

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA-



جامعة باجي مختار-عنابة-

FACULTE : Sciences de l'ingénieur

DEPARTEMENT : Electrotechnique

MEMOIRE DE LICENCE

DOMAINE : Science et Technologie

Energie Photovoltaïque et Pile à Combustible

FILIÈRE : Electrotechnique

OPTION : Electrotechnique

Présenté par :

- Zioual Aymen
- Abainia Raid

Dirigé par : Mehoubi Med Larbi

Examineur : Adjabi Mohamed

Année Universitaire : 2020-2021

Dévouement

Nous dédions cette thèse à nos familles dont l'amour pour nous ne connaissait pas de limites, et qui ont enseigné que rien n'est impossible et qu'il n'est jamais trop tard pour être le meilleur, nous avons appris d'eux que le meilleur type de connaissance à avoir est celui qui s'apprend pour son bien.

À nos sœurs et frère qui se tiennent toujours avec nous qui ont été là tout ce temps dans les mauvais avant les bons moments, alors ils méritent d'être mentionnés ``Hanane, Ahlem, Housseem ' merci pour vous merci de nous encourager et votre patience avec nous, pour votre amour et vous êtes mon soutien.

À nos mamans qui ont été notre source d'inspiration et nous ont donné les forces pour surmonter tous les défis, pour faire confiance à Dieu et croire en nous-mêmes, qui nous ont également appris que même la plus grande tâche peut être accomplie si elle est accomplie une étape à la fois.

Enfin, je dédie ceci à ceux qui pensaient que nous ne pouvions pas réussir, merci de nous faire travailler plus dur pour faire nos preuves.

Aimez-vous tous. Qu'Allah vous protège et que nous puissions vous rendre la moitié du bonheur que vous nous avez donné.

REMERCIEMENT

vie et en bonne santé jusqu'à ce jour
Et nous a permis de réussir dans cette mémoire

Nous tenons à remercier Madame W.Tourab
notre superviseur, qui a fait des efforts, par ses
conseils et ses encouragements

Nous remercions également tous ceux qui nous
ont aidés dans ce travail, de près et de loin ,
dans la réalisation de ce travail.

Remerciements

Il y a un certain nombre de personnes sans eux, cette thèse n'aurait peut-être pas été écrite, et à qui je suis énormément redevable.

Nous sommes particulièrement redevables à «**Tourab Wafa** » , qui nous a soutenus dans notre travail et qui a travaillé activement pour nous fournir tous les conseils et informations dont nous avons besoin, nous avons vraiment bénéficié des commentaires et suggestions qu'elle nous a donnés.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre directeur, qui a grandement contribué à l'amélioration de la thèse.

Nous avons été extrêmement chanceux d'avoir un superviseur qui se souciait tellement de notre travail et qui a répondu à nos questions et requêtes si rapidement, elle a été très patiente avec nous et nous a encouragés, sa vision positive et sa confiance dans notre travail nous ont inspirés et ont donné en nous confiance.

Merci une autre fois notre cher professeur, nous espérons tout le meilleur pour vous et nous sommes vraiment heureux de travailler avec vous.

Listes des figures

Figure	Titre	Page
	Chapitre I	
Fig1.1	Photovoltaïque_Schuco-International	04
Fig1.2	Solaire_thermique_Viessmam	04
Fig1.3	Solaire_thermique_Abengoa_2	05
Fig1.4	Energie_eolienne_Eolfi	05
Fig1.5	Energie_hydraulique-GEG	06
Fig1.6	Grande_hydraulique-CNR	06
Fig1.7	Hydrolienne2	07
Fig1.8	Bois-energies-franche_comte	07
Fig1.9	Methaniseur	08
Fig1.10	Biocarburants	08
Fig1.11	Geothermie2_France_geothermie	09
Fig1.12	Architecture_bioclimatique	09
Fig1.13	Lescentralesthermiquesàflamme	10
Fig1.14	Photod'unecentralethermique	11
Fig1.15	Photod'unecentralenucléaireenFrance	11
Fig1.16	Centralehydroélectrique	12
Fig1.17	Photod'unecentraleéolienne	13
Fig1.18	Photod'unecentralesolaire	13
	Chapitre II	
Fig2.1	Système photovoltaïque	17
Fig2.2	Système photovoltaïque autonome avec stockage	18
Fig2.3	Système photovoltaïque connectée au réseau électrique	19
Fig2.4	Coupe d'une cellule PV	19
Fig2.5	Fabrication d'un syst. PV.	20
Fig2.6	Cellule PV au silicium	20
Fig2.7	Fabrication d'une cellule PV	21
Fig2.8	Cellule mono et polycristalline	22
Fig2.9	Coupe des cellules de deuxième génération	23
Fig2.10	Cellule PV Organique en polymère	23
Fig2.11	Modèle de cellule PV idéal	24
Fig2.12	Modèle de cellule PV réel	25
Fig2.13	Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau du laboratoire	26
Fig2.14	Caractéristique courant-tension et puissance-tension	28
Fig2.15	Les étapes de fabrication d'un panneau PV	29
	Chapitre III	
Fig3.1	Composantes fondamentales d'une PAC	32
Fig3.2	Classification des systèmes hybrides	34
Fig3.3	Coupe d'une PAC (1-2)	34
Fig3.4	Schéma de principe de la PAC à hydrogène	36
Fig3.5	Diagramme du système PAC sous l'environnement de Matlab	36
Fig3.6	Résultats de la simulation	37
Fig3.7	Schéma de principe couplage de PV avec pile à combustible	42

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
	Chapitre II	
Tab(02.1)	avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques	24
Tab(02.2)	Caractéristiques électriques du module BPMSX62 de BP solaire	28
	Chapitre III	
Tab(03.1)	types des piles à combustibles	40

Sommaire

Pages

Titre

Introduction générale

Chapitre I : énergie renouvelable

I.1 introduction

I.2 définition et Types d'énergies renouvelables

I.2.1 définition d'énergie renouvelable

I.2.2 Types d'énergies renouvelables

a) Energie Solaire

☐ L'énergie solaire photovoltaïque

☐ Le soleil thermique « Basse Température »

☐ Le soleil thermique « Haut Température »

b) Energie Eolienne

c) Energie Hydraulique –Hydroélectricité

☐ La petite hydraulique

☐ La grande hydraulique

☐ Les énergies marines

d) La Biomasse

☐ Bois énergie

☐ Le Biogaz

☐ Le Biocarburants

e) La Géothermie

f) Architecture Bioclimatique

I.3 production de l'énergie électrique et les différentes centrales électriques

I.3.1 production de l'énergie électrique

I.3.2 les différentes centrales électriques

a) Les centrales thermiques

b) Les centrales nucléaires

c) Les centrales hydroélectriques

☐ Les types des centrales hydrauliques

d) Les centrales éoliennes

e) Les centrales solaires ou photovoltaïques

I.4 Les avantages et Inconvénients de ces centrales

I.4.1 Centrale thermique

a) Avantage

b) Inconvénients

I.4.2 Centrale nucléaire

a) Avantage

b) Inconvénients

I.4.3 Centrale hydroélectrique

a) Avantage

b) Inconvénients

I.4.4 Centrale éolienne

a) Avantage

b) Inconvénients

I.4.5 Centrale solaire ou photovoltaïque

a) Avantage

b) Inconvénients

I.5 Conclusion

Chapitre II : Energie Photovoltaïque

II.1 Introduction

II.2 Système photovoltaïque (Energie photovoltaïque)

II.2.1 Définition

a) Système autonome

b) Système connectée au réseau

Sommaire

- II.2.2 Principe de fonctionnement
 - II.2.3 La chaîne de fabrication
 - II.3 Cellule photovoltaïque
 - II.3.1 Fabrication d'une cellule photovoltaïque
 - II.3.2 Technologie
 - a) 1^{ère} génération : Silicium cristallin (mono et poly)
 - b) 2^{ème} génération : CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin
 - c) Technologies photo-électro-chimiques (DyeSensitisedCell et Organic PV)
 - II.3.3 Modélisation
 - a) Cellule photovoltaïque idéal
 - b) Cellule photovoltaïque réel
 - II.3.4 Evolution des rendements des différents types de cellule
 - II.4 Module photovoltaïque
 - II.4.1 Les caractéristiques d'un module PV
 - a) La tension en circuit ouvert
 - b) Le courant de court-circuit
 - c) La puissance maximale
 - d) Le rendement
 - II.5 Générateur photovoltaïque
 - II.6 Panneau photovoltaïque
 - a) Association des cellules photovoltaïques en parallèle
 - b) Association des cellules photovoltaïques en série
 - c) Fabrication d'un panneau photovoltaïque
 - II.7 L'onduleur
 - II.7.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur
 - a) Onduleur monophasée
 - b) Onduleur Triphasée
 - II.8 Conclusion
- Chapitre III : Pile à combustible et système hybride
- III.1 Introduction
 - III.2 Technologie d'hydrogène
 - III.3 Définition
 - III.3.1 Définition d'une pile à combustible
 - III.3.2 Définition d'un système hybride
 - a) Etude des systèmes hybride
 - ☐ Critère d'optimisation
 - ☐ La probabilité de perte de la charge
 - ☐ Le cout d'énergie produite
 - ☐ Logiciel de dimensionnement
 - III.4 Classification
 - III.4.1 Structure d'une PAC
 - III.4.2 Fonctionnement d'une PAC
 - III.4.3 Structure d'un système hybride
 - a) Etude des structures du système hybride
 - ☐ Système hybride Photovoltaïque / Stockage
 - ☐ Système hybride éolien / Stockage
 - ☐ Système hybride Photovoltaïque /éolien / Stockage
 - III.4.4 Fonctionnement d'un système hybride
 - III.5 Les différents types de la pile à combustible
 - III.6 Les caractéristiques d'une pile à combustible
 - III.7 Les systèmes de stockage
 - III.7.1 Les batteries
 - III.7.2 Les pile à combustibles
 - III.8 Modélisation

Sommaire

III.8.1 Modèle de l'installation photovoltaïque

III.8.2 Modèle des éoliennes

III.9 Couplage photovoltaïque – Eolien avec pile à combustible

III.10 Conclusion

Conclusion générale

Bibliographie

Introduction Général

La révolution de la technologie dans l'électrotechnique a mené la production des énergies à être plus vaste. L'une des énergies utilisées dans la nouvelle technologie est l'énergie photovoltaïque, cette énergie a été découverte par l'effet photovoltaïque en 1839 qui a été mise en évidence par Antoine Becquere. L'énergie photovoltaïque fait partie des meilleure technologies qui convertissent le rayonnement lumineux en électricité, cette énergie est utilities dans de nombreux domaines.

