

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie



Département d'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

Etude comparative entre deux sources d'énergies renouvelables

PV/PAC

Présenté par :

BAKHTI Khadidja Nour El-Houda

BENZERDA Ikram

Devant le jury composé de :

Dr. BEKRI Oum Lfadel Loubaba

Présidente

Dr. ARZAG Kaddour

Examineur

Dr.MANKOUR Mohamed

Encadreur

Soutenu le Septembre 27/09/ 2021

Promotion 2020-2021

Remerciements

Au début et avant tout, nous rends grâce à **Allah et** tout puissant qui nous a aidés à terminer ce travail.

Nous tenon à exprimer notre profonde reconnaissance au *Dr.MANKOUR.M* d'avoir bien voulu encadré ce travail et pour les conseils efficaces et les encouragements et encore plus pour tout le temps qu'il nous consacré pour nous suivre pendant la réalisation de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos professeurs pour leurs conseils et leurs critiques et d'avoir guidé nos réflexions en acceptant à nos rencontrer et répondre à nos questions durant notre recherches.

Nos vif reconnaissance sont adresser aux membres de jury *Dr. ARZAG.K et Dr.BEKRI.L* pour leur acceptation d'évaluer ce modeste travail.

Dédicace

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail
à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais
jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*Je dédie mon travail à mes chers parents mon père et ma mère et mes
cher sœurs Wiem et Maroua*

A mon neveu Rafik

A mon cousin Side Ahmed et toute ma famille

A mes cher amis Fatima, Amel et khadidja

A tout la promo réseaux électriques

*Sans oublier mon cher binôme Houda pour son soutien de moral, sa
patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

BENZERDA Ikram

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère la joie de ma vie

À ma plus chère sœur Gaidia que dieu la bénisse

À mes sœurs Hadjira Mouna Meriem kaoutar

À mon neveu Yanisse, ainsi mes petites nièces douaa alae israa djamila fatima
nihad hiba rahaf

À mes frères abdou youcef, et mes cousins

À mes chers oncles krimo mhamed fadloun zidnedinne

À tous mes amis Hamid, Wassila, Hanane, Amina et Fatima

À mes collègues que j'ai connus jusqu'à maintenant.

Sans oublier mon binôme Ikram pour son soutien de moral, sa patience et sa
compréhension tout au long de ce projet.

À ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

Merci pour leur amour et leur encouragement.

HOUDA

Chapitre I : Les énergies renouvelables

Figure I-1	la part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale	3
Figure I-2	Les énergies renouvelables	5
Figure I-3	Quantité d'électricité produite par chaque énergie renouvelable à l'horizon 2050	5
Figure I-4	L'énergie hydrolenne	6
Figure I-5	L'énergie hydraulique au niveau des barrages	6
Figure I-6	L'énergie de la biomasse	7
Figure I-7	Chauffage d'une maison par énergie géothermique	10
Figure I-8	Production d'électricité par énergie géothermique	10
Figure I-9	Panneaux solaires	12
Figure I-10	Chauffe-eau solaire	13
Figure I-11	Capteur parabolique	13
Figure I-12	Capteur cylindro-parabolique	14
Figure I-13	Une éolienne à 3 pâles	15
Figure I-14	l'énergie éolienne à rotation rapide	16
Figure I-15	l'axe de rotation est vertical	17

Chapitre II : Les systèmes photovoltaïques

Figure II-1	Rayonnement solaire au sol	22
Figure II-2	Principe de la conversion photovoltaïque	24
Figure II-3	Cellule photovoltaïque	24
Figure II-4	Dopage de type N	26
Figure II-5	Dopage de type P	26
Figure II-6	Génération de la paire électron-trou	27
Figure II-7	Passage du silicium pur à la cellule photovoltaïque mono cristalline	29
Figure II-8	cellule poly cristalline	30
Figure II-9	cellule amorphes	31
Figure II-10	Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques	31
Figure II-11	Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série	32
Figure II-12	Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_p cellules en parallèle	33
Figure II-13	Caractéristique résultantes d'un groupement hybride de $(n_p ; n_s)$ cellules identiques	34
Figure II-14	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	35
Figure II-15	Les caractéristiques de GPV en fonction de la température pour les deux éclaircements ($1000W/m^2$ et $400W/m^2$)	40
Figure II-16	Les caractéristiques de GPV en fonction de l'éclairement pour les deux températures ($25^\circ C$ et $50^\circ C$)	41

Chapitre III : La pile à combustible

Figure III-1	Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide	48
Figure III-2	Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique	49
Figure III-3	Différents types de piles à combustible	50
Figure III-4	Stack d'une pile à combustible à membrane	52
Figure III-5	Géométrie des piles PAFC	54
Figure III-6	Technologie circulaire	56
Figure III-7	Technologie plane	56
Figure III-8	Pile de Sulzer Hexis	57
Figure III-9	Eléments d'une PAC	59
Figure III-10	Schéma de principe de la géométrie tubulaire	62
Figure III-11	Technologie planaire classique	64
Figure III-12	Cellule unité de chez Sulzer-Hexis	65
Figure III-13	Un portable chargé par une PAC model POWERTREEK (MyFc).	66
Figure III-14	L'installation Siemens-Westinghouse de Irvine (220 kW) (2002)	67
Figure III-15	Schéma d'une voiture équipé de la pile à combustion	68
Figure III-16	Comportement des gaz dans la pile SOFC	69
Figure III-17	la caractéristique électrique (tension courant) d'une cellule élémentaire.	73
Figure III-18	Pertes d'activation d'une pile à combustible de type SOFC	74
Figure III-19	Pertes ohmiques d'une pile à combustible de type SOFC	75
Figure III-20	Pertes de concentration. d'une pile à combustible de type SOFC	75
Figure III-21	Densité de puissance d'une pile à combustible de type SOFC	76
Figure III-22	Rendement électrique de la cellule d'une pile à combustible de type SOFC	76
Figure III-23	L'effet de la température sur la tension d'une cellule élémentaire	79
Figure III-24	L'effet de la température sur les pertes ohmiques de la cellule	79
Figure III-25	Chute de prix des modules photovoltaïques	81

Liste des tableaux

Tableau II-1	Les paramètres du modèle photovoltaïque	38
Tableau III-2	Caractéristiques des différents types de piles à combustible.....	50
Tableau III-3	Paramètres de simulation de la pile SOFC.....	73
Tableau III-4	Polluants émis par hydrogène.....	82
Tableau III-5	Cout de production de l'hydrogène par électrolyse.	83

Liste des abréviations

PV	Photovoltaïque.
GPV	Générateur photovoltaïque.
I-V	Courant-Tension
T	Température.
E	Énergie du photon.
H	Constante de Planck.
C	Vitesse de propagation.
A	Longueur d'onde
CuO	Oxyde cuivreux
Se	Sélénium.
Si	Silicium.
GaAs	Arséniure de gallium
N	Couche avec porteurs des charges libres négatives.
P	Couche avec porteurs des charges libres positives.
K	Couche conductrice.
E_g	Énergie du «bonde gap».
eV	Électron-volt
c - Si	Silicium cristallin
a -Si	Silicium amorphe
P	Phosphore.
Br	Bore.
BV	Bande de valence.
BC	Bande de conduction
η	Rendement.
P_m	Puissance maximale.

Liste des Abréviations

S	Surface du module photovoltaïque
E	Éclairement.
Ns	Nombre des cellules en série.
Np	Nombre des cellules en parallèle
Icc	Courant de court-circuit.
Voc	Tension de circuit ouvert.
Rs	Résistance série.
Rsh	Résistance shunt
Iph	Photo-courant.
I0	Courant de saturation
A	Facteur d'idéalité de la jonction
Icell	Courant délivré par la photopile
Id	Courant de diode
IRsh	Courant shunt
Ki	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du pannea
G	Irradiation sur la surface de la cellule
Tref	Température de référence
Gref	Irradiation de référence (1000 W/m²).
IRs	Courant de fuite.
Q	Charge de l'électron
K	Constante de Boltzmann
Ipv	Courant du panneau
CST	Conditions de Test Standard
P-V	Puissance -Tension

Liste des Abréviations

a	Anode
c	Cathode
τ	Constante de temps (s)
δ	Tafel constant
B	Pente de Tafel
N	Nombre d'électrons participant à la réaction
R	Résistance ohmique (Ω)
IL	Courant de limitation (A)
E	Potentiel réversible en circuit ouvert (V)
Eo	Potentiel cellulaire réversible standard (V)
I	Courant de pile (A)
Vs	Tension de pile (V)
Va , Vc	Le volume (V)
Vact	Pertes d'activation (V)
V	ohm Pertes ohmiques (V)
Vconc	Pertes de concentration (V)
R	Constante de gaz, 8.3143 j/(mol k)
T	Température du gaz (K)
Ts	Température cellulaire (K)
F	La constante de Faraday (96487 C/mol)
N0	Nombre de cellules dans la pile
Mi	Débit molaire des espèces i (mol/s)
H2	Hydrogène
O2	Oxygène
H2O	Eau
PH2	Pression partielle d'hydrogène (atm)

Liste des Abréviations

PH₂O	Pression partielle de l'eau (atm)
PO₂	Pression partielle d'oxygène (atm)
q_O	Débit d'oxygène à l'entrée (mol/s)
q_H	Débit de carburant en entrée (mol / s)
in	Entrée
out	Sortie
PAC	pile à combustible
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membranes Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell

An orange scroll banner with a gradient from light orange to a slightly darker shade. It has a vertical strip on the left side that looks like a scroll edge, and the top and bottom edges are slightly curved. The text is centered on the banner.

Introduction générale

Introduction générale

Le terme d'énergie renouvelable est souvent assimilé à celui d'énergie propre ou propre et sûre. Une énergie propre ne produit pas ou peu de polluant, ou bien elle produit des polluants sans conséquences pour l'environnement.

La grande partie de l'énergie consommée par l'homme provient des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...etc.) dont l'utilisation massive conduit à l'épuisement de ses réserves et suppose une menace réelle à l'environnement, qui se manifeste, principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Sans oublier aussi qu'il y a une inégalité extrême de la distribution de la consommation de l'énergie. Beaucoup de populations, spécialement dans les zones rurales isolées des pays en voie de développement qui bénéficient d'un fort ensoleillement, sont confrontées à de grands problèmes pour satisfaire leurs besoins en énergie. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) de par ses caractéristiques de modularité qui permet de l'adapter à des besoins énergétiques divers, autonomie, fiabilité et viabilité sur le plan économique, permet d'apporter de réelles solutions telles que l'éclairage public et domestique, le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation, ...etc.

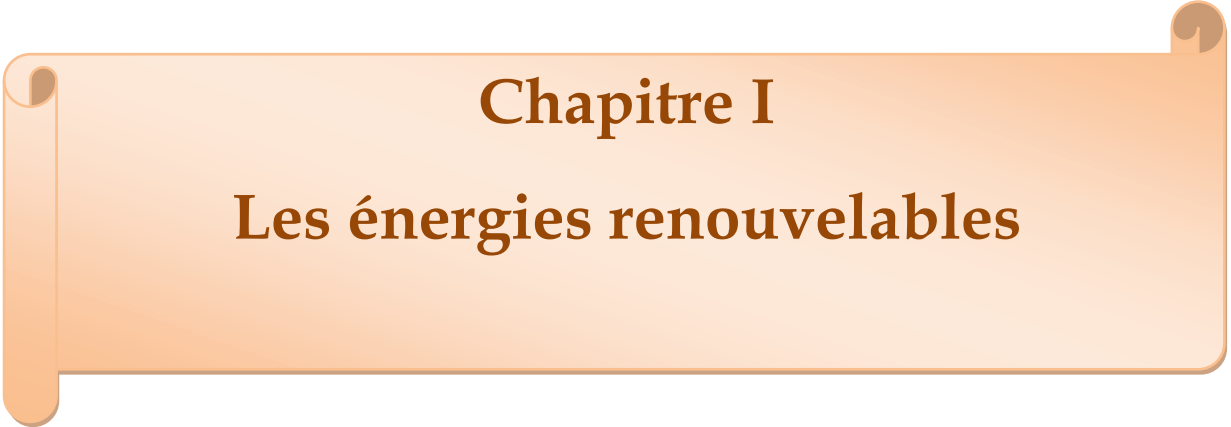
La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Initialement liée à la conquête spatiale où elle a prouvé ses qualités technologiques, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, dans les pays en développement ou en voie de développement qui bénéficient d'un fort ensoleillement, a jusqu'à présent trouvé ses débouchés préférentiels dans des installations en sites isolés, de moyennes et petites puissances.

La pile à combustible a la particularité de s'appuyer sur un procédé électrochimique simple, mais elle reste complexe à mettre en œuvre. Cette technologie est portée par l'espoir que suscite l'hydrogène. En effet, l'hydrogène constitue une partie de la plus abondante ressource naturelle de la terre. Son utilisation au moyen de la pile à combustible a l'avantage non négligeable de ne rejeter que de la chaleur et de l'eau pure. Elle constitue alors un générateur totalement propre.

Pour réaliser notre recherche nous avons divisé les travaux en trois chapitres :

- Le premier chapitre exposera les énergies renouvelables en générale;
- Le deuxième chapitre sera consacré au système d'énergie solaire. Nous présenterons tout d'abord, une définition générale sur l'énergie photovoltaïque et ses composantes. Puis on fera une simulation avec les résultats obtenus ;
- Le troisième chapitre contiendra en premier lieu des généralités sur la pile à combustible, ses types, ainsi que son principe de fonctionnement. En deuxième lieu, nous allons étudier la simulation d'une pile à combustible. Et pour finir on fera une étude comparative entre les deux sources d'énergies renouvelables PAC/PV.
- Nous terminerons notre travail par une conclusion générale dont laquelle nous présenterons les résultats de notre recherche et quelques perspectives.

An orange scroll banner with a gradient from light orange to a darker shade at the edges. It has a vertical strip on the left side and small circular details at the top and bottom corners, giving it the appearance of a rolled-up piece of paper.

Chapitre I

Les énergies renouvelables

I-1 Introduction :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables.

Il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

I-2 Définition des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables constituent près de 10% de la part énergétique mondiale. 9% de ces 10% concernent des énergies renouvelables facilement stockables comme l'hydraulique (3%) et la biomasse (6%). La part des autres énergies nouvelles est très marginale dans le modèle énergétique mondial : éolien 0,04 %, solaire 0,01 %.(Figure : I-1)

Dans le domaine de la production d'énergie la transition énergétique nécessite que l'on fasse appel à toutes les sources d'énergie disponibles n'impliquant pas des carburants fossiles émettant des gaz à effet de serre. Donc toutes les formes d'énergies renouvelables sont appelées à être des composantes du modèle énergétique futur. Les caractéristiques, de ces énergies font qu'on doit examiner les avancées scientifiques et technologiques susceptibles d'accélérer leur déploiement.

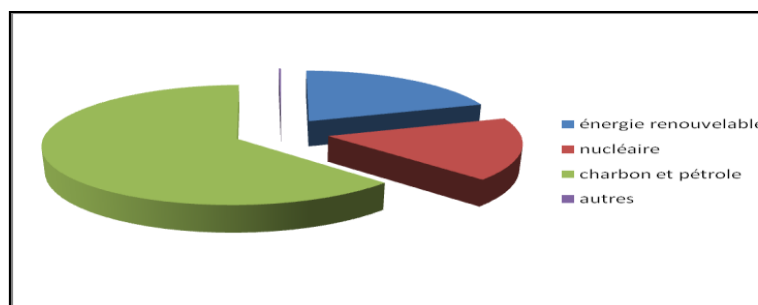


Figure I-1 : la part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale. [7]

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossile et nucléaire à plusieurs titres :

- Elles perturbent généralement moins l'environnement, n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets.
- Elles sont inépuisables.
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux.
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent :

- L'énergie à finalité mécanique (à partir du vent, des mouvements de l'eau...).
- L'énergie à finalité électrique (à partir de panneaux thermo solaire et photovoltaïque, d'éoliennes, de barrages hydrauliques...).
- L'énergie à finalité thermique (géothermie, solaire thermique...).

Les formes d'énergie renouvelables à finalité électrique qui sont actuellement les plus exploitées tout en respectant au mieux l'environnement sont :

- L'énergie hydraulique.
- L'énergie géothermique.
- L'énergie de la biomasse.
- L'énergie éolienne.
- L'énergie solaire.
- Autre source prometteuse d'énergie électrique, la pile à combustible.

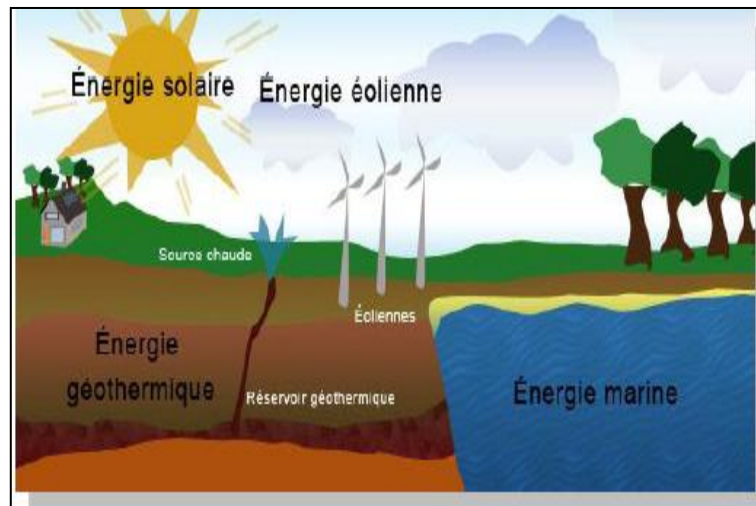


Figure I-2: Les énergies renouvelables. [3]

L'estimation mondiale de la participation des énergies renouvelables à l'horizon 2050, pour la production de l'électricité est présentée par la figure (I-3):

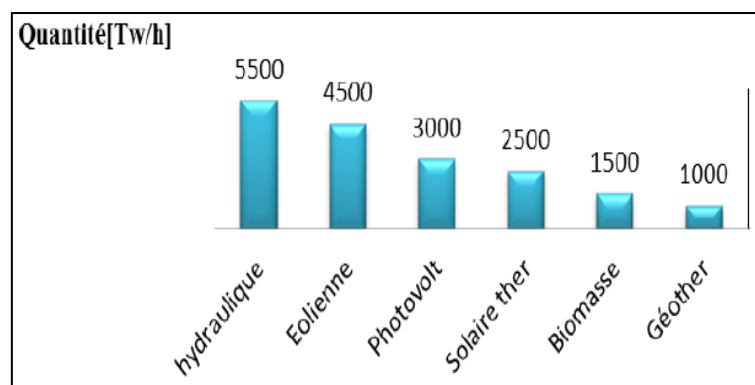


Figure I-3: Quantité d'électricité produite par chaque énergie renouvelable à l'horizon 2050. [01].

I-3 Différentes types de l'énergie renouvelable :

I-3.1 Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer.

Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utiliser directement ou converti sous forme d'électricité (Hydrolienne ; Marémotrice ; Barrage).

I-3.1.1 Hydrolienne :

Les sortes d'hydrolienne anglais de (Sea Genont) ont une capacité de 1.2 MW.

Les courants marins représentent une énergie fabuleuse qui contrairement aux vents sont constantes et prévisibles.



Figure I-4 :L'énergie hydrolienne. [7]

I -3.1.2 Marémotrice :

L'usine marémotrice de la Rance (La France) est une centrale électrique tirant son énergie de la force de la marée.

I-3.1.3 Barrages hydrauliques :

Le 1/5 des besoins en énergie totaux de la terre sont couverts par l'énergie hydraulique. Elle est produite dans le monde entier par environ 45.000 barrages. [2]



Figure I-5: l'énergie hydraulique au niveau des barrages.[2]

I-3.1.4 les avantages et les inconvénients :

✓ **Les avantages:**

- Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité ;

- Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenu. Ce procédé permet de stocker l'énergie électrique en surplus du réseau en une énergie potentielle qui sera transformée à nouveau ;
 - Démarrage et arrêt des centrales très rapides ;
 - Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité ;
 - Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports).Facilitée d'entretien et la faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modérée ;
 - Haut niveau de rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique ;
 - Souplesse d'exploitation, qu'accroissent encore les progrès de l'automatisme et des télécommandes.
- ✓ **Inconvénient:**
- Modification du débit et du niveau de l'eau ;
 - Perturbation de la faune et de la flore ;
 - Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons ;
 - Risque pour les personnes en aval lié au barrage. [3]

I-3.2 La biomasse:

Le terme biomasse désigne au sens large, l'ensemble de la matière vivante. Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux utilisés à des fins énergétiques.



Figure I-6: L'énergie de la biomasse.[5]

I-3.2.1 Les biocarburants :

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matières organiques. Les trois principales catégories sont : huile- végétale- carburant.

I-3.2.2 Bioéthanol :

Fabrique à partir du saccharose (betterave, canne à sucre ...) ou de l'amidon (blé, mais...) par fermentation.

I -3.2.3 Biogaz :

La méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries en absence de l'oxygène, ou nous utilisons des matières premières :

- Déchets organiques des communes : les poubelles des ménages.
- Déchets organiques industriels : agro-alimentaire, abattoirs.
- Déchets agricoles : lisier, fumier et les résidus de récolte.
- Sous-produit de processus industriels : glycérine.

I-3.2.4 Les avantages et les inconvénients :

✓ Les avantages :

- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable ;
- Biodégradable rapidement ;
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques ;
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables ;
- La biomasse est disponible partout ;
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie. [4]

✓ Les inconvénients :

- Leur rendement énergétique est assez faible ;

- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole ;
- Dégage du CO₂ ;
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement ;
- Provoque la pollution des eaux et des sols ;
- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.

I-3.3 L'énergie géothermique :

La géothermie est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à les exploiter.

La géothermie ou l'énergie géothermique, issue de l'énergie de la terre, désigne le processus qui permet de capter en profondeur la chaleur stockée dans le sous-sol, pour la transformer en source d'électricité ou de chauffage.

La Terre est un réservoir à fort potentiel énergétique. On observe sur la totalité du globe une élévation de la température au fur et à mesure que l'on fore vers le noyau terrestre, c'est le gradient géothermique. En moyenne il est de l'ordre de 30°C par kilomètres de profondeur. Jusqu'à présent, nous n'avons exploité qu'une infime partie des réserves de chaleur souterraines.

La géothermie, technique aujourd'hui maîtrisée et qui a fait ses preuves, peut s'appliquer à la production d'électricité, au chauffage urbain ainsi qu'au chauffage et à la climatisation de bâtiments individuels. [5]

Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), la géothermie haute température se rencontre dans des régions affectées par des phénomènes magmatique volcanisme les eaux ont des vapeurs à plus de 180 °C, qui entraînent des turbines à des fins de production d'électricité), « moyenne énergie » (90° à 150°C , la géothermie moyenne température a pour vocation la production d'électricité), « basse énergie » (30° à 90°C, La géothermie basse température consiste en l'extraction d'une eau à moins de 90°C dans des gisements situés entre 1500 et 2500 mètres de profondeur. Le niveau de chaleur est insuffisant pour produire de

l'électricité mais parfait pour le chauffage des habitations et certaines applications industrielles) et « très basse énergie » (moins de 30°C, s'intéresse essentiellement aux ressources souterraines à faible profondeur dont la température est inférieure à 30°C, les principales applications sont la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments). [6]

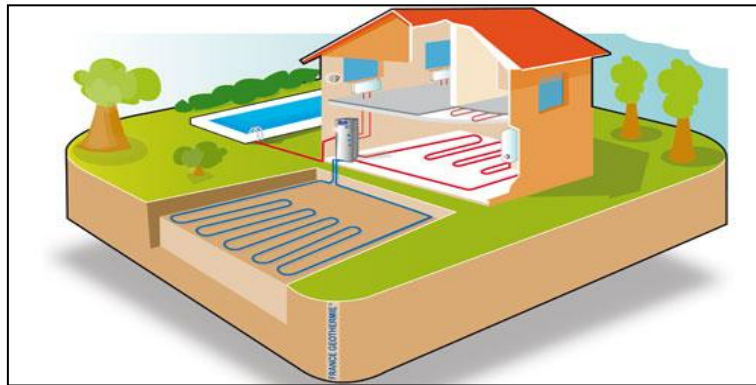


Figure 1-7 : Chauffage d'une maison par énergie géothermique.[6]

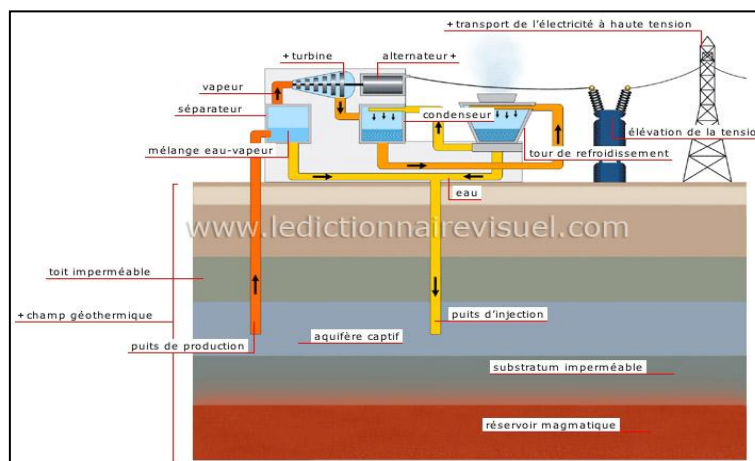


Figure 1-8: Production d'électricité par énergie géothermique. [6]

I-3.3.1 Les avantages et les inconvénients :

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques et elle représente comme une source d'énergie constante de forte puissance. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps.

Elle s'apparente d'avantage à une ressource minière, par la réalisation de ses forages profonds, par les lourds investissements qui la caractérisent et par son

exploitation qui consiste à extraire les calories du noyau terrestre et par le fait qu'elle est épuisable. Et par contre la géothermie est limitée au nombre de site.

Cependant, l'énergie géothermie est peu utilisée car elle a beaucoup d'inconvénients :

- Émissions potentielles : les gaz à effet de serre sous la surface de la terre peuvent potentiellement migrer vers la surface et dans l'atmosphère. Ces émissions tendent à être plus élevées à proximité des centrales géothermiques, lesquelles sont associées aux émissions de dioxyde de soufre et de silice. De plus, les réservoirs peuvent contenir des traces de métaux lourds toxiques comme le mercure, l'arsenic et le bore.
- Coûts de distribution : si l'énergie géothermique est transportée sur de longues distances, les coûts peuvent devenir prohibitifs. [6]

I-3.4 Energie solaire :

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable, abondante et propre car elle ne provoque pas d'émissions de gaz nocifs pour notre environnement. Elle se propage dans l'espace sous forme des photons, donc elle est disponible partout et sans cesse renouvelable. L'énergie solaire arrivant sur terre quotidiennement est supérieure au total des énergies fossile connues et prévisibles.

Il y a deux formes d'énergie solaire: l'énergie thermique et l'énergie photovoltaïque. [8]

I-3.4.1 Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir des rayonnements du soleil. Les modules photovoltaïques composés par des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. [9]

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont :

- Energie indépendante et performante.

- Entretien minimal.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- Aucun bruit.
- Non polluant.
- L'extension des systèmes est facile. [10]

✓ **Inconvénients**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. [10]



Figure I-9: Panneaux solaires. [7]

I-3.4.2 L'énergie solaire thermique :

Le principe de l'énergie thermique repose sur l'utilisation de capteurs qui transforment l'énergie du rayonnement solaire en chaleur véhiculée par l'eau.

Cette énergie trouve de nombreuses applications :

- La production d'eau chaude ;
- Le chauffage des maisons ;
- Le chauffage de l'eau des piscines ;
- Le séchage des récoltes ;
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments ;
- La production de très haute température. [9]

I-3.4.2.1 Chauffe-eau solaire:

L'énergie solaire est principalement utilisée pour le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage de bâtiments. Et son principe de fonctionnement :

Le rayonnement solaire est reçu par un absorbeur qui, à son tour, chauffe soit un fluide caloporteur soit l'eau directement. [11]



Figure I-10: Chauffe-eau solaire. [7]

I-3.4.2.2 Le capteur parabolique :

Le capteur parabolique obéit aux mêmes lois physiques que ce qu'il est convenu d'appeler paraboles, (en fait des paraboloïdes) et qui sont des antennes paraboliques destinées à recevoir et à concentrer les ondes électromagnétiques émises par les satellites de communication en un point appelé foyer, et qui ont l'avantage obligatoire d'être géostationnaires et de ne nécessiter qu'un seul alignement définitif.

Dans le cas d'une capture parabolique solaire, le problème est la nécessité d'orienter ce capteur vers le soleil dans sa course. Un asservissement électronique est alors nécessaire et des dispositifs idoines existent. Le très gros avantage est la température énorme qui est atteinte par un tel capteur.

La réflexion vers le foyer sera d'autant plus efficace que le miroir qui tapisse le capteur sur sa face ensoleillée sera de bonne qualité. Pour prendre un exemple, les résultats seront plus probants avec de vrais miroirs qu'avec des feuilles d'aluminium.

Un bricoleur averti peut sans trop de problèmes construire une « cocotte solaire ou autocuiseur solaire » sur une parabole. [12]

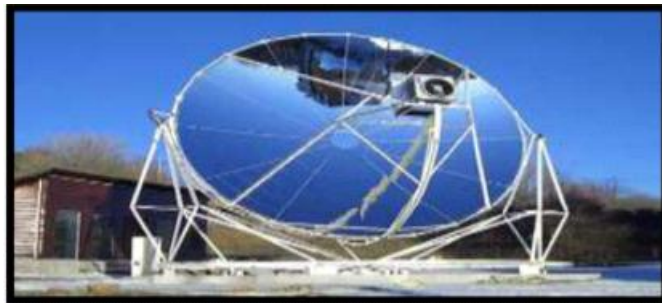


Figure I-11: Capteur parabolique. [7]

I-3.4.2.3 Le capteur cylindro-parabolique:

Il s'agit de la technologie la plus utilisée dans les grandes centrales solaires thermodynamiques de production d'électricité. Le miroir concentrateur est un cylindre de section parabolique et ne compte qu'une seule direction de courbure. La concentration a lieu sur la ligne où est placé le récepteur tubulaire dans lequel circule le fluide caloporteur.

Le champ solaire est la partie réceptrice de l'installation : la radiation solaire y est transformée en énergie thermique. Le champ solaire est l'ensemble des capteurs solaires connectés en série pour former de longues files qui à leur tour sont connectées en parallèle. Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est de l'ordre 80°. [13]



Figure I-12: Capteur cylindro-parabolique. [7]

I-3.5 L'éolienne :

L'humanité utilise le vent depuis la nuit des temps (bateau à voile, moulin à vents...).

C'est certainement la forme d'énergie renouvelable qui connaît le plus fort développement, les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années.

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et rentrent dans la catégorie des énergies renouvelables.

La représentation dans la figure suivante donne un modèle de petit réseau caractérisant la transformation de l'énergie du vent en énergie électrique. [14]



Figure I-13: Une éolienne à 3 pâles. [10]

I-3.5.1 Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I-3.5.1.1 Les éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement qui est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pâles, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau. Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.
- Sur la base du nombre de pâles que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

I-3.5.1.1 .1 les éoliennes à rotation lente "multiples" :

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau.

I-3.5.1.1.2 Aérogénérateurs :

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant « d'aérogénérateurs ». Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ». [15]

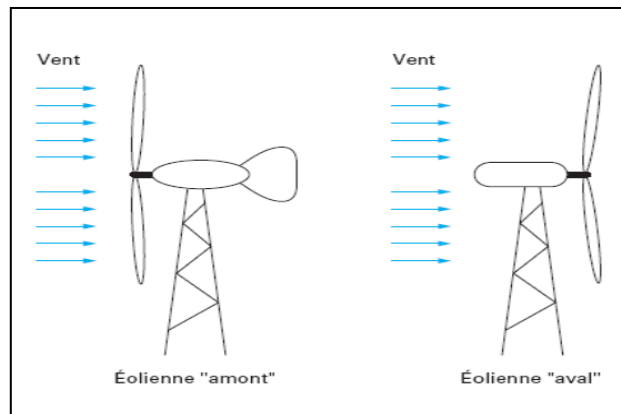


Figure I-14-: l'énergie éolienne à rotation rapide.[10]

I-3.5.1.2 Les éoliennes à axe vertical :

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation, deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer ;
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts étaient faits dans la recherche sur ce sujet. [16]



Figure I-15 : l'axe de rotation est vertical.[10]

I-3.5.2 Les avantages et les inconvénients :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

✓ Les avantages :

- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc...
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable ;
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique. Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance. [14]

✓ Les inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien ;
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils extrémités de pale, mécanismes de transmission etc...
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux ;
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

I-3.6 Les piles à combustibles :

Parmi les technologies envisagées à l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse. [17]

La pile à combustible est un générateur électrochimique qui permet de convertir l'énergie chimique d'un combustible, comme l'hydrogène, en énergie électrique.

L'utilisation de l'hydrogène pur comme combustible conduit théoriquement à une pile non polluante puisque le seul produit généré par la pile est alors de l'eau.

I-4 Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent plusieurs avantages et aussi des inconvénients :

✓ Les avantages :

- Plus les sources sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée ;
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps ;
- Pas de CO₂ ;
- Cout au KWh fixe, faible et stable ;
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

✓ Les inconvénients :

- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement ;
- Projet de longue durée ;
- Le stockage d'hydrogène.

1-5 Conclusion :

Pour conclure ce chapitre, on peut dire que les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique permettant le développement futur et elles représentent la solution à beaucoup de problèmes énergétiques et environnementaux. Elles ont plusieurs avantages : elles sont inépuisables, respectueuses de l'environnement, elles aident aussi à lutter contre l'effet de serre et la pollution atmosphérique, sauf que (l'énergie de biomasse).

Le chapitre suivant sera consacré à une source d'énergie propre et non polluante, qu'est l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Les systèmes photovoltaïques

II-1 Introduction :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable.

Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite ces rayons en électricité.

II-2 Système d'énergie solaire:

Actuellement, il existe deux types d'utilisation de l'énergie solaire:

➤ L'énergie solaire thermique : c'est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique.

➤ L'énergie solaire photovoltaïque : où la conversion de la lumière du rayonnement en électricité est directe par le biais des cellules ou photopiles.

C'est donc cette forme d'énergie qui sera traitée dans notre travail.

II-3 Rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.106 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.106 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visibles ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. On distingue donc :

- Le rayonnement direct qui est reçu du solaire, directement sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux. Ce rayonnement forme donc des ombres et peut être concentré par les miroirs.
- Le rayonnement diffus qui est constitué de la lumière diffusée par l'atmosphère, ce rayonnement est isotope c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste.
- Le rayonnement solaire réfléchi, c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).[19]

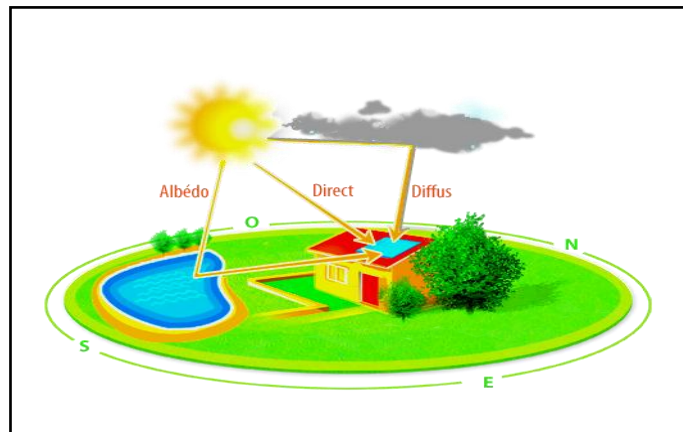


Figure II-1: Rayonnement solaire au sol.[19]

- Le rayonnement global est la somme de ces différentes formes de rayonnement.

La conception du système photovoltaïque nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site à étudier. Plus on reçoit une grande énergie solaire, moins on a des panneaux solaires et inversement.

II-4 Effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Phots », qui signifient lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827), inventeur de la pile électrique). [18]

La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication.

La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous. Ces deux couches sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant. L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron-trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique.

Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants. Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule. [19][20]

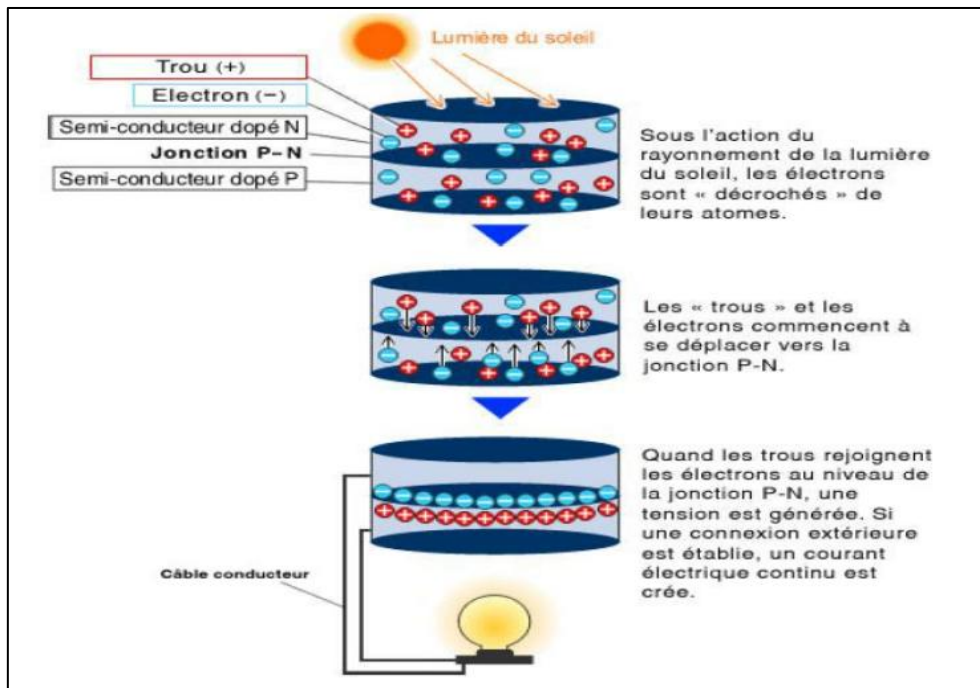


Figure II-2 : Principe de la conversion photovoltaïque. [20]

II-5 Cellule photovoltaïque:

La cellule ou photopile photovoltaïque est un composant opto-électrique, composé d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en énergie électrique.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et à celles des semi-conducteurs.



Figure II-3 : Cellule photovoltaïque. [26]

II-6 Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs :

II-6.1 Semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du

courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du «bonde gap», E_g en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin (c - Si), et 1.7eV pour le silicium amorphe (a -Si). Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde).

Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule. [21]

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique, de part et d'autre de la cellule. [22]

II-6.2 Dopage du silicium:

Les atomes de Si on quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin par une liaison covalente. [23]

II-6.2.1 Dopage de type N :

Si un atome ayant cinq électrons de valence (le phosphore (P)), est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre.

Cet électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous.

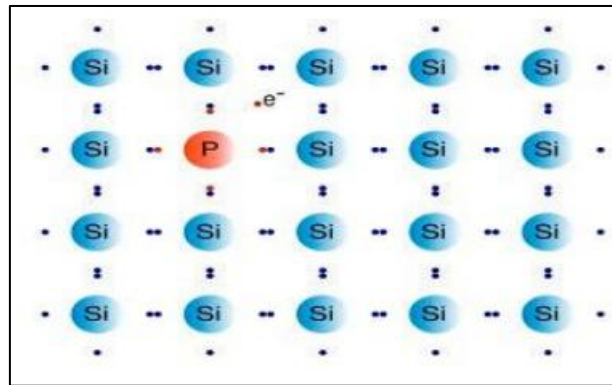


Figure II-4 : Dopage de type N. [24]

II-6.2.2 Dopage de type P:

Si un atome trivalent (bore (Br)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi trou.

Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons.

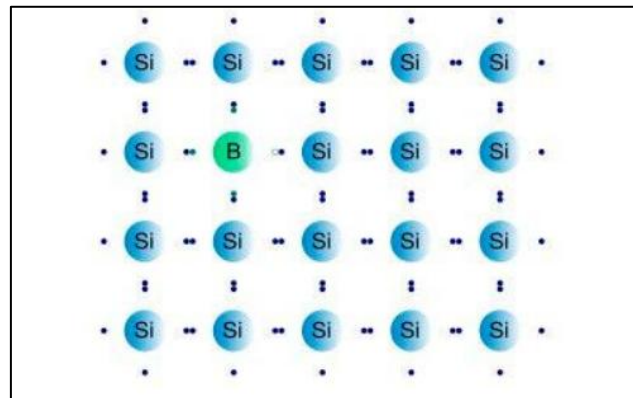


Figure II-5 : Dopage de type P. [24]

II-6.2.3 Formation de la jonction PN :

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres. [25]

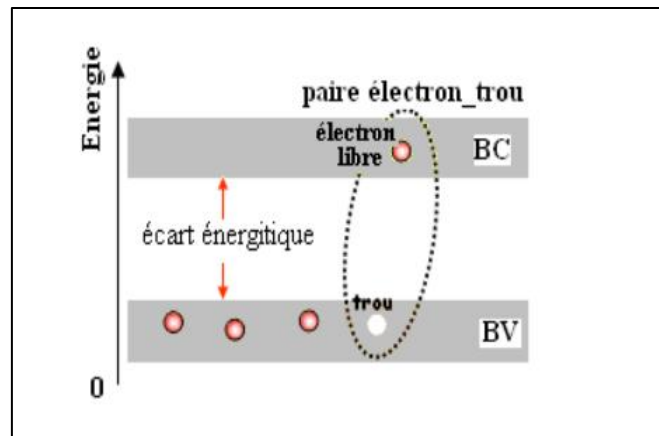


Figure II-6 : Génération de la paire électron-trou. [24]

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. [26]

Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P.

II-7 Technologie des cellules photovoltaïques:

Les matériaux qui constituent les cellules photovoltaïques sont classés en deux grandes familles à savoir :

1. Les matériaux solides cristallisés ;
2. Les couches minces.

Les couches minces sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible et sont déposées sur un support, alors que les cellules cristallines sont massives et épaisses de 0.15 à 0.2 mm.

Comme dit précédemment, le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium tétravalent d'où l'étude des cellules au silicium. [27]

II-7.1 Cellules au silicium cristallin :

Les cellules les plus répandues sont celles au silicium cristallin et se présentent sous forme des plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées.

Le silicium qui constitue le matériau étant un cristal, d'où l'appellation du matériau (cristallin) avec un arrangement parfait des atomes selon une structure atomique ordonnée de type tétravalent.

Si la cellule est constituée d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin et elle a un aspect uniforme et gris bleuté, parfois noir. Si par contre la cellule est composée de plusieurs cristaux assemblés, on dit qu'elle est faite de silicium multi cristallin et présente l'aspect d'une mosaïque compacte de fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelques centimètres appelés gains. [28]

II-7.2 Cellules au silicium monocristallin :

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.

Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. [29]

Les cellules sont rondes ou presque carrées, vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.

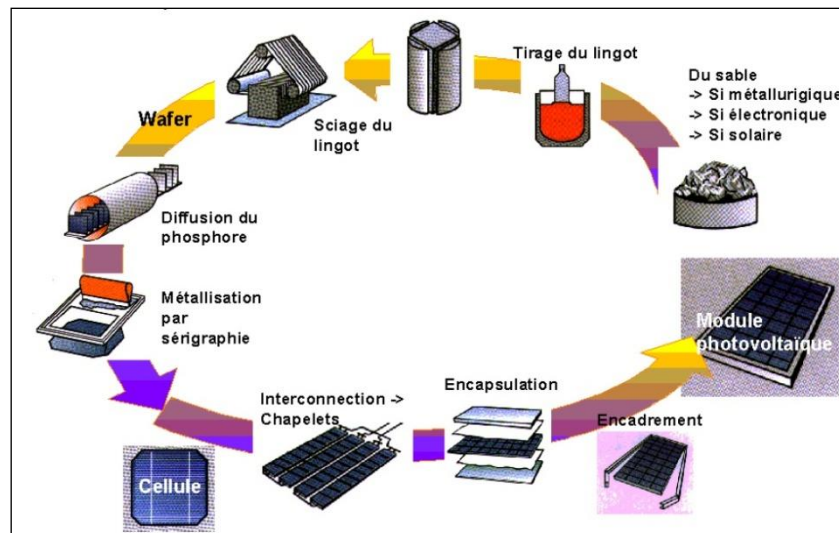


Figure II-7: Passage du silicium pur à la cellule photovoltaïque mono cristalline. [23]

Les différentes étapes de fabrication de la cellule au silicium monocristallin sont les suivantes :

- Le décapage de la surface pour éliminer les défauts de sciage et ensuite une gravure sélective pour obtenir une surface texturée en petites pyramides, ce qui améliore la collecte de la lumière dans toutes les directions.
- Une diffusion de phosphore pour réaliser la jonction ;
- Un dopage de l'arrière avec l'aluminium pour bonne collecte de charge ;
- Le dépôt d'une couche antireflet sur l'avant ;
- Le dépôt d'une grille de métallisation sur l'avant ;
- Le dépôt d'un métal soudable sur l'arrière ;
- Le test et le tri de toutes les cellules fabriquées.

II-7.3 Cellules poly cristallines :

Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans.

L'économie de la surface puisque les wafers sont carrés, le rendement en matière est bon. La recristallisation a également un effet bénéfique sur la pureté locale de matériau.

De nos jours, cette technologie est la plus répandue car bien maîtrisée sur le plan industriel et offre un bon rapport qualité- prix.

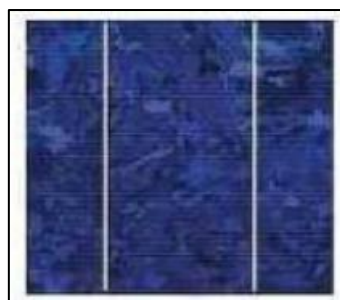


Figure II-8 : cellule poly cristalline. [26]

II-7.4 Cellules au silicium amorphe :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé dévalorisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines.

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.



Figure II-9 : cellule amorphes. [26]

II-8 Rendement d'une cellule:

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/m^2 , ce rendement a pour formule : [30]

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E}$$

II-9 Générateur photovoltaïque:

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera. [31]

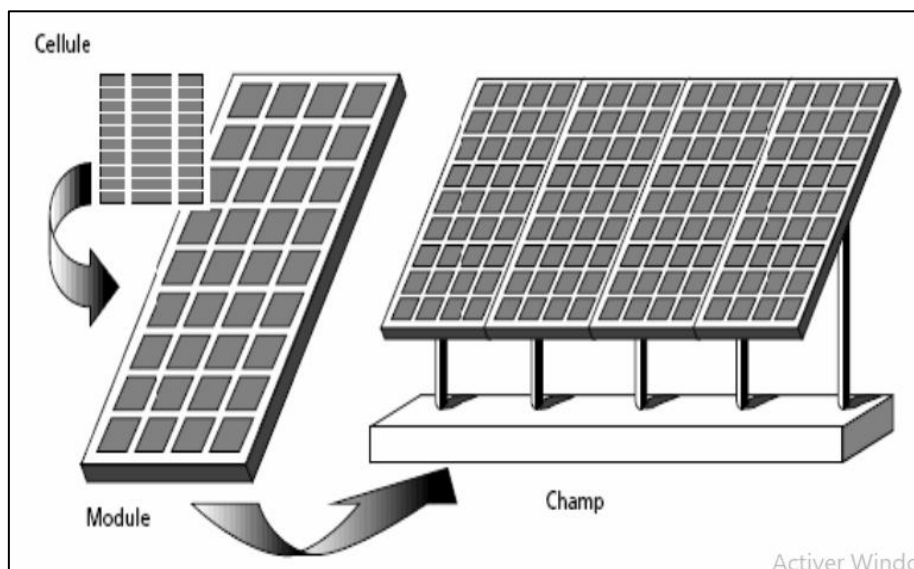


Figure II-10: Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques. [22]

II-9.1 Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle est important afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

II-9.1.1 Association en série:

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (Figure II-11). L'équation (II.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules. [32]

$$V_{oc\ n_s} = n_s V_{oc} \quad \text{avec} \quad I_{cc\ n_s} = I_{cc} \quad (\text{II-1})$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

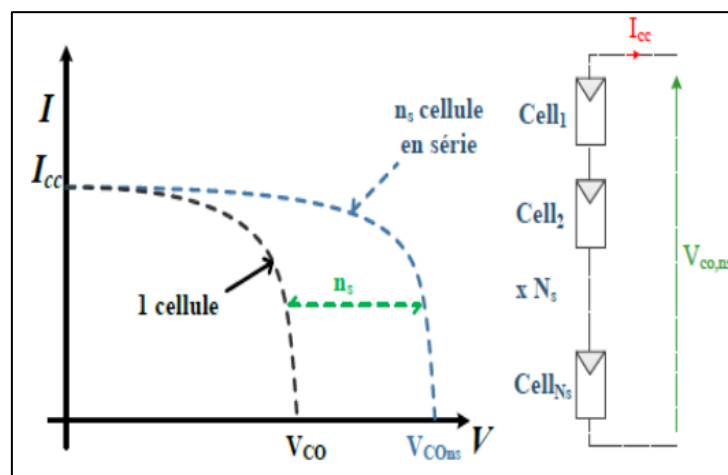


Figure II-11 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série. [19]

II-9.1.2 Association parallèle :

Une association parallèle de n_p cellules permet d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (Figure II-12).

L'équation (II-2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules. [33]

$$I_{cc\ np} = n_p \cdot I_{cc} \quad \text{avec} \quad V_{oc\ np} = V_{oc} \quad (\text{II-2})$$

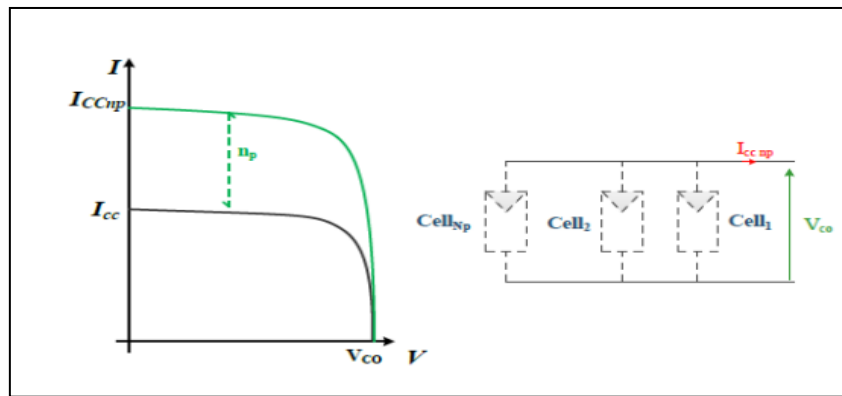


Figure II-12 : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle. [20]

II-9.1.3 Association hybride : (en série et en parallèle) :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p I_{cc} \quad (\text{II-3})$$

$$V_{oc}^t = n_s V_{oc} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

n_p : nombre des cellule en parallèle ;

n_s : nombre des cellule en série.

La figure (II-13) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.

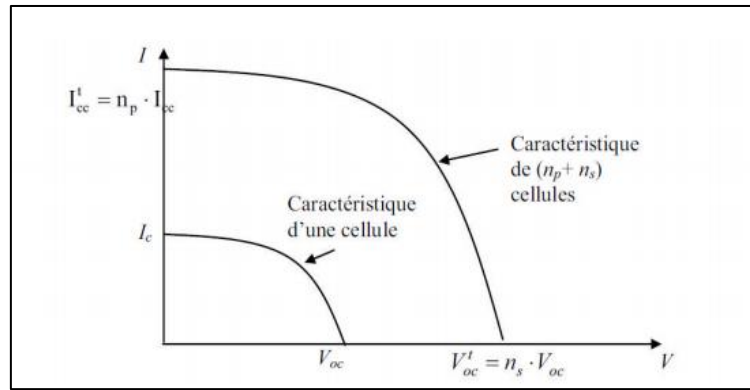


Figure II-13 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p; n_s)$ cellules identiques.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure II-13).

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). [32]

II-10 Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque :

Nous allons étudier la modélisation de la cellule et le générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) pour deux niveaux d'ensoleillement G (1000 W/m^2 et 400 W/m^2) et pour différentes températures (0°C , 25°C , 50°C), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et on utilise l'outil MATLAB -SIMULINK pour faire la simulation de comportement de la cellule et du générateur PV.

II-10.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance Shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$:

- **La résistance série** : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

[20] [34]

- **La résistance shunt** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [20] [34]

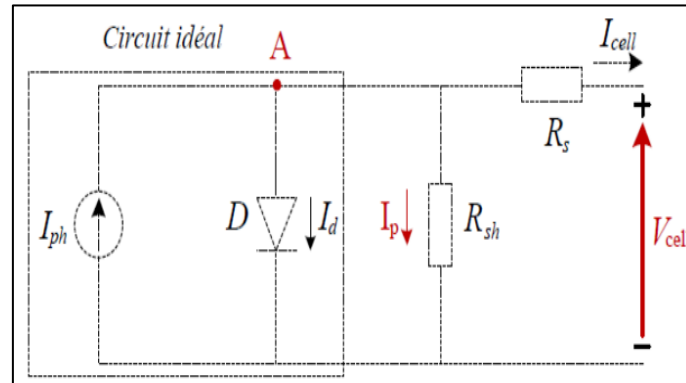


Figure II-14: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. [20] [35]

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont : Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} , en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. [20]

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (II-5)$$

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la photopile.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de la diode.

I_{Rsh} : Courant shunt.

On a la résistance (R_{sh}) plus élevée donc on peut négliger le courant I_{Rsh} donc l'équation s'écrit :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \quad (II-6)$$

a. Le photo-courant :

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

Avec :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (II-7)$$

I_{cc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

K_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (298 K).

G_{ref} [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²).

b. Le courant de saturation I_0 :

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{Rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{E_g}{A K} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (II-8)$$

Avec :

E_g [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) :

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{RS} = I_{cc} \exp \left(\frac{I_{cc}}{\left(\frac{q V_{oc}}{K A T} \right)} \right) - 1 \quad (\text{II-9})$$

Où : V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

q [°C] : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ °C).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

A : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).

K [J/K] : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\frac{q V_{cell} + R_s I_{cell}}{N_s A K T} (-1) \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (\text{II-10})$$

d. Le courant du panneau :

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique

I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\frac{q V_{cell} + R_s I_{cell}}{N_s A K T} (-1) \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (\text{II-11})$$

Où :

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

II-10.2 Simulation du module photovoltaïque sous Matlab/Simulink :

Basé sur les équations mathématiques, le modèle du module photovoltaïque est développé à l'aide de Matlab/Simulink.

Les paramètres d'entrées représentent le rayonnement solaire et la température ambiante. Les réponses dynamiques du module photovoltaïque en puissance et tension de sortie sont évaluées. En ajoutant le courant de charge aux deux paramètres de sorties constituer pour participer aux calculs des itérations suivantes.

Les paramètres du modèle utilisés dans la simulation sont donnés en tableau (II-1).
[15]

R_s	1.32Ω	I_{ref}	1000 W/m^2
$V_{oc,ref}$	87.72 V	α_{ref}	5.472 V
$V_{mp,ref}$	70.731 V	$I_{mp,ref}$	2.448 A
$T_{c,ref}$	25°C	C_{pv}	$5.10^4 \text{ J}/(^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2)$
A	1.5 m^2	k_{pert}	$30 \text{ W}/(^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2)$
$V_{in,pv}$	0.9	$I_{L,ref}$	2.664 A

Tableau II-1 : Les paramètres du modèle photovoltaïque

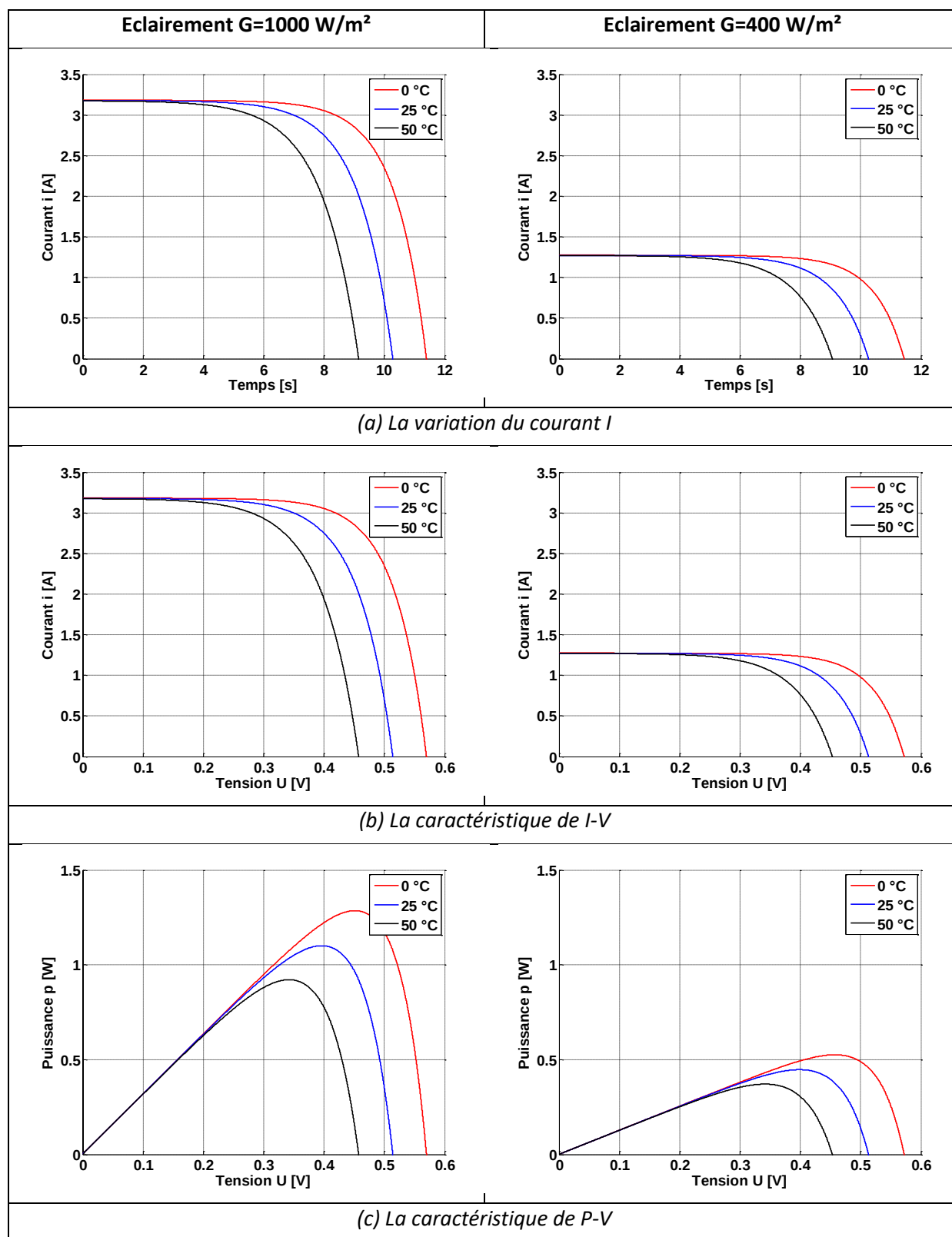
A. Influence de la température :

L'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule.

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque pour deux niveaux d'ensoleillement G (1000 W/m^2 et 400 W/m^2) et pour différentes températures (0°C , 25°C , 50°C).

Pour la figure (II-15), nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et aussi la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (II-15) (d).

La figure (II-15) (c) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique P-V.



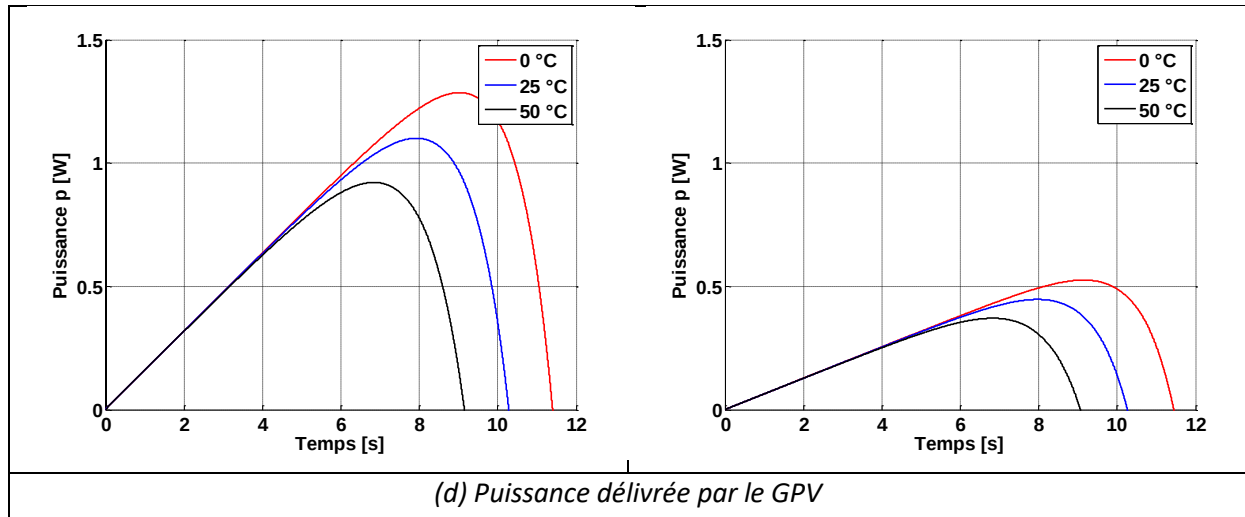


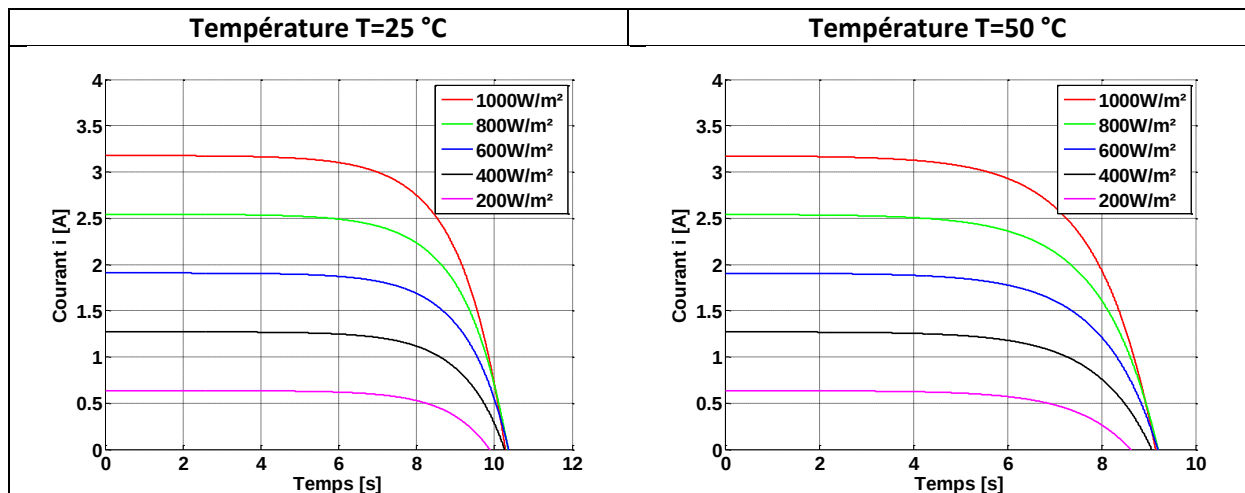
Figure (II-15) : Les caractéristiques de GPV en fonction de la température pour les deux éclairements (1000W/m² et 400W/m²).

B. Influence de l'éclairement :

Le même travail comme précédente, nous avons fixé la température pour différents éclairements figure (II-16).

Pour la figure (II-16) (a), on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I=3.2\text{A}$ et pour $G=800\text{w/m}^2$ le courant $I=2.6\text{A}$, on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (II-16) (c), (d).

La figure (II-16) (c) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V.



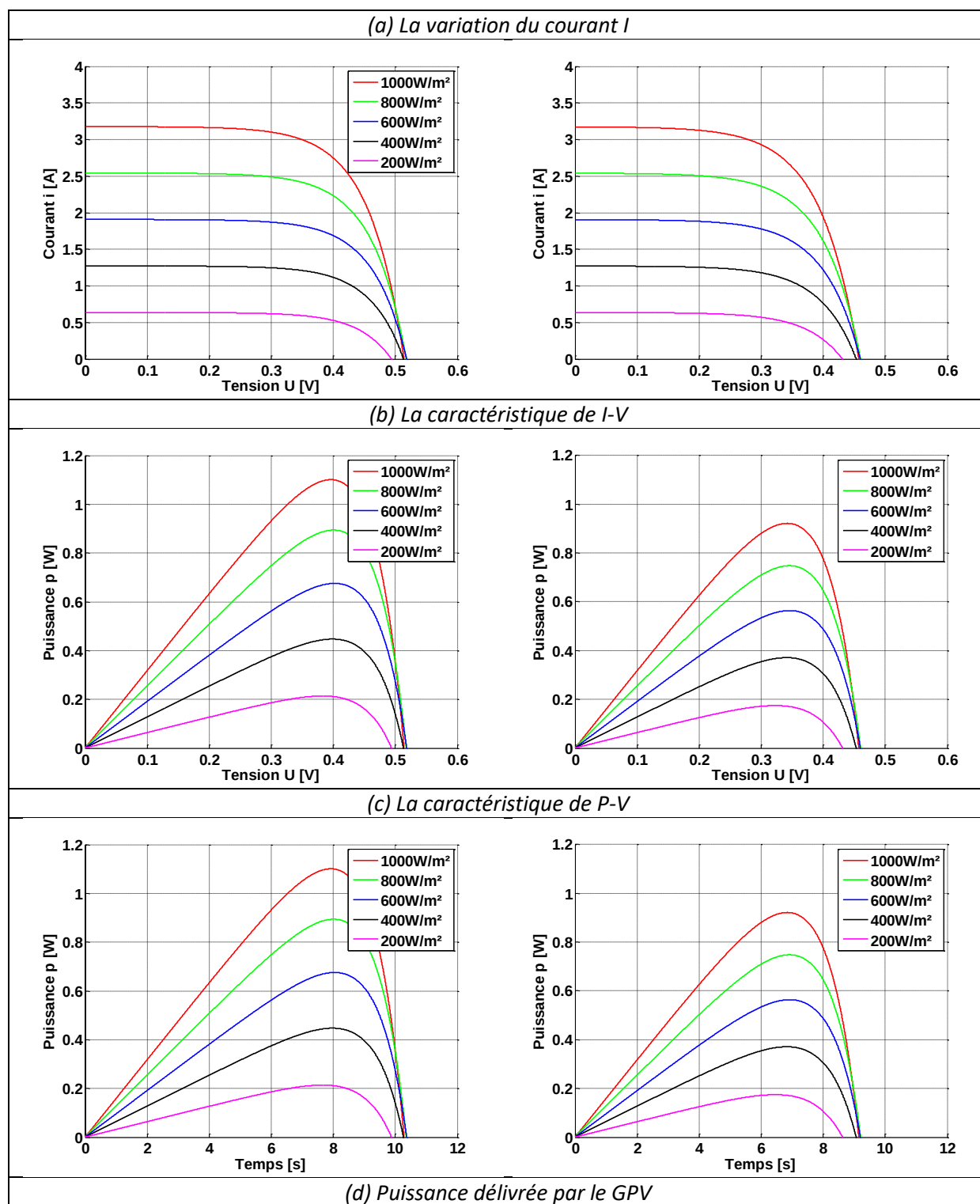
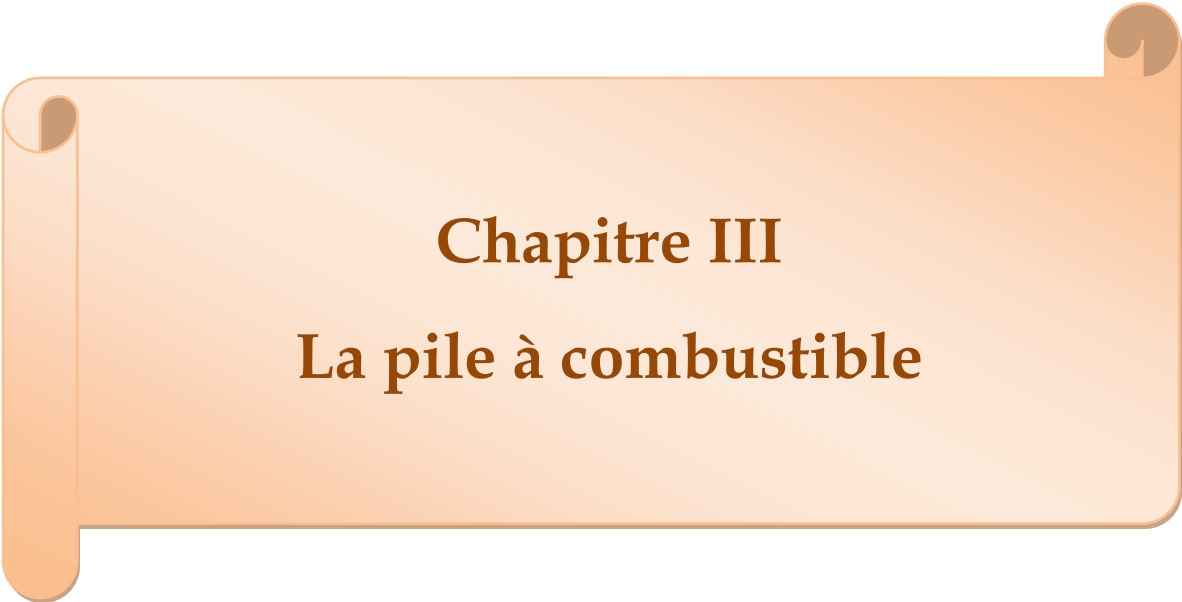


Figure (II-16) : Les caractéristiques de GPV en fonction de l'éclairement pour les deux températures (25°C et 50°C).

II.11 Conclusion :

Tout d'abord, ce chapitre nous a permis de mieux cerner les notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque. Et après avoir fait modélisation et simulation d'une cellule et d'un générateur photovoltaïque nous sommes arrivés au fait que pour avoir un bon fonctionnement des conditions standards doivent être prises en compte ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ$).

Le chapitre suivant présentera une autre source d'énergie renouvelable, la pile à combustible.

An orange scroll graphic with a gradient, featuring a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends and a slight shadow.

Chapitre III

La pile à combustible

III -1 Introduction:

Les piles à combustibles sont parmi les alternatives énergétiques actuelles les plus prometteuses grâce à leurs efficacités et à leurs incidences favorables sur le plan de l'environnement. Elles ont un grand potentiel pour devenir la technologie propre la plus efficace.

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie interne d'un combustible d'une réaction directement en énergie électrique avec dégagement de la chaleur.

III-2 Historique:

Le principe de la pile à combustible fut découvert en 1802 par l'anglais Sir Henri David, qui démontra d'une manière conceptuelle la possibilité de générer l'électricité à partir de l'électrolyse inverse de l'eau. C'est en 1839 que William GROVE décrit la première pile à combustible.

Elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte.

Dès 1855 de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mis au point. Les résultats sont modestes et en 1939, le bilan du premier siècle de recherche est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène.

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ".

La pile à combustible a trouvé un regain d'intérêt au début des années 60, lorsque la NASA (Nation Aeronautique and Space Administration) chercha une solution énergétique plus satisfaisante que les batteries, l'énergie solaire et l'énergie nucléaire. Cette recherche a mené la technologie de pile à combustible à un développement de la première membrane échangeuse de protons. [37]

Les piles servaient de générateur pour les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de General Electric) et Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney). Ayant prouvé leur efficacité, les piles sont toujours employées dans les navettes américaines.

L'un des moments clefs du développement des recherches sur les piles à combustible est le premier choc pétrolier de 1973. Pour la première fois apparaît la nécessité d'être indépendant sur le plan énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, Du Pont met au point la membrane Nafion, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse, de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop importants pour être insérées dans un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : une seule veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés. Les PEMFC qui peuvent être utilisées dans des applications stationnaires, portables et mobiles bénéficient ainsi d'une certaine synergie. [2]

III-3 Les études précédentes:

Les résultats observés, en les comparants aux résultats d'autres auteurs ayant fait des études similaires ou proches. Tout sujet a déjà été abordé par d'autres dont on ne doit pas méconnaître la méthodologie ou les résultats.

1. **Jason Le Masters [38]**, a développé un code informatique en différence finie, capable d'exécuter des calculs de conception préliminaires pour l'analyse des contraintes thermiques qui peuvent avoir lieu dans les piles à combustible à oxyde solide. Ce modèle analyse la fabrication, le démarrage (start-up) et opère dans les conditions de fonctionnement en état stationnaire. Ce code a été minutieusement modelé pour inclure des changements significatifs (la structure), des nouvelles sources de chaleur (électrochimiques), des conditions de flux et des différentes propriétés des fluides (air température élevée et hydrogène). des conditions de flux et des différentes propriétés des fluides (air température élevée et hydrogène). Ce code était comparé au code commercial avec FLUENT.
2. **Eduardo Hernandez-Pacheco [39]**, a développé un modèle électrochimique thermique pour simuler la performance d'une pile à combustible à oxyde solide sous des conditions de fonctionnement différentes et des facteurs géométriques. La température, le courant, la distribution du gaz et le carburant utilisé ont été calculés avec le modèle dans différentes régions. Les résultats de modélisation ont montré de bons résultats pour des réductions de gradients de température à l'intérieur de la pile.
3. **Srividya Valluru [40]**, son travail caractérise les contraintes thermiques surgissant pendant le fonctionnement des piles à combustible à oxyde solide planaire. Ce facteur est important pour l'efficacité de ce genre de pile. Les contraintes thermiques sont calculées à partir des champs température en utilisant le code ANSYS. Une approche d'analyse de contrainte thermique couplée est mise en œuvre pour un modèle en deux et trois dimensions.
4. **V.T. Srikar et al. [41]**, se sont intéressés aux piles SOFC miniaturisées, ils considèrent une configuration planaire avec électrolyte supporté et en utilisant un modèle analytique simple. L'analyse de perte d'énergie en raison de la conduction de chaleur met en évidence l'importance efficace de l'isolement thermique. Cette analyse avec des considérations géométriques, permet l'identification d'une structure qui réduit simultanément au minimum les pertes thermiques et assure une bonne stabilité suffisante.

Le développement d'arrangements pour l'isolement thermique de micro dispositifs de pile à combustible est donc un secteur important de recherche.

5. **Jinliang Yuan et al. [42]**, analysent numériquement le flux du gaz et le transfert thermique dans un le canal anodique d'une pile SOFC dans le cas tridimensionnel. Ils montrent que parmi des divers paramètres, la configuration du canal et les propriétés de la couche anodique poreuse ont des effets significatifs tant sur le flux du gaz que sur le transfert thermique.
6. **Masayuki Suzuki et al. [43]**, évoquent une série de simulation numérique pour voir l'influence des transferts couplés (chaleur et masse) avec des réactions électrochimiques dans une pile de type SOFC planaire. Les résultats montrent que les pertes de tension sont principalement dus à la résistance interne dans l'inter connecteur et la surtension d'activation des électrodes. La différence de température dans la pile devient plus grande lorsque la longueur de la cellule augmente. En se basant sur les résultats, ils proposent une conception améliorée de pile, qui utilise un matériau de résistance électrique basse et haute conductivité thermique. La tension calculée de la pile nouvellement conçue est environ 7 à 10 % plus haute que celle de la pile conventionnelle, de plus, la température maximale est réduite de 10 à 40 K.
7. **David L. et al. [44]**, ont étudié le transfert radiatif dans les électrodes et l'électrolyte, aussi bien que le transfert radiatif entre le carburant et les canaux véhiculant le flux d'oxygène. Les auteurs montrent que le mode de transfert radiatif est prépondérant et étudient les pertes de chaleur par conduction. Ces modes doivent être pris en considération durant la conception de la pile et ont une importance critique pour la gestion efficace thermique de la pile à haute température. Ils ont discuté la quantité et les effets radiatifs dans les matériaux constituant ce type de pile (SOFC).
8. **Y. Inui et al. [45]**, se penchent sur le problème de la durée de vie de la céramique utilisée dans les piles SOFC et élucident que les très hautes températures provoquent des contraintes thermique dans la céramique. La distribution de température dans la pile, devrait être gardée aussi

constante que possible durant l'opération de charge. En considérant ce fait, les auteurs optimisent numériquement les paramètres d'exploitation comme la température de gaz d'admission.

9. **P.F. van den Oostkamp [46]**, cite que l'état actuel de l'art du développement des piles à combustible repose sur la connaissance des phénomènes des transferts thermiques. Aussi, tant dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) que les piles à combustible à oxyde solide lui-même, le transfert thermique est une question critique. L'auteur montrera les implications du transfert thermique de pile à combustible à son architecture totale.
10. **K.J. Daun et al. [47]**, montrent qu'à cause de leurs hautes températures d'exploitation, le transfert thermique radiatif peut jouer un rôle important dans l'électrode et les couches d'électrolyte de piles à combustible à oxyde solide. ils présentent une caractérisation détaillée des propriétés radiatives et thermo physiques des matériaux composites, qui sont utilisés pour définir un modèle 2D simple incorporant les caractéristiques de transfert thermique de l'électrode et les couches d'électrolyte de la pile SOFC type planaire. Par la suite, l'importance de radiation thermique est évaluée en comparant le champ de température obtenu utilisant un modèle de conduction avec celui obtenu en utilisant un modèle couplés conduction/radiation. Contrairement à une certaine littérature publiée, ces résultats montrent que le transfert thermique de radiation a un effet négligeable sur le champ de température dans ces composants et ne doit pas être adapté dans les modèles thermiques complets de SOFC planaire.

III-4 Généralités sur la pile à combustible:

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique. Le combustible utilisé dans la plupart des piles à combustible est l'hydrogène. Le méthanol peut aussi être utilisé directement dans certaines piles à combustible. [48]

Dans les piles à hydrogène, la conversion d'énergie chimique en énergie électrique, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, est réalisée par une réaction chimique de type redox. L'hydrogène se combine avec l'oxygène pour former de l'eau selon la relation globale suivante :



Le principe de base de la technologie de la pile à combustible repose sur la séparation de la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène de celle de réduction de l'oxygène. Pour cela, la cellule de base d'une pile à combustible est constituée de deux électrodes (anode, cathode) séparées par un électrolyte. Selon le type d'électrolyte acide ou basique (alcalin), la réaction chimique conduisant à la production d'électricité et de chaleur diffère.

Dans un électrolyte acide, ce sont les ions positifs (protons) qui se déplacent de l'anode à la cathode (figure III-1). L'eau est produite à la cathode. Par contre, dans un électrolyte basique (alcalin), ce sont les ions négatifs qui se déplacent de la cathode à l'anode (figure III-2). L'eau est produite à l'anode, mais de l'eau est aussi nécessaire à la cathode pour créer les ions.

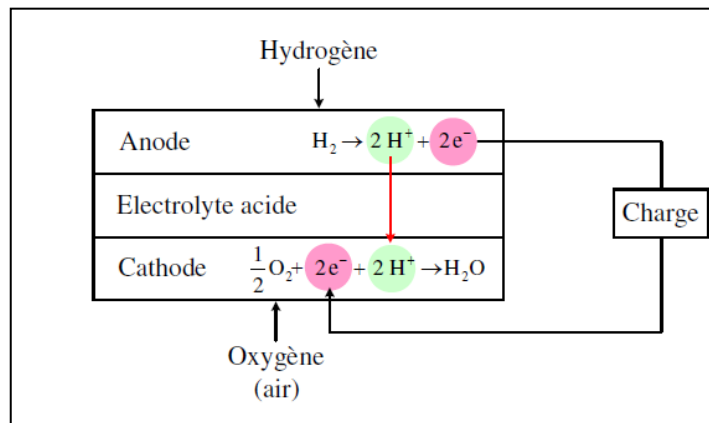


Figure III.1 : Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide. [48]

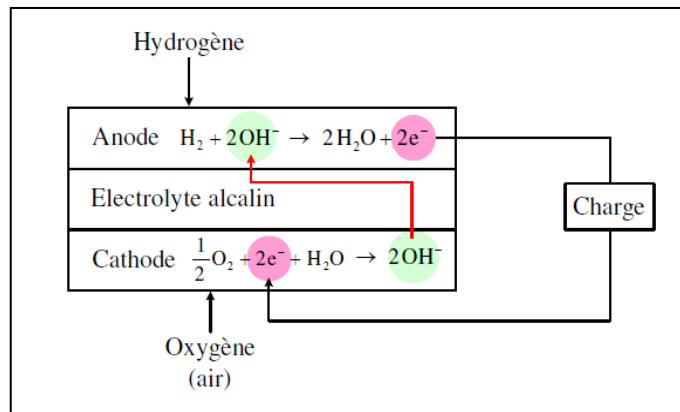


Figure III-2 : réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique. [48]

III -5 Les différents types des piles à combustible :

Les piles à combustible sont classées en basant sur des critères différents telle que : la température de fonctionnement (haute de 600° à 1000° et basse de 60° à 250°), la nature de la membrane utilisée (liquide ou solide) et le type de combustible (hydrogène, méthanol, gaz naturel). De ceci ils ont fini par avoir six types différents des piles à combustible qui sont : [49]

✓ **Les piles à basse température de fonctionnement :**

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (**PEMFC** Proton Exchange– Membranes Fuel Cell);
- Les piles au méthanol direct (**DMFC** Direct Methanol Fuel Cell) ;
- Les piles à acide phosphorique (**PAFC** Phosphoric Acid Fuel Cell) ;
- Les piles alcalines (**AFC** Alkaline Fuel Cell).

✓ **Les piles à haute température de fonctionnement :**

- Les piles à oxydes solides (**SOFC** Solid Oxide Fuel Cell) ;
- Les piles à carbonates fondus (**MCFC** Molten Carbonate Fuel Cell).

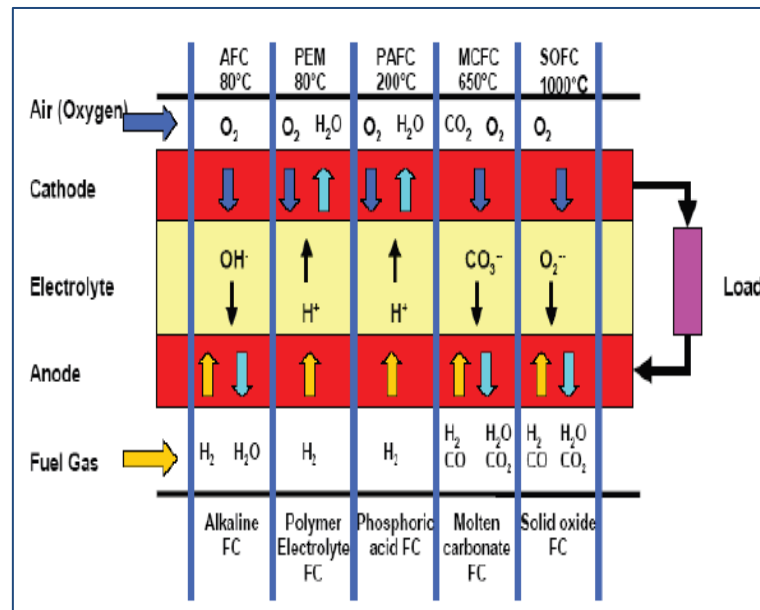


Figure III-3: Différents Types de piles à combustible. [48]

Modèle	Nom	Electrolyte	Température de fonctionnement	Combustibles	Puissance	Rendement électrique en %	Rendement thermique en %	Coût initial d'investissement	Durée de vie
PEM FC	Proton Exchange membrane Fuel Cell	Polymère (solide)	50-100° C	H_2	De quelques MW à 1MW	30-45	45-65	3000-4000 Dollar/KW	60000-90000 heures
AFC	Alkaline Fuel Cell	Potasse (liquide)	25-260°C	H_2	10KW-100KW	55-60	< 30	200-700 Dollar/KW	5000-8000 heures
PAFC	Phosphoric acid Fuel Cell	Acide phosphorique (liquide)	190-210°C	H_2	100KW - 400KW	40	40	4000-5000 Dollar/KW	30000-60000h eures
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	Sels fondus (liquide)	600-660°C	H_2 CH_4O CH_4	50KW-10MW	40-60	40-50	4000-6000 Dollar/KW	20000-30000 heures
SOF C	Solid Oxide Fuel Cell	Céramique (solide)	600-1000°C	H_2 CH_4O CH_4	Jusqu'à 100mw	30-60	40-60	3000-4000 Dollar/KW	Supérieur à 90000 heures

Tableau III-2 : Caractéristiques des différents types de piles à combustible. [48]

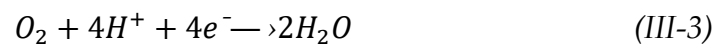
III-5.1 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC):

Ce type de pile à été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fut ensuite vite remplacé par des AFCs, faute de rendement suffisant. Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de type Nafion (fabriquées par la société Dupont de Nemours), permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour la généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C, de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent :

A l'anode, on a :



Et à la cathode, on a :



L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des Protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux centres de recherche sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeurs d'ions plus efficaces et également moins coûteux.

Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de Composites de métaux à base de carbone. [50]

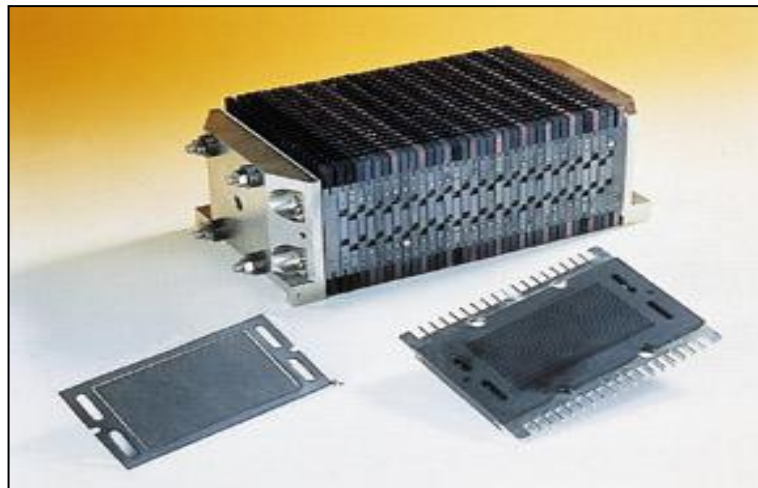
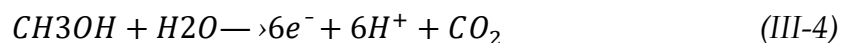


Figure III-4: Stack d'une pile à combustible à membrane. [48]

III-5.2 Pile à méthanol direct (DMFC):

La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C :

A l'anode:



Et à la cathode on a:



Dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane. Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels du à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile. [51] [52]

III-5.3 Pile à acide phosphorique (PAFC) :

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.

Les avantages des PAFCs sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) à des températures variant de 150 à 220°C.

A l'anode:



Et à la cathode :



Comme dans le cas des PEMFCs, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat côtelé dans le quel l'électrolyte peut être stocké. [53]

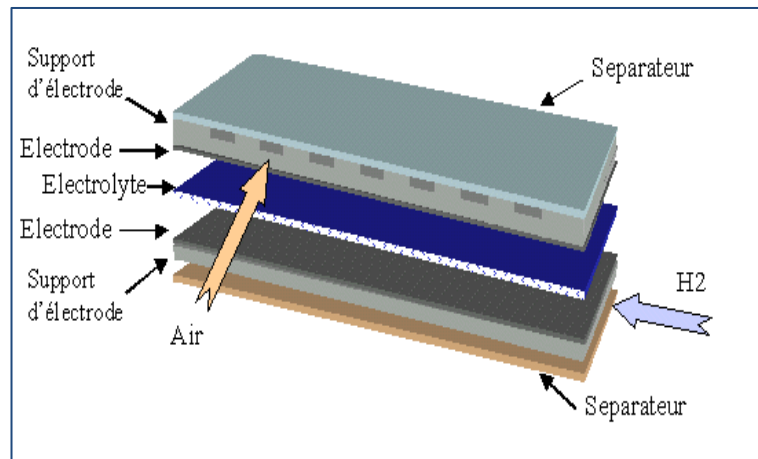


Figure III-5: Géométrie des piles PAFC. [50]

III-5.4 Pile alcaline (AFC):

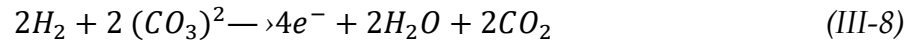
Les piles alcalines sont les piles à combustible développées au début des années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise un électrolyte liquide, en général de l'hydroxyde de potassium (KOH) qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Cependant, elle ne travaille correctement que lorsqu'elle utilise de l'hydrogène et de l'oxygène purs. En effet, lors de l'utilisation d'air ou d'hydrogène réformé, le dioxyde de carbone contenu dans ces derniers réagit avec l'électrolyte KOH et forme du carbonate de potassium, ce qui réduit la mobilité des ions.

Cette pile a l'avantage d'utiliser une grande variété de catalyseurs et présente le meilleur rendement de toutes les piles à combustible. [54]

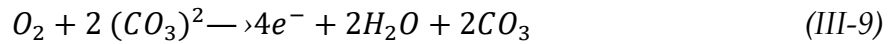
III-5.5 Pile à carbonate fondu (MCFC):

Le développement des piles à combustible à carbonate fondu a débuté dans le milieu du vingtième siècle. Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements supérieurs à 50%, voir supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs. De plus les MCFC peuvent utiliser une large gamme de carburant, et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas des piles à basses températures.

A l'anode, on a la réaction suivante :



Au niveau de la cathode :



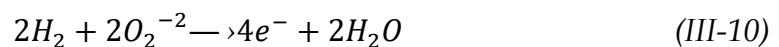
L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel de la côte de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et de la température de fonctionnement très élevée. [52].

III-5.6 Pile à oxyde solide (SOFC):

Le principe de fonctionnement des SOFCS est basé sur le mécanisme suivant. L'oxygène est dissocié à la cathode en O²⁻, puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons. [50]

Les réactions mises en jeu sont les suivantes :

A l'anode:



A la cathode:



On trouve plusieurs technologies de SOFC :

A- La technologie cylindrique : Ici un tube sert de support à l'ensemble qui l'entoure sous forme de couches concentriques.

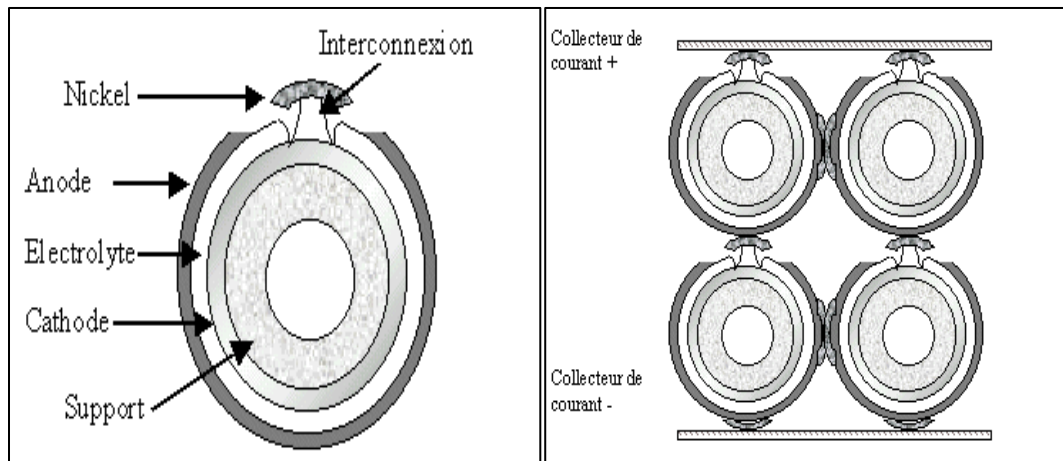


Figure III-6: Technologie circulaire. [51]

B- La technologie plane : Cette structure est plus compacte et plus simple. Chaque des cellules est reliée aux par des plaques bipolaires et séparées des autres par joints d'étanchéité, qui cause parfois un véritable problème dans l'utilisation de ses piles.

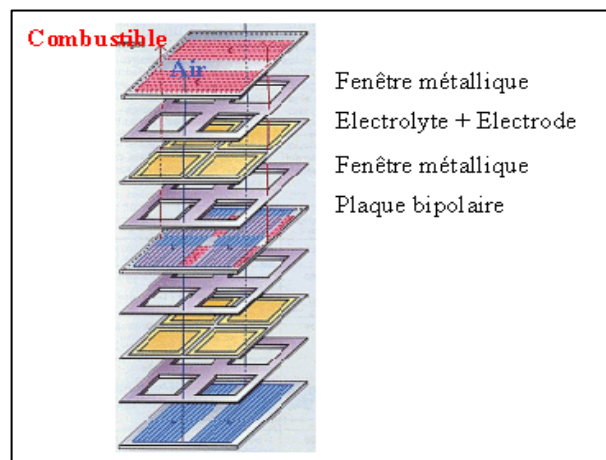


Figure III-7: Technologie plane. [51]

C- La technologie dite de Sulzer Hexis : C'est une structure plane et circulaire. Les cellules sont séparées des autres par des échangeurs. [2]

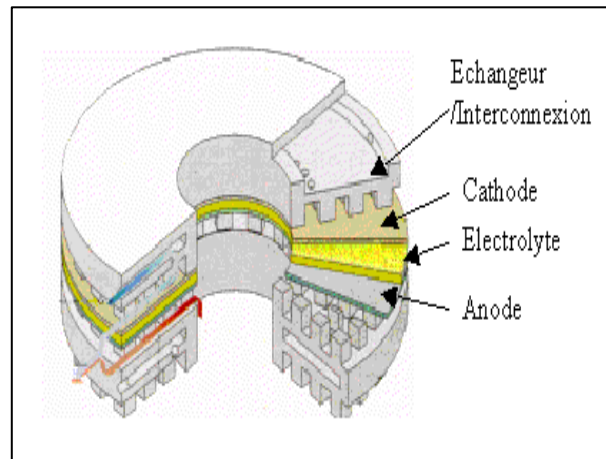


Figure III-8 : Pile de Sulzer Hexis. [51]

III-6 Avantages et l'inconvénient des piles à combustible:

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré, SOFC ou MCFC par exemple, mais aussi du type d'application visé, portable ou stationnaire par exemple. Toutefois, des avantages et inconvénients généraux ressortent souvent. Les avantages sont les suivants:

III-6.1 Rendement de la conversion énergétique:

Grâce à la conversion directe 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; ceci nous donne un rendement important.

III-6.2 Modulabilité:

Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes. La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de la taille de la pile.

III-6.3 Flexibilité:

Les piles à combustible pouvant avoir différentes tailles, elles peuvent aussi par conséquent être disposées en différents endroits avec un minimum de place. Ne comportant pas de parties mobiles, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores. De ce fait, les piles à combustible peuvent très bien être à proximité de quartiers résidentiels.

III-6.4 Propreté:

Les piles à combustible rejettent moins de gaz nocifs (CO_2 , NO_x).

III-7 Les inconvénients :**III-7.1 Coûts importants liés aux matériaux :**

Les piles à combustible hautes températures sont schématiquement de deux types, cylindrique ou planaire. Pour les cylindriques, les coûts de fabrication sont élevés mais il y a moins de problèmes pour les systèmes car les empilements se font avec des cellules indépendantes mécaniquement les unes des autres, et parce que l'étanchéité se fait en zone froide. Pour les piles planaires, les coûts de fabrication sont moins importants, mais les problèmes apparaissent pour la réalisation des systèmes car les empilements se font en reliant mécaniquement les cellules et les étanchéités se font en zone chaude.

III-7.2 Economie:

L'introduction de dispositifs sur le marché de l'énergie implique pour le moment un capital important pour faire face au coût des retours sur investissements. En effet, il n'y a pas de réseau de distribution d'hydrogène par exemple.

III-8 Les éléments constituent la pile à combustible:

Chaque type de pile a sa structure géométrique propre figure (III-9), cependant les composants principaux restent les mêmes. Le cœur de la pile est constitué :

- Des électrodes.
- L'électrolyte (La membrane).

- Des backings (couche de diffusion entourant les électrodes).
- Les plaques bipolaires.

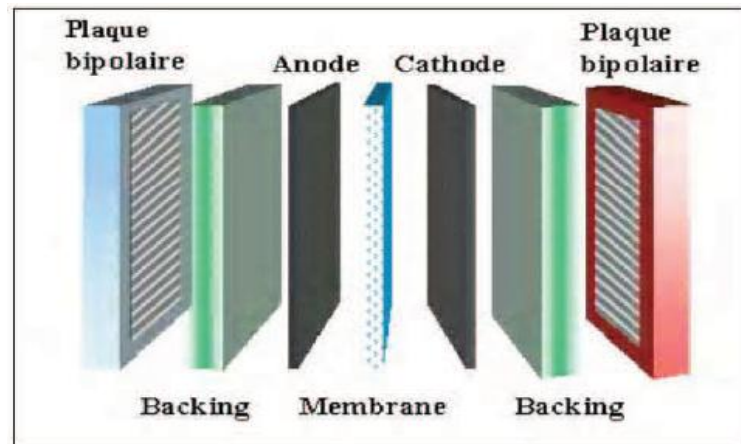


Figure III-9: Eléments d'une PAC. [51]

III-8.1 Les électrodes:

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. Pour que l'hydrogène (ou tout autre carburant) soit oxydé, un catalyseur est nécessaire. De même pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques. Une température plus élevée permettrait en théorie de faciliter ces échanges, mais cela impose des contraintes sur les matériaux. Les électrodes qui transportent les ions et les électrons sont le lieu des réactions. Par conséquent, ces éléments doivent être poreux, conducteur et posséder une grande surface d'échange.

- **Les catalyseurs**
- **Du côté anode :**

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilise des métaux précieux : platine

Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme de particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe. Ces électrodes sont très sensibles au CO et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du reformage, on

assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance. De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher (80F/g) ou la diminution de la quantité nécessaire : alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) afin d'éviter le problème d'empoisonnement au CO.

- **Du côté cathode :**

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe.

III-8.2 L'électrolyte :

L'électrolyte varie en fonction du type de pile : KOH pour les piles AFC, membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC ou les DMFC, acide phosphorique pour les PAFC, carbonates fondus pour les MCFC et oxydes solides pour les SOFC. Il permet que les ions (et pas les électrons) transitent de l'anode vers la cathode. Ces électrolytes déterminent la température de fonctionnement de la pile. Les caractéristiques de chaque type de pile sont leur conductivité ionique, leur étanchéité aux gaz, leur stabilité face aux réactifs chimiques, leurs propriétés mécaniques. A cela s'ajoute d'autres contraintes selon le type de pile, le niveau de la température, les composants des gaz, les espèces ioniques passant à travers l'électrolyte ainsi que les conditions de pression. Quant à l'électrolyte, il doit être dense et imperméable aux différents gaz utilisés. L'imperméabilité aux gaz est nécessaire pour éviter tout contact entre l'oxygène et l'hydrogène qui serait préjudiciable au bon fonctionnement de la cellule.

L'électrolyte est également un bon conducteur ionique pour assurer la migration des ions. En revanche, il ne doit pas conduire les électrons pour ne pas mettre la pile en court-circuit en créant un contact électrique entre l'anode et la cathode.

III-8.3 Les plaques bipolaires:

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Elles ont, aussi plusieurs rôles :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur ;
- Collecter le courant ;
- Gérer les flux d'eau.

Généralement en graphite, ces plaques doivent être conductrices du courant, mais aussi permettre une diffusion homogène des gaz jusqu'aux électrodes ainsi qu'intervenir dans la gestion de l'eau à évacuer ou à apporter pour humidifier (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent être résistantes aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique).

La structure de ces ensembles est intéressante : des canaux y sont gravés pour permettre le passage des réactifs. Réalisés par usinage, ils sont très chers.

A ces composants essentiels qui forment le cœur de la pile s'ajouteront ensuite des auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement. Il s'agit des réservoirs pour le carburant et l'eau, du compresseur pour l'air, de l'humidificateur, des pompes pour le carburant et l'eau, des échangeurs de chaleur pour refroidir la pile, de l'onduleur pour transformer le courant continu.

III-9 Configurations des piles:

Les parties suivantes présentent les différentes géométries qui ont pu être existes, la variété des géométries est importante : elles ont toutes des avantages et des inconvénients qui sont souvent un compromis entre coût de fabrication, facilité d'empilement et donc de pouvoir réaliser des piles de tailles variables, ou même encore facilité dans la résolution des problèmes d'étanchéité des chambres gazeuses qui est un point très important pour les piles à combustible.[55]

III-9.1 Géométrie tubulaire:

La géométrie telle que schématisée sur la figure (III-10), présente les avantages suivants :

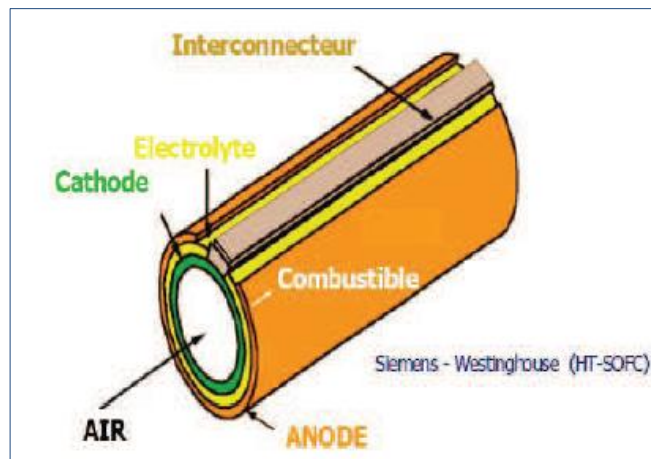


Figure III-10 : Schéma de principe de la géométrie tubulaire. [52]

- L'absence de joints d'étanchéité dans la zone dite « chaude » de fonctionnement de la pile entre les deux compartiments gazeux, ce qui est très important pour des céramiques fonctionnant et fabriquées à hautes températures.
- La structure complète est robuste car les couches sont déposées sur un support épais et chaque cellule de cette géométrie est indépendante des autres.
- Cette indépendance permet quelques degrés de liberté dans le désaccord dilatométrique entre les matériaux sans craindre de fissures ou de ruptures.

Cependant, les inconvénients suivants sont développés :

- Le chemin du courant à travers de la pile est relativement long. Ce chemin est court à travers de l'électrolyte et des inter connecteurs mais long à travers des électrodes.
- Les tubes support des couches apportent un poids supplémentaire inutile qui diminue d'autant la densité de puissance de la pile.
- L'épaisseur du tube support diminue la quantité d'oxygène transporté vers les sites réactionnels de la cathode, diminuant ainsi les performances. Ainsi, la diffusion des gaz à travers du support peut devenir l'étape limitant de la pile. Néanmoins, ce phénomène peut être annihilé si la cathode est utilisée directement comme support.
- Enfin, le procédé de dépôt par EVD (Electrochemical Vapor Deposition) qui est très utilisé limite drastiquement le choix des dopants pour l'électrolyte et les interconnecteurs ce qui peut limiter les performances.

III-9.2 Géométrie plane :

La géométrie plane présente les avantages suivants :

- La conduction se faisant perpendiculairement au plan des cellules, la résistance interne des dispositifs ne dépend pas de la surface des cellules mais seulement de leur épaisseur qu'il convient alors de minimiser pour réduire la résistance électrique.
- La flexibilité des systèmes en géométrie plane est plus importante que dans les autres géométries. En effet, les cellules peuvent être de section carrée, rectangulaire, ronde voir même hexagonale, et on peut rajouter des cellules à la suite autant que nécessaire sans pour autant perturber la gestion des gaz ni du système complet.
- Cette géométrie est simple de fabrication et met en œuvre des techniques peu onéreuses. Les différents éléments, électrolyte, électrodes ou inter connecteurs peuvent être fabriqués séparément évitant les cofrittages. Il est donc aussi possible dans ce cas d'intégrer des composants métalliques comme pour les interconnecteurs.
- Enfin, les contrôles qualité des différents éléments sont plus faciles du fait de leur grande indépendance les uns des autres.

Cependant, les inconvénients suivants sont aussi présents :

- Cette géométrie nécessite l'utilisation de joints haute température pour l'étanchéité entre les compartiments. Des joints, compressifs (joint d'or), céramiques (verres) ou ciments ont été proposés sans pour autant être complètement satisfaisants. Des contraintes mécaniques importantes peuvent apparaître et détériorer les cellules, mais aussi des réactions chimiques, surtout pour les verres, avec les composants de la pile et diminuer tout ou partie des performances.
- En pratique, augmenter la taille et la longueur des dispositifs augmente le parcours des ions et électrons et donc aussi la résistance interne. D'autre part, la réalisation indépendante de chacun des éléments apporte une grande résistance de contact lors de l'assemblage final des éléments, et il est donc parfois préférable de faire des empilements des matériaux suivis de cofrittage.

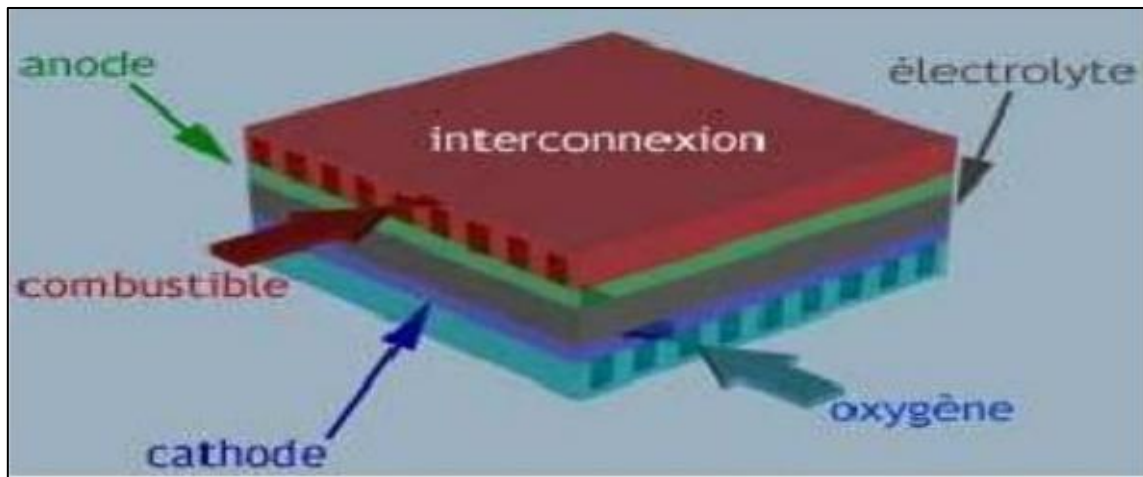


Figure III-11: Technologie planaire classique. [48]

III-9.3 Géométrie monolithique:

Les avantages principaux de cette géométrie sont :

- Une dimension des cellules très petite qui augmente les surfaces actives et réduit les pertes résistives grâce à la réduction du chemin des courants ionique et électronique. En effet, les ions comme les électrons traversent dans le plan de l'électrolyte et des électrodes, la résistance interne est donc faible.

- Grâce à la résistance interne faible, les piles de géométrie monolithique peuvent fonctionner à des densités de courant plus élevées tout en ayant la même tension de sortie que pour d'autres géométries.

- Enfin, la densité de puissance est accrue grâce à l'augmentation des surfaces actives, à de plus grande densité de courant et aussi grâce à l'élimination des supports de dépôt. Ces piles sont donc aussi moins lourdes que pour les géométries précédentes.

Cependant, les inconvénients suivants peuvent être soulignés :

- Le principal inconvénient est l'obtention de la structure ondulée qui nécessite donc un court circuit de l'ensemble du fait de cette structure très imbriquée.

- L'intégrité de la structure dépend de l'accord dilatométrique de chacun des matériaux entre eux mais aussi du retrait de frittage de chacun pour ne créer aucune

fissure, mais surtout aucune contrainte qui pourrait se révéler lors du fonctionnement.

Enfin, pour s'assurer de la qualité des structures finies, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques d'analyse non destructives.

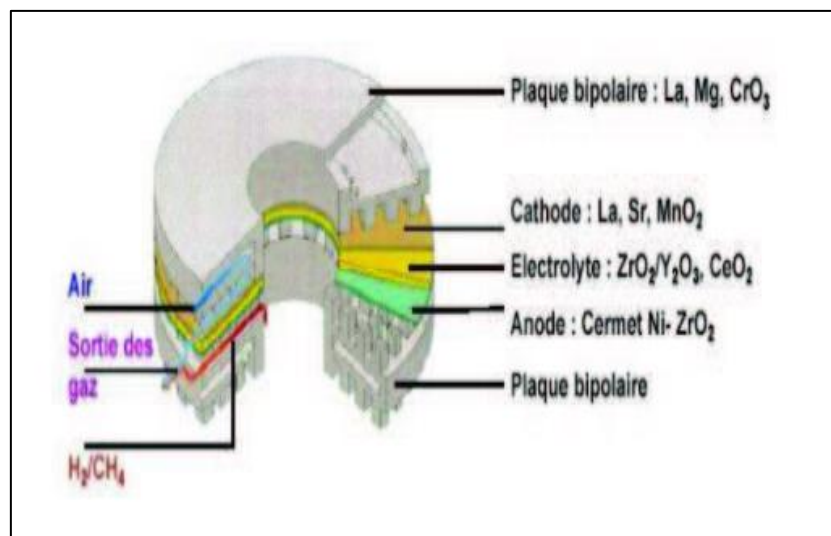


Figure III-12 : Cellule unitaire de chez Sulzer-Hexis [50]

III-10 Applications:

Les marchés potentiels des piles à combustible apparaissent aujourd'hui multiples, ils sont généralement classés en trois grandes familles d'application: portables, stationnaires et transport.

III-10.1 Les applications portables :

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW, 50 mW en veille et quelques watts en conversation) et l'ordinateur portable (qui consomme en moyenne 10 W). Ces deux applications connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même la plus performante comme la batterie lithium-ion. Cette dernière atteint aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 160 Wh/kg qui laisse généralement quelques jours d'autonomie à un téléphone portable et environ 3 heures à un ordinateur portable. Or les clients

demandent aujourd'hui 3 à 5 fois mieux alors que la batterie électrochimique est proche de ses limites. Pour donner une idée de l'enjeu, il suffit de considérer le marché des «portables»: 300 millions d'unités vendues pour les téléphones mobiles fin 1999 dans le monde et 640 millions en 2005; 18 millions d'ordinateurs portables vendus en 1999 et 40 millions en 2005.

La solution qui fait l'objet de recherches importantes, essentiellement aux États-Unis, est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol.

L'utilisateur rechargera son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.

Des prototypes existent déjà et les premiers produits commerciaux sont prévus d'ici trois à quatre ans. La technologie qui sera utilisée est la PEMFC du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide, alimentée soit directement en hydrogène, soit méthanol dans sa version méthanol direct. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle, soit environ 0,80 \$/Wh.

En ce qui concerne les applications portables, les critères économiques seront probablement d'une importance moindre que pour les autres domaines, car la qualité du nouveau service rendu justifiera, au moins dans un premier temps, un surcoût par rapport à la solution actuelle.



Figure III-13: Un portable chargé par une PAC model POWERTREEK (MyFc). [53]

III-10.2 Les applications stationnaires :

Compte tenu de la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier aux États-Unis. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications: la production collective (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 200 kW à quelques MW) et la production individuelle ou domestique (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 2 à 7 kW).

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC, même si d'autres technologies (MCFC et SOFC) font également l'objet de tests, mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation proche.

Dans le domaine de la production individuelle (habitat), plusieurs projets sont en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle et la première commercialisation était en 2002, avec un coût annoncé autour de 0,10 \$/kWh électrique. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur à 60°C (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques: un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène.



Figure III-14: L'installation Siemens-Westinghouse de Irvine (220 kW) (2002). [53]

III-10.3 Les applications de transport :

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes dans leurs besoins, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement (donc les coûts admissibles) ne seront pas du tous les mêmes. [39]

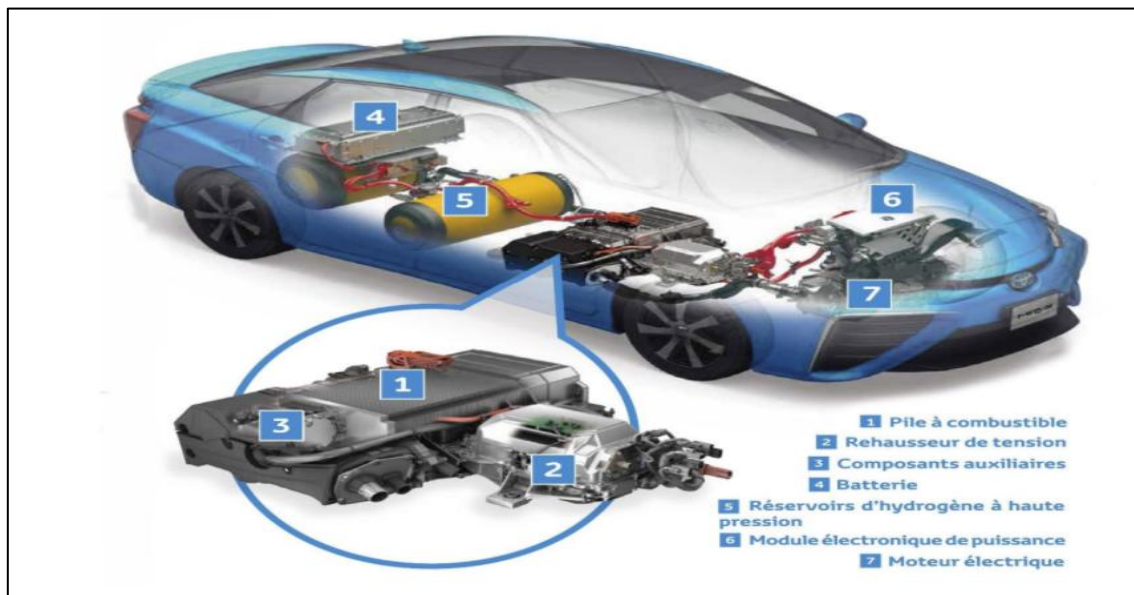


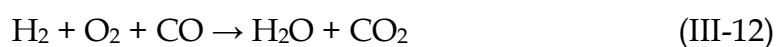
Figure III-15: Schéma d'une voiture équipé de la pile à combustion. [53]

III-11 Modèle électrochimique :

III-11.1 Potentiel de la pile :

L'hydrogène et l'oxygène (figure :III-16) arrivent sous pression dans les électrodes, les électrodes sont poreuses permettant ainsi l'accès de gaz vers l'électrolyte.

La réaction totale de la cellule est :



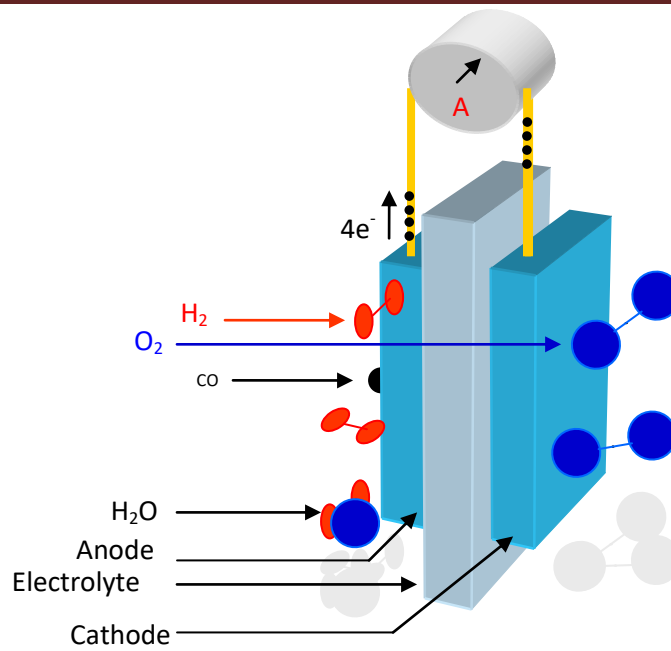


Figure III-16: Comportement des gaz dans la pile SOFC. [54]

La variation d'enthalpie libre de la réaction chimique s'écrit. [54]

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{III-13})$$

Avec :

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad (\text{III-14})$$

Et

$$\Delta U = W + Q \quad (\text{III-15})$$

Où :

ΔG : Variation d'enthalpie libre.

ΔH : Variation d'enthalpie.

T : Température.

ΔS : Variation d'entropie.

P : Pression.

ΔV : Variation du volume.

ΔU : Variation d'énergie interne.

W : Travail.

Q : Chaleur.

De (III-14) et (III-15) l'équation (III-13) s'écrit :

$$\Delta G = W + Q + P\Delta V - T\Delta S \quad (\text{III-16})$$

La transformation est réversible et donc :

$$Q = T\Delta S \quad (\text{III-17})$$

Et l'équation (III-16) s'écrit :

$$\Delta G = W + P\Delta V \quad (\text{III-18})$$

De plus, W comprend ici le travail électrique (-nFE.) et le travail des forces de pression (-PΔV), donc :

$$\Delta G = -nFE - P\Delta V + P\Delta V \quad (\text{III-19})$$

Par suite, on a simplement :

$$\Delta G = -nFE. \quad (\text{III-20})$$

Avec :

E : Force électromotrice de la pile.

F : Constante de Faraday.

n : Nombre d'électrons transférés.

L'enthalpie libre de la réaction chimique (III-12) est :

$$\Delta G_r = G_{\text{H}_2\text{O}} - G_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}G_{\text{O}_2} \quad (\text{III-21})$$

Les équations (III-16) et (III-21) nous permettent d'écrire :

$$\Delta G_r = G_r - NRT \log \frac{P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}} P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{III-22})$$

Avec :

R : Constante molaire des gaz.

P_{O_2} , P_{H_2} , $P_{\text{H}_2\text{O}}$ Sont respectivement la pression d'oxygène, d'hydrogène et la

pression de la vapeur d'eau.

En divisant les deux membres de l'équation (III-22) par -nF, il vient :

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \log \frac{P_{O_2}^{\frac{1}{2}} P_{H_2}}{P_{H_2O}} \quad (\text{III-23})$$

III-11.2 Potentiel réel de la pile :

La pile à combustible produit un potentiel V , inférieur au potentiel idéal de telle sorte qu'on écrit :

$$V = E - \text{pertes.} \quad (\text{III-24})$$

Ces pertes sont dues aux pertes de charge irréversibles appelées aussi, polarisations, qui sont polarisation d'activation, polarisation ohmique et la polarisation de concentration.

a. Polarisation d'activation :

La polarisation d'activation est présente quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. En d'autres termes, la polarisation d'activation est directement reliée au taux de la réaction électrochimique. Dans les deux cas, pour qu'une réaction chimique ou électrochimique puisse démarrer, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation. [54]

Les pertes d'activation sont exprimées par l'équation suivante : [56]

$$\eta_{\text{act}} = \frac{RT}{\alpha_c nF} \log\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (\text{III-25})$$

Où :

i : Densité de courant.

i_0 : Densité du courant d'échange.

α_c : Coefficient de transfert de charge.

b. Polarisation ohmique :

Elle est due à la résistance qui rencontre le flux en traversant l'électrolyte et le circuit électrique, il due aussi à la résistance électrique dans les plaques de diffusion (Backing). [50]

Les pertes ohmiques sont exprimées par l'équation suivante.

$$\eta_{oh} = \alpha \exp[\beta(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})] \quad (III-26)$$

Où :

α et β : coefficients de la résistance ohmique.

T : Température de la cellule.

c. Polarisation de concentration

Lorsque à l'anode il y'a une perte de potentiel due à l'incapacité du système à maintenir, la concentration initiale des réactifs, nous avons alors, la formation d'un gradient de concentration.

De nombreux facteurs peuvent contribuer à la polarisation de concentration, la faible diffusion du gaz a travers les électrodes poreuses et la dissolution des réactifs.

Ces pertes sont données par la relation suivante. [47] [49]

$$\eta_{con} = \frac{RT}{nF} \ln(1 - \frac{i}{i_l}) \quad (III-27)$$

Où :

i : Densité de courant de charge.

i_l : Densité de courant limite.

De (III-23), (III-25), (III-26) et (III-27), la tension de sortie de la pile en tenant compte des différentes pertes est donnée par:

$$V_c = N_0(E^0 + \frac{RT}{nF} \log \frac{P_{O_2}^{1/2} P_{H_2}}{P_{H_2O}}) - \frac{RT}{nF} \ln(1 - \frac{i}{i_l}) - \frac{RT}{\alpha_c nF} \log(\frac{i}{i_0}) - \alpha \exp[\beta(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})] \quad (III-28)$$

III-12 Simulation et présentation des résultats :

La modélisation des équations électrochimiques s'intéresse aux performances des piles à combustible de type SOFC. Le modèle de la pile est simulé avec un logiciel de simulation dit Matlab Simulink.

La modélisation électrique de la pile est basée sur une expression de la tension en circuit ouvert et de différentes surtensions : activation, ohmique et concentration. Cette expression prend en compte les pressions partielles des espèces chimiques.

Les valeurs des paramètres utilisés pour la simulation sont regroupées dans le tableau suivant :

E_0	1.18 V
R	8.314 (J/ mole °K)
F	96500 (C /mol)
A	0.2
B	-2870
i_l	0.8 A/Cm ²

Tableau III-3 : Paramètres de simulation de la Pile SOFC

III-12.1 Caractéristique tension-courant de la pile :

La caractéristique (tension/courant) d'une cellule obtenue est représentée sur la figure (III-17) :

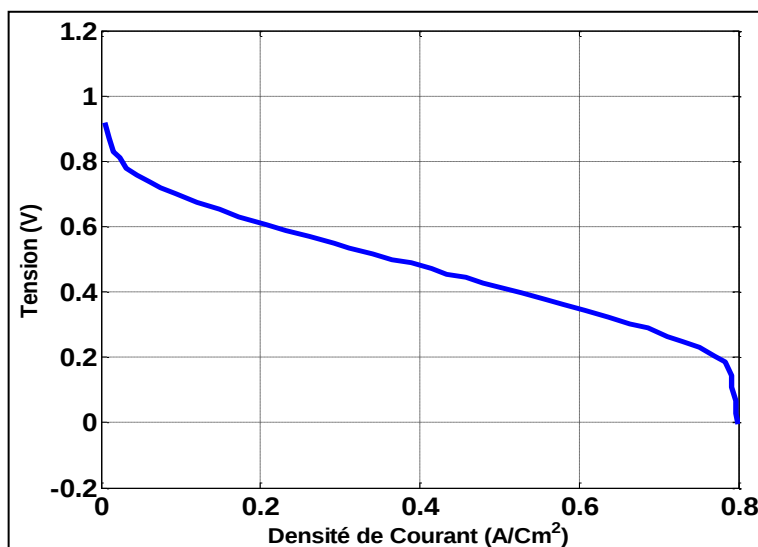


Figure III-17: la caractéristique électrique (tension courant) d'une cellule élémentaire.

Normalement la potentielle thermodynamique théorique égale 1,27 V, mais, la tension en circuit ouvert ($I = 0$) égale 0,94 V (figure III-17).

Cette première réduction est liée aux irréversibilités des réactions électrochimiques, notamment de la réduction de l'oxygène à la cathode. De plus, pour les faibles densités de courant, (de 1.10^{-3} à 0.1 A/Cm^2), des contre réactions sur les électrodes, dont l'importance est liée à leur cinétique, génèrent des surtensions d'activation.

Ensuite, pour la partie linéaire de la courbe, ce sont les pertes liées aux résistances électroniques et ioniques internes (figure III-19) qui diminuent la tension entre électrodes.

Enfin, pour les hautes densités de courant, c'est la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes qui devient le facteur limitant. Ce phénomène est dû aux pertes de concentration (figure III-20)

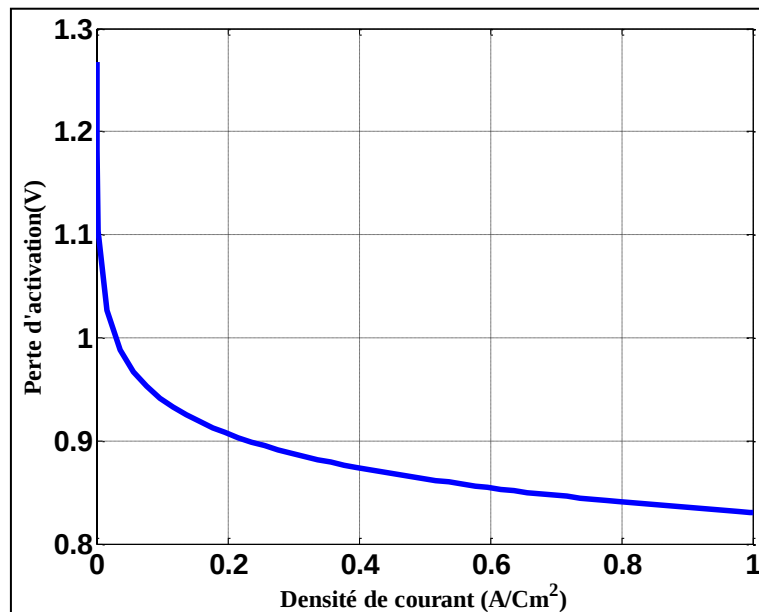


Figure III-18: Pertes d'activation d'une pile combustible de type SOFC

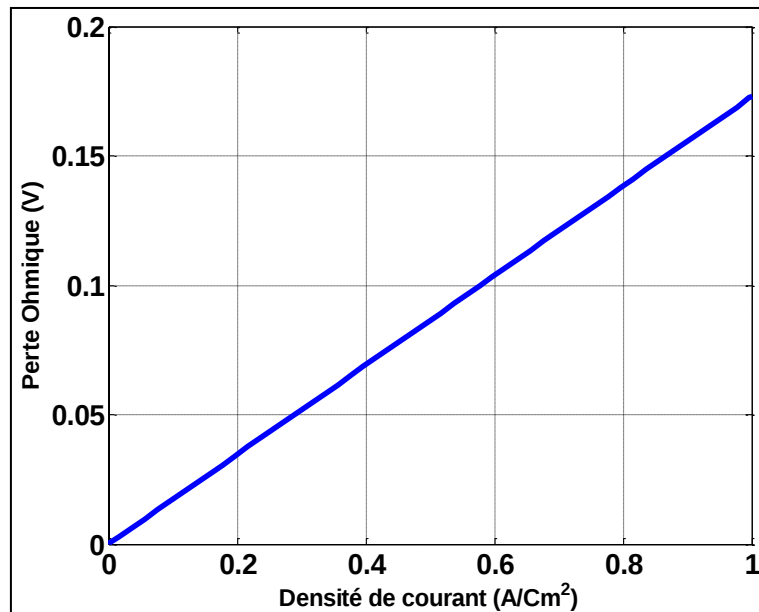


Figure III-19 Pertes ohmiques d'une pile combustible de type SOFC

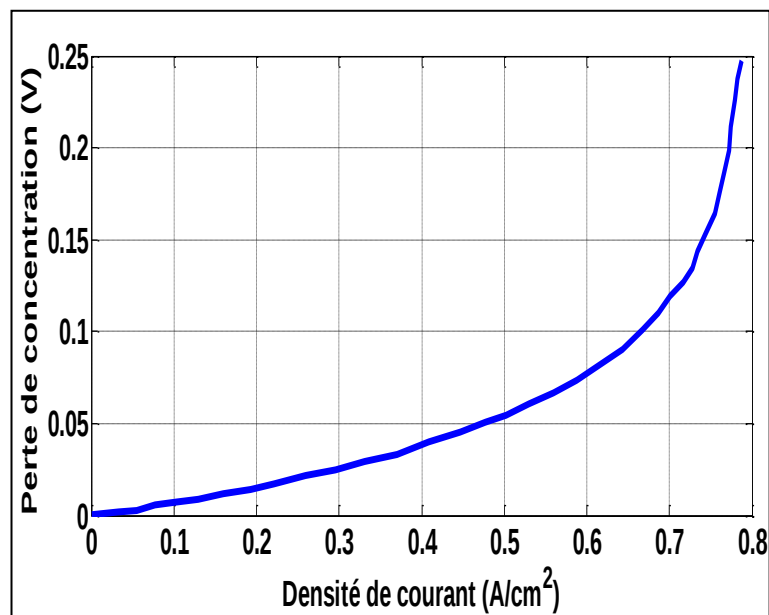


Figure III-20: Pertes de concentration. d'une pile combustible de type SOFC

III-12.2 La puissance :

La figure III-21 représente la courbe de la densité de puissance en fonction de la densité de courant. Elle est presque parabolique, elle croît puis atteint un maximum et enfin diminue rapidement. Ce comportement est dû à l'effet des polarisations qui sont directement relié à la densité de courant.

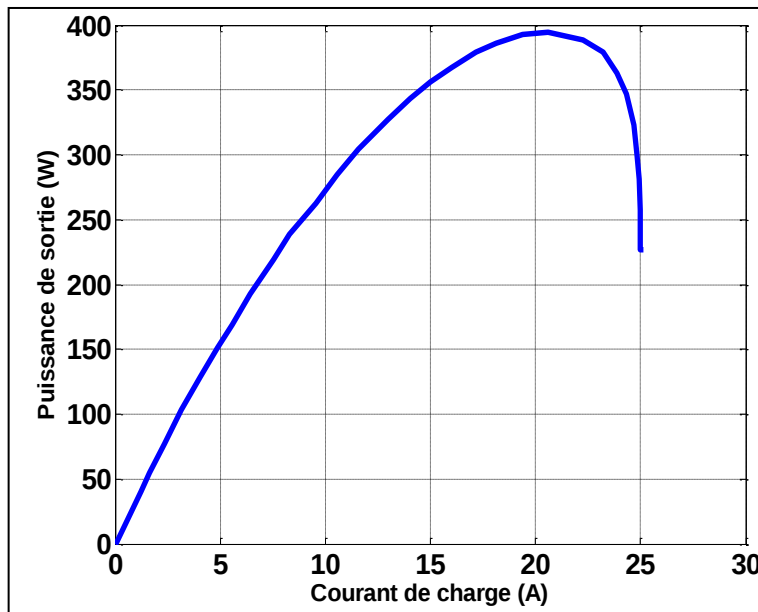


Figure III-21: Densité de puissance d'une pile combustible de type SOFC

III-12.3 Rendement électrique :

La figure III-22 montre la variation du rendement électrique en fonction de la densité de courant. Nous remarquons que le rendement électrique à circuit ouvert égal 0,78, puis il diminué jusqu'au 0.15, donc ce rendement est directement proportionnel à la charge.

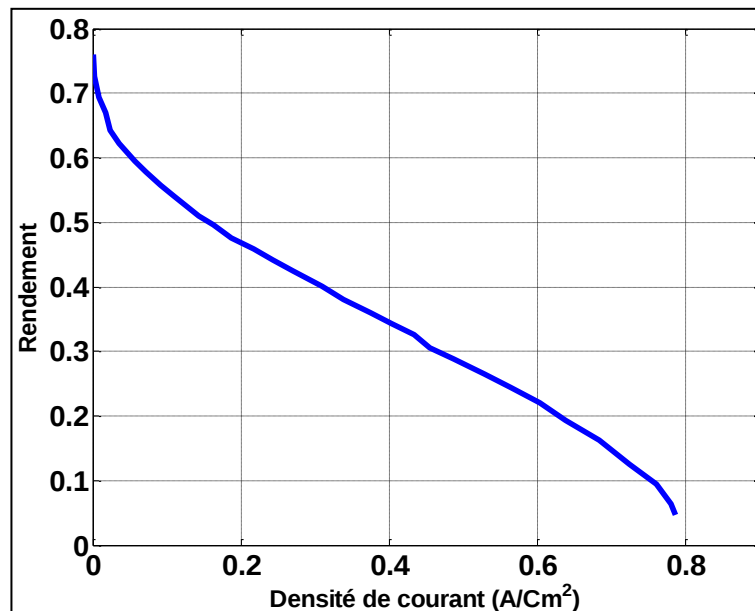


Figure III-22: Rendement électrique de la cellule d'une pile combustible de type SOFC

III-13 Dimensionnement de la pile :

Le dimensionnement de la pile consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules, il est intéressant à vérifier le composant à un stack de pile à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir.

Comme le montre la Figure (III-21) d'avoir des densités de puissance élevées (pour réduire l'encombrement et le coût/kW de la pile). Cela passe par une faible surface de cellule, donc des densités de courant élevées. Cette contrainte s'oppose à l'objectif d'avoir une tension par cellule élevée.

Une trop forte densité de courant conduit de plus, à un rendement faible (figure III-22) et donc à une puissance thermique à évacuer élevée, ce qui posera des problèmes pour le système.

III-13.1 Détermination du nombre de cellules :

La puissance électrique du stack se calcule par la relation suivante:

$$P = N_0 * V_c * J * S \quad (III-29)$$

Où :

P: Puissance électrique brute du stack (W).

N_0 : Nombre de cellules.

V_c : Tension par cellule (V).

J: Densité de courant (A/m²).

S: Surface active des cellules (m²).

V_c et J sont liés par la caractéristique tension/courant de la pile, il reste donc trois variables indépendantes à ajuster de façon à obtenir la puissance souhaitée.

Les contraintes liées à l'application vont nous permettre de faire les choix nécessaires.

Il est intéressant d'avoir la tension $V_p = V_c * N$ la plus élevée et donc le courant $I = J * S$ est plus faible possible car cela limite les pertes joule dans la cellule.

Pour une densité de courant de 0.2 A/cm² ce qui correspond à une tension de

$V_c = 0.6$ (Figure III-17) et un rendement électrique de 0.5 (figure III-22) et pour une tension du stack de 230V, le nombre de cellules correspond à tous ces paramètres peut être calculé comme suit :

$$N = \frac{U}{V_c} = \frac{230}{0.6} = 383.33.$$

C'est-à-dire $N = 384$ cellules.

III-13.2 Détermination de la surface des cellules :

Il est maintenant possible de déterminer les autres paramètres tels que le courant et la surface.

Pour une puissance de 46KW le courant de la pile égal à :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{46000}{230} = 200A$$

Tandis que la surface égale à

$$S = \frac{I}{J} = 1000 \text{ Cm}^2.$$

III-14 Etude paramétrique :

III-14.1 L'effet de la température :

La figure III-23 suivante, montre l'effet de la température sur la tension d'une cellule élémentaire.

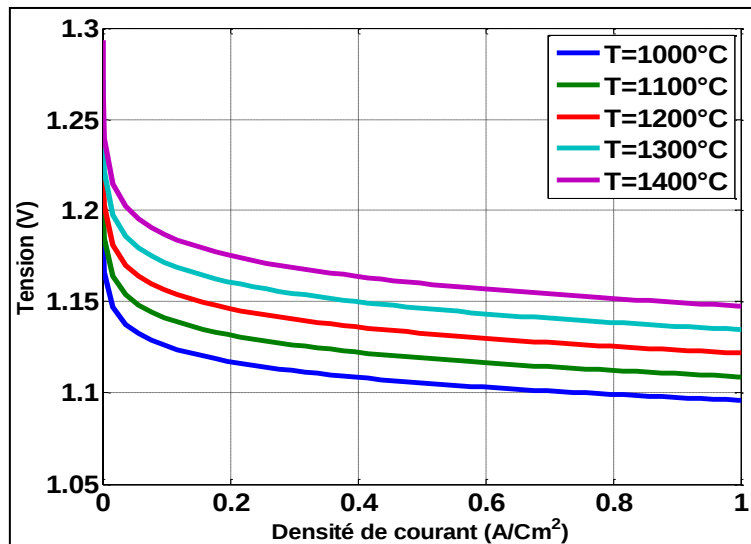


Figure III-23 : L'effet de la température sur la tension d'une cellule élémentaire.

D'après cette figure, on constate bien que l'augmentation de la température de la pile joue un rôle bénéfique sur la tension de cette dernière, ce ci est expliqué par la forte conduction ionique de l'ensemble (électrolyte, plus les électrodes) engendrée pour des températures plus élevées (exemple $T = 1300^{\circ}\text{C}$ et $T = 1400^{\circ}\text{C}$).

Donc pour assurer un bon fonctionnement de la cellule, il est nécessaire d'augmenter la température.

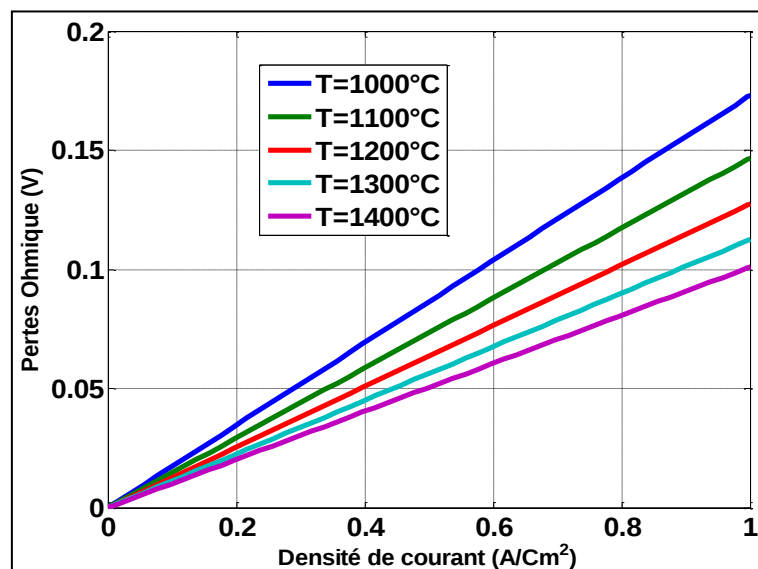


Figure III-24: L'effet de la température sur les pertes ohmiques de la cellule.

III-15 Etude comparative entre PV/PAC :

La consommation mondiale d'énergie va augmenter dans les prochaines décennies, même s'il est difficile de prédire et de quantifier cet accroissement.

Cependant, les sources d'énergies renouvelables sont par nature dispersées et leur disponibilité est irrégulière. Ces spécificités et la répartition géographique des lieux de consommation posent le problème du stockage et du transport de l'énergie.

La diversité des sources d'énergies nous a poussé à chercher la source d'énergie la plus conforme, à savoir son rendement électrique et son coût réduit.

Alors quelle est la source d'énergie la plus adéquate? L'énergie photovoltaïque ou la pile à combustible ?

L'énergie solaire photovoltaïque est basée sur un phénomène physique qui provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de panneaux solaires qui constituent par des cellules composées d'un matériau semi-conducteur.

L'étude est basée sur la détermination des caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ d'un système de panneaux photovoltaïque. Ces caractéristiques sont influencées par plusieurs facteurs tel que :

- ❖ **La température** influe négativement sur la tension de circuit ouvert, on en conclut que les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.
- ❖ **L'éclairement** influe aussi sur le courant qui subit une variation importante, par contre la tension varie légèrement ce qui se traduit par une augmentation de la puissance. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement. Ce qui fait que la puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables.

D'autre part chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque dépend de la surface du module.

Entre 2010 et 2012, le rendement moyen, à l'échelle mondiale, des cellules en silicium monocristallin est passé de 17,2 à 18,6 % ; pour le silicium polycristallin (moins cher que le monocristallin), il a augmenté de 16,1 à 17 %.

L'installation des panneaux à un coût élevé par contre son coup de maintenance est relativement bas.

On observe une régression impressionnante : chaque doublement des capacités installées se traduit par une baisse du coût moyen de 19,3 %.

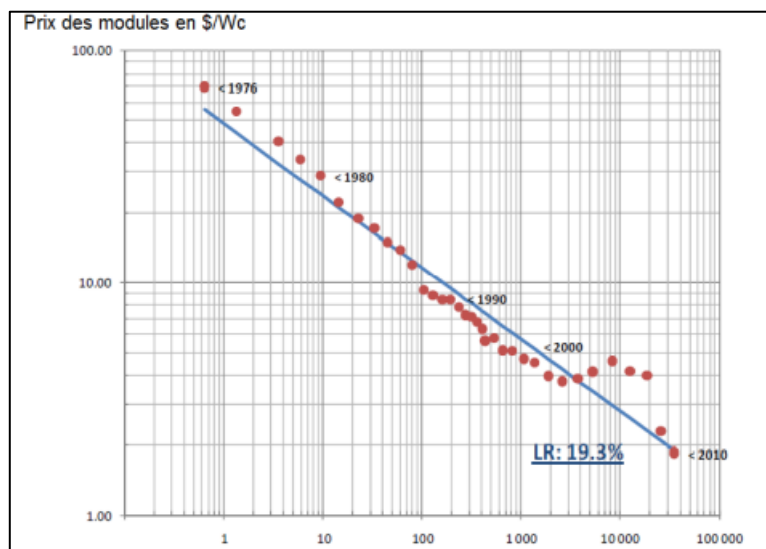


Figure III-26 : Chute de prix des modules photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque est une énergie propre non polluante qui respecte l'environnement.

Tout comme l'énergie photovoltaïque, la pile à combustible représente aussi une énergie renouvelable, propre et qui respecte l'environnement.

La pile à combustible est basée sur un phénomène électrochimique, qui convertit l'énergie interne d'un combustible d'une réaction entre l'oxygène et l'hydrogène directement en énergie électrique. Fait remarquable, les sous-produits de cette réaction, eau et chaleur, sont non polluantes et peuvent même être valorisés ce qui en fait un allié précieux dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Polluant	Hydrogène (Kg/GJ)
CO ₂	0
CO	0
SO ₂	0
NO _x	0.10

Tableau III-4 : Polluants émis par hydrogène.

La transformation d'énergie chimique en énergie électrique et thermique se fait, selon le type de pile, par des réactions différentes. Chaque type de pile a ses propres conditions de fonctionnement : milieu acide ou alcalin, température haute ou basse et électrolyte liquide ou solide. La pile du type SOFC a été choisie comme étant la plus adapté à diverses applications.

L'étude de la pile est basée sur une expression de la tension en un circuit ouvert et de différentes surtensions : activation, ohmique et concentration. Ces dernières sont classifiées selon la densité du courant comme suit :

- ❖ **Dans la faibles densité du courant**, il se produit une chute de tension due à une barrière d'énergie d'activation ;
- ❖ **Dans un courant à densité moyenne**, l'énergie du combustible lors de sa conversion se fractionne en chaleur, cette chaleur se transforme en pertes ohmiques due à des résistances aux transferts d'ions et d'électrons ;
- ❖ **Dans une densité de courant élevé**, il se produit une surtension de concentration qui est causé par la faible vitesse de transport des réactifs vers le site de réaction.

Dans le système de fonctionnement de la pile à combustible l'effet de la température et plus précisément l'augmentation de la température de la cellule influe sur la valeur de la tension. Donc pour assurer un bon fonctionnement de la cellule, il est nécessaire d'augmenter sa température.

Le rendement énergétique net électrique dépend du type de pile, il varie entre 50% et 80% selon le niveau de température et la nature de la membrane utilisée (liquide

ou solide). Ce rendement ne diminue donc pas dans le cas de petites installations. A l'opposé de l'énergie photovoltaïque qui elle nécessite une grande surface pour son installation.

La pile à combustible ne provoque aucun mouvement : Il n'y a donc pas d'usure et elle ne nécessite aucun entretien. Par contre, l'énergie photovoltaïque requiert une maintenance régulière des panneaux.

Le stockage de l'électricité reste un problème entier (le transport dans une moindre mesure) mais ses qualités sont indéniables,

Le coût va se répartir entre la membrane, les électrodes, le catalyseur, les plaques bipolaires. Le prix d'hydrogène reste élevé en comparaison avec les autres hydrocarbures mais malgré cela le coût reste réduit par rapport au coût des installations de l'énergie photovoltaïque.

Coût de l'électrolyseur		€/KW	2000	2500	800	800	800	800
Rendement électrolyse			60%	50%	80%	80%	80%	80%
Production annuelle		KWh	7000	2000	2000	1000	500	7000
Coût de l'électricité stockée		€/MWh	70	70	70	140	0	60
Coût de l' H₂ produit		€/Kg	7	18.3	6.1	12.2	10.5	3.7
	soit	\$/MBtu	68	177	59	118	102	36
	soit	€/MWh	178	463	154	309	267	94

Tableau III-5 : Coût de production de l'hydrogène par électrolyse.

De cette petite comparaison entre les deux énergies renouvelables PV/PAC on n'en conclut que la pile à combustible reste la meilleure source d'énergie par rapport à l'énergie photovoltaïque non seulement du côté de la surface utilisée pour ses

installations, de son rendement électrique mais aussi le coût, puisque la pile à combustible reste beaucoup moins cher.

III-16 Conclusion:

Les travaux réalisés dans ce chapitre nous ont conduit à différencier les types de pile à combustible selon la membrane. En choisissant la pile à combustible du type SOFC dans la simulation et qui nous a fourni des informations importantes concernant l'influence du courant et de la tension de sortie de la pile. Nous avons constaté aussi que l'évolution de tension peut être divisée en trois zones : la zone des pertes par activation, la zone de la chute ohmique et la zone des pertes par concentration. Et que pour assurer un bon fonctionnement de la cellule, il est nécessaire d'augmenter la température.

D'après l'étude comparative entre PV/PAC, la pile à combustible est plus productive en matière d'énergie électrique.

CONCLUSION

Conclusion générale

Depuis quelques décennies, l'insertion à grande échelle des sources d'énergies renouvelables doit contribuer efficacement au développement économique des pays suite aux fluctuations des coûts de combustibles qui ne cessent d'augmenter. Afin de remplacer en grande partie, les sources d'énergies conventionnelles dans la production de l'électricité, les chercheurs doivent penser sérieusement aux développements économique et technique de ces types d'énergies au futur proche.

Effectivement, le premier chapitre a été un rappel sur les différentes sources d'énergies renouvelables qui représentent une grande partie de notre avenir énergétique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV), nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Nous avons utilisé le logiciel MATLAB dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV.

Les principaux éléments auxquels a abouti notre recherche sont :

- Le courant délivré par le GPV est directement proportionnel à l'ensoleillement par contre la tension aux bornes du GPV est relativement peu dégradée par l'accroissement de celui-ci.
- L'augmentation de la température conduit à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, à une légère augmentation du courant de court-circuit, et à une diminution de la puissance maximale
- Pour profiter de la puissance maximale délivrée par un panneau solaire, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre ce panneau et la charge est nécessaire.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté une description générale d'une pile à combustible, ses différents types et son principe de fonctionnement. Ce

système est un dispositif électrochimique qui dégage de la chaleur et de l'eau. Cette description nous a permis de dire que la pile à combustible est perçue comme l'un des systèmes de production d'énergie les plus propres. La pile à combustible est utilisée dans différentes applications : stationnaire, de transport et portable.

Pour ce travail nous avons fait la simulation de la pile à combustible de type SOFC qui nous a donné les résultats suivants :

- La tension réversible est modifiée par trois sources d'irréversibilité (Surtension) : surtension ohmique, activation, concentration.
- Il convient ici de mentionner que la puissance maximale est obtenue pour le courant maximal que la pile peut fournir avant l'apparition des pertes de concentrations.
- les systèmes de piles à combustible fonctionnent à hautes températures.

Cette étude montre le champ de température et celui des fractions massique d'eau dans les trois parties; anode, électrolyte et cathode de la pile SOFC.

Et la distribution de température dans deux types de plans, un parallèle au sens de l'écoulement et l'autre perpendiculaire, est analysée en fonction des types de source de chaleur et en fonction de la densité de courant.

D'après nos recherches théoriques sur les énergies renouvelables et plus spécifiquement l'énergie photovoltaïque et la pile à combustible et en plus des résultats de simulation nous sommes arrivés à la conclusion suivante :

La pile à combustible est meilleure que l'énergie photovoltaïque. En effet, la pile à combustible a un bon rendement à l'opposé des panneaux photovoltaïques qui nécessitent une grande surface et qui demande un matériel qui coute excessivement cher. Et c'est pour cette raison là, qu'on a besoin d'une grande production d'énergie à cout réduit. Donc la pile à combustible reste la source la plus convenable pour une énergie propre et durable. Malgré qu'elle n'est pas assez utiliser par rapport à l'énergie photovoltaïque parce que les recherches dans ce domaine sont toujours en cours.

Comme perspective :

- L'application des systèmes hybrides ;
- Pile- Photovoltaïque ;
- Eolienne-Photovoltaïque ;
- L'application des systèmes de régulation et l'électronique de puissance pour connecter aux réseaux ;
- L'intégration des nouveaux matériaux.

- [1] Rapport Mondial REN21 sur les Energies Renouvelables, 2012.
- [2] S.KOURAT, A.GHOUT, « modèle et calcul d'une source d'énergie renouvelable pile à combustible », université Dr. Moulay tahar , saïda ,2015
- [3] C. Jules, G. Paul, N. Jordan, G. Guillaume, C. Madie, « Fonctionnement d'une centrale hydraulique (4AB - E1) », le site du collège MTA d'Auvergne à Thouars, 2013.
- [4] Ai, B, Yang, H, Shen, H., Liao, X., (2003). Computer-aided design of PV/wind hybrid system. Renewable Energy, vol. 28, pp. 1491-1512, 2003.
- [5] K.Khachatryan, « Le rôle des Energies Renouvelables dans la Politique de L'Union Européenne », Centre International de Formation Européenne Promotion Nice, 2006/2007.
- [6] S.R. Bull, «Renewable Energy Today and Tomorrow», Proceedings of the IEEE, vol.
- [7] Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER)
- [8] Wood Energy Barometer. Systèmes solaires n°158. Décembre 2003. EurObserv'ER.
- [9] Dr. L. BELAIDI, « Cours Energie photovoltaïque », Université de Bejaia, Faculté de technologie, Département de génie électrique, 2015, p.08.
- [10] S.LALOUNIS, « Etude commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie électrique », pour l'obtention du grade de Docteur en science, Université de A. Mira ,Bejaia 2009
- [11] M.SADI, Z.HAMLAT, « l'impact des énergies renouvelables sur le réseau électrique ouest algérie 220KV », Mémoire de fin d'étude, Université de MOLAY Tahar de Saïda, Faculté de technologie, 2014,p09
- [12] S.QUOILIN, « Les centrales solaires à concentration, Université de Liège », Faculté des sciences appliquées, Mai 2007, p.89.
- [13] H.BETTACHE, « Amélioration des cylindro parabolique », Mémoire de fin d'étude, Faculté de technologie, Bejaia, 2013, p.19

- [14] P.FREDERIC, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [15] O. De VRIES, « On the theory of the horizontal axis wind turbine», Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96
- [16] Désiré Le Gouiri, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.
- [17] FABIEN, l'hydrogène comme vecteur énergétique, Compagne Européenne des Technologies de l'Hydrogène.URL : <http://ipnweb.in2p3.fr/~ed421/ED421/hydrogene.pdf>
- [18] F.HANANOU, A.ROUABAH, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque», MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 09 /06/2014
- [19] C.CEDRIC, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [20] A.BISKERO, M.CHIRI, « Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau», Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Juin 2012
- [21] B. ROBYNS, P. BASTARD, «Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques», La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [22] S.BELAKEHAL, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/ 2010

- [23] H.Boukli, «Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique», THESE DE MAGISTER, Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2010/2011.
- [24] Home Energy, «Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques», Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques, Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 PARIS, Mai 2006/Juillet 2006
- [25] F.SLAMA, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIFUFAS (ALGERIE) ,01/04/2011.
- [26] A.MUEL, J.BILLABAO, R.AGUIAR, H.KAMBEZIDIS, E.NEGRO, (2001). Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean belt area. Solar Energy, vol. 2, Issue 2, pp. 143-153, 2001.
- [27] S.DIAF, G.NOTTON, M.BELHAHEM, M.HADDADI, A.LOUCHE, (2008). Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. Applied Energy, vol. 85, pp. 968-987, 2008.
- [28] Ener sol (2004). Hydropower – Energy saving and renewable energy in vocational education. Enersol EU rapport, available at:
<http://www.duurzaammbbo.nl/DuurzaamMBO/DuurzaamMBO/Basismodule/Hydropower.pdf>.
- [29] T.ISHIKAWA, (2002). Grid-connected photovoltaic power systems: Survey of inverter and related protection equipments. Report IEA PVPS T5-05, 2002
- [30] F.CHEKIRED, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [31] K.HELALI, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude Comparative», Mémoire Magister, Université Mouloud de Tizi-Ouzou, 25/06/2012.
- [32] M.MAKHLOUF , «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de Constantine, 2012.

- [33] A.SAIDANI, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015
- [34] A.BOUHARCHOUHE, A.BOUABDALLAH, « Étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP, 2010.
- [35] D.MEEKHUN, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [36] A.KHELIF, L.FATNASSI, (2005). The hybrid power stations. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain, pp. 2947-2951, 2005.
- [37] A.GUYEN, « Modélisation Dynamique Du 'Cœur' de la pile à combustible de type PEM », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, juillet 2010.
- [38] Jason Le Masters. Thermal stress analysis of lca-based solid oxide fuel cells. Master Thesis (2004). Georgia Institute of Technology.
- [39] Eduardo Hernandez-Pacheco. Electro-thermal model for a solid oxide fuel cell. PhD (2004). Grand Forks, North Dakota.
- [40] Srividya Valluru. Steady State Thermal Stress Analyses Of Two-Dimensional And Three-Dimensional Solid Oxide Fuel Cells. Master of Science (2005). West Virginia University.
- [41] V.T. Srikar, Kevin T.Turner, Tze Yung Andrew Ie, S. Mark Spearing. Structural design considerations for micro machined solid-oxide fuel cells. Journal of Power Sources (2004).
- [42] Jinliang Yuan, Masoud Rokni, Bengt Sunden. Three-dimensional computational analysis of gas and heat transport phenomena in ducts relevant for anode-supported solid oxide fuel cells. International Journal of Heat and Mass Transfer (2003).

- [43] Masayuki Suzuki, Koji Fukagata, Naoki Shikazono and Nobuhide Kasagi. Numerical Analysis of Temperature and Potential Distributions in Planar-Type SOFC. Thermal and Fluids Engineering Conference (2005). Jeju- Korea.
- [44] David L. Damm, Andrei G. Fedorov. Radiation heat transfer in SOFC materials and components. Journal of Power Sources (2005).
- [45] Y. Inui, N. Ito, T. Nakajima, A. Urata. Analytical investigation on cell temperature control method of planar solid oxide fuel cell Energy Conversion and Management. (2006).
- [46] P.F. van den Oosterkamp. Critical issues in heat transfer for fuel cell systems Energy Conversion and Management. (2006).
- [47] K.J. Daun, S.B. Beale, F. Liu, G.J. Smallwood Radiation heat transfer in planar SOFC electrolytes. Journal of Power Sources (2005).
- [48] Fuel Cell Handbook (Sixth Edition). Science Applications International Corporation Under Contract No. DE-AM26 99FT40575 U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, November 2002.
- [49] Fuel Cell Handbook EG&G Technical Services, Inc., 6ème édition, novembre 2002.
- [50] A. LACHICHI. « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant: Application aux convertisseurs pour pile à combustible ». Thèse de Doctorat (2005). Université de Franche Comté.
- [51] H. OMAN, « Fuel cells for personal electricity ». Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 15, n° 9, September 2000, pp.43-45.
- [52] P. STEVENS, F. NOVEL-CATTIN, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, « piles à combustible ». Technique de l'Ingénieur, D 3 340-1/28.
- [53] G. ANDERSEN, C. KLIMPNER, S. KJAER, F. BLAABJERG, « A new green power inverter for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'02, 2002, vol. 2, pp. 727-733.
- [54] Les piles basses températures SOFC, CLEFS CEA N°44 - hiver 2000-2001.

- [55] A.R. Maher and S. Al-Baghdadi, « Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Based on Semi-Empirical Equations », *Renewable Energy*, Vol. 30, pp.1587 - 1599, 2005.
- [56] A.HALIM, «etude et modélisation d'une pile à combustible », pour l'obtention du diplôme de Magister, université A. MIRA, Bejaia, 2016.