



*Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique*

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

En vue de l'obtention du diplôme de master en micro-électronique

Thème :

Etude d'un système Photovoltaïque-Hydrogène

Encadré :

M^r Abdallah KHELLAF

M^{elle} Dalila HOCINE

Réalise par :

M^{elle} Katia OUMAILIA

M^{elle} Tinhinane OULDLAMARA

Soutenu publiquement

Le 26/09/2018

Devant le jury

Mme Ouiza BOUGHIAS

Mr Abdallah KHEIIAF

Mme Dalila HOCINE

Mme Amel SIDI SAID

Présidente UMMTO

Encadreur CDER

Co-encadreur UMMTO

Examinatrice UMMTO

2017/2018

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à :

- M.Khellaf Abdellah, notre directeur de recherche pour la qualité de son encadrement, ses précieuses orientations, ses conseils et sa patience ainsi qu'à sa femme pour sa disponibilité, sa bonté et son aide même si elle n'était pas obligée de le faire.
- Notre promotrice Melle Hocine Dalila pour son engagement et son temps.
- Les membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer notre travail.
- L'ensemble des enseignants de la faculté génie électrique et d'informatique.
- Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

La lumière de ma vie, la prunelle de mes yeux, à toi yemma azizen

Celui qui a bercé mon enfance et guider mes pas, à toi mon père

Mes amours, mes rayons de soleil, à vous mes deux frères Nerdine et Rabah, et mes sœurs Amel, Sonia, Karima et Liri

Ma meilleure, celle qui a toujours été là pour moi, à toi Sonia

Celle avec qui j'ai partagé stress et galère, joie et bonheur, à toi ma chère binôme Tina

Tous mes amis, et tous ceux que j'aime

Katia

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ceux qui m'inspirent joie et amour, à mes très chers parents Bachir et Houria

Mes amours, à mes deux frères Luba et Syfax

La famille OuldSamara grands et petits, et à la famille Ait said

La mémoire de mon grand père Ait said Youcef

Ma très chère amie Dehbia, et à toute la famille Ouldhamouda

Ma meilleure amie ziri et à toute sa famille

Celle avec qui j'ai partagé stress et galère, joie et bonheur, à toi ma chère binôme Kati

Tous mes amis et tous ceux que j'aime

Tinfinane

Résumé

Le logiciel HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources), est un logiciel de dimensionnement, simulation et d'optimisation. Il nous a permis de faire une étude d'un système photovoltaïque basé sur la production et le stockage de l'hydrogène pour faire fonctionner une pile à combustible de type PEMFC dans le but d'alimenter une charge par la suite. La production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques.

Mot clé : PV, pile à combustible, l'électrolyseur de l'eau, convertisseur, HOMER.

Sommaire

Sommaire **I**
Liste des figures **IV**
Liste des tableaux **VI**

Introduction générale **i**

Chapitre I : Etude bibliographique sur l'hydrogène.

Introduction **2**
I.1. Les particularités de l'hydrogène 2
 I.1.1. Propriétés physiques 2
 I.1.2. Propriétés énergétiques 3
I.2. Production d'hydrogène 5
 I.2.1. Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures) 5
 I.2.1.1. Le vaporéformage de gaz naturel 5
 I.2.1.2. Oxydation partielle 6
 I.2.2. Production à partir du charbon 6
 I.2.3. l'électrolyse de l'eau 6
 I.2.4. Production à partir des énergies renouvelables 7
 I.2.4.1. La biomasse 7
 I.2.4.2. Energie éolienne 7
 I.2.4.3. Energie solaire 7
I.3. Stockage de l'hydrogène 8
 I.3.1. Stockage conventionnel 8
 I.3.2. stockage par adsorption 9
 I.3.3. stockage par hydrure 10
I.4. Les applications d'hydrogène 11
 I.4.1. Applications chimiques 12
 I.4.2. Utilisations énergétiques 12
 I.4.2.1. Piles à combustibles 12
 I.4.2.2. Autres applications énergétiques 13
I.5. Transport et distribution de l'hydrogène 14
I.6. Projets et programmes à l'échelle internationale 15
Conclusion **16**