Dans nos jours l'énergie photovoltaïque est utilisée spécifiquement pour l'alimentation des satellites dans le cadre domestique ou des industries. L'énergie photovoltaïque est considérée comme une énergie renouvelable, pour son utilisation à partir de la source du soleil, qui est donnée par les rayons lumineux afin de produire de l'électricité. En effet il existe plusieurs types d'énergie renouvelable utilisés par l'énergie photovoltaïque, notamment: énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique, la biomasse, la géothermie, architecture bioclimatique. Ce dont nous parlerons dans le premier chapitre suivit des détails les plus précis.

Nous avons mené une étude sur les piles à combustible, où nous avons pu identifier le point commun entre elles et l'énergie photovoltaïque, qui est la conversion d'une certaine énergie en énergie électrique. Les piles à combustible sont un moyen non polluant de produire de l'électricité, la pile à combustible en peut l'appliquer pour l'alimentation en énergie d'appareils portables, propulsion électrique des moyens de transport ainsi que la production stationnaire de chaleur et d'électricité. L'utilisation d'hydrogène combustible a pour objet de facilité le stockage.

La mémoire est divisée en trois chapitres :

- ▣ Le premier chapitre définit l'énergie renouvelable : Représente les notions de base de l'énergie renouvelable et leur types.
- ▣ Le deuxième chapitre s'intéresse à la construction des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement ; les avantages et inconvénients.
- ▣ Le chapitre trois basé sur la production d'énergie électrique à travers la conversion de l'énergie chimique par l'utilisation d'une pile à combustible, on distingue leur type et leur caractéristique, principe de fonctionnement ainsi nous allons parler de leurs utilisation dans les système hybride .

I.1 Introduction

Il y a plusieurs types d'énergies, les énergies fossiles et les énergies renouvelables : L'énergie fossile désigne l'énergie que l'on produit à partir de roches issues de la fossilisation des êtres vivants : pétrole, gaz naturel et houille. Elles sont présentes en quantité limitée et non renouvelable. Leur combustion chimique exothermique (c'est-à-dire accompagnée d'une production d'énergie sous forme de chaleur) entraîne des gaz à effet de serre (l'effet de serre est un processus naturel de réchauffement de l'atmosphère qui intervient dans le bilan radioactif de la Terre).

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil mais aussi la Lune. Aujourd'hui, les énergies servent pour de nombreux usages comme les transports, le chauffage, l'industrie, l'éclairage... La consommation d'énergie a augmenté fortement ces dernières années (+35% entre 1973 et 2000) [1].

I.2 Définition et Types d'énergies renouvelables

I.2.1 Définition d'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... On qualifie les énergies renouvelables d'énergies « flux » par opposition aux énergies « stock », Elles- mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (Pétrole, Charbon, Gaz, Uranium). Contrairement à celle des énergies fossiles, L'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies renouvelables ne couvrent que 20% de la consommation mondiale d'électricité. Utiliser les énergies renouvelables présentes de nombreux avantages. Cela aide à lutter contre l'effet de serre, En réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. Cela participe de plus à une gestion intelligente des ressources locales et à la création d'emplois [2].

I.2.2 Types d'énergies renouvelables

a) Energie Solaire

☐ L'énergie solaire photovoltaïque



Fig1.1 Photovoltaïque_Schuco-International

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure « C'est l'effet photovoltaïque ». L'énergie est apportée par les photons (composants de la lumière), qui heurtent les électrons et les libèrent induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. Un générateur solaire PV est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation PV dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez. L'avenir du PV dans les pays industrialisés passe par son intégration sur les toits et les façades des maisons solaires [2].

☐ Le soleil thermique « Basse Température »



Fig1.2 Solaire_thermique_Viessmann

L'énergie solaire peut servir à chauffer votre eau sanitaire grâce à un CESI, mais aussi alimenter un système ayant la double fonction de chauffage et de production d'eau chaude : le système solaire

combiné (SSC), aussi appelé "combi". D'une façon générale, un CES couvre entre (40 et 80)% des besoins en eau chaude, et un SSC de (25 à 60)% des besoins en chauffage et en eau chaude [2].

☐ Le soleil thermique « Haut Température »



Fig1.3 solaire_thermique_Abengoa_2

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400°C et 1000°C. La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'héliothermodynamie.

Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

- Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.
- Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.
- Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire.

Energie Eolienne



Fig1.4 Energie_eolienne_Eolfi

Comme les moulins à vent du passé, les éoliennes génèrent des forces mécaniques ou électriques. Avec une puissance mondiale installée de 200 GW en 2011, l'énergie éolienne est devenue un producteur majeur d'EnR électriques. L'énergie éolienne est produite par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles-mêmes un générateur produit de l'électricité d'origine renouvelable.

b) Energie Hydraulique –Hydroélectricité

☐ La petite hydraulique



Fig1.5Energie_hydraulique-GEG

Si toutes les installations de petite puissance sont regroupées sous le terme de PCH, on distingue la pico-centrale: inférieure à 20kW; la microcentrale: de 20kW à 500kW; la mini-centrale: de 500kW à 2MW; et la petite centrale: de (2 à 10)MW. Construite au fil de l'eau, la petite hydroélectricité ne demande ni retenue ni vidanges ponctuelles susceptibles de perturber l'hydrologie, la biologie ou la qualité de l'eau. Les microcentrales hydroélectriques fonctionnent comme les grandes centrales des barrages qui exploitent l'énergie des fleuves.

☐ La grande hydraulique



Fig1.6 Grande_hydraulique-CNR

À l'image des moulins à eau de jadis, l'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du XIXe siècle. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur

électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau. L'énergie hydraulique représente 19% de la production totale d'électricité dans le monde et 13% en France. C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée. Cependant, tout le potentiel hydroélectrique mondial n'est pas encore exploité.

Les énergies marines



Fig1.7 Hydrolienne

La filière des énergies marines appelées aussi énergie des océans ou thalasso-énergies, comprend le développement des technologies et la maîtrise et l'exploitation des flux d'énergies naturelles fournies par les mers et les océans. On recense : la houle, l'énergie des vagues, l'énergie des courants, l'énergie des marées et l'ETM qui travaille sur le gradient thermique entre les couches d'eau de surface et celle des profondeurs.

c) La Biomasse

☐ Bois énergie



Fig1.8 Bois-énergies-franche_comte

Le bois est une EnR. C'est la principale ressource ligneuse, mais il faut également prendre en compte d'autres matières organiques telles que la paille, les résidus solides des récoltes, les grappes de maïs, la bagasse de la canne à sucre, les grignons d'olives ...

Il existe aujourd'hui des appareils à combustible bois innovants et efficaces à disposition des particuliers comme des collectivités ou des industries. Les chaudières à biomasse brûlent différents biocombustibles : granulés de bois, bûches, plaquettes forestières, sciures ou copeaux [2].

Le Biogaz



Ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation (méthanisation). On l'appelle aussi « gaz naturel renouvelable » ou encore « gaz de marais », par opposition au gaz d'origine fossile. Mélange de méthane et de gaz carbonique additionné de quelques autres composants, le biogaz est un gaz combustible. Il sert à la production de chaleur, d'électricité ou de biocarburant. Le biogaz peut être directement capté dans les centres d'enfouissement des déchets ou produit dans des unités de méthanisation. Sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, boues des stations d'épurations, lisiers, animaux ou déchets agricoles peuvent être méthanisés dans des unités industrielles [2].

Les Biocarburants



Fig1.10 Biocarburants

Les biocarburants, parfois appelés agro carburants, sont issus de la biomasse. Il existe principalement deux filières industrielles : l'éthanol et le biodiesel. Ils peuvent être utilisés purs comme au Brésil (éthanol) ou en Allemagne (biodiesel), ou comme additifs aux carburants classiques.

L'éthanol est produit en France à 70 % à partir de la betterave, et à 30 % à partir de céréales. Le biodiesel est issu des graines oléagineuses (colza, tournesol)[2].

d) La Géothermie

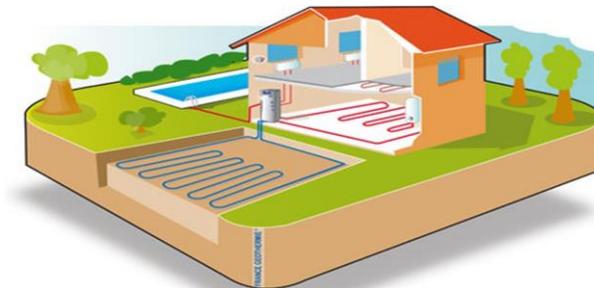


Fig1.11 Geothermie

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C)[2].

e) Architecture Bioclimatique



Fig1.12Architecture_bioclimatique

Architecture passive, maison solaire, bâtiment à énergie positive, haute qualité environnementale, haute performance énergétique ... sont autant de noms pour parler de l'architecture bioclimatique. Ce mode de conception architectural consiste à trouver le meilleur équilibre entre le bâtiment, le climat environnant et le confort de l'habitant. L'architecture bioclimatique tire le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle de l'air pour réduire les besoins énergétiques, maintenir des températures agréables, contrôler l'humidité et favoriser l'éclairage naturel[2].

I.3 Production de l'énergie électrique et les différentes centrales électriques

I.3.1 Production de l'énergie électrique

Une centrale de production d'énergie électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturelle en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs [3].

I.3.2 Les différentes centrales électriques

a) Les centrales thermiques

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière [3].



Fig1.13 Les centrales thermiques à flamme



Fig1.14 Photo d'une centrale thermique

b) Les centrales nucléaires

Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission[3].

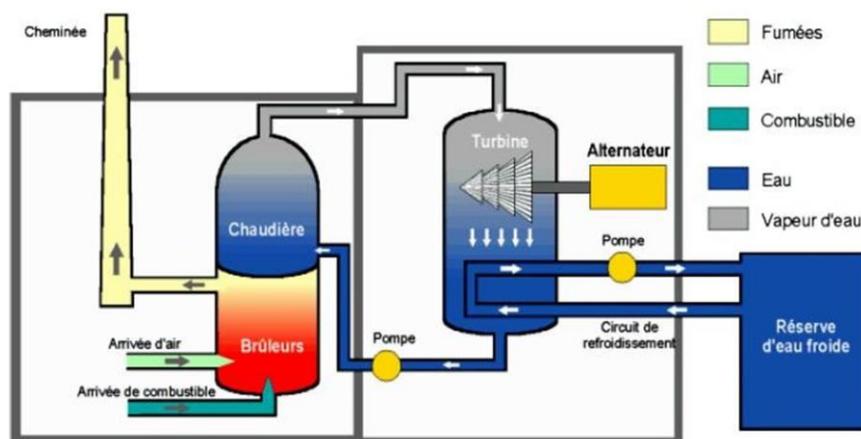


Fig1.15 Photo d'une centrale nucléaire en France

c) Les centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique [3].

▣ Les types des centrales hydrauliques

Suivant la hauteur de chute, on distingue [3] :

- Les centrales de haute chute, ils utilisent des turbines de type Pelton.
- Les centrales de moyenne chute, ils utilisent des turbines de type Francis.
- Les centrales de basse chute, ils utilisent des turbines de type Kaplan [3].

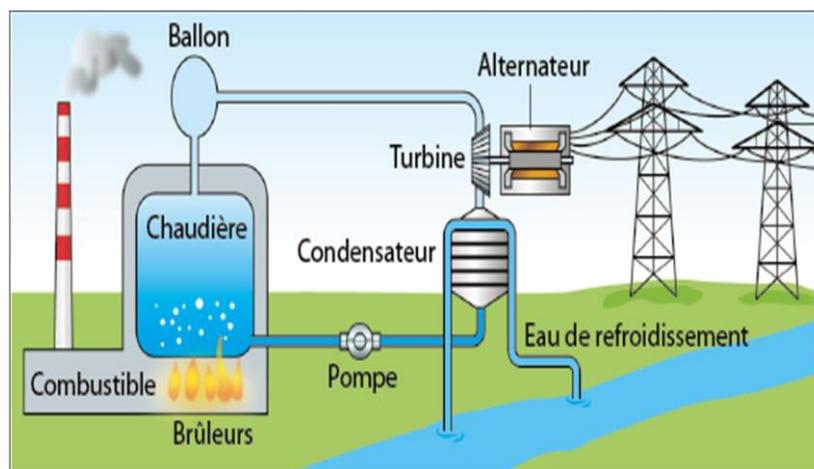


Fig1.16 Centrale hydroélectrique

d) Les centrales éoliennes

L'énergie éolienne est produite sous forme d'électricité par une éolienne. Des éoliennes formées d'un mat surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées [3].



Fig1.17 Photo d'une centrale éolienne

e) Les centrales solaires ou photovoltaïques

Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux [3].



Fig1.18 Photo d'une centrale solaire

I.4 Les avantages et Inconvénients de ces centrales

I.4.1 Centrale thermique

a) Avantage

- Cette énergie est rentable à la production.
- Elle a un prix modeste sur le marché mondial.
- Souplesse d'utilisation et disponibilité élevée
- Facilité d'exploitation

- Facilité de transport(pétrole)
- Possibilité de développer la cogénération
- Compétitivité

b) Inconvénients

- Prix fluctuants
- Géostratégie des ressources
- Impacts sur l'environnement (Gaz à effet de serre, marée noire, etc.)
- Il faut un plan d'eau à proximité.
- Les usines possédant un circuit de refroidissement à circuit ouvert, peuvent avoir des problèmes écologiques dus au réchauffement des rivières.

I.4.2 Centrale nucléaire

a) Avantage

- Adapté à la production de masse
- Disponibilité élevée.
- Stabilité des coûts
- Réserves d'uranium importantes
- Faibles émissions de CO2 en exploitation
- L'énergie nucléaire peut être utilisée dans le domaine spatial.
- Elle ne nécessite pas d'oxygène, ce qui est un atout pour l'homme.

b) Inconvénients :

- Lourds investissements
- Risque industriel
- Nécessite un niveau de technologie élevé
- Acceptation du public
- Chaque année les tranches nucléaires produisent des tonnes de déchets.
- Le stockage des déchets qui augmente le niveau de pollution.
- Le risque d'accident (26 avril 1986 à l'usine de Tchernobyl).

I.4.3 Centrale hydroélectrique

a) Avantage

- Faible coût du KWh pour le gros hydraulique
- Souplesse d'utilisation
- Possibilité de « stocker » de l'électricité pour le turbinage

L'hydraulique est une énergie renouvelable mise en valeur mais pourtant rarement comptabilisée, elle fournit 13 % de la production et contribue également à l'écrêtement des crues.

b) Inconvénients

Contrainte géographique
Aléas climatiques (sécheresse)
Nécessité de concilier les différents usages de l'eau
Impacts sur l'environnement à la construction
L'inondation de certains reliefs lors de la construction de barrages.

I.4.4 Centrale éolienne

a) Avantage

L'énergie éolienne est propre et peut être associée à des panneaux de photopiles et à une batterie d'accumulateur afin d'optimiser la fourniture d'électricité.

b) Inconvénients

L'exploitation de l'énergie éolienne est non polluante par elle-même mais les aérogénérateurs engendrent une pollution acoustique due à la notation des pâles qui engendrent une dégradation du paysage.
Faible disponibilité (20 à 30%) Difficultés de raccordement au réseau
Surface au sol
Acceptation du public

I.4.5 Centrale solaire ou photovoltaïque

a) Avantage

Faible pollution et respect de l'environnement
Adapté aux pays chauds et aux sites isolés
L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
Installations avec un coût d'installation et de maintenance réduit.

b) Inconvénients

- Coût encore élevé
- Puissance assez faible
- Disponibilité.

I.5 Conclusion

Les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique. Elles permettent le développement futur et sont une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux. Il y a plusieurs énergies renouvelables qui existent mais sont peu utilisées par l'Homme car elles ont un coût élevé. Leur création est dû aux changements climatiques et à la pollution et aux gaz échappés des industries. Elles ont des avantages propres à elles : elles sont inépuisables, respectueuses de l'environnement (aucun déchets rejetés dans la nature) comparées aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. Elles aident aussi à lutter contre l'effet de serre et la pollution atmosphérique. Elles sont aussi source d'emplois. Un argument permet de parler plus des énergies renouvelables, c'est l'épuisement des énergies fossiles (charbon, pétrole, ...).

II.1 Introduction

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 (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [4].

II.2 Système photovoltaïque (Energie photovoltaïque)

II.2.1 Définition

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. Les systèmes photovoltaïques les plus couramment rencontrés sont : les systèmes autonomes, et les systèmes connectés au réseau électrique [5].

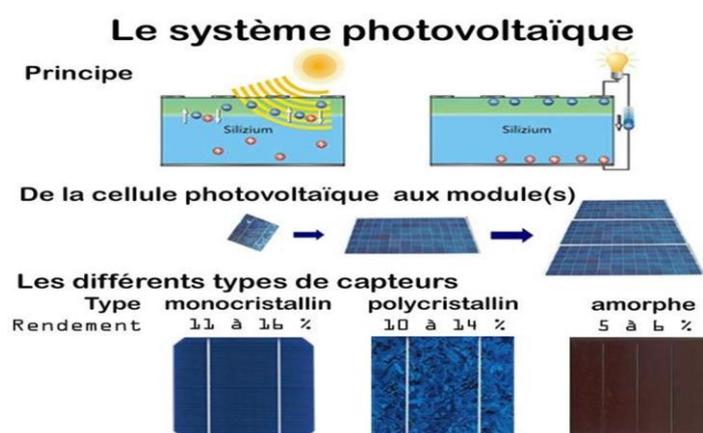


Fig 2.1 système Photovoltaïque

a) Système autonome

Un système autonome photovoltaïque répond aux besoins en électricité de ceux qui sont trop éloignés et n'ont pas accès aux réseaux de distribution. Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries. Il se révèle particulièrement adapté pour des applications comme une pompe dans le jardin, l'éclairage en zone isolée, l'alimentation de bornes téléphoniques le long de l'autoroute, etc. La figure 2.2 représente l'exemple d'un système PV autonome avec stockage. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques. Le système autonome doit être capable de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse. Si on a besoin du courant toute l'année, la période de moindre irradiation est l'hiver (pour l'Algérie). Pendant cette période, il faudra plus de panneaux pour couvrir les mêmes besoins qu'en été. Les batteries donnent une autonomie au système pour des applications nocturnes ou quand les panneaux ne fournissent pas assez de courant [6].

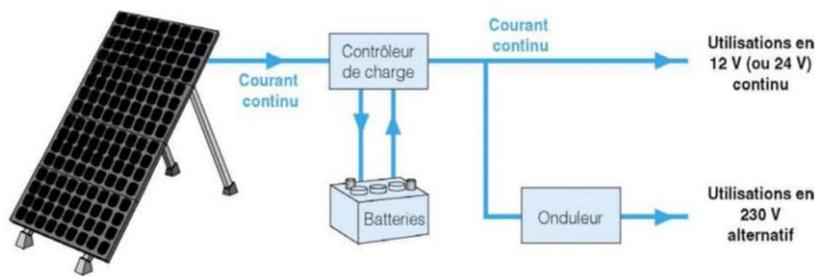


Fig 2. 2 Système photovoltaïque autonome avec stockage.

b) Système connectée au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau permettent la décentralisation de la production sur le réseau électrique. Ces installations sont raccordées au réseau électrique public dans lequel elles injectent l'électricité qu'elles produisent. L'électricité générée n'est donc pas stockée mais fournie au réseau local de distribution. Ces systèmes couplés directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur DC-AC (onduleur). La figure 2.3 présente un système PV connecté au réseau électrique. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui prend en charge l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Il est impératif de convertir le courant continu produit par le système photovoltaïque en un courant alternatif synchronisé avec le réseau. Afin d'effectuer cette conversion, un onduleur de tension est mis en œuvre. Le rendement typique d'un onduleur est d'environ 95%, il en existe de différentes puissances et sont conçus spécifiquement pour les applications photovoltaïques [6].

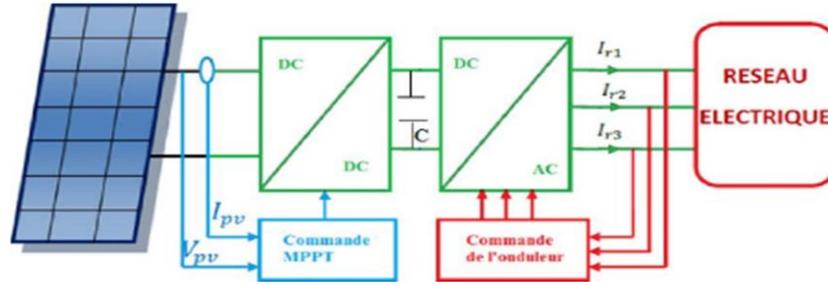


Fig 2. 3 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

II.2.2 Principe de fonctionnement

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.

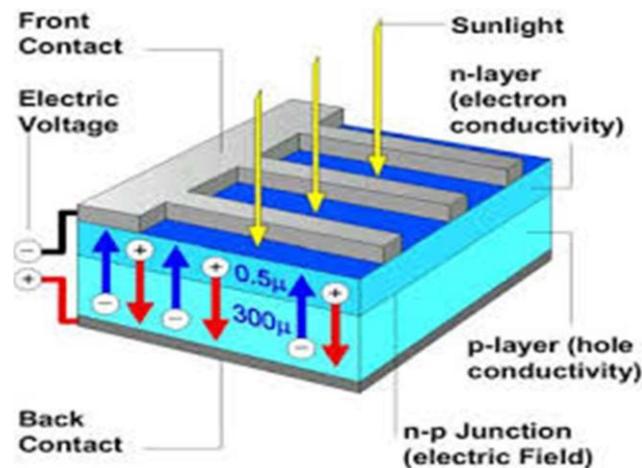


Fig 2.4 Coupe d'une cellule PV.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [5].

II.2.3 La chaîne de fabrication

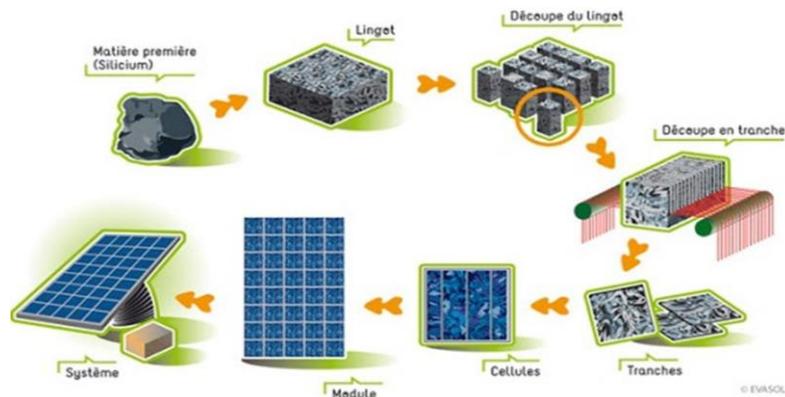


Fig 2.5 fabrication d'un Syst. PV.

II.3 Cellule photovoltaïque

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe :

- Absorption de la lumière incidente.
- Collection des électrons en surface.

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin, un semi-conducteur. Une des faces de la cellule est dopée **n** (par exemple du phosphore). L'autre est dopée **p** (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique.



Fig 2.6 Cellule PV au silicium

poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

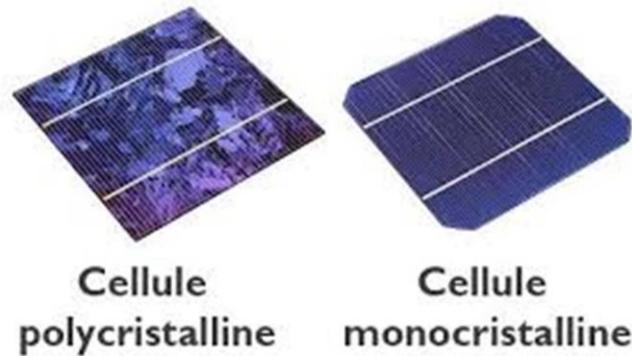


Fig 2.8 cellule mono et poly cristalline

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 12% à 14% (poly-cristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), au niveau des modules commerciaux les plus largement utilisés [5].

b) 2^{ème} génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (*thin film*). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

CdTe : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)

CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide

Silicium en couche mince : silicium amorphe α Si et microcristallin

A noter que le tellurure de cadmium est un alliage de métal lourd, très toxique, et peut –tout comme le plomb ou le mercure- se concentrer dans la chaîne alimentaire. L'UE en a interdit l'usage pour les appareils électriques... exception faite pour les cellules PV...

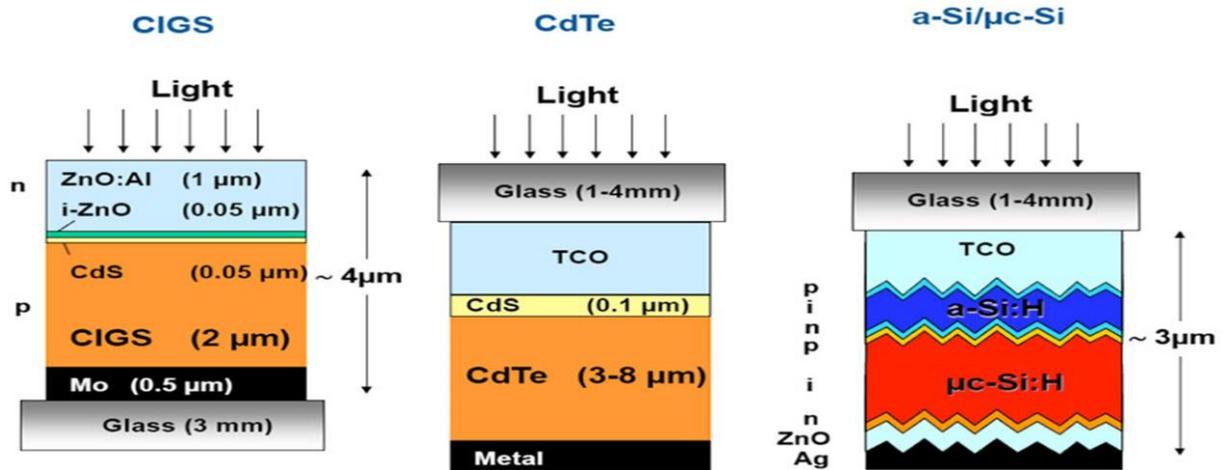


Fig 2.9 Coupes des cellules de deuxième générations

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% (αSi) à 5 à 11% (CdTe) (efficacité des cellules, les modules présentant une efficacité un peu moindre due aux espaces entre les cellules) [5].

c) Technologies photo-électro-chimiques (DyeSensitisedCell et Organic PV)

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types :

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

Apparues dans les années 1990, ces technologies ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires.



Fig 2.10 Cellule PV. Organique en polymère.

Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd’hui que dans le secteur de l’électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d’autres applications devront voir le jour dans les années à venir.

Encore au stade de recherche expérimentale, le record de rendement est compris entre 4 et 5% en laboratoire. Avant une possible commercialisation, des avancées concernant l'efficacité et l'encapsulation doivent encore être réalisés [5].

Tab (02.1) : avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques[4].

Types	Silicium monocristallin	Silicium poly cristallin	amorphe
Durée de vie	< 35 ans	5 ans	10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct.	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l’amorphe).	Souplesse prix moins élevé que les cristallins. Bon rendement en diffus.
inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

II.3.3 Modélisation

a) Cellule photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être représentée de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec un courant continu DC une diode qui correspond à l’aire de transition p-n de la cellule PV [4].

Après la loi de nœuds : $I = I_{ph} - I_d$ (2.1)

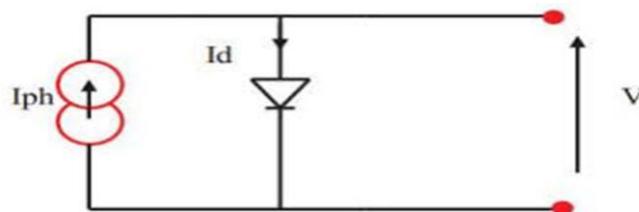


Fig 2.11 Modèle de cellule PV idéal

Pour générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_d$ (2.2)

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_o. \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (2.3)$$

Avec :

I_o : le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : la tension à la borne de diode.

V_t : KT/q potentiel thermique ; donc la relation sera :

$$I = I_{Ph} - I_o. \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (2.4)$$

b) Cellule photovoltaïque réel

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle $R_p=R_{sh}$ [4].

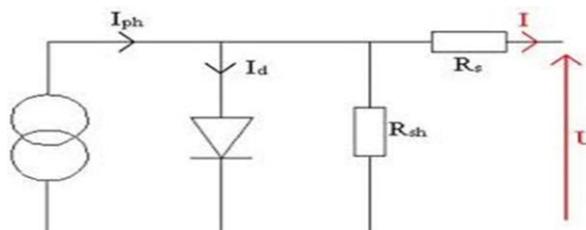


Fig 2.12 Modèle de cellule PV réel.

Donc on a :

$$I = I_{Ph} - I_d - I_p \quad (2.5)$$

$$I_p = \left(\frac{V + R_c I}{R_p} \right) \quad (2.6)$$

$$I_d = I_o. \left(\exp\left(\frac{V + R_c I}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (2.7)$$

Avec :

$V=U$: la tension au borne de la diode.

I : le courant fourni par la cellule.

$I_{ph} = I_{sc} \cdot (G/1000)$: le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : le courant de saturation de la diode.

K : constante de BOLTZMAN ($1.381 \cdot 10^{-23}$ joule/kelvin).

q : charge d'électron = $1.602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : le facteur de qualité de diode.

T : la température de cellule en kelvin.

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V+R_c \cdot I}{n \cdot R_p}\right) - 1 \right) \quad (2.8)$$

II.3.4 Evolution des rendements des différents types de cellule

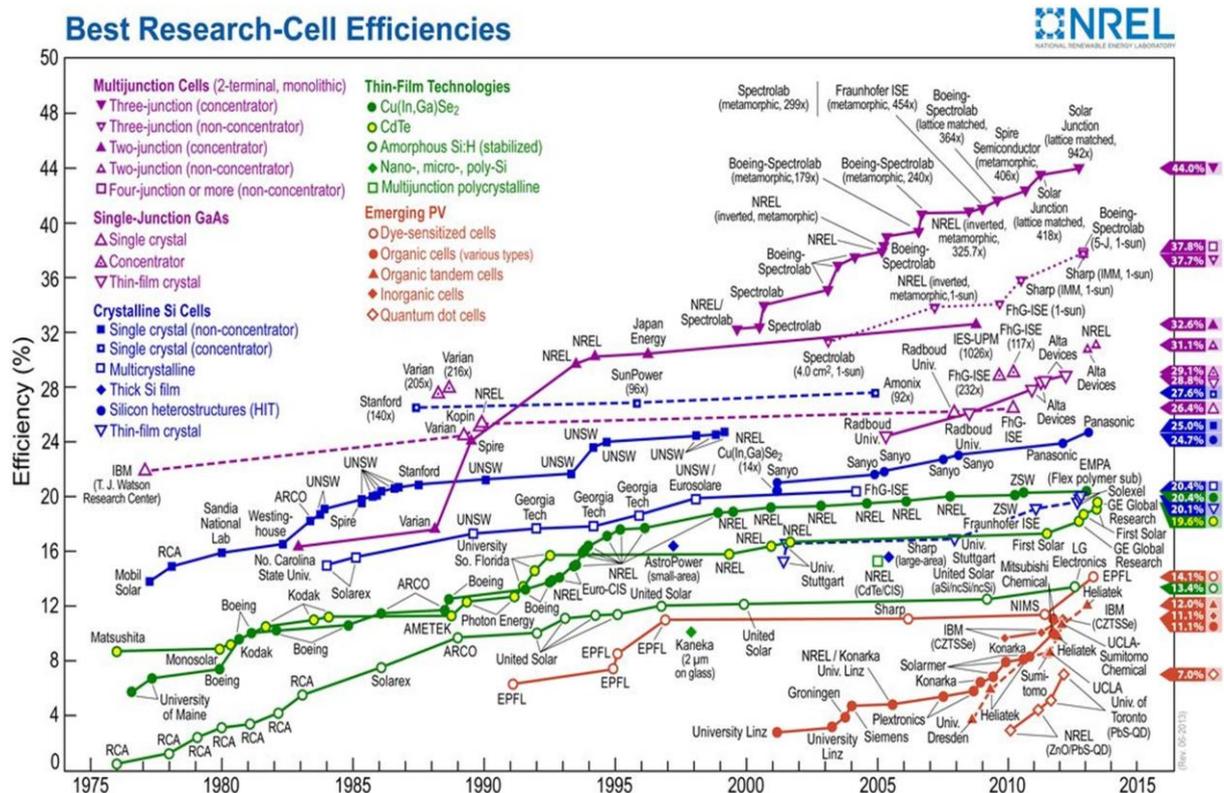


Fig 2.13 Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire[5].

II.4 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène[7].

II.4.1 Les caractéristiques d'un module PV

a) La tension en circuit ouvert

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert UCO ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement)[7].

b) Le courant de court-circuit

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit ICC. De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande [7].

c) La puissance maximale

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale U_m et à une intensité maximale I_m . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m²), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (W_c) [7].

Tableau (2. 1): Caractéristiques électriques du module BP MSX62 de BP Solaire

Température	<i>T</i>	25	°C
Tension de circuit ouvert	<i>Voc</i>	21.0	V
Courant de court circuit	<i>Icc</i>	3.8	A
Tension de puissance maximale	<i>Vm</i>	16.03	V
Courant de puissance maximale	<i>Im</i>	3.5	A
Puissance maximale	<i>Pm</i>	62.13	W

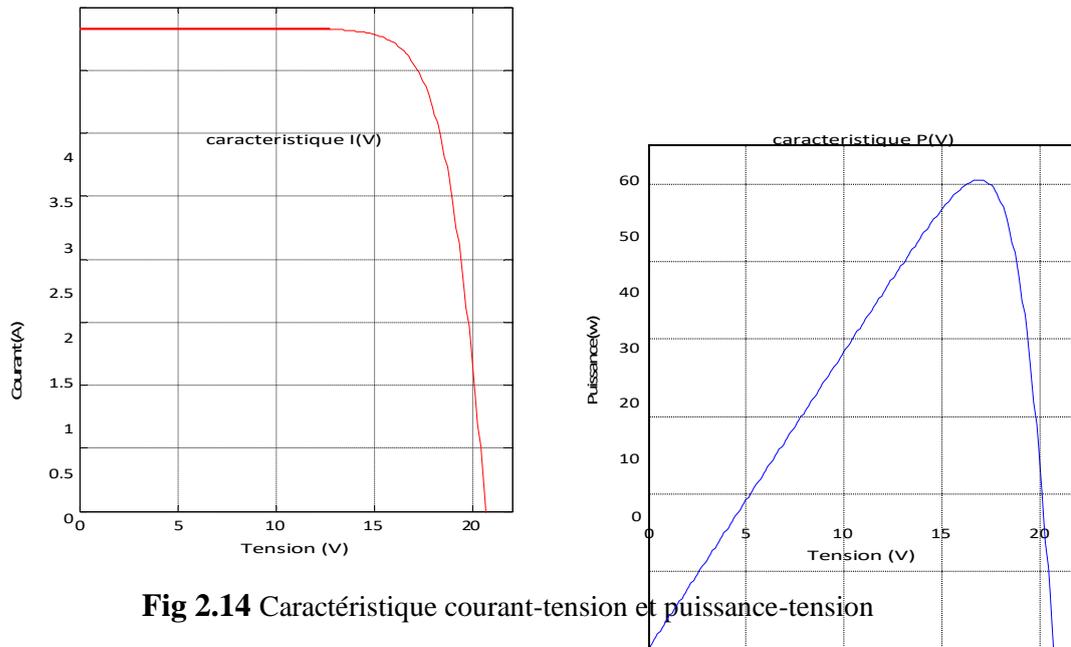


Fig 2.14 Caractéristique courant-tension et puissance-tension

d) Le rendement

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit *S* la surface du module et *E* l'éclairement en W/m², ce rendement a pour formule:

$$\eta = \frac{P_m}{S \cdot E} \tag{2.9}$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température [7].

II.5 Générateur photovoltaïque

Le câblage série/parallèle des panneaux est utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées, ce dernier que l'on appelle un central photovoltaïque [7].

II.6 Panneau photovoltaïque

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenté la tension) et en parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- Des besoins en électricité
- De la taille du panneau
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisation
- De la saison d'utilisation [7].

a) Association des cellules photovoltaïques en parallèles

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue en association en parallèle (indice p) N_p cellules identiques[4].

b) Association des cellules photovoltaïques en séries

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [4].

c) Fabrication d'un panneau photovoltaïque

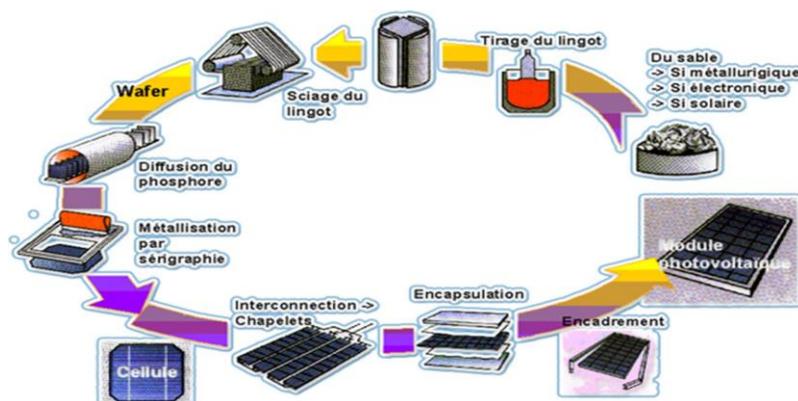


Fig 2.15 les étapes de fabrication d'un panneau PV

II.7 L'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires. La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sortie d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control » par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit [8].

II.7.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde .Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion :

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé [8].

a) Onduleur monophasée

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

- Onduleur monophasé en demi-point.
- Onduleur monophasé en pont (Pont H) [8].

b) Onduleur triphasée

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance .La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [8].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants du système photovoltaïque. Nous avons étudié le principe de fonctionnement photovoltaïque, d'une cellule photovoltaïque ses paramètres et son modélisation.

III.1 Introduction

Le système de génération hybride et autonome est constitué d'un générateur d'énergie éolienne (GEE) et d'un générateur d'énergie photovoltaïque (GPV) avec la méthodologie de contrôle adéquat. Pour fournir une quantité d'énergie plus fiable pour les clients, nous devons monter une configuration de système basée sur les deux sources primaires. La troisième source de l'énergie renouvelable utilisée est la pile à combustible (P à C) servant à compenser la discontinuité de l'irradiation solaire et éolienne, et augmentant le rendement et l'efficacité [13].

L'énergie hydrogène est l'une des meilleures options pour une énergie propre si vous pouvez la convertir en énergie électrique, ce que permet la pile à combustible. Nous présenterons les propriétés intéressantes de la pile à combustible, sa structure et son fonctionnement.

III.2 Technologie d'hydrogène

Face à l'accroissement incessant de la consommation énergétique et aux problèmes environnementaux qu'il soulève, il est urgent d'opérer des choix de société. Deux solutions sont proposées. Une est de réduire la consommation globale d'énergie. Plusieurs gouvernements, conscients de cette situation, se sont mis d'accord au Japon en 1997 et ont signé le Protocole de Kyoto qui vise à réduire et à stabiliser les émissions de CO₂ pour la période 2008-2012, à des valeurs correspondant à 1990. La seconde solution consiste à développer des technologies nouvelles plus favorables à l'environnement. L'énergie d'hydrogène apparaît comme l'une des solutions les plus prometteuses car elle présente plusieurs caractéristiques intéressantes:

- ☐ énergie efficace: par rapport au pétrole ou au charbon, l'hydrogène de poids équivalent libère environ 3 fois plus d'énergie que le pétrole, environ 6 fois plus d'énergie que le charbon.
- ☐ énergie propre: production d'hydrogène sans pollution.

Source fiable: l'hydrogène est très abondant et très accessible dans la nature.

Grâce aux nombreux avantages, l'hydrogène est une énergie très respectueuse de l'environnement. La recherche de nouvelles technologies d'utilisation a été encouragée et entreprise, afin de développer des systèmes de conversion ou de production d'énergie électrique. Les piles à combustible apparaissent comme l'une des meilleures solutions pour la transformation de l'hydrogène en énergie électrique [9].

III.3 Définition

III.3.1 Définition d'une pile à combustible

Une pile à combustible transforme directement l'énergie chimique en énergie électrique via une réaction redox (oxydoréduction) comme une pile classique [10].

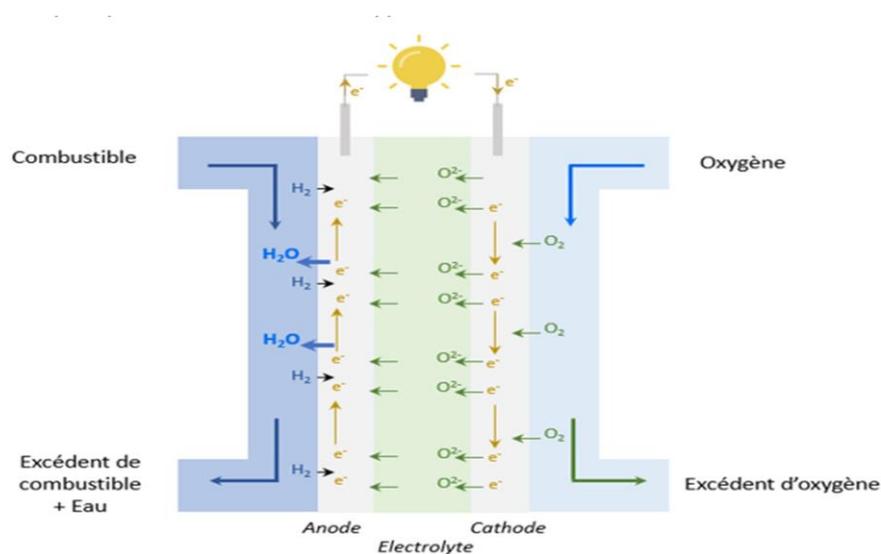


Fig 3.1 Composantes fondamentales d'une PAC.

III.3.2 Définition d'un système hybride

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage de sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un système hybride à source d'énergie renouvelable (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride [11].

a) Etude des systèmes hybride

✚ Critère d'optimisation

✚ La probabilité de perte de la charge

(lost of load probability) ou la probabilité de perte d'approvisionnement (loss of power supply probability) Ces deux critères sont univoques et rendent compte du rapport énergie non satisfaite et énergie totale consommée sur la période d'étude choisie. En générale, le calcul de ce paramètre est réalisé en utilisant l'équation (3.1):

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{load,i} - E_{prod,i})}{\sum_{i=1}^N E_{load,i}} \quad (3.1)$$

Où $E_{load,i}$ est l'énergie demandée par le consommateur pour la période i , $E_{prod,i}$ est l'énergie produite, et m est le nombre de période pour lesquelles la recherche est réalisée [12].

Le cout d'énergie produite

Diverses approches sont utilisées pour le calcul du coût : il dépend de l'énergie demandée par le consommateur, du coût d'investissement initial pour l'achat des composants du système, du coût de leur installation, du coût de maintenance et de remplacement (pour les éléments qui ont une vie d'exploitation plus courte que celle de l'élément qui définit la vie d'exploitation du système hybride) etc... [13][14].

Logiciel de dimensionnement

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement parmi lesquels les plus connus sont :

- REMI **Hybrid2** — ce logiciel est destiné à l'étude de différents systèmes hybrides avec divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer une analyse économique. La présentation des résultats peut être réalisée de deux manières—des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps.
- REMI **HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)** — avec ce logiciel, il est possible de modéliser des systèmes hybrides qui travaillent en parallèle avec le réseau électrique ou en régime autonome. Il dispose de modèles de générateurs conventionnels et à sources d'énergie renouvelables. De plus, le logiciel contient des algorithmes d'optimisation à l'aide desquels il est possible de choisir le meilleur système hybride.
- REMI **RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator)** — c'est un logiciel de simulation pour différents modes d'un approvisionnement en courant alternatif. Il peut être utilisé pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques, de générateurs éoliens et diesel dans des systèmes hybrides isolés. De plus, il faut signaler que l'utilisation de ces logiciels a des inconvénients puisqu'ils limitent les modifications de l'utilisateur et empêchent une analyse approfondie des systèmes hybrides à cause du code protégé [14].

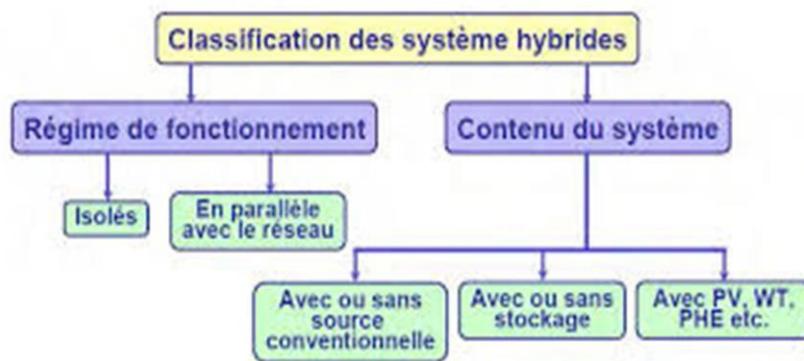
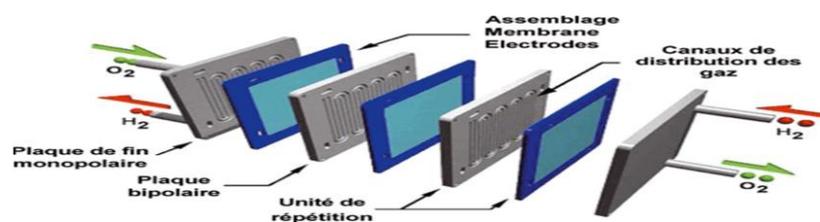


Fig.3.2 Classification des systèmes hybrides[14].

III.4 Classification

III.4.1 Structure d'une PAC

1)



2)

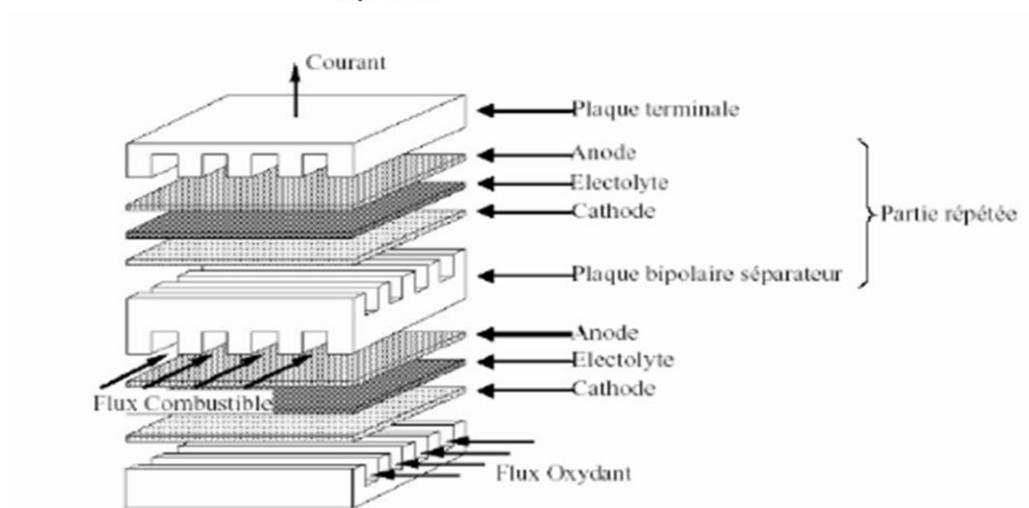


Fig 3.3 coupé d'une PAC(1-2)[11].

III.4.2 Fonctionnement d'une PAC

Une pile à combustible est un générateur d'électricité transformant de l'énergie chimique d'un gaz ou liquide combustible en énergie électrique. De manière générale, le combustible est de l'hydrogène et il se combine avec de l'oxygène pour former de l'eau selon la réaction chimique (équation 3.2). Cette relation correspond à celle de la combustion de l'hydrogène. L'énergie de cette réaction est libérée sous forme de chaleur et sous forme d'électricité. La combustion se produit à l'aide d'un catalyseur à base de platine (Pt).



Pour quantifier l'énergie fournie lors de la réaction, le repère généralement utilisé est l'énergie libérée lors de la combustion des réactants. Cette énergie est appelée enthalpie ΔH , elle dépend de l'état des réactants avant et après la réaction. L'enthalpie de réaction est définie par

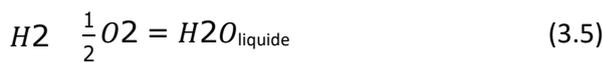
$\Delta H_R = \Delta H_{\text{produits}} - \Delta H_{\text{réactifs}}$. Pour la combustion de l'hydrogène créant de l'eau, on considère deux possibilités.

La première est la création d'eau sous forme de vapeur (équation 3.3):



$$\Delta H = -24183. \text{KJmol}^{-1} \quad (3.4)$$

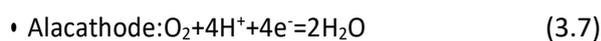
Si l'eau est condensée après la combustion, la valeur de l'enthalpie change (équation 3.4):



$$\Delta H = -28584. \text{KJmol}^{-1}$$

La différence entre les deux valeurs correspond à l'enthalpie d'évaporation de l'eau, ou chaleur latente. La valeur négative de ΔH explique la création de chaleur ($\Delta H < 0$) lors de la réaction.

Dans le cas particulier de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), les deux demi-réactions s'écrivent:



Le transport des protons à travers l'électrolyte est assuré par les molécules d'eau qu'il contient. Ainsi, la PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C, de façon à maintenir l'eau contenue dans la membrane sous forme liquide. Un assèchement de la membrane induit une augmentation de la résistance protonique et ainsi à une diminution des performances électriques.

la pile. La gestion de l'eau doit donc être particulièrement soignée. . Le transport de l'eau dans la membrane supposée dense est la résultante de deux phénomènes opposés. Du fait d'une différence d'activité de part et d'autre de la membrane, il existe un flux diffusif d'eau qui aurait tendance à s'établir de la cathode vers l'anode puisque l'eau est produite à la cathode (équation 3.7). D'autre part, la migration des cations de l'anode vers la cathode sous l'effet du champ électrique, engendre un flux d'eau de même sens dû à l'électro-osmose (drainage de molécules d'eau dans les sillages des porteurs de charge). En ce sens, les degrés d'humidification des gaz se révèlent importants. Après avoir expliqué le principe de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEMFC, nous allons nous intéresser aux problématiques des piles à combustible dans les applications transport [11].

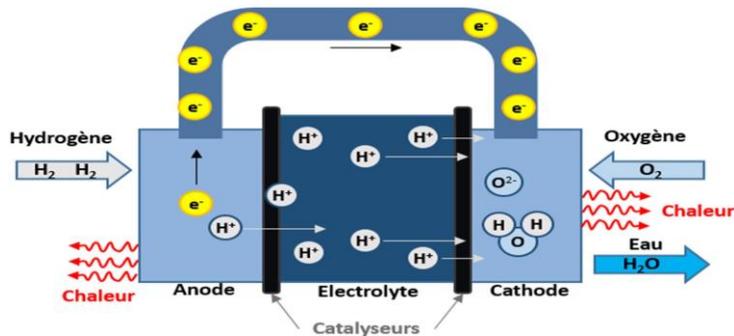


Fig 3.4 Schéma de principe de la PAC à hydrogène.

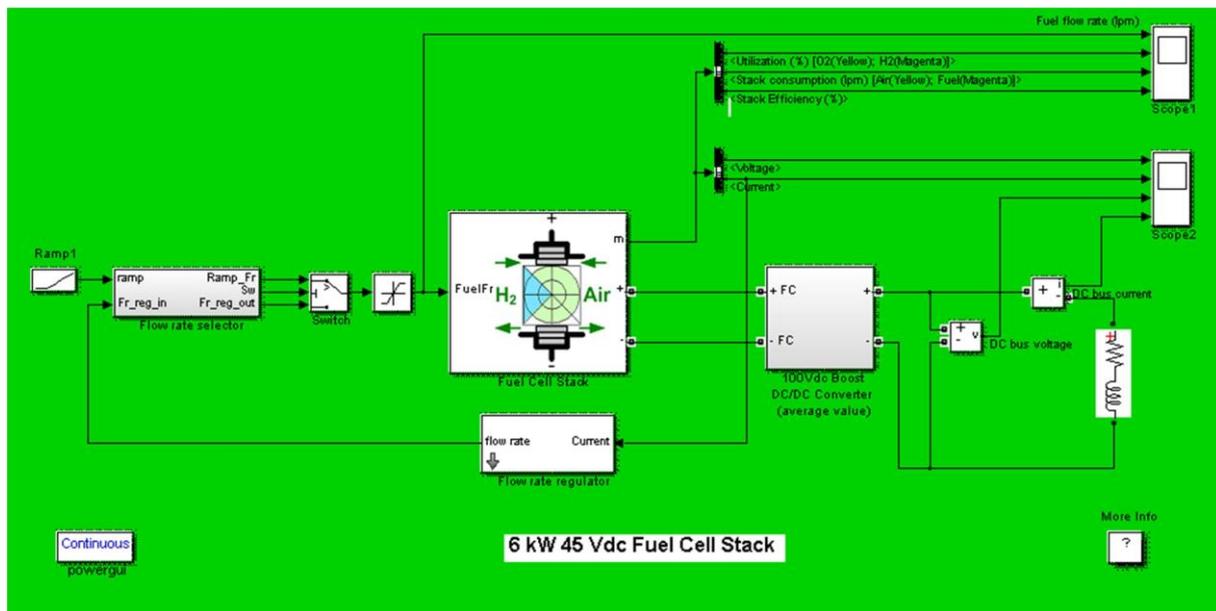


Fig 3.5 Diagramme de système PAC sous l'environnement de matlab

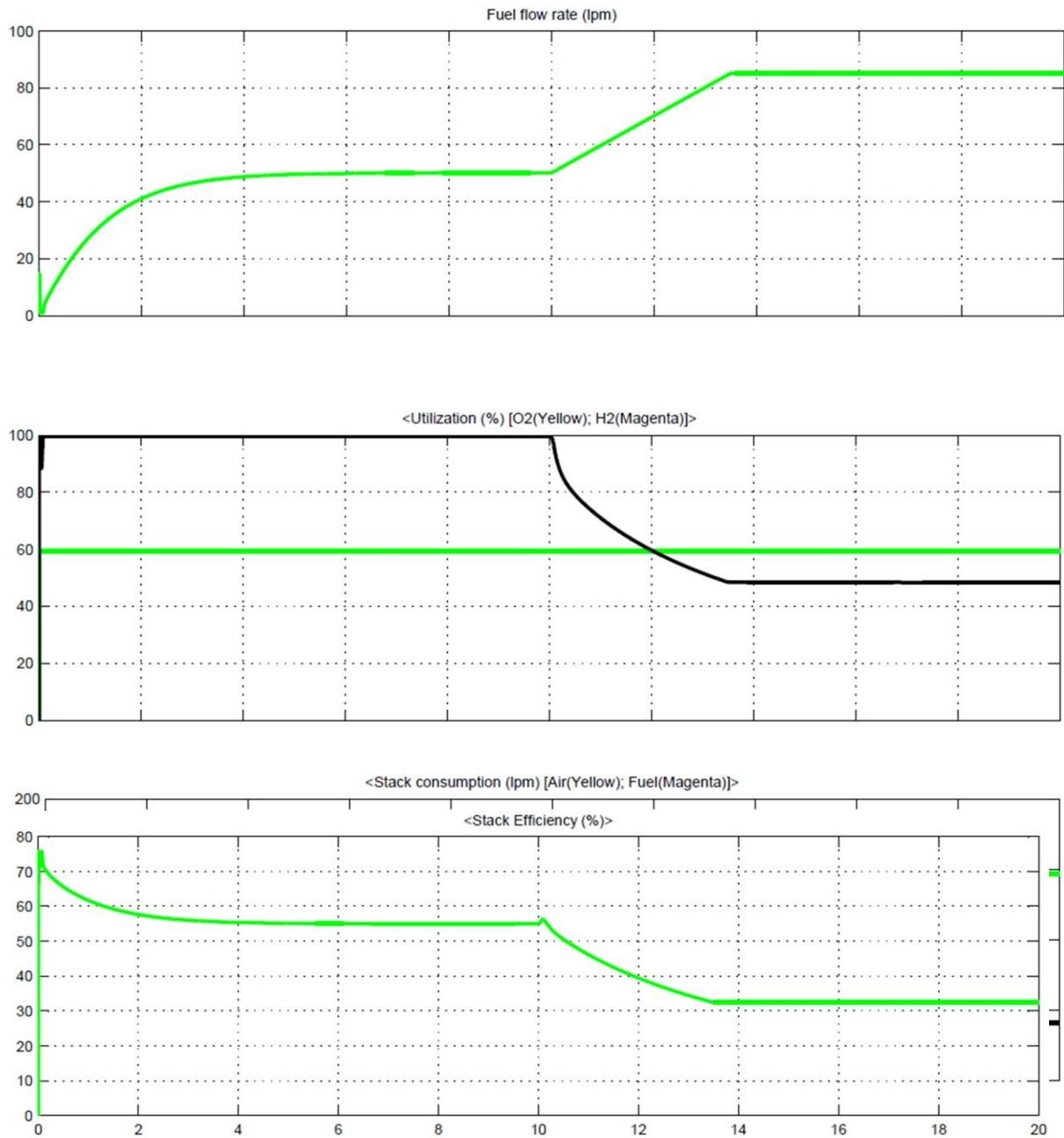


Fig 3.6 Résultats de la simulation

III.4.3 Structure d'un 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. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une microturbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complète, une centrale entière. 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 la période d'absence d'une ressource primaire convertie en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir à hydrogène, des volants d'inertie, etc...

La dernière classification possible est celle relative au type de la source d'énergie renouvelable utilisée, la structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur hydraulique (une centrale hydroélectrique, l'utilisation des vagues ou bien une combinaison de ces deux sources). Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit de l'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 d'une source conventionnelle, etc...[13].

a) Etude des structures du système hybride

Système hybride Photovoltaïque / Stockage

L'installation photovoltaïque 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. Certains travaux traitent de modélisation et d'analyse, d'autres de dimensionnement optimisé des composants du système. Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation. Ils présentent des résultats de 6 systèmes d'une puissance totale de 6,3 kW et des résultats de systèmes hybrides implantés dans des centres de recherche. La stratégie de gestion de l'énergie a été étudiée par des algorithmes pour le suivi du point de puissance maximale qui ont été développés à partir de la logique floue. Le stockage est parfois idéal, un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie ou électrolyseur et super condensateur. L'utilisation de super condensateurs est de conception très récente et, ils sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en termes de quantité stockée mais plus lent[13].

Système hybride éolien / Stockage

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un 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, soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors des périodes de faible vitesse du vent. Le réseau électrique peut être de grande taille, ou de faible taille (réseau insulaire).

Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage, soit un bâtiment (hôtel) et même un village. Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène, une combinaison des deux, un stockage par air comprimé, des aimants supraconducteurs ou une combinaison d'un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène et un supercondensateur. Lorsque le système opère en parallèle avec le réseau électrique, la stratégie de gestion de la puissance joue un rôle important. Sur le plan économique, certains auteurs se contentent de donner les prix des divers organes du système, d'autres approfondissent l'analyse économique en calculant le prix du kilowattheure produit [13].

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 du kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie.

Ils peuvent assurer l'alimentation des cellules 3G d'opérateurs mobiles, des ménages ou des villages. Ils sont installés sur tous les continents : en Afrique : Algérie, Asie : Syrie, Malaisie ; au Brésil ; et en Amérique du Nord : Canada. Ces systèmes fonctionnent le plus souvent en régime autonome, mais il existe des travaux sur des systèmes connectés au réseau électrique. Les dispositifs de stockage sont le plus souvent des batteries, parfois un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de batterie et stockage d'hydrogène. Les modèles de comportement ont pour paramètres d'entrée les valeurs du rayonnement solaire et les vitesses du vent horaires, les valeurs moyennes mensuelles ou une distribution statistique de Weibull [13].

III.4.4 Fonctionnement d'un système hybride

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve le système hybride travaillant en parallèle avec le réseau électrique et aussi connecté au réseau. Ce système contribue 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, le cas d'un refuge de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc... [13].

III.5 Les différents types de la pile à combustible

L'électrolyte doit être un isolant électronique et un conducteur ionique. Il peut être soit liquide, soit solide. Les plaques bipolaires permettent l'accès des gaz par la présence de canaux, jusqu'aux sites réactionnels. Il existe six types de piles à combustible qui, suivant l'électrolyte, fonctionnent à différentes températures.

- ☐ Pile alcaline (Alkaline Fuel Cell)
- ☐ Pile à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- ☐ Pile à membrane fonctionnant au méthanol (Direct Methanol Fuel Cell)
- ☐ Pile à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell)
- ☐ Pile à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell)
- ☐ Pile à oxyde solide (Solid Oxid Fuel Cell) [11].

Tab (03.1): types des piles à Combustibles [11].

Pile à combustible	Electrolyte	Température C	Combustible	Comburant
AFC	Solution KOH	<100	H ₂ pur	Air ou O ₂ pur
PEMFC	Membrane à échange de proton (à base de fluor)	50-85	H ₂ pur	Air ou O ₂ pur
DMFC	Membrane à échange de protons	60-120	CH ₃ OH	Air ou O ₂ pur
PAFC	Acide phosphorique	160-220	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	Air
MCFC	Mélange de Li ₂ CO ₃ et de K ₂ CO ₃	600-800	H ₂ , CH ₄	Air
SOFC	Oxyde de zirconium stabilisé ZrO ₂ et Y ₂ O ₃	600-1000	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH, CO	Air

III.6 Les caractéristiques d'une pile à combustible

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. La

tension à vide dite (**tension de Nernst**) est d'environ 1,23 V. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes (**pertes d'activation et ohmique**) : la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement (**pertes de concentration**).

- Tension de Nernst.
- Polarisation d'activation.
- Polarisation ohmique.
- Polarisation de concentration [12].

III.7 Les systèmes de stockage

III.7.1 Les batteries

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés, dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme. Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène [13].

III.7.2 Les piles à combustibles

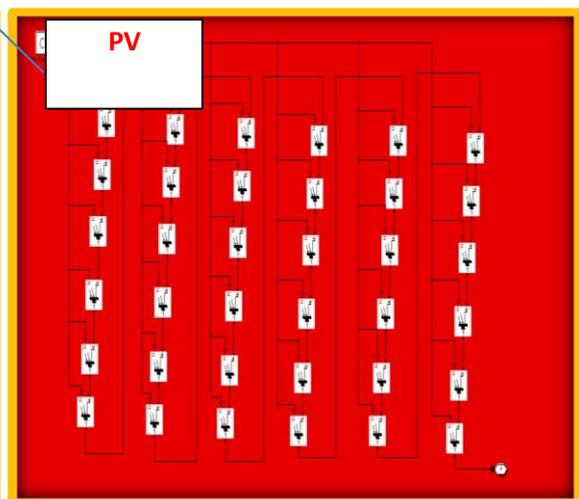
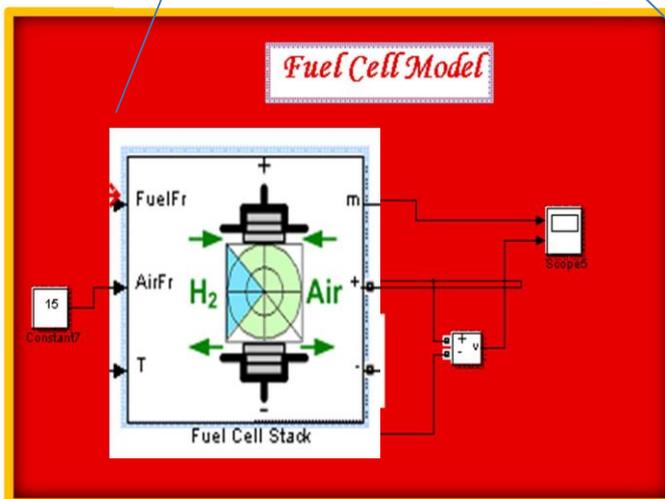
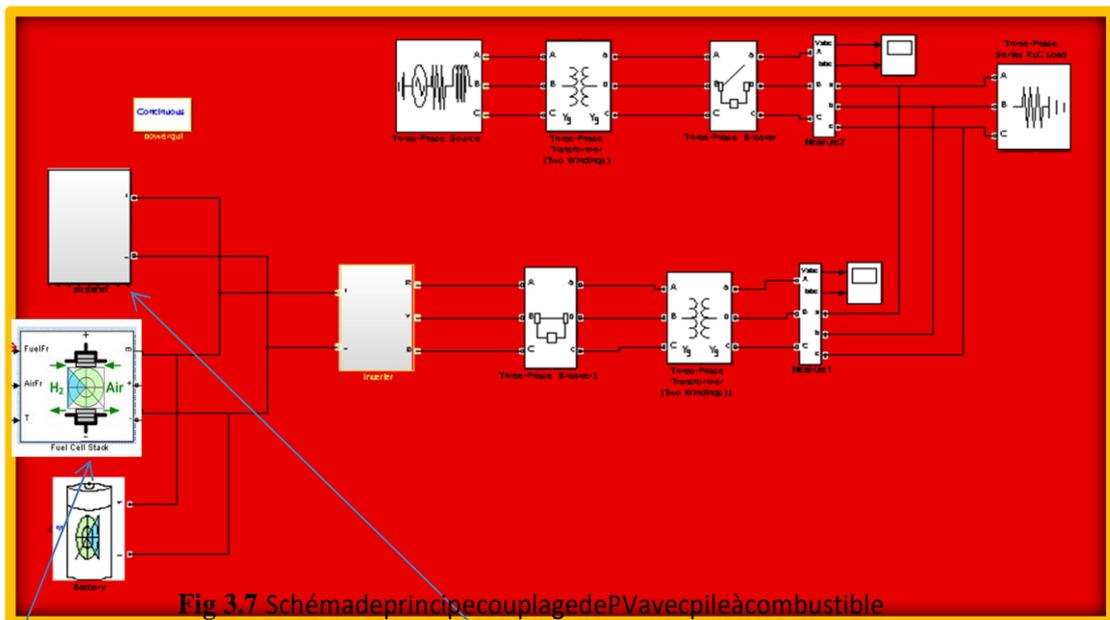
L'intérêt accru dans le monde entier à la technologie PàC rend relativement énormes, centrales, fixes de 200 W à 2 MW. Ces piles sont disponibles dans le commerce, avec des rendements allant de 30 à 50%. La pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie statique électrochimique qui produit un courant continu à travers la réaction d'hydrogène et de l'oxygène en présence d'un électrolyte, une électrode positive (cathode) et une électrode négative (anode). L'électrolyte porte des charges électriques par une électrode à l'autre. Un catalyseur est habituellement exploité pour accélérer la réaction aux électrodes. Il existe plusieurs types de piles à combustible, il a été mentionné dans le chapitre précédent [13].

III.8 Couplage photovoltaïque avec pile à combustible

Compte tenu des problèmes environnementaux sévères auxquels la planète est confrontée, l'introduction d'un nouveau vecteur énergétique, tel que l'hydrogène, doit favoriser le développement des sources primaires renouvelables telles que le solaire, l'éolien et l'hydraulique. L'hydrogène d'origine renouvelable contribuera à la diversification des approvisionnements pour les transports et permettra le stockage de l'énergie intermittente pour les applications de cogénération stationnaire. Les sources d'énergies renouvelables sont de nature intermittente. Mais le fait que l'hydrogène puisse être

stocké sans perte et en grande quantité permet d'envisager un lissage de la production électrique d'origine renouvelable et l'alimentation en continu. Il s'agit de fournir une solution permettant la production d'hydrogène très pur à partir d'électricité d'origine photovoltaïque et d'eau à partir d'un électrolyseur de type PEM. Les différents modules production électrique, "MPE", et "production d'hydrogène", "MPH" peuvent être fournis séparément. Il est toutefois à noter que l'interaction entre ces deux modules étant très forte, leur couplage nécessite une attention particulière.

L'intérêt de l'utilisation de l'hydrogène comme combustible réside dans la diversité des sources d'approvisionnement ainsi que dans l'impact possible sur l'environnement. La production locale par voie électrolytique sur des systèmes de petite capacité est une voie qui doit être examinée, car il ne faut pas oublier qu'un litre d'eau contient suffisamment d'hydrogène pour produire 2 kWh d'électricité, via une pile à combustible présentant un rendement de 55% [15].



III. 9 Conclusion

Nous avons identifié ce qu'est une pile à combustible et en quoi elle consiste, et nous avons étudié le principe de fonctionnement de cette pile à combustible. Nous parlerons aussi à la relation entre l'énergie photovoltaïque et la pile à combustible. Ces dernières années, l'utilisation des énergies renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien est en forte croissance pour la production de l'électricité. Mais ces systèmes doivent être hybridés avec d'autres sources d'énergie comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse, puis stocké et enfin réutilisé par une pile à combustible pour produire de l'énergie électrique verte.

Donc, les besoins de production d'énergie électrique et thermique sont de plus en plus nécessaires, c'est pour cela que la production d'hydrogène par des moyens autonomes comme le couplage aux énergies renouvelables ou le reformage apportés des réponses propres, fiables et plus économiques à cette nouvelle technologie [15].

Conclusion Générale

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats mais l'intermittence de leur production nécessite de trouver des moyens de stockage efficaces et respectant l'environnement.

Ce travail s'articule autour d'une l'étude de l'énergie photovoltaïque avec quelque source d'énergie renouvelable au début on a donné des généralités sur l'énergie renouvelable, différents types, différents centrale.

Après on mit des notions sur les systèmes photovoltaïques, l'effet photovoltaïque, cellule photovoltaïque, panneaux photovoltaïque.

Ensuite on a présenté le principe de fonctionnement d'un système hybride et d'une pile à combustible, la classification des systèmes hybrides.

En perspective, dans le cadre de la préparation du projet de fin d'études du master, Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible.

Bibliographie

- [1] TPE1S : Les énergies renouvelables Sites.google.com
- [2] Source : www.énergies_renouvelables.org
- [3] BoukhlifaMed.Wassim et HadeF Zinedine Mémoire de licence, L'énergie renouvelable, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR _ANNABA_2019
- [4] GrabsiaFateh et Sekehal Meriem Mémoire de Master, Structure et commande d'une installation photovoltaïque, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR _ANNABA_2017
- [5] Le photovoltaïque _Module3_Fonctionnement Et technologies, Novembre 2010 ; IBGE, Bruxelles Environnement. Infos Fiches_Énergie
- [6] BoualemBoukezata Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle(LMD), Etude et commande d'une chaine de conversion d'énergie d'un Système Solaire photovoltaïque. UNIVERITE Ferhat Abbas_Sétif1 UFAS(Algérie),
- [7] HannounAbdekarim et Djellaili Boudali, Mémoire de Master (LMD), Modélisation et Simulation d'un système Photovoltaïque Alimentant d'une charge Triphasés. UNIVERSITE Dr. Taher Moulay de Saida, 2016
- [8] OthmaneBenseddik et Fathi Djaloud, Mémoire de Master, Etude et optimisation du fonctionnement d'un Système photovoltaïque, UNIVERSITE KASDIMERBAH _Ouargla_2012
- [9] Zhiming Zhang, Thèse de doctorat, Modélisation mécanique des interfaces multi_contacts dans une pile à combustible, UNIVERSITE D'Evry-VAL D' ESSONNE, 2010
- [10] Bouras Kheira et Moussounileila, Mémoire de Master, Modélisation de systèmes réversible de types électrolyseurs et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïque, UNIVERSITE Dr. Tahar Moulay de Saida, 2017
- [11] Samir Jemeri, Thèse Présenté pour obtenir le grade de docteur de l'université de Technologie de Belfort Montbéliard et de l'université de Franche comte. Modélisation d'une pile à combustible de type PEM par réseaux de neurone, 2004.
- [12] Salem et Amel MEDDAH et MENASRIA, Etude d'un système énergétique à pile à combustible destiné à une application résidentielle, UNIVERSITE e Bechar Algérie_ Ingénieur d'état 2006

Bibliographie

[13] BORN ABDELHALIM, Magistère en Electrotechnique, Thèse Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE, ETUDE ET OPTIMISATION D'UN MULTI SYSTEME HYBRIDE DE CONVERSION D'ENERGIE ELECTRIQUE, UNIVERSITE CONSTANTINE1, FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE.

[14] Thèse préparée en cotutelle et soutenue pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN ENERGETIQUE et DOCTEUR DE L'UNIVERSITE TECHNIQUE DE SOFIA Electrotechnique, Soutenue publiquement par LudmilStoyanov, le 28 octobre 2011 Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables.

[15]M.Belatel, F.Benchikh, Z.Simohamed, F.Ferhat et F.Z.Aissous, Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC' Faculté des Sciences de l'Ingénieur, UniversitéMentouriRoute Ain-El-Bey, Constantine, Algérie (reçu le 29 Novembre 2010 – accepté le 30 Mars 2011) Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte.