure (III.34): Courbe de simulation de production du gaz O₂ d'un électrolyseur.

III.6 L'influence de la température et la pression en oxygène sur l'électrolyseur :

Nous avons élaboré sous environnement Matlab les programmes pour étudier l'influence de la température et la pression en oxygène sur l'électrolyseur.

III.6.1 L'influence de la température :

Pour voir l'impact de la température sur le comportement électrique de l'électrolyseur, nous avons maintenu le paramètre pression de l'oxygène constante ($p_{O_2}=1.4$ bar), pour différentes températures $T=10^\circ\text{C}$, $T=25^\circ\text{C}$ et $T=50^\circ\text{C}$. Nous remarquons que la tension diminue lorsque la température augmente pour une densité de courant constante. Cette influence diminue pour les faibles intensités [15].

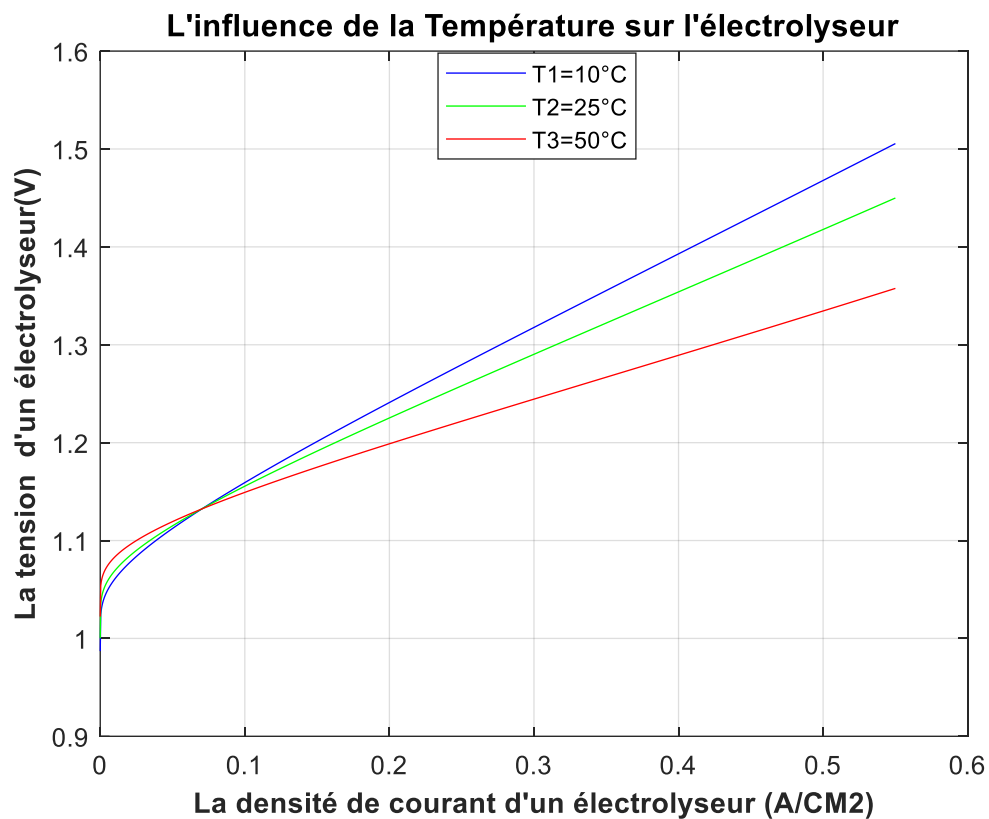


Figure (III.35): Courbes de simulation de V-J d'électrolyseur PEM (influence de la température)

A titre d'exemple :

$$A J = 0.3 \text{ A/cm}^2$$

$$V = 1.31 \text{ v} \rightarrow T = 10^\circ\text{C}$$

$$V = 1.29 \text{ v} \rightarrow T = 25^\circ\text{C}$$

$$V = 1.23 \text{ v} \rightarrow T = 50^\circ\text{C}$$

Pour voir l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(J)$ de l'Electrolyseur de type PEM, nous avons pris les mêmes conditions de l'exemple précédant, et nous avons remarqué que la densité de puissance P de l'électrolyseur augmente simultanément avec l'augmentation de la densité de courant J [16].

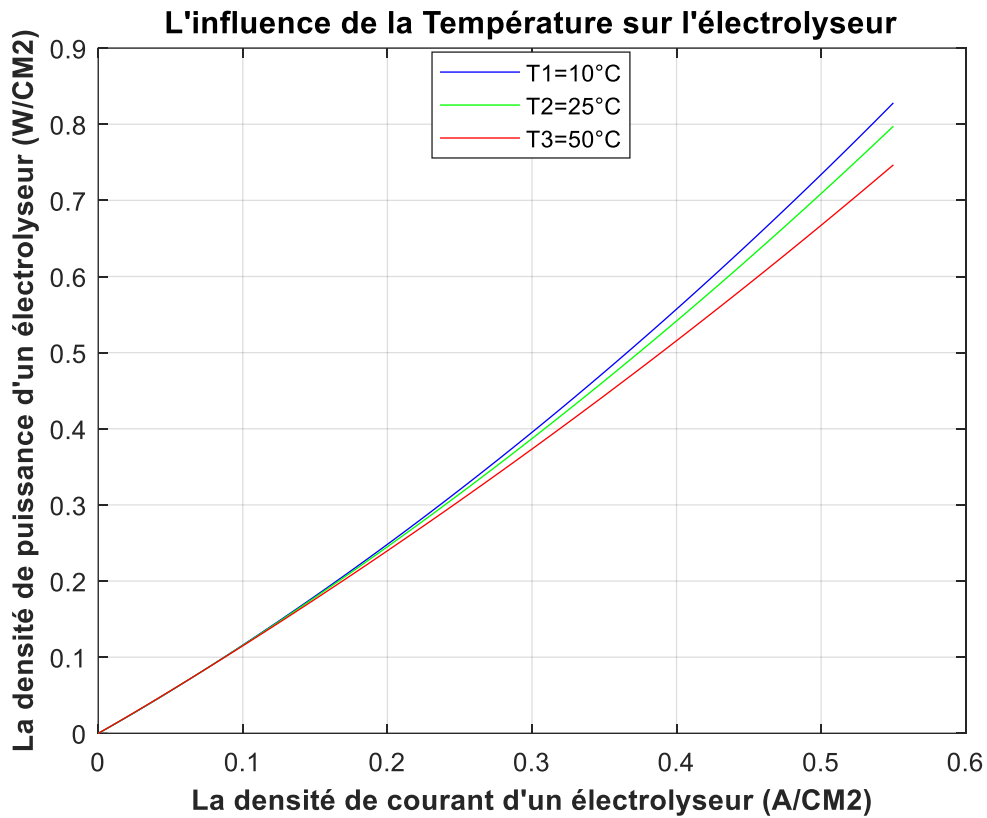


Figure (III.36): Courbes de simulation de P-J de l'électrolyseur de type PEM (influence de la température)

III.6.2 L'influence de la pression :

Nous nous intéressons maintenant à la caractéristique de densité de puissance à pression en oxygène variable. La Figure (III.37) montre la courbe de simulation de la tension en fonction de la densité de courant. Nous constatons que la tension augmente avec l'augmentation de densité de courant (relation croissante) pour une température fixe de 35°C et pour des valeurs de pressions de 0.9, 1.4, 1.9 bar

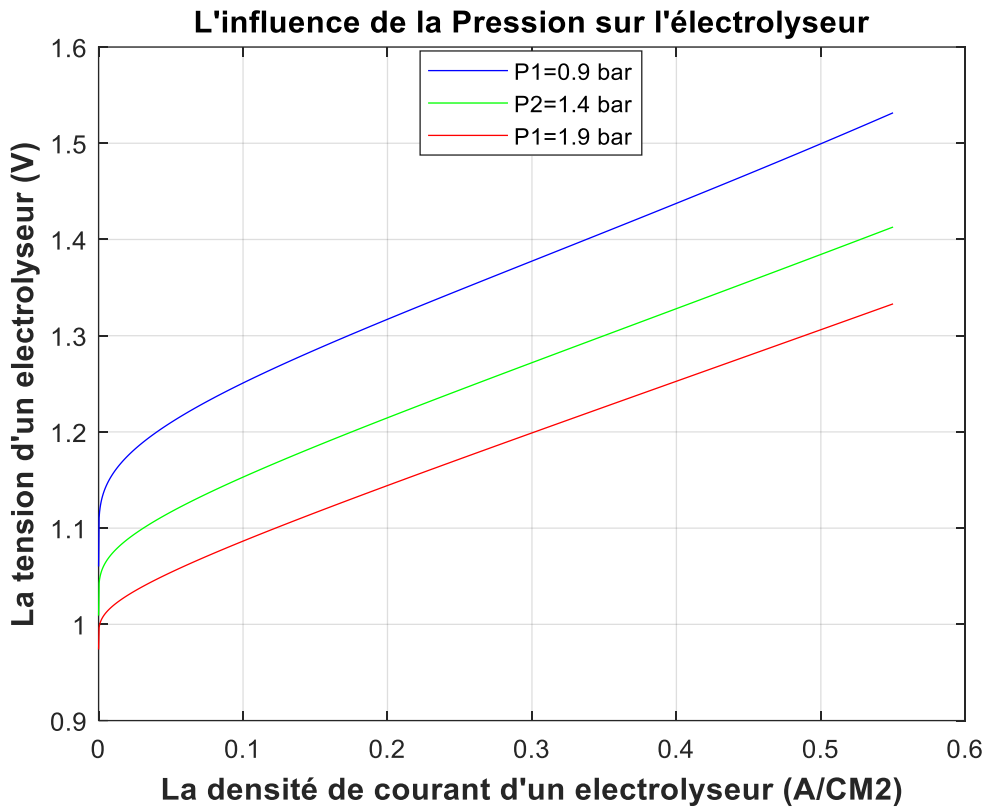


Figure (III.37): L'influence de la pression sur la caractéristique V-J de l'électrolyseur PEM

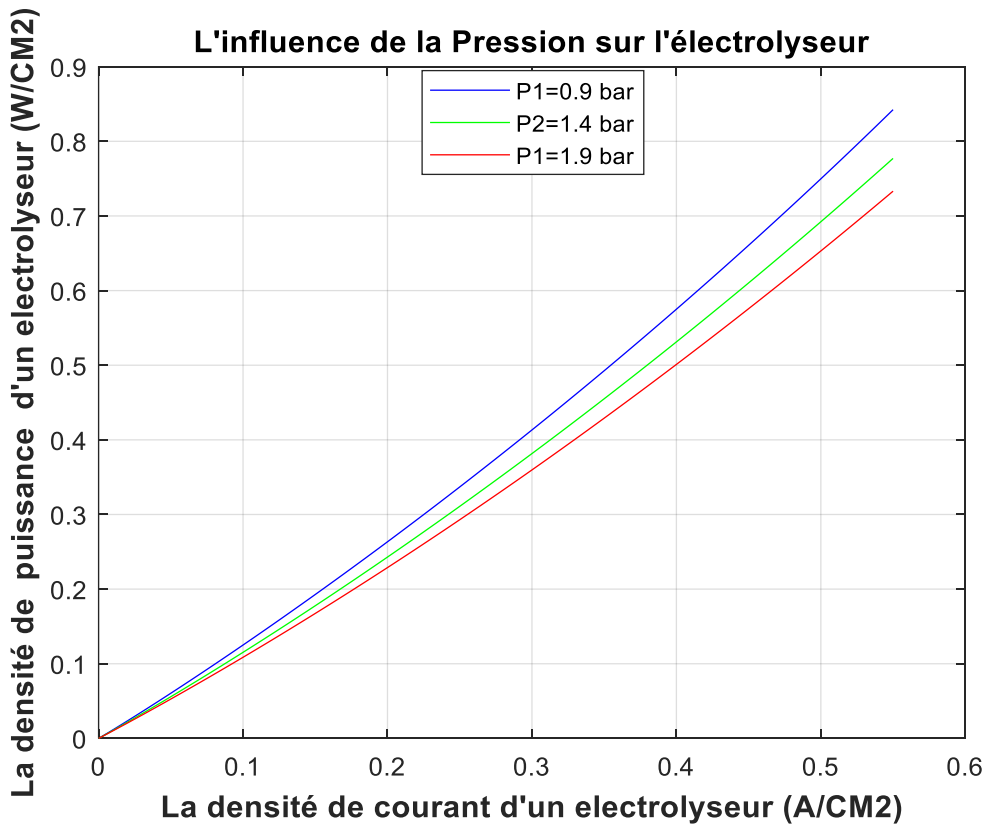


Figure (III 38): L'influence de la pression sur caractéristique P-J de l'électrolyseur PEM.

Nous avons obtenu la figure précédente pour les mêmes conditions de travaux (P_{O_2} et T °C) et nous avons observé que la densité de puissance a une faible diminution avec l'augmentation de la

pression partielle en oxygène pour une seule cellule d'Électrolyseur de type PEM. Une augmentation en pression n'augmente pas les performances de l'électrolyseur.

III.7 Avantages et inconvénients d'électrolyseur PEM :

III.7.1 Les avantages : [18]

- Rendement électrique élevé (8 – 9 %).
- Électrolyte solide (pas de pièces mobiles, pas de liquide corrosif).
- Compacité du système, Fortes densités de courant.
- Conception compacte (bipolaire).
- Grande production de gaz sous pression.
- Fonctionnement à haut pression.
- Réponse rapide aux variations de charge.
- Haute pureté des gaz produits.
- Durabilité.

III.7.2 Les inconvénients : [19]

- Le coût élevé des membranes polymères.
- Des catalyseurs en métal noble.
- Processus de fabrication compliqués et coûteux.
- Le coût élevé des catalyseurs.
- Stock inférieur au MW

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre en a vu d'une manière générale tous qui est en relation avec l'électrolyse de l'eau comme une procédure technologique de production d'hydrogène. Ce dernier qui reste un vecteur énergétique très importants et très qualifiants pour la production d'électricité, aussi on précise en détails l'électrolyseur PEM par définition et description et explication et aussi les facteurs qui influent sur le rendement (température et pression en oxygène) et nous avons conclu que :

-La tension et la densité de puissance d'électrolyseur ont une relation croissante avec la densité de courant pour des conditions de travail fixes.

-Nous remarquons que la tension et la puissance d'électrolyseur diminuent lorsque la température ou la pression partielle en oxygène augmente.

Chapitre IV :

La pile à combustible

IV Introduction :

La production d'électricité est essentiellement un secteur industriel, destiné à mettre à la disposition de l'ensemble des consommateurs la possibilité d'un approvisionnement adapté à leurs besoins en énergie électrique

Aujourd'hui, cette production se fait à partir de l'énergie fossile (gaz naturel et pétrole), mais Au cours de ces dernières années, un intérêt particulier a été accordé au développement des énergies renouvelables pour remplacer les énergies fossiles [1].

D'autre part, l'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant dans l'univers et l'un des vecteurs potentiels d'énergie à l'avenir pour le stockage de l'électricité [2], Il est particulièrement intéressant pour valoriser des énergies renouvelables ou pour limiter les impacts environnementaux liés aux émissions de carbone. Dans le contexte actuel de l'évolution du système énergétique, il est pertinent de s'appuyer sur des technologies avancées utilisant l'hydrogène, en particulier la pile à combustible (PAC) [3, 4,5] qui est considérée comme une nouvelle source de production d'énergie électrique par la réaction chimique de l'hydrogène et de l'oxygène

IV.1 Historique de la pile à combustible (PAC) :

L'histoire des piles à combustible a commencé en 1839, Sir William Robert Grove « connu comme le père de la pile à combustible », un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. Son principe la figure (IV.20) est l'inverse de l'électrolyse de l'eau en utilisant dans son expérience un tube en U avec deux électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte : l'hydrogène se combine avec de l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur.

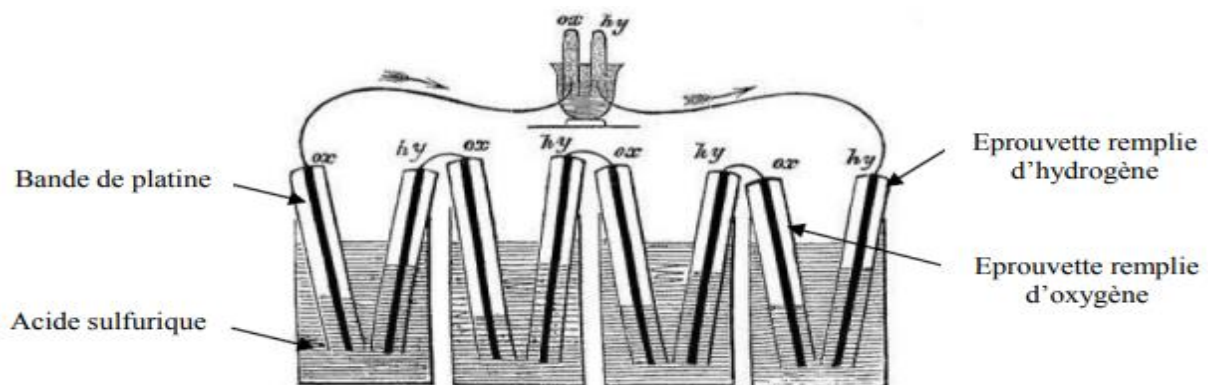


Figure (IV.39): L'expérience de Sir William Grove.[27]

La pile à combustible a connu une renaissance au début des années 60 lorsque un nouvel organisme gouvernemental des États-Unis (NASA) « National Aeronautique and Space Administration » rechercha comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux. La NASA avait

déjà éliminé les batteries car trop lourdes, l'énergie solaire car source trop chère et l'énergie nucléaire car trop risquée. En 1960, c'est avec la NASA qu'une pile à combustible a été utilisée pour la première fois dans un projet spatial appelé Gemini. Par la suite elle a été utilisée également dans le programme APOLLO « Le programme Apollo est le programme spatial de la NASA mené durant la période 1961-1975 qui a permis aux États-Unis d'envoyer pour la première fois des hommes sur la Lune »

Le très fort développement des recherches sur les piles à combustible dans les années 1970 résulte de la première crise pétrolière de 1973. Depuis, la recherche sur les piles à combustible a continué et ont été utilisées avec succès dans une grande variété d'application. A la suite du deuxième choc pétrolier de 1979, une étude sur l'évaluation des possibilités techniques et économiques du développement de la pile à combustible pour la traction fut menée en France. De très nombreuses incertitudes sur l'avenir des piles sont levées et cette étude a conclu à la non-poursuite des programmes de recherche.

En 1993 un bus à pile à combustible est réalisé par l'entreprise Ballard (aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la pile à combustible) en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz [6]. La pile à combustible était de type PEM (« Proton Exchange Membrane » ou « membrane échangeuse de proton »). L'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile était produit par le reformage embarqué de méthanol.

A partir de 2007, les constructeurs japonais commencent à réfléchir aux normes, règles et standards de fabrication des piles à combustible dans l'automobile pour réduire les émissions de CO₂ jusqu'à 50%. Les principaux constructeurs de pile à combustible sont : BALLARD, SIEMENS WESTINGHOUSE, SULZER, HTCeramix, AXANE et HELION.

IV.2 L'hydrogène :

L'hydrogène (H₂) est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies. Un atome d'hydrogène a seulement un proton et un électron. Cependant l'hydrogène comme gaz (H₂) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées. Combiné avec l'oxygène, c'est l'eau (H₂O). Combiné avec le carbone, il forme les composés organiques tels que le méthane (CH₄), le charbon ou le pétrole. La plupart de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui vient des carburants fossiles. Seulement 7% viennent des sources d'énergie renouvelable. Dans une optique de raréfaction des carburants fossiles, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur. Puisque le gaz d'hydrogène n'existe pas naturellement sur terre, il faut le produire. Il y a plusieurs manières de faire cela. Si l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau, l'électrolyseur étant alimenté à partir d'une source d'énergie

renouvelable (panneau solaire, éolienne ou turbine hydroélectrique), il n'y aura pas d'émissions de dioxyde de carbone. Le développement des piles à combustible conduira à différents modes de production liés aux méthodes locales de production énergétique. En raison de l'abondance de gaz naturel, de la disponibilité du méthanol et du propane, et du manque d'une infrastructure de production et de distribution de l'hydrogène, on prévoit que les carburants hydrocarbures seront les carburants dominants pour les applications stationnaires de piles à combustible. Tant que ces carburants sont disponibles à faible coût, le reformage hydrocarbure est la méthode la plus simple et la plus efficace pour produire de l'hydrogène [7].

IV.3 PAC et batterie :

Une PAC (pile à combustible) est un générateur qui convertit directement l'énergie d'un combustible (hydrogène pur ou hydrocarbure) en énergie électrique, par un procédé électrochimique. Le bilan de la réaction finale est la production d'électricité, d'eau et de chaleur. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible et en comburant. C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), ou remplacés (piles pour poste de radio). Une pile à combustible, tout comme une batterie, est constituée de deux électrodes et d'un électrolyte. Il existe cependant des différences notables par rapport aux batteries : la batterie est un dispositif de stockage d'énergie, l'énergie maximum utilisable est déterminée par la quantité de réactant chimique stocké dans la batterie elle-même. La batterie cesse donc de produire de l'électricité lorsque tout le réactant chimique est consommé. Dans une pile à combustible par contre, les électrodes ne sont pas consommées avec le temps et les produits ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile. Ainsi, tant que le combustible et le comburant sont fournis à la pile, l'électricité continue de circuler [8].

IV.4 Définition de la pile à combustible:

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique de conversion d'énergie qui permet de produire de l'électricité à partir d'une énergie chimique sans la présence d'aucun processus thermique ou mécanique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de bruits sonores, puisqu'il ne comporte pas de composantes mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. L'électricité est produite grâce à une réaction chimique de combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) avec comburant (oxygène de l'air). La réaction est du type électrochimique et génère de l'électricité et de la chaleur. L'électricité peut être utilisée pour alimenter différents dispositifs ou stocker et la chaleur peut être récupérée sans être gaspillée (chauffage...) [9]

IV.5 Structure générale de PAC :

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules, chaque cellule est constituée de deux électrodes (anode et cathode) poreuses séparées par un électrolyte. De chaque côté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires. La figure (II.40) montre la structure générale d'une cellule d'une pile à combustible.

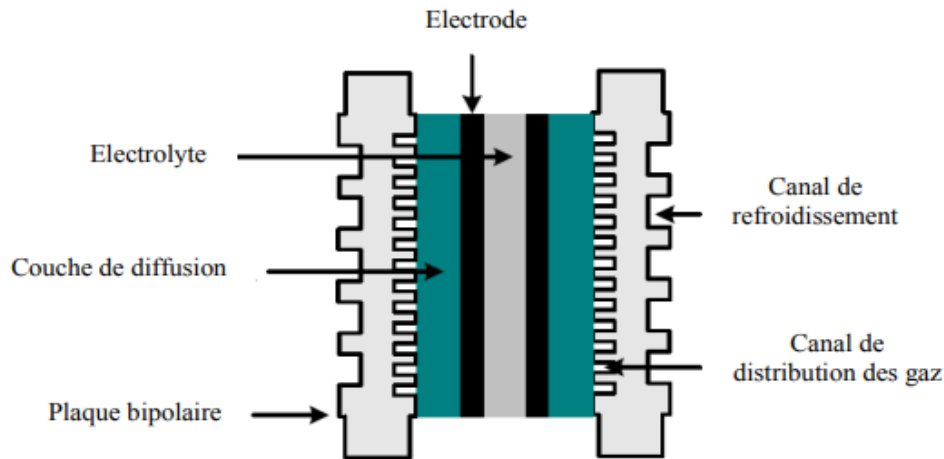


Figure (IV.40) : Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible[27]

IV.5.1 Les électrodes (anode et cathode) :

Les électrodes sont le siège des réactions électrochimiques : une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces réactions dépendent de plus de l'état de surface des électrodes et de la facilité avec laquelle les réactions se réalisent [10]. Elles créent ainsi une zone de triple contact au niveau du site réactionnel. Les électrodes ont une triple fonction [11] :

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux protons de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène, vers les sites de réduction de l'oxygène.
- Évacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et les redistribuer sur les sites catalytiques cathodiques.

Afin de favoriser la création de la zone du triple contact, les électrodes doivent présenter les caractéristiques suivantes [12] :

- Être poreuses pour permettre la diffusion des gaz jusqu'aux sites des réactions. Elles sont généralement en feutre de carbone ou en papier carbone.
- Être imprégnées d'une pâte constituée de catalyseur contenant du carbone platiné sur la face en contact avec l'électrolyte. La partie de l'électrode imprégnée de pâte constitue la zone active et la partie non imprégnée constitue la zone de jonction.

- Avoir un caractère hydrophobe pour faciliter l'évacuation de l'eau. Un matériau de type PTFE (Téflon) est généralement ajouté. L'évacuation de l'eau est primordiale pour une pile à combustible afin d'éviter le noyage qui représente une source de dysfonctionnement.
- Être de bons conducteurs électroniques pour assurer la collecte des électrons et leur conduction vers les plaques bipolaires.
- Être flexibles pour augmenter la surface de contact avec l'électrolyte.

IV.5.2 L'électrolyte :

L'électrolyte (cœur de la cellule) permet que les ions (et pas les électrons) transitent de l'anode vers la cathode. Il varie en fonction du type de pile

L'électrolyte est un élément clé de la pile à combustible. Celle-ci doit assurer plusieurs fonctions : isoler électriquement les deux électrodes, séparer efficacement les gaz afin d'éviter le contact direct du combustible et du gaz oxydant, etc.

La conductivité de l'électrolyte dépend essentiellement de sa température de fonctionnement et de son taux d'hydratation. Ce dernier point peut particulièrement complexifier la fabrication de l'électrolyte qui résulte d'un compromis entre ces divers paramètres : les caractéristiques mécaniques, la conductivité ionique, la permutation des gaz, la stabilité face aux réactifs chimiques, les caractéristiques d'hydratation et le coût de fabrication. Il doit présenter aussi de bonnes propriétés de résistances mécanique et chimique face aux contraintes thermiques de pression et d'hydratation [12]. Le matériau utilisé varie en fonction du type de pile.

IV.5.3 Les plaques bipolaires :

La plaque bipolaire est la frontière entre deux cellules élémentaires de pile à combustible, ainsi nommées car elles constituent le pôle positif d'une cellule et le pôle négatif de la suivante. Ces plaques remplissent plusieurs fonctions :

- La liaison électrique entre les deux plaques mono polaires et le circuit externe.
- La collecte des électrons libérés au niveau des électrodes afin d'assurer la conduction du courant électrique.
- L'évacuation des produits et des réactifs non consommés.
- La tenue mécanique de la cellule.
- La séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- La collection du courant.

Les plaques doivent avoir un bon niveau de conductivité, une bonne inertie chimique notamment par rapport à l'eau et aux acides ainsi qu'une perméabilité très faible à l'hydrogène.

Elles doivent également être très résistantes à la corrosion et être légères afin que les empilements nécessaires pour réaliser une pile à combustible ne soient pas trop lourds.

Les plaques de refroidissement placées entre les cellules ou les groupe de cellules sont de conception similaire, les canaux de refroidissement étant conçus pour maximiser les échanges thermiques. Les plaques bipolaires de refroidissement comportent les entrées et sorties de fluides et assurent la liaison avec les plaques voisines. Des joints entre les plaques s'assurent que les flux de carburant, d'oxydant et de liquide de refroidissement ne se mélangent pas

IV.5.4 Les couches de diffusion :

Les couches de diffusion ont pour rôle :

- D'assurer une bonne distribution des gaz sur toute la surface de réaction (couche de réaction), qui est la surface active de l'électrode.
- D'effectuer la conduction électrique entre la couche active et les plaques bipolaires.
- D'évacuer l'eau produite du côté cathode afin d'éviter une accumulation d'eau liquide qui augmente la résistance au transport des gaz et limite ainsi leur diffusion

Les composants des couches de diffusion doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à la présence d'eau, ils doivent garantir une alimentation uniforme en gaz afin d'éviter les points chauds (dus au caractère isotherme de la réaction électrochimique) qui peuvent provoquer des fissures dans l'électrode et doivent avoir aussi une bonne inertie chimique du fait qu'ils sont dans un milieu très corrosif.

IV.6 Principe de fonctionnement de PAC :

On peut dire que le fonctionnement de toutes les piles à combustible, quel que soit leur technologie (alcaline, carbonate fondu, polymère, céramique, etc.), repose sur le même principe, à savoir qu'elles sont alimentées en Hydrogène et en Oxygène qui en se combinant dans le cœur de la pile donne lieu à des dégagements de chaleur, d'eau et d'électricité [13].

Le principe de base de fonctionnement de la pile à combustible repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau. Les combustibles utilisés sont l'hydrogène pur ou les hydrocarbures. Pour pouvoir utiliser des combustibles de type méthane ou autres alcools, il faudrait des températures de fonctionnement élevées. Pour cette raison, on privilégie l'emploi de l'hydrogène pur pour les piles à combustible fonctionnant à basse température.

Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode qu'on nomme cellule [14]

Les deux électrodes, séparées par un milieu conducteur ionique appelé électrolyte.

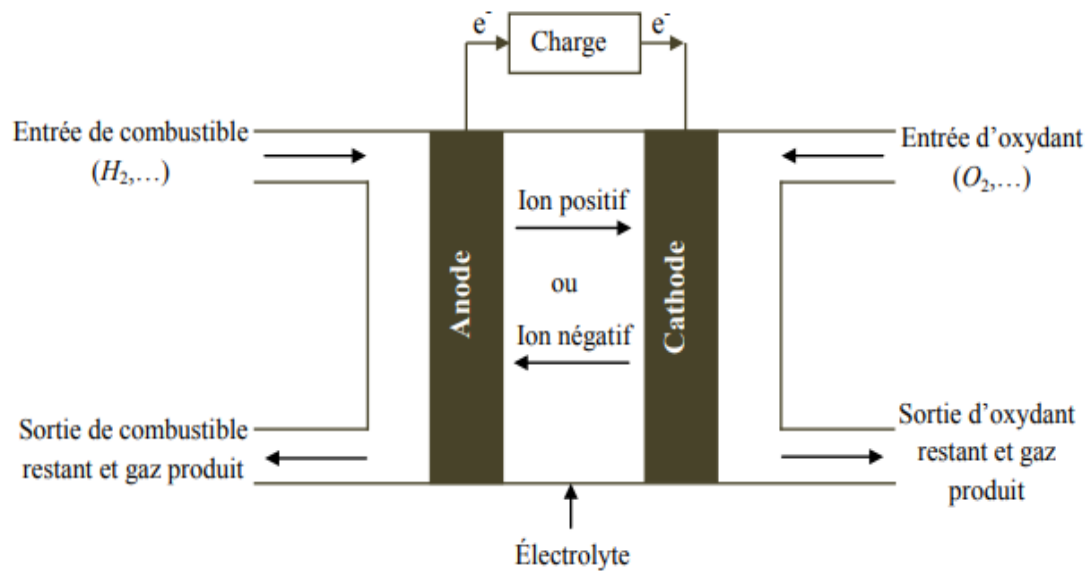


Figure (IV.41) : Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible.[27]

Les piles à combustible peuvent fonctionner en utilisant une variété de combustibles et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le combustible le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres combustibles, 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.

Dans une pile hydrogène-oxygène, le principe de base de fonctionnement repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau, l'hydrogène se combine avec l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'une réaction chimique de type redox « réduction oxydation », mais malheureusement le mélange direct de l'hydrogène avec l'oxygène ne génère que la vapeur de l'eau, pour cela on adopte sur la séparation de la demi réaction d'oxydation de l'hydrogène de celle de réduction de l'oxygène.

L'hydrogène entre dans chaque cellule de la pile du côté de l'anode et l'oxygène du côté de la cathode. La structure de la cellule assure une arrivée des combustible et comburant de manière homogène sur tout la surface des électrodes à raison de la présence des canaux de distribution.

Ce qui nous intéresse, sont les électrons libres qui apparaissent au niveau de l'anode comme résultat d'oxydation. Ces électrons doivent être transportés de l'anode vers la cathode pour participer dans la réduction de l'oxygène. Mais l'électrolyte n'est pas un chemin, car plus qu'il est imperméable au gaz, il ne laisse passer que les ions. Pour cela, les électrons sont conduits de l'anode à la cathode par un circuit extérieur à travers une charge électrique [15].

IV.7 Les différents types de piles à combustible :

Les différents types de PAC sont généralement répertoriés et classés en fonction soit de la nature de l'électrolyte utilisé dans les empilements, soit de la température de fonctionnement.

Les principaux types de piles à combustible utilisés ou étudiés actuellement sont :

- Les piles alcalines (AFC, Alkaline Fuel Cell).
- Les piles à carbonate fondu (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell).
- Les piles à électrolyte solide (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell).
- Les piles à acide phosphorique (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell).
- Les piles à méthanol direct (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell)
- Les piles à membrane polymère échangeuse de protons (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

IV.7.1 La pile alcaline (AFC) :

Cette pile est la plus anciennement développée, elle a été utilisée pour les programmes spatiaux de la NASA. L'électrolyte utilisé est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) sous forme liquide. Ces piles nous imposent à utiliser comme combustible le H₂ pur et le O₂ pur comme oxydant, car le CO₂ contenu dans l'aire ou issu de reformage, réagit avec le OH⁻ pour former le carbonate (CO⁻²₃). Ce phénomène réduit la conductivité ionique de l'électrolyte et bouche les pores à cause de la formation de carbonate de potassium (K₂CO₃) insoluble. La conséquence est une réduction importante du rendement de la pile à combustible

La pile à combustible alcaline fonctionne à des températures de 80 °C à 150 °C pour les applications terrestres et de 200 °C à 250 °C pour les applications spatiales. Dans le premier cas, la pile travaille à la pression atmosphérique tandis que dans le second cas, la pression est de l'ordre de 0,5 MPa. La tension par élément est comprise entre 0,7 V et 1 V. Le rendement peut atteindre 60 %.

[16]

IV.7.2 La pile à carbonate fondu (MCFC) :

L'électrolyte des piles à combustible à carbonate fondu est un mélange eutectique de carbonates de lithium et de potassium. La cathode est constituée d'oxyde de nickel lithié et l'anode est faite d'alliage nickel-chrome. Le nickel joue au même temps le rôle de catalyseur.

La température de fonctionnement élevée (entre 600 et 800 °C) évite l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs, donc moins coûteux, avec une pression comprise entre 0,1 MPa et 1 MPa. La tension par élément va de 0,75 V à 0,90 V. Le rendement est de l'ordre de 55 % [17].

IV.7.3 La pile à oxyde solide (SOFC) :

Ce type des piles à combustible génère la plus haute température comparativement aux autres types, de 900 à 1100 °C, cette température élevée ; augmente la conductivité ionique de l'électrolyte qui est en céramique, le plus souvent, il s'agit de l'oxyde de zirconium ZrO_2 , dopée à l'oxyde d'yttrium Y_2O_3 , et aussi permet l'utilisation directe comme combustible des hydrocarbures. Ces derniers, seront facilement reformés pour produire essentiellement de l'hydrogène et le monoxyde de carbone

IV.7.4 La pile à acide phosphorique (PAFC) :

Les piles à combustible à acide phosphorique PAFC ont un électrolyte liquide (acide phosphorique). Elles sont adaptées pour les moyennes et grandes puissances en cogénération électricité et chaleur dans des systèmes stationnaires et nécessitent de l'hydrogène comme combustible, généralement produit par reformage d'hydrocarbures tels que le gaz naturel. Les électrodes sont des couches minces de graphite avec un liant en PTFE. Le catalyseur des deux électrodes est du platine ou un mélange de platine et de nickel.

La pile à acide phosphorique fonctionne à des températures de 150 °C à 220 °C. La pression peut aller de 0,1 MPa à 0,8 MPa. La tension par élément est comprise entre 0,5 V et 0,8 V. Le rendement peut atteindre 50 %.

IV.7.5 La pile à méthanol direct (DMFC) :

Les piles à méthanol direct ont la même construction que les piles à membrane échangeuse de protons, mais l'utilisation du méthanol comme combustible crée la différence, le combustible est du méthanol liquide qui réagit directement à l'anode. Les électrodes sont formées de fines particules de carbone. Le catalyseur est du platine-ruthénium pour l'anode et du platine pour la cathode. L'état liquide du méthanol facilite son transport et son stockage. Mais il est nocif pour l'être humain lors du contact direct avec la peau. La température de fonctionnement est de l'ordre de 60 à 90°C.

IV.7.6 La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) :

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisées dans la majorité des prototypes construits [17]. Sa température de fonctionnement avec des conditions optimales est autour de 80 °C. Le combustible le plus utilisé est l'hydrogène, sous une forme très pure, nécessitant un reformage externe très poussé des carburants classiques (gaz naturel,

méthanol...). Les réactions d'oxydation et de réduction dans les deux demis cellules sont les mêmes que dans la pile PAFC. L'électrolyte est une membrane polymère qui laisse passer les hydrons, mais reste imperméable aux gaz. Le matériau le plus utilisé est le Nafion, marque commerciale de la société Dupont, mais d'autres polymères sont commercialisés. Les électrodes poreuses sont constituées de papier en fibres de carbone. Le catalyseur est du platine pour la cathode et un mélange de platine et de ruthénium pour l'anode [16].

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des caractéristiques principales des différents types des piles à combustible citées précédemment :

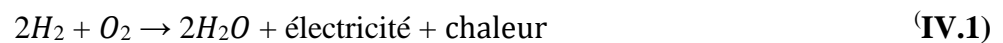
	AFC	PAFC	PEMFC	DMFC	MCFC	SOFC
	Basse température				Haute température	
Température (°C)	80 à 250	150 à 220	70 à 100	60 à 90	600 à 800	600 à 1100
Electrolyte	Potasse (KOH) liquide	Acide phosphorique (PO ₄ H ₃) liquide	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Mélange de Li ₃ CO ₃ et K ₂ CO ₃ liquide	Céramique solide
Combustible possible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂	Méthanol (CH ₃ OH)	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Platine	Nickel et l'oxyde de nickel	Nickel-zircone (Cermet)
Oxydant	O ₂ (pur)	Air/O ₂	Air/O ₂	Air/O ₂	Air/O ₂	Air/O ₂
Ion mobile	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Rendement	55-60%	35-50% +75% avec cogénération	35-45%	20-30%	50-60%	50-55% +70% en cogénération
Gamme de Puissance (kW)	1-100	50-1000	10 ⁻³ -1000	10 ⁻³ -1000	100-10 ⁵	5-10 ⁵
applications	Spatial Militaire Equipement portable	Transport, Equipements portable	Cogénération, Téléphone portable, Sous-marin, Automobile, Spatiale	Applications portables	Cogénération, production centralisée d'électricité	Cogénération, production centralisée d'électricité, automobile, maritime

Tableau (IV.4) : Comparaison des différents types des piles à combustible

IV.8 Principe de fonctionnement de la PEMFC :

Le principe de base de fonctionnement de la pile à combustible repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau. Les combustibles utilisés sont l'hydrogène pur et le dioxygène (ou de l'air) sert de comburant pour produire de l'électricité selon les deux réactions d'oxydoréduction. Pour pouvoir utiliser des combustibles de type méthane ou autres alcools, il faudrait des températures de fonctionnement élevées. Pour cette raison, on privilégie l'emploi de l'hydrogène pur pour les piles à combustible fonctionnant à basse température,

Une relation chimique décrit son principe. 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 suivant [18] :



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 :



Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant:

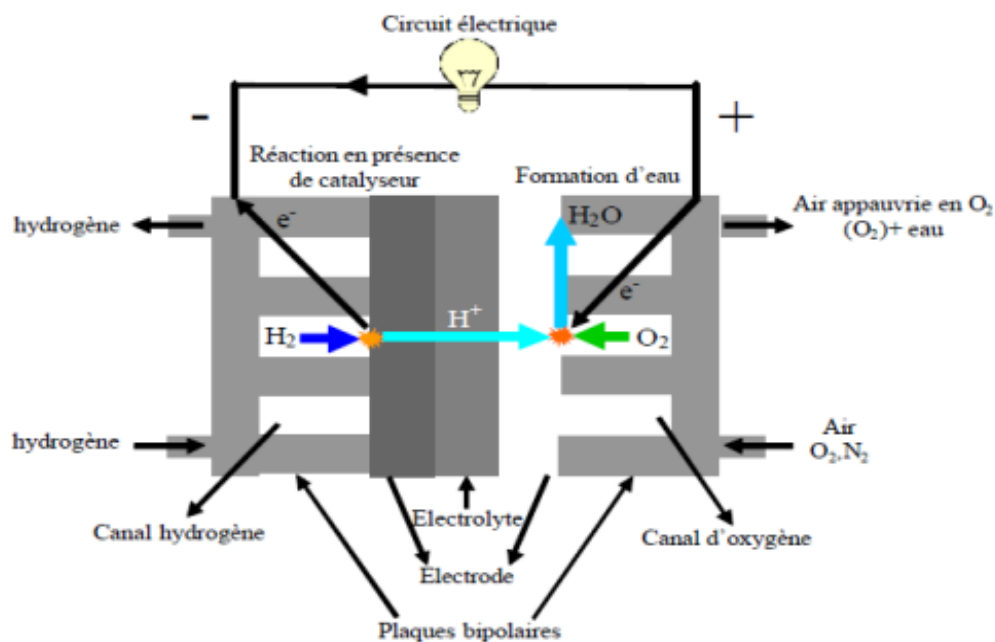


Figure (IV. 42) : schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC.[19]

Les réactions électrochimiques (d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode) se produisent à l'interface électrolyte électrode ou se situent une couche de diffusion des gaz et une couche d'activation contenant le catalyseur (souvent du platine) nécessaire à l'activation de la réaction en des points appelés « points triples »

En ces points, nous trouvons, 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 [19]

Cette réaction est exothermique: à 25°C, l'enthalpie libre de la réaction est de -237 kJ/mol ou - 229 kJ/mol selon que l'eau formée est liquide ou gazeuse

La quantité maximum d'énergie électrique produite dans une cellule PEM correspond à l'énergie libre de Gibbs, ΔG , de la réaction ci-dessus, liée à l'enthalpie de cette même réaction par :

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (\text{IV.4})$$

Le courant de sortie est le produit de la charge électrique nF échangée par mole de réactif hydrogène par son débit molaire :

$$I = n.F.dh_2 \quad (\text{IV.5})$$

Dans une conversion idéale sans pertes et sans stockage, la conservation de l'énergie implique la continuité de la puissance :

$$EI = dH_2.\Delta G \quad (\text{IV.6})$$

Il résulte de ces équations :

$$E = \frac{\Delta G}{nF} \quad (\text{IV.7})$$

Comme le nombre d'électrons impliqués dans la réaction vaut $n=2$, et F est la constante du Faraday (96485 coulombs/électron-mole) sont connus, le potentiel théorique à vide à l'équilibre

thermodynamique à 1 bar de pression et à 25°C, en conditions standards (eau est formée à l'état liquide) est donné par :

$$E_{\text{rev}}^{\circ} = -\frac{\Delta G^{\circ}}{nF} = \frac{237.340\text{J/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ As/mol}} = 1.23\text{V}$$

$E_{\text{rev}}^{\circ} = 1.18\text{V}$ Lorsque l'eau est formée à l'état gazeux.

La pile PEMFC présente une bonne compacité, indispensable, comme convertisseur électrochimique pour alimenter les véhicules du futur, dans le domaine stationnaire et portable [20].

IV.9 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM : [21]

IV.9.1 Avantages :

- Un rendement de conversion important : grâce à la conversion de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées
- Un générateur propre : les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs (CO₂, NO_x) au niveau du cœur de pile.
- Un système modulable : les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustibles peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.
- Un système relativement silencieux ; comme elle ne comporte pas la partie mobile au niveau du cœur, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores importantes. De ce fait, les piles à combustible peuvent être placées à proximité de quartiers résidentiels.

IV.9.2 Inconvénients :

- Un fonctionnement à basse température imposé par la membrane actuellement utilisées. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur du platine et d'autre part d'alimenter le cœur de pile par de l'hydrogène par ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant.
- Une technologie qui est encore au stade artisanal ce qui induit des coûts de fabrications élevées. Bien que la structure du cœur de pile soit assez simple.
- Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

IV.10 Caractéristiques tension-densité de courant de la pile à combustible (PEMFC) :

Pour caractériser le fonctionnement des piles à combustibles, des modèles assez complexes sont utilisés. On se limite, dans ce travail, à une approche plus simple où les différents phénomènes sont étudiés vus des bornes de la pile indépendamment les uns des autres. Lorsqu'un courant circule dans le circuit extérieur, le potentiel de la pile est plus faible que le potentiel théorique. Ceci est dû à différentes chutes de tension figure (IV.43) : [22]

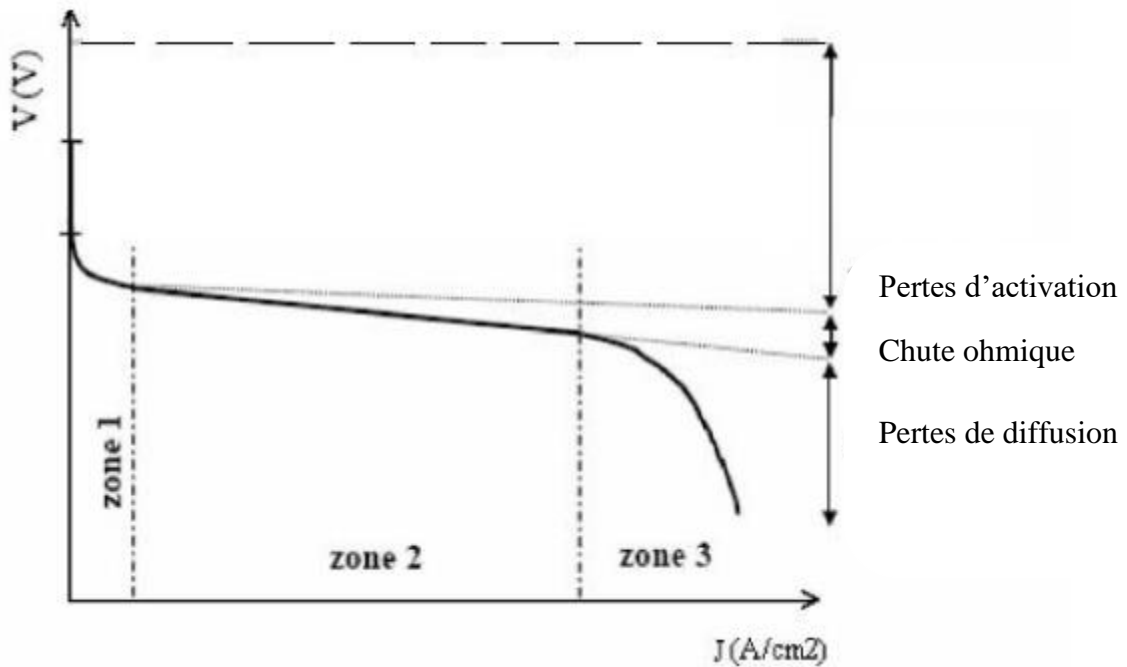


Figure (IV.43) : Caractéristiques courant-tension de la PEMFC

Ces chutes se résument à la :

Polarisation d'activation (zone 1) :

La polarisation d'activation est provoquée par une réaction d'électrode lente, nécessitant une énergie d'activation pour se produire. Les réactifs doivent franchir une barrière d'activation.

Polarisation ohmique (zone 2) :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant l'électrolyte et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes. Cependant, les pertes apparaissant au niveau de l'électrolyte sont les plus importantes et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique.

Polarisation de concentration (zone 3) :

Lorsque la demande en courant augmente. Ceci conduit à un effondrement rapide de la tension aux bornes de la pile. Plusieurs facteurs contribuent à la polarisation de concentration. Dans une pile PEM alimentée en air, la concentration de l'oxygène va diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'arrivée d'air, entraînant ainsi une diminution de la pression partielle d'oxygène. De la même manière, la pression d'hydrogène va diminuer. Ces chutes de tension dues à la concentration peuvent être très importantes en particulier lorsque l'hydrogène est produit par un reformeur et que celui-ci n'arrive pas à suivre un accroissement de la demande en courant.

IV.11 Modélisation électrique de la PAC de type PEMFC :

La simulation du comportement des composantes électrochimiques nécessite plusieurs modèles. Le modèle électrique requis pour le cahier de charge permet de calculer le point de fonctionnement en fonction de la température et de la pression en O₂. Dans l'électrolyseur (convertisseur « inverse » de la PAC) et la pile à combustible, la même réaction électrochimique se déroule et le modèle électrique de ces composants est identique, mis à part quelque ajustement de paramètres [23].

Il existe plusieurs modèles pour simuler et traduire les phénomènes de la PEMFC ainsi que son comportement. Pour notre présent travail, le modèle sélectionné est basé sur le modèle électrique empirique, non divergent en J₀ = 0, développé par N. ALBRIEUX. L'équation caractéristique est :

$$V = E_{0c} + \frac{b}{\ln\left(\frac{J}{J_d * e^2}\right)} + \left(\frac{b}{4 * J_d} - \Delta\right) * J \quad (\text{IV.8})$$

Avec :

V : Potentiel d'une cellule (V).

J : Densité de courant (A/cm²).

E_{0c} : Tension de circuit ouvert de la cellule (V), paramètre du modèle.

J_d, b, Δ Paramètres du modèle dépendant de la température et de la pression partielle en oxygène.

Les paramètres E_{0c}, b, J_d et Δ dépendent de la température T et de la pression partielle en oxygène P_{O2}. Chaque paramètre est dissocié en trois composantes selon l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} E_{0c} \\ J_d \\ b \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E1 & E2 & E3 \\ Jd1 & Jd2 & Jd3 \\ b1 & b2 & b3 \\ \Delta1 & \Delta2 & \Delta3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ T \\ T * \ln(P_{O2}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

J_d En A.m⁻², E_{0c} en V, b en V, Δ en Ω.m², T en °k, P_{O2} en bar.

Les valeurs utilisés pour notre cas est [24]:

Paramètres	PEMFC		
J_d en $A.m^{-2}$	$J_{d1} = 0.868$	$J_{d2} = -1.762e^{-3}$	$J_{d3} = -4.9e^{-4}$
E_{0c} en V	$E1 = 0.7$	$E2 = 1.062e^{-3}$	$E3 = -3.22e^{-4}$
b en V	$b1 = 1.0926$	$b2 = -1.616e^{-3}$	$b3 = -1.489e^{-3}$
Δ en $\Omega.m^2$	$\Delta1 = -2.8822$	$\Delta2 = -7.447e^{-3}$	$\Delta3 = -2.696e^{-4}$

Tableau (IV.5) : Paramètres de la pile à combustible PEM.

IV.12 Caractéristiques tension- densité de courant et densité de puissance - densité de courant :

D'après la modélisation de la PAC de type (PEMFC), deux paramètres importants "température, pression en oxygène" influent directement sur le comportement de cette dernière.

Nous avons élaboré sous environnement Matlab les programmes pour étudier l'influence de la température et la pression sur la pile (PEMFC).

IV.12.1 Impact de la température :

Pour dégager l'impact de la température sur la caractéristique de la PEMFC, nous avons maintenu la pression P02 constante à 1.4 Bar selon la figure (IV.44) Pour différentes températures, nous traçons les caractéristiques tensions, densité de courant ($V=f(J)$).

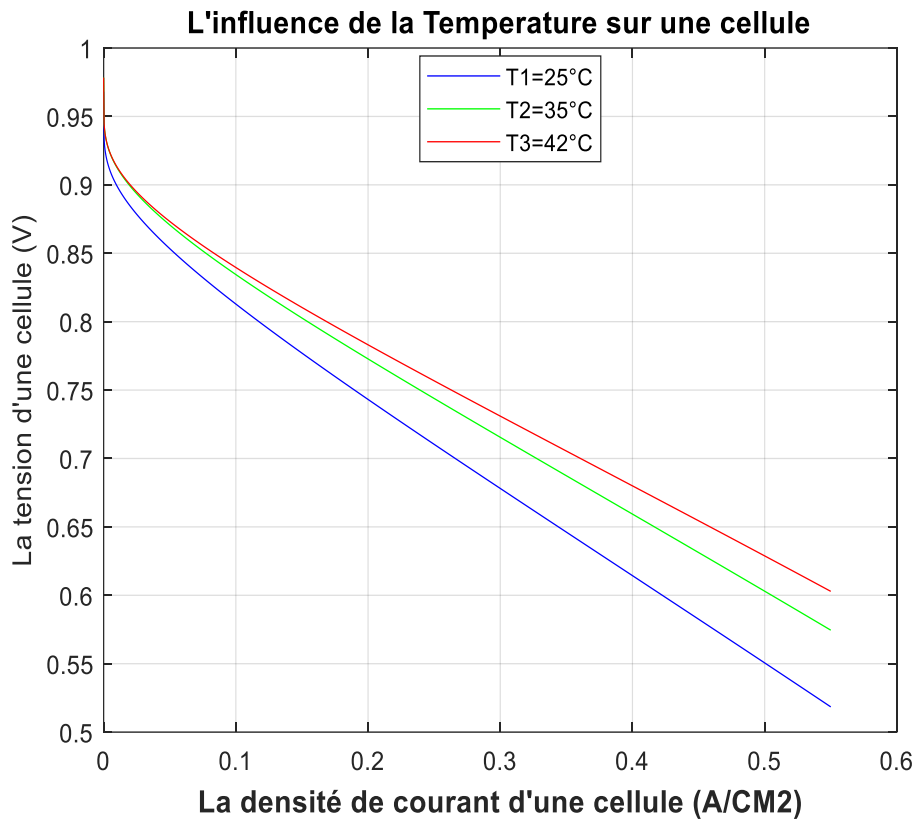


Figure (IV.44) : Résultat obtenu de la simulation de la caractéristique $V = f(J)$ sous l'influence de la température.

Nous remarquons que la tension a une relation décroissante avec la diminution de la température.

A titre d'exemple :

Pour $J = 0.4 \text{ A/cm}^2$

$V = 0.61 \text{ V} \rightarrow T = 25^\circ\text{C}$

$V = 0.66 \text{ V} \rightarrow T = 35^\circ\text{C}$

$V = 0.67 \text{ V} \rightarrow T = 42^\circ\text{C}$

Pour $J = 0.22 \text{ A/cm}^2$

$V = 0.74 \text{ V} \rightarrow T = 25^\circ\text{C}$

$V = 0.77 \text{ V} \rightarrow T = 35^\circ\text{C}$

$V = 0.78 \text{ V} \rightarrow T = 42^\circ\text{C}$

Nous allons étudier l'influence de la température sur la caractéristique puissance- densité de courant (P-J). La pression est constante et égale à 1.4 bar.

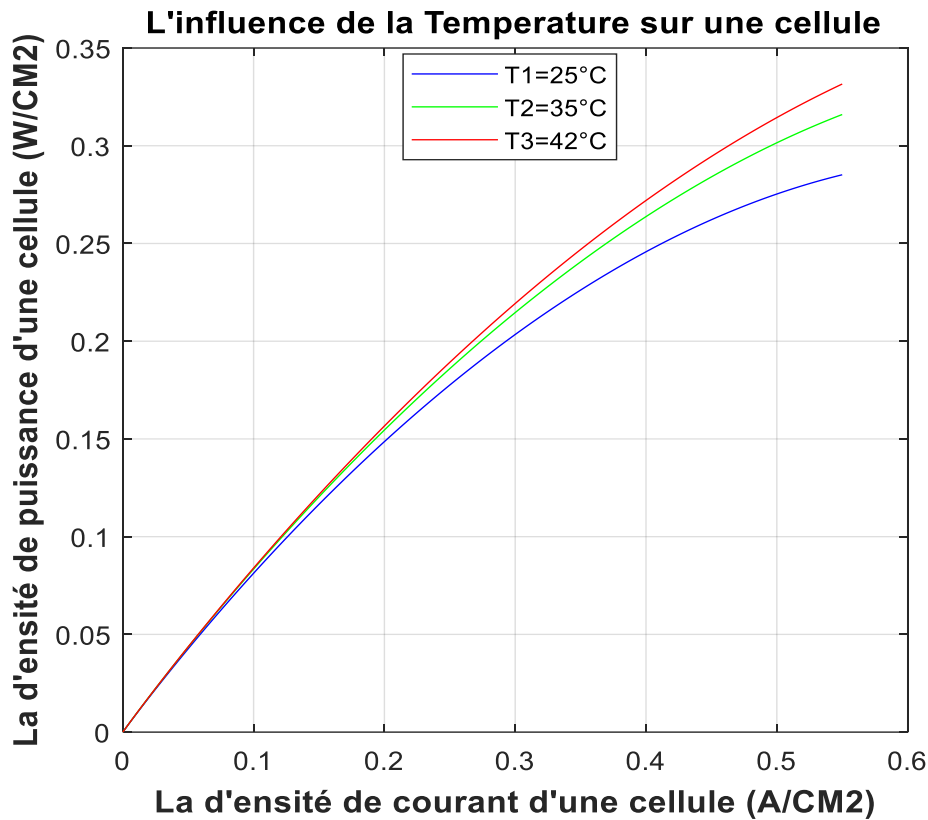


Figure (IV.45) : courbe de simulation de la densité de puissance en fonction de la densité de courant avec des variations de la température $p=1.4$ bars

La figure (IV.45) montre la courbe de la densité de puissance d'une PEMFC en fonction de la densité de courant, avec des variations de température à pression constante. Nous observons que la densité de la puissance augmente avec l'augmentation de la densité de courant pour des températures prises de 25°C, 35°C, 42°C. Plus la température augmente, plus la densité de puissance n'augmente.

A titre d'exemple :

Pour $J= 0.4$ A/ cm^2

$P=0.24$ w/ $cm^2 \rightarrow T = 25^\circ C$

$P= 0.26$ w/ $cm^2 \rightarrow T= 35^\circ C$

$P= 0.27$ w/ $cm^2 \rightarrow T= 42^\circ C$

Pour $J= 0.22$ A/ cm^2

$P=0.15$ w/ $cm^2 \rightarrow T = 25^\circ C$

$P= 0.15$ w/ $cm^2 \rightarrow T = 35^\circ C$

$P= 0.15$ w/ $cm^2 \rightarrow T = 42^\circ C$

IV.12.2 Impact de la Pression :

A présent, nous allons fixer la température à 35° C et faisons varier la pression pour voir son influence sur la caractéristique $V=f(j)$ de la PEMFC. Les pressions choisies sont $P_{O_2} = (0.9, 1.4, 1.9)$ Bar. Les courbes obtenues sont montrées en figure (IV.46)

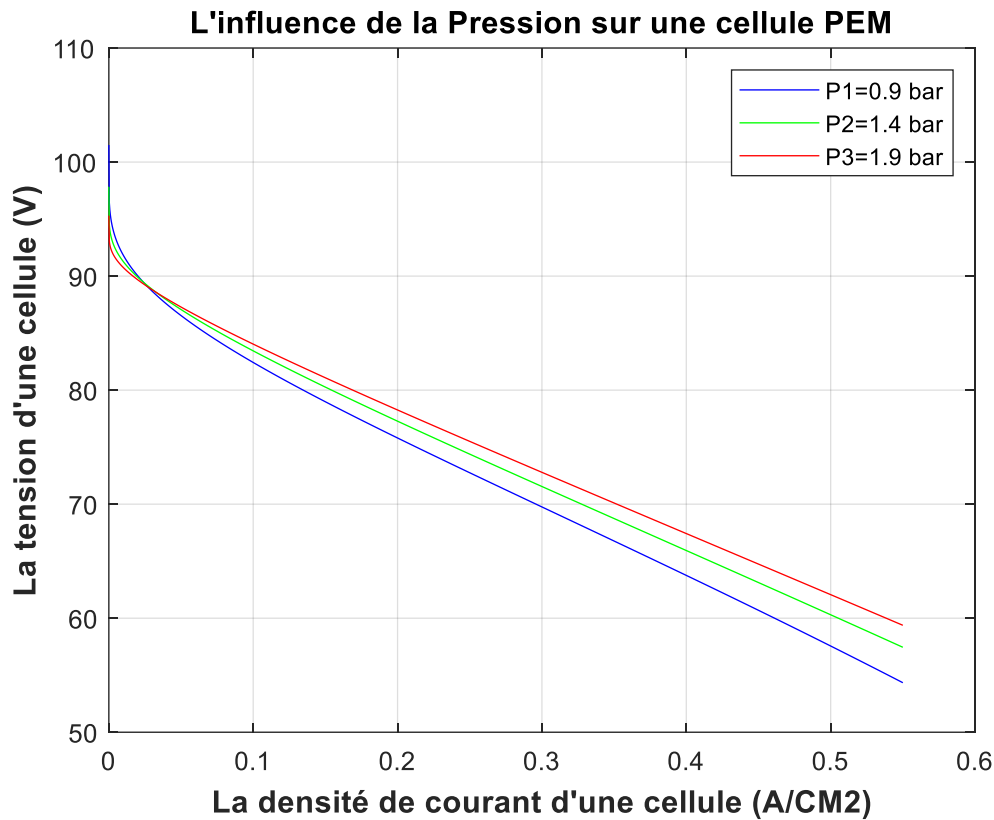


Figure (IV.46) : simulation de la caractéristique $V = f(J)$ sous l'influence de la pression, $T=35^{\circ}\text{C}$
 Nous observons que pour une intensité de courant constante, l'augmentation de la pression partielle en oxygène fournie à la PEMFC entraîne une légère augmentation de la tension délivrée.

exemple :

Pour $J = 0.4 \text{ A/cm}^2$

$V = 0.63\text{V} \rightarrow P_{\text{O}_2} = 0.9 \text{ bar}$

$V = 0.65\text{V} \rightarrow P_{\text{O}_2} = 1.4 \text{ bar}$

$V = 0.67\text{V} \rightarrow P_{\text{O}_2} = 1.9 \text{ bar}$

Pour $J = 0.2 \text{ A/cm}^2$

$V = 0.75\text{V} \rightarrow P_{\text{O}_2} = 0.9 \text{ bar}$

$V = 0.77\text{V} \rightarrow P_{\text{O}_2} = 1.4 \text{ bar}$

$V = 0.78\text{V} \rightarrow P_{\text{O}_2} = 1.9 \text{ bar}$

Nous allons étudier l'influence de la pression sur la caractéristique densité de puissance-densité de courant ($p-J$) pour $T = \text{constante}$.

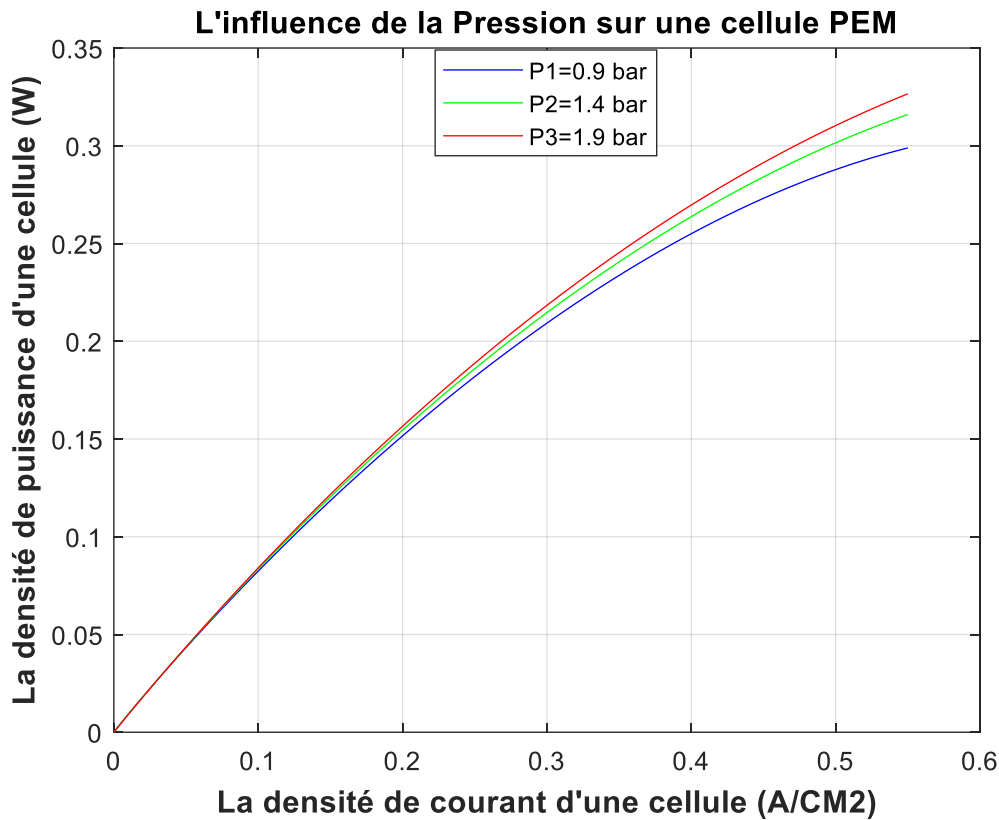


Figure (IV.47) : Courbe de simulation de la densité de puissance en fonction de la densité de courant avec des variations de la pression.

A titre d'exemple :

Pour $J = 0.4 \text{ A/cm}^2$

$P = 0.25 \text{ w/cm}^2 \rightarrow P_{O_2} = 0.9 \text{ bar}$

$P = 0.26 \text{ w/cm}^2 \rightarrow P_{O_2} = 1.4 \text{ bar}$

$P = 0.27 \text{ w/cm}^2 \rightarrow P_{O_2} = 1.9 \text{ bar}$

Pour $J = 0.2 \text{ A/cm}^2$

$P = 0.15 \text{ w/cm}^2 \rightarrow P_{O_2} = 0.9 \text{ bar}$

$P = 0.15 \text{ w/cm}^2 \rightarrow P_{O_2} = 1.4 \text{ bar}$

$P = 0.16 \text{ w/cm}^2 \rightarrow P_{O_2} = 1.9 \text{ bar}$

Nous observons que pour une intensité de courant constante, la densité de puissance de la PEMFC elle est presque constante.

IV.13 Couplage PAC-Charge :

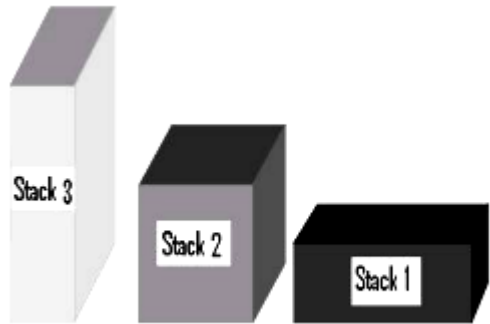
On définit :

-Le nombre N_s de cellules mise en séries qui fixe la tension du stack.

-Le nombre N_p de cellules mise en parallèles qui fixe la densité du courant du stack.

A cet effet, nous sommes intéressés par l'obtention d'un système meilleure adaptation formé d'un générateur PAC et charge.

Présentation de la technique de connexion directe générateur PAC–charge pour voir comment est l'adaptation des composants de ce système. Cette étude dégagera une mesure de la qualité de l'adaptation du système pour voir s'il y'a un meilleur rendement d'utilisation du générateur PAC [25].



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

Tableau (IV.6) : Modularité d'un stack: 3exemples de conception d'une PAC de 5KW.

IV.14 Connexion directe pile à combustible(PAC)-charge :

Le problème de dimensionnement définit le nombre de cellules qui constituent le générateur PAC qui est déterminé à partir des besoins en énergie électrique de la charge et des caractéristiques de fonctionnement du stack. Le fonctionnement des cellules PAC est lié étroitement à la température et la Po₂.

Une connexion directe entre un STACK (ensemble) de PACS et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La figure (IV.48) montre ce cas. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de « réglage » de la puissance de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du STACK de PACS vers la charge n'est pas non plus garanti.

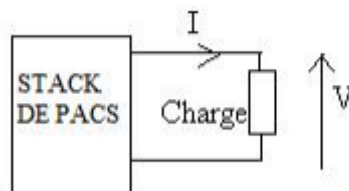


Figure (IV.48) : Connexion directe STACK DE PACS-charge.

Le point de fonctionnement du STACK DE PACS résulte de l'intersection entre la caractéristique V-J (tension-densité de courant) du STACK DE PACS et la caractéristique V- J de la charge [26].

Nous supposons que la nature de la charge est continue (DC). En effet, une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe car le STACK DE PACS fournit un courant continu. Pour la connexion d'un STACK DE PACS à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage de conversion spécifique de type onduleur.

Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale : point P pour un courant optimal (IOPT) et une tension optimale (VOPT). Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques I(V) du générateur et celles de la charge.

IV.15 Calcul du rendement :

A chaque point de fonctionnement correspond donc une puissance de fonctionnement qui change, selon les conditions de travail, pour une configuration du STACK et une charge donnée. Cette puissance peut coïncider, être proche ou éloignée de la puissance optimale P_{max} pour des conditions de travail fixes. C'est cet écart qui renseigne sur la qualité d'adaptation. Cet écart est calculé pour chaque point de fonctionnement et pour chaque charge. La qualité d'adaptation peut être aussi calculée par une autre grandeur similaire qui consiste à déterminer le rendement d'utilisation. C'est celle que nous allons utiliser. Ce rendement est noté n_g et est défini par :

$$n_g = \frac{P_{fct}}{P_{max}} \quad \text{(IV.10)}$$

Où :

P_{fct} est la puissance de fonctionnement.

P_{max} est la puissance optimale pour des conditions de travail fixes.

Plus ce rendement se rapproche de 100%, plus l'adaptation STACK-charge est bonne impliquant une bonne exploitation des cellules.

Le travail qui suit regroupe les différents résultats obtenus du calcul pour chaque charge des divers rendements liés à la variation des conditions de travail.

IV.16 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une source de production d'énergie électrique en convertissant l'énergie chimique des gaz en électricité à l'aide d'une pile à combustible PEMFC. Et on précise par la définition, la description et explication et leur principe de fonctionnement et nous avons pu représenter différentes caractéristiques de la pile à combustible électrique et les facteurs qui influent sur le rendement, et nous avons conclu que :

- Ce générateur est parfait : la pile à combustible produit sans bruit de l'énergie électrique et thermique

- De nombreux points restent à étudier et à améliorer : fiabilité, durée de vie, prix...

Conclusion générale :

Le travail présenté concerne la production d'énergie électrique dans un système photovoltaïque.

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude de dimensionnement d'un Système photovoltaïque Orienté pour alimenter l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène vert ce qui est idéal pour être consommé par la pile à combustible.

Nous avons fait un aperçu sur le système hybride et ses concepts, son importance et Les principaux composants et les différentes structures de ce système de génération de l'énergie électrique et principe de fonctionnement d'une cellule PV ainsi que l'étude de son schéma équivalent. Puis, nous avons considéré les différents paramètres du circuit équivalent qui permettent de tracer la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque. Nous avons remarqué que les performances d'un GPV (générateur photovoltaïque) sont fortement influencées par les conditions météorologiques (température, éclairement)

Cette étude a touché les paramètres essentiels composant le système photovoltaïque. Elle se résume par ses différents points:

-L'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique

-La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV nécessite une étude bien approfondie pour analyser le fonctionnement de système PV et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et la température.

Puis nous avons présente Les différentes technologies d'électrolyseurs d'eau et on a défini d'électrolyseur PEM ce que nous utilisons pour produire de l'hydrogène et expliqué ses composants et son principe de fonctionnement et Dans la partit pratique nous avons effectué représenter les différentes caractéristiques électriques de l'électrolyseur et dégagé l'impact des agents température et pression en oxygène sur le comportement de ce dernier et nous avons conclu que :

-La tension et la densité de puissance d'électrolyseur ont une relation croissante avec la densité de courant pour des conditions de travail fixes.

-Nous remarquons que la tension et la puissance d'électrolyseur diminuent lorsque la température ou la pression partielle en oxygène augmente.

Et finalement nous avons fait une étude sur la pile à combustible et nous avons présente caractérisation expérimentale d'une pile à combustible de membrane échangeuse de proton (PEMFC) dans le but d'utiliser cette pile dans un système photovoltaïque, et Dans la partit pratique nous avons effectué représenter les différentes caractéristiques électriques de la pile PEMFC et dégagé l'impact des agents température et pression. Ecologiquement, ce générateur est parfait : la pile à combustible produit sans bruit de l'énergie électrique et thermique, à des rendements élevés, ne produisant que de l'eau et ne rejetant aucun gaz à effet de serre et ce n'est pas une technologie mature. De nombreux points restent à étudier et à améliorer : fiabilité, durée de vie, prix...

En fin, Nous pouvons dire que les résultats que nous avons acquis et les simulations que nous avons fait ce système c'est un système de production d'électricité propre grâce à une source d'énergie gratuite qui est le soleil, et l'eau.

Comme perspectives, Cette installation pourra être améliorée dans l'avenir par l'ajout d'autres sources renouvelables et d'autres éléments de contrôle et de gestion d'énergie.

Références Bibliographiques Chapitre I :

- [1] M. Rabah ROUAS< Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque> THÈSE DE DOCTORAT 2018
- [2] A. El Khadimi, L. Bchir et A. Zeroual, « Dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque - éolien avec système de stockage », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 7, pp : 73-83, (2004)
- [3] A.Taher Azar, N.Ahmad Kamal, « Renewable Energy Systems - Modeling, Optimization and Control », Academic Press is an imprint of Elsevier,2021.
- [4] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Doctorat en Energétique, Université Technique de Sofia, 2011.
- [5] Petibon, S. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». PhD thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [6] BAGHDADI Faiza, 2011, Modelisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables, Universite de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, MEMOIRE DE MAGISTER.
- [7] Jeremy, L. « Modélisation, Dimensionnement et Optimisation des Systèmes d'Alimentation Décentralisés à Energie Renouvelables- Application des Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Energie ». PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [8] A.Taher Azar, N.Ahmad Kamal, « Renewable Energy Systems - Modeling, Optimization and Control », Academic Press is an imprint of Elsevier,2021.
- [9] A.S.Belfedhal, « Modélisation et Commande d'un système de production d'électricité Photovoltaïque-Eolien », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'ELHARACH, 2019
- [10] A.BorniI, « Etude Et Optimisation D'un Multi Système Hybride de Conversion D'énergie Electrique », Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 2015
- [11] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Doctorat en Energétique, Université Technique de Sofia, 2011.

[12] Ashari, M., Nayar, C. V., (1999). « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)–diesel–battery hybrid power system ». Solar Energy, vol. 66, Issue 1, pp 1-9, may 1999.

[13] S.Bensmail ,« Optimisation et Gestion d’Energie D’un Système Hybride A Energies Renouvelables »,Thèse de doctorat, Université de Bejaïa, 2017.

[14]A.Bouharchoche, « Etude et Commande d’un Système de Production Hybride Eolien-photovoltaïque », Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, 2013

Références Bibliographiques Chapitre II :

[1] GrabiaFateh et Sekehal Meriem Mémoire de Master, Structure et commande d’une installation photovoltaïque, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR_ANNABA_2017

[2] TOUMI NIHED KOUDA ISKANDAR, < ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME> Mémoire MASTER, 2020/2021

[3] BERREGUI ABDELFETTAH ABSA AMJED < Etude technico-économique d’une installation photovoltaïque pour application dans la région d’Ouargla >, Mémoire MASTER, 2019/2020

[4] M. rania- Z. seddik<< etude et réalisation d’un chargeur solaire par arduino>> mémoire master, universite kasdi merbah ouargla, 24/06/2018

[5] G. Walker, "Evaluating MPPT Converter Topologies Using A MATLAB PV Model, A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005

[6] Y.Mebrak, "Contribution à l'étude et à la modélisation des éléments d'un système photovoltaïque", mémoire Magister, Département de Physique, Université Abou-Bakr Belkaid, TlemcerL ,2011.

[7]H.Bennacer. (2009). Diplome de Magister (Modélisation d’un système photovoltaïque). Sidi Bel Abbès: Université D.Liabes. . Bettouche Mohamed Amine, Redjradj Adel. (2016). Diplôme de Master (Etude, dimensionnement et simulation d'un système hybride photovoltaïque - diesel alimentant une habitation isolée). Bejaia: Université Abderrahmane Mira.

- [8] GUEDAOURIA H., “ Dimensionnement d’un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l’université de Béchar ”, Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.
- [9] A. Bouharchoche, « Etude et Commande d’un Système de Production Hybride Eolien-photovoltaïque », Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, 2013
- [10] S. Astie, "Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule ", Techniques de l’Ingénieur, D 3 936
- [11] V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL, “Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques”, université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [12] K .TOUAFEK, «Etude d’un Capteur solaire hybride Photovoltaïque Thermique», Mémoire de Magister en électronique, ENP Algérie, 2005.
- [13] Jean-Claude Muller. Améliorations attendues avec les nouvelles technologies PV : rendements, coûts et cycle de vie. J3eA - 6 (2007) - DOI : 10.1051/j3ea:2007003..
- [14] A. Müller, M. Ghosh, R. Sonnenschein, P. Woditsch, Silicon for photovoltaic applications. materials Science and Engineering 2006; B 134: 257–262.
- [15] H. TEBIBEL, «Contribution à l’étude des performances des Installations photovoltaïques en milieu Saharien», Mémoire de Magister en électronique, ENP Algérie, Décembre 2009

Références Bibliographiques Chapitre III :

- [1] Étude et simulation d’un Générateur Photovoltaïque Muni d’un Convertisseur MPP pour une Meilleure Gestion Énergétique page 27 UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’ ILA
- [2] BEN AMMAR Makhoulf et EMBARKI Ala Eddine Mémoire de Master Modélisation D’électrolyseur Proton Exchange Membrane (PEM), Université Mohamed Khider Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Electrique_2019 / 2020
- [3] Séverine Busquet. Étude d’un système autonome de production d’énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d’un banc d’essai et modélisation. Sciences de l’ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003. Français. ffNNT : 2003ENMP1195ff. ffpastel-00001338f
- [4] HAMICHI, Anissa. Potentiel de production d’hydrogène à partir de l’énergie éolienne en Algérie: Approche basée sur le SIG. Diss. 2019.

- [5] Hashimoto A and al., Development of PEM water electrolysis type hydrogen
- [6] Norsk-hydro, Procédé de préparation de cathodes actives pour des appareils électrochimiques, Brevet français, no 2381836, 22 sept. 1978.
- [7] J. Labbé, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité "Énergétique", 2006
- [8] B. BOURGESM, « Improvement in Solar Declinaison Computation », Solar Energy, Vol. 35, N°4, pp. 367 - 369, 1985.
- [9] A.S. Corbeau. Les piles à combustible. Site internet <http://www.annso.freesurf.fr/>, 2003.
- [10] Saisset R. : "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques", Ecole Normale Supérieure de Cachan, (2004).
- [11] Busquet S., « Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation ». Thèse Energétique, CENERG, Mines de Paris, ENSMP, (2003).
- [12] R.Boudries, R.dizène, A. Khellaf and M. Belhamel, «HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER », Editor: Aiden M.Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc.
- [13]Bouziane, K. (2011). Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par Electrolyse de l'eau. Mémoire de Magister en Génie des procédés. Université Kasdi Merbah, Ouargla
- [14] Friedli, Etude d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque en Suisse:Laboratoire de Cristallographie, Rapport final, université de Genève, mai 1997.
- [15]L. Stoyanov , G. Notton et V. Lazarov , "Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables", Revue des Energies Renouvelable,. 10(1): 1 – 18, 2007.
- [16] X. Vallvé, I. Vosseler and G. Gafas, "International Experience With Hybrid systems: energy Management in Communities", Workshop on Photovoltaic Hybrid Systems: 1-7, 2001.
- [17] Th.F. El-Shatter, M.N. Eskandar, M.T. El-Hagry, "Hybrid PV/fuel cell system design and Simulation", Technical note, Renewable Energy , 27:479–485, 2002.
- [18]Modélisation d'une électrolyse d'eau à membrane polymère pour la production d'hydrogène par B. Soldi, Gökalp, A. Zeroual et A. Aymard
- [19] J.H.RUSSEL, L.J. Nuttall, A.P.Fickett, " Hydrogen generation by solid polymer electrolyte water electrolysis". Chem. Soc. Div. Fuel Chem. Prepr. 18, 24–40 (1973).
- [20] CHEBBOUB Chaouki CHENINI Abdelkarim “ Etude et évaluation d'un système photovoltaïque électrolyseur –pile à combustible de génération d'électricité” Mémoire MASTER ACADEMIQUE

[21] BOUAZIZ Nasreddine & ALLAM Abdelmoumen ‘ ‘ Dimensionnement d’un Système photovoltaïque Orienté pour alimenter l’électrolyseur pour produire de l’hydrogène vert’ ’ Mémoire Présenté pour l’obtention d’un diplôme de Master

Référence bibliographique Chapitre IV :

[1] Etudié par : Melle : SAIM Nabila Mémoire de fin d’études(En vue d’obtention du diplôme de Master Académique en électrotechnique Option : Machines électriques), thème : MODELISATION ET SIMULATION D’UNE PILE A COMBUSTIBLE(PEM), UNIVERSITE MOULOUD MA M MERI D E TIZI OUZOU FACULTE DE GENIE E LECTRIQUE ET DE L’INFOR MA TIQUE DEPARTEMENT D’ELECTROTECHNIQUE, l’année 2011/2010/////

[2] F. Z. ZERHOUNI; M. T. BENMASSAOUD; A. BOUDGHENE, Approche dans la modélisation et dans la caractérisation d’une pile à combustible. Université des sciences et de la technologie d'Oran, 2007.

[2] F. SAINT-JALM, M. Press, G. Klotz : L'hydrogène un vecteur d'énergie, CEA (de la recherche à l'industrie), 2013

[3] E. DIOP : Application et perspective d'application, étude du couplage photovoltaïque de la pile à membrane échangeuse de protons, mémoire d'ingénieur, Université CHEIKH DIOP. École supérieure polytechnique-Dakar, 2003

[4] F. AMROUCHE, B. MAHMAH, M. BELHAMEL, H. BENMOUSSA : Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale. Thèse non publiée, Université des sciences et de la technologique Houari Boumediene, 2005.

[5] F. EIBAHRI, I. SAADOUNI, Étude, dimensionnement et simulation d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque, mémoire de master. Université d'Adrar, 2016

[6] K. B. Prater, "Solid polymer fuel cell developments at Ballard", Journal of Power Sources, Vol. 37, n°. 1-2, pp. 181-188, 1992..

[7] P.THONTHONG, « CONCEPTION D’UNE SOURCE HYBIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS », THESE DE DOCTORAT, L’INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, 2005.

[8]] FZ Zerhouni, Développement et optimisation d’un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC, thèse de Doctorat ; département électronique, USTO, 2001

[9]L.Carrette, K.A.Friedrich et U. Stimming, «Fuel Cells - Fundamentals and Applications, Fuel Cells », 1 (2001) 5-39. http://www.prophysik.de/Phy/pdfs/NEWS_PDF_GER_758.pdf.

[10] N. P. Brandon and D. Thompsett, "Fuel Cells Compendium", Elsevier, 2005,

- [11] G. Hoogers, "Fuels Cell Technology Handbook ", CRC Press, Birkenfeld. Germany, 2003
- [12] J. Wu, J. Zhu, G. Cao, and H. Tu, " Dynamic modeling of SOFC based on a TS fuzzy model", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 16, n°. 5, pp. 494-504, 2008.
- [13] E. AGLZIM (2009) : Caractérisation Par Spectroscopie d'impédance De l'impédance Complexe d'une Pile A Combustible En Charge – Evaluation De l'influence De l'humidité –, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1.
- [14] W. Friede, « Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible de type PEM ». Thèse INPL, Nancy, 28 août 2003.
- [15] : Fayssal OUAGUENI, mémoire Doctorat en sciences en : Automatique Intitulé. Modélisation et Commande des Piles à Combustible, Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie, Soutenue publiquement le : 28/01/2021
- [16] P. Mayé, "Générateurs électrochimiques : Piles, accumulateurs et piles à combustibles", Dunod, Paris, 2010.
- [17] P. Thounthong, "Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine. France, 2005
- [18] T. Alleau Mémento de l'hydrogène : La pile PEMFC AFH2 - FICHE 5.2.2 – 2003
- [19] J. LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction ». Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [20]] L. Stoyanov , G. Notton et V. Lazarov , "Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables ", Renewable Energy 27 :479–485, 2002
- [21] A moins de 1000 €/kW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. REE n° 2, février 2002, pp. 8-9.
- [22] L. Stoyanov , G. Notton et V. Lazarov , "Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables", Revue des Energies Renouvelabl., 10(1): 1 – 18, 2001
- [23] Busquet S & al., "A new approach to empirical electrical modeling of a fuel cell, an electrolyser or a regenerative fuel cell", Journal of Power Source, 134: 41-48, 2004
- [24] Busquet S & al., "A new approach to empirical electrical modeling of a fuel cell, an electrolyser or a regenerative fuel cell", Journal of Power Source, 134: 41-48, 2004
- [25] Th.F. El-Shatter , M.N. Eskandar, M.T. El-Hagry, "Hybrid PV/fuel cell system design and Simulation", Technical note, Renewable Energy , 27:479–485, 2002.
- [26] S. Ashok, "Optimised Model for Community-Based Hybrid Energy System", Renewable Energy, 32(7): 1155 - 1
- [27] Fayssal OUAGUENI “ Modélisation et Commande des Piles à Combustible” thèse Doctorat en sciences en Automatique