Chapitre II : Etude de l'énergie solaire photovoltaïque

Introduction	18
II.1. Historique du photovoltaïque	18
II.2. Le rayonnement solaire	19
II.2.1. nature du rayonnement solaire	19
II.2.2. Spectre du rayonnement solaire	19
II.2.3. Comportement du rayonnement solaire à la surface de la terre.....	20
II.2.4. Mesure du rayonnement solaire.....	20
II.2.4.1. Techniques de mesure.....	20
II.2.4.1. a. Mesure au sol	20
II.2.4.1. b. Mesure satellitaire	22
II.2.5. Estimation du rayonnement solaire	22
II.2.5.1. Modèle d'Angström	22
II.2.5.2. Modèle de Hottel	22
II.3. Principe de la conversion photovoltaïque (PV)	23
II.3.1. Le silicium et ses propriétés.....	23
II.3.2. Cellules solaires photovoltaïques	26
II.3.2. a. Cellule à base de silicium monocristallin.....	28
II.3.2. b. Cellule à base de silicium polycristallin	28
II.3.2. c. Cellule à base de silicium amorphe.....	29
II.3.3. Le rendement	32
II.3.4. Caractéristique électrique et paramètres de la cellule PV	32
II.3.4.1. La caractéristique courant-tension	32
II.3.4.1. a. Caractéristique idéale	33
II.3.4.1. b. Caractéristique réelle.....	35
II.4. Le générateur photovoltaïque	35
II.4.1. Le module photovoltaïque	36
II.4.1.1. Montage en série	36
II.4.1.2. Montage en parallèle.....	36
II.4.2. Influence de l'éclairement sur les modules photovoltaïques	37
II.4.3. Influence de la température sur les modules photovoltaïques.....	38
II.5. Les systèmes CPV	39
II.5.1. Système CPV à faible concentration	39
II.5.2. Système CPV à moyenne et haute concentration	39
II.5.3. Les concentrateurs solaires	40
II.5.3.1. Les miroirs cylindro-paraboliques	40
II.5.3.2. Les centrales à tour	41
II.5.3.3. Les miroirs de Fresnel.....	41
II.5.3.4. La lentille de Fresnel.....	42

II.6. Les batteries	43
II.6.1. Les batteries au plomb-acide	43
II.6.2. Les batteries au Nickel-Cadmium (NiCD)	44
II.6.3. Les batteries au Nickel-Hydrure-Métallique NiMH	44
II.7. Les convertisseurs	44
II.8. Différentes configurations des systèmes photovoltaïques	44
II.8.1. Système autonome sans batterie	45
II.8.2. Système autonome avec batterie	45
II.8.3. Système fonctionnant au fil du soleil	46
II.8.4. Système avec appoint électrique	46
II.9. les applications d'énergie solaire photovoltaïque	46
II.10. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	46
II.10.1. Avantage	46
II.10.2. Inconvénient	47
Conclusion.....	47

Chapitre III : Etude du système PV-hydrogène

Introduction	49
III.1. Les principaux composants	49
III.1.1. Générateur photovoltaïque	49
III.1.2. Convertisseurs DC/DC	49
III.1.2.1. Convertisseurs dévolteurs (Buck-Converter)	49
III.1.2.2. Convertisseur survolteur (Boost-Converter).....	50
III.1.2.3. Convertisseur Buck-Boost	50
III.1.3. Electrolyseurs	50
III.1.3.1. Les différentes technologies d'électrolyseurs.....	50
III.1.3.1.a. Electrolyseurs alcalins	50
III.1.3.1.b. Electrolyseurs PEM	51
III.1.3.1.c. Electrolyseurs à haute température	52
III.1.4. Piles à combustible	53
III.1.4.1. Description générale	53
III.1.4.2. Différents types de piles à combustible	53
III.1.4.3. Piles à combustibles de type PEM.....	53
III.1.4.4. Principe de fonctionnement de la pile	54
Conclusion.....	56

Chapitre IV : Simulation et analyse du système PV-hydrogène

Introduction	58
IV.1. Critères du choix du logiciel HOMER	58
IV.1.1. Présentation du logiciel HOMER.....	58
IV.1.2. Caractéristiques principales de HOMER.....	59
IV.2. Les données relatives à l'ensoleillement moyen au site de Tizi Ouzou	59
IV.3. Construction du schéma de conception du système.....	59
IV.4. Configuration du système en fonction du cout net actuel	60
IV.5. Production et consommation d'énergie électrique.....	61
Conclusion générale	iii
Références bibliographiques	VII

Liste des figures

Figure I.1 : densité de masse d'énergie de quelques carburants.....	3
Figure II.1 : spectre d'irradiante solaire.....	23
Figure II.2 : principe de la conversion PV.....	27
Figure II.3 : La cellule photovoltaïque.....	27
Figure II.4 : Différents technique de cellules photovoltaïque.....	28
Figure II.5 : cellule monocristalline.....	28
Figure II.6 : cellule poly cristalline.....	29
Figure II.7 : cellule amorphe.....	31
Figure II.8 : Schéma de principe d'une cellule à colorant.....	33
Figure II.9 : caractéristique courant-tension d'une cellule PV.....	34
Figure II.10 : le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale.....	35
Figure II.11 : le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.....	36
Figure II.12 : caractéristiques de groupement série des cellules.....	37
Figure II.13: caractéristiques de groupement parallèle des cellules.....	37
Figure II.14 : caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements.....	38
Figure II.15 : la caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement.....	38
Figure II.16 : influence de la température sur la caractéristique électrique.....	39
Figure II.17 : la caractéristique $P=f(V)$ en fonction de la température.....	41
Figure II.18 : aperçu des miroirs de Fresnel.....	41
Figure II.19 : aperçu des lentilles de Fresnel.....	42
Figure II.20 : batterie au plomb-acide.....	42
Figure II.21 : schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.....	44
Figure II.22 : schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.....	45
Figure III.1 : schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.....	49
Figure III.2 : schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.....	50
Figure III.3 : schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.....	50

Liste des figures

Figure III.4 : principe de l'électrolyse alcaline.....	51
Figure III.5 : principe schématique de l'électrolyse PEM.....	52
Figure III.6 : principe de l'électrolyse à haute température selon le type de l'électrolyte.....	52
Figure III.7 : image d'une PEMFC démontable.....	54
Figure III.8 : diagramme d'une PEMFC.....	55
Figure IV.1 : radiation globale horizontale mensuelle à Tizi Ouzou.....	59
Figure IV.2 : montage électrique du système.....	60
Figure IV.3 : configuration proposée par le logiciel HOMER.....	60
Figure IV.4 : puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.....	62
Figure IV.5 : production journalière de la pile.....	64

Liste des figures

Liste des tableaux

Tableau I.1 : propriété thermo physique de l'hydrogène.....	3
Tableau I.2 : polluants émis par les différents carburants.....	4
Tableau I.3 : les différents types de piles à combustibles.....	13
Tableau II.1 : la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde.....	20
Tableau II.2 : classification de différents types de silicium.....	21
Tableau II.3 : caractéristiques des centrales solaires à concentration.....	29
Tableau II.4 : caractéristiques des centrales solaires à concentration.....	40
Tableau IV.1 : architecture du système PV-Hydrogène.....	61
Tableau IV.2 : énergie annuelle produite.....	61
Tableau IV.3 : énergie annuelle consommée.....	61
Tableau IV.4 : tableau de fonctionnement du panneau photovoltaïque.....	62
Tableau IV.5 : paramètres de fonctionnement de la pile à combustible.....	63
Tableau IV.6 : paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur.....	64
Tableau IV.7 : paramètres de fonctionnement du convertisseur.....	65
Tableau IV.8 : paramètres de fonctionnement du stockage d'hydrogène.....	65

Introduction générale

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières, la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans le domaine de recherche et développement.

Aujourd'hui, on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables comme, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement climatique.

Le plus intéressant dans l'utilisation de l'énergie solaire, est l'obtention de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant ainsi une maintenance réduite.

De l'avis de plusieurs scientifiques, l'hydrogène est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur. L'hydrogène représente la forme énergétique la moins nocive pour l'environnement. Muni d'un cycle énergétique fermé, il rentre dans divers applications, tels que la production d'électricité et le chauffage des habitats.

Les réserves d'énergies fossiles étant très limités, l'hydrogène se présente comme un excellent alternatif dans un premier temps et un substitut par la suite. Il peut jouer un rôle même plus important que les énergies conventionnelles. En effet, il présente l'avantage d'être non polluant et il peut utiliser les mêmes moyens de transport que les énergies conventionnelles. Non seulement il peut subvenir aux besoins énergétiques locales mais il peut aussi être une importante commodité

d'exportation. Et pour atteindre cet objectif, le but de notre travail dans ce mémoire est de contribuer à une meilleure compréhension d'une nouvelle technologie de production, de stockage et d'utilisation d'une énergie propre. Cette étude est conçue pour susciter de futurs travaux dans ce domaine.

Dans ce projet, nous présentons une étude d'un système photovoltaïque basé sur la production et le stockage de l'hydrogène pour faire fonctionner une pile à combustible de type PEMFC dans le but d'alimenter une charge par la suite. La production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques.

Pour consolider notre étude, nous avons utilisé le logiciel HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources), qui est un logiciel de dimensionnement, simulation et d'optimisation.

Notre travail se répartit en quatre chapitres principaux :

Dans le premier chapitre nous faisons une étude bibliographique sur l'hydrogène (production, stockage et transport).

Dans le deuxième chapitre nous exposons une étude générale sur les systèmes photovoltaïques et les applications de ces systèmes.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du système PV-Hydrogène.

Le chapitre quatre se portera sur la simulation du système PV-Hydrogène à l'aide du logiciel HOMER et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I:
*Etude bibliographique sur
l'hydrogène*

Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. La molécule de dihydrogène(H_2) est constituée de deux atomes d'hydrogène. On parle communément d'hydrogène pour désigner en effet le dihydrogène.

L'hydrogène est très abondant à la surface de la terre mais n'existe pas à l'état pur, il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau, les hydrocarbures.

Les organismes vivants (animal ou végétal) sont également composés d'hydrogène. La biomasse constitue donc une autre source potentielle d'hydrogène.

Extraire l'hydrogène de ces sources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie, comme pour l'électricité, on considère ainsi que l'hydrogène est un vecteur énergétique.

L'hydrogène pourrait être quasi inépuisable, à condition de savoir le produire en quantité suffisante et à un coût compétitif et idéalement à partir d'énergie (nucléaire et renouvelable).

On appelle technologie de l'hydrogène l'ensemble des technologies étudiées pour produire l'hydrogène, le stocker et le convertir à des fins énergétiques.

I.1. Les particularités de l'hydrogène

I.1.1. Propriétés physiques

L'hydrogène est un gaz incolore et inodore. C'est l'élément le plus léger. Il représente 75% de la masse de l'univers. Cependant, il se trouve pratiquement en combinaison avec d'autres éléments tels que l'oxygène, le carbone et l'azote. Sur terre, on le trouve principalement dans l'eau et les hydrocarbures. Le tableau I.1, rapporte ses propriétés physiques. [1]

Masse moléculaire	2.016
Electronégativité	2.1
Densité de masse (phase gazeuse)	0.0838 kg/m
Masse volumique (phase liquide)	70.8 kg/m
Température d'ébullition	20 K
Température de fusion	13.8K
Chaleur latente de fusion	58.23 KJ/kg
Chaleur latente de vaporisation	449.59KJ/kg
Chaleur latente de sublimation	507.39KJ/kg
Capacité calorifique (phase gazeuse)	14.9KJ/kg K
Capacité calorifique (phase liquide)	9.69KJ/kg K
Valeur de chauffage supérieur	140MJ/kg
Valeur de chauffage inférieur	120MJ/kg

Tableau I.1 : propriété thermo physique de l'hydrogène. [1]

I.1.2. Propriétés énergétiques [1]

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène présente plusieurs avantages :

- ✓ Il a une très grande densité de masse d'énergie. Comme on peut le voir dans la figure I.1, l'énergie fournie par unité de masse d'hydrogène est deux fois plus celle fournie par l'énergie conventionnelle, elle est presque trois fois celle de l'essence et près de six fois celle du méthanol.

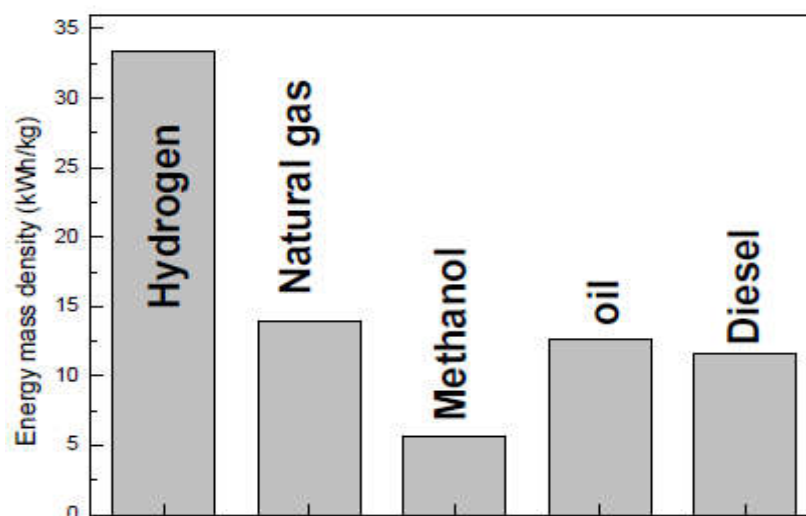


Figure I.1 : densité de masse d'énergie de quelques carburants. [1]

- ✓ L'hydrogène est le vecteur d'énergie le plus polyvalent. En effet, les sources d'énergies conventionnelles ne peuvent pas être converties sous forme d'énergies utiles (mécanique, thermique ou électrique) suivant seulement un seul processus : la combustion. Par contre, l'hydrogène peut être converti en énergie utile selon cinq processus différents. En plus de la combustion, l'hydrogène peut :
 - Etre directement transformé en vapeur.
 - Etre converti directement en chaleur par combustion catalytique.
 - Etre converti directement en électricité par des procédés électrochimiques.
 - Agir comme une source de chaleur et /ou dissipateur de chaleur par réaction chimique.
- ✓ En tenant compte des impacts environnementaux, l'hydrogène solaire est un carburant propre comparé aux divers combustibles, comme le montre le tableau I.2. La seule particule émise est le NO_x et cela lors de la combustion de l'hydrogène. Toute autre forme d'utilisation d'hydrogène (hydruration, génération de vapeur, combustion catalytique, etc.) ne produit ou produit très peu d'éléments nocifs pour l'environnement.
- ✓ Comme pour tout carburant, des précautions de sécurité élémentaires doivent être respectées pendant l'utilisation de l'hydrogène. Cependant, en comparaison avec les dangers liés à l'utilisation d'autres combustibles, en particulier la toxicité et les risques d'incendie, l'hydrogène est le carburant qui représente le moins de risque.

Polluant	Hydrocarbure	Charbon	Hydrogène
CO₂	72.40	100.00	0.0
CO	0.80	0.65	0.0
SO₂	0.38	0.50	0.0
NO_x	0.34	0.32	0.10

Tableau I.2 : polluants émis par les différents carburants. [1]

I.2. Production d'hydrogène [1]

Par production d'hydrogène, on entend l'extraction et l'isolation de la molécule d'hydrogène de la matière première. Les matières premières utilisées actuellement sont l'eau, la biomasse ou les hydrocarbures (pétrole, gaz nature ou charbon.)

Plusieurs techniques de production existent. Certaines sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène industrialisés ou en phase d'industrialisation.

I.2.1. Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures)

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus se présente dans l'apparition de CO₂ comme sous produit ce qui peut présenter des avantages économiques mais pas très écologiques.

I.2.1.1. Le vaporéformage de gaz naturel

Le gaz naturel contient essentiellement du méthane. Toutefois, il doit généralement être désulfuré avant d'être dirigé vers l'unité de vaporéformage (reformage à la vapeur). Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse et la conversion du CO. On notera que ces réactions sont thermodynamiquement équilibrées, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire à la réaction chimique pour s'effectuer, une partie de la charge ne réagit pas et reste mélangée aux produits. Dans le cas de vaporéformage, ceci se traduit par une fraction significative de méthane (CH₄) et de monoxyde de carbone (CO) en sortie d'unité.

Réaction1:



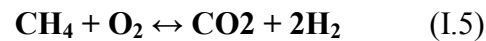
Les deux réactions :



I.2.1.2. Oxydation partielle

On peut synthétiser l'hydrogène par l'oxydation des hydrocarbures en présence d'air ou d'oxygène pur, cette procédure appelée l'oxydation partielle qui est également un processus de production maîtriser.

Dans le cas du méthane l'oxydation partielle de ce dernier peut être décrite par les équations suivantes :



Ces types des réactions sont exothermiques et se déroulent sans catalyseur.

La production d'hydrogène par oxydation partielle du méthane augmente avec la température de processus, mais atteint une valeur de plateau à environ 1000K. L'efficacité théorique est semblable à celle de la vaporéformage conventionnelle, mais il exige un peu d'eau.

I.2.2. Production à partir du charbon

L'hydrogène est produit dans le monde à 18% à partir du charbon, contre 4% en Europe. Le principal inconvénient de son utilisation est qu'il produit du CO₂. Cependant, le charbon étant mieux réparti à la surface du globe que le gaz naturel ou le pétrole, il représente une solution pour l'indépendance énergétique des pays.

I.2.3. l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau (H₂O) en hydrogène (H₂) et oxygène (O₂) lors d'une réaction d'oxydo-réduction. Le procédé

industriellement disponible à l'heure actuelle consiste à réaliser cette électrolyse à l'aide d'électricité. L'hydrogène est actuellement produit par électrolyse à 4% seulement dans le cas où l'électricité est bon marché ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire. [1]

I-2-4- Production à partir des énergies renouvelables

I-2-4-1- La biomasse

La production d'hydrogène à partir de la biomasse fait l'objet d'intenses activités. Les techniques de production peuvent être divisées en deux classes :

✓ Les techniques biologiques :

Ces techniques connues sous le nom de bio hydrogène offrent diverses méthodes de production. La bio photolyse de l'eau par les algues ou les micro-organismes et la décomposition des composés organiques par dégradation des bactéries photosynthétiques et des composés organiques par fermentation en présence des bactéries constituent les principales méthodes de production.

✓ Les techniques thermochimiques.

I.2.4.2. Energie éolienne

L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'hydrogène les plus prometteuses. Elle offre de réelles opportunités en sites isolés. Réalisée principalement en utilisant l'électrolyse de l'eau, les systèmes de production comprennent entre autres les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les convertisseurs de puissance et les électrolyseurs.

I.2.4.3. Energie solaire

L'hydrogène est produit, par voie solaire, principalement à l'aide de procédés Thermochimique, photo électrochimique et électrolytique :

- Procédés thermochimique : ces technologies permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre

200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%, cette chaleur primaire ensuite sera convertie en vecteur énergétique d'hydrogène. Les concentrateurs solaires pourraient être une des alternatives qui intéresse les pays qui ont des ressources importantes en énergie solaire.

- Procédés photo électrochimiques: La cellule photolyse est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photon) décompose l'eau en oxygène et hydrogène. une telle cellule photo électrochimique est formée d'une électrode photosensible immergée dans un électrolyte ou dans l'eau. Ce procédé de photolyse présente l'avantage sur filière photovoltaïque de supprimer la nécessité de transport du courant électrique entre la centrale solaire photovoltaïque et les installations de production de l'hydrogène par hydrolyse (la conversion directe apporte en outre un rendement supérieur).
- Procédés électrolytiques : Ce procédé consiste à dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen d'un courant électrique continu, traversant un électrolyte disposé entre deux électrodes.

I.3. Stockage de l'hydrogène [1]

Le stockage de l'hydrogène en particulier dans le cadre des applications mobiles, est l'un des principaux défis scientifique et technologiques à relever. Son importance découle de la recherche, notamment pour le secteur du transport comme pour un réservoir compact, léger, économiquement accessible et répondant aux exigences de sécurité. Les techniques de stockages conventionnelles ne permettent pas d'atteindre cet objectif. La recherche de nouvelles techniques de stockages sont en cours. Les critères de sélection sont sur le niveau des densités volumiques et gravimétriques de l'hydrogène, le dispositif de stockage, l'efficacité et la vitesse de chargement et déchargement. Différents modes de stockages d'hydrogène existent, parmi ces modes on a :

I.3.1. Stockage conventionnel

C'est le mode le plus utilisé. Il est surtout approprié pour de grandes quantités. Il Y'a deux méthodes différentes :

- **Stockage sous compression** : dans ce cas, l'hydrogène est encore sous forme gazeuse. Il est comprimé à une pression variante entre 200 bars et 350 bars. A cette pression, la densité d'hydrogène dépasse 11 Kg/m³, ce qui représente une augmentation de la densité d'un facteur 130 fois plus élevé que la densité à une pression normale. La densité volumique reste ni au moins faible pour les applications de transport. Cependant, les réservoirs capables de supporter les pressions supérieures à 450 bars sont en cours de développement. De plus, à fin de réduire (alléger) plus le poids du système de stockage, les développements sont en cours pour l'introduction de polymères et des fibres de carbone dans la structure des réservoirs qui sont actuellement en métal alliage.
- **Stockage sous forme liquide** : l'hydrogène est liquéfié à 20K avant son stockage dans un réservoir d'acier à double paroi. L'espace entre les murs est rempli de matériaux isolants, d'azote liquide ou conservé sous vide. Les matériaux composites sont sous développements pour fabriquer des réservoirs plus légers sous forme liquide. La densité de l'hydrogène s'élève à environ 71Kg/m³, ce qui rend possible d'avoir des citernes répondant aux exigences du secteur de transport une fois le problème de pertes résolu. Cependant, la nécessité de maintenir la température basse et limité les pertes de vaporisation d'une part, et réduire le cout énergétique exorbitant de la liquéfaction d'autre part, fait que ce mode de stockage se conforme de manière optimale aux critères de stockage pour une consommation d'énergie d'hydrogène à grande d'échelle.

I.3.2. stockage par adsorption

Il s'effectue par la concentration d'hydrogène par absorption à la surface d'un adsorbant approprié. Si l'adsorption de l'hydrogène par une grande variété de matériaux est en théorie possible, seule l'adsorption par le carbone est significative et peut alors être considérée pour les applications technologiques. Dans les conditions normales, des densités d'environ 0.5% en poids ont été obtenues. Mais à très basse température et haute pression, la densité augmente jusqu'à 8%. Donc, pour que ce mode de stockage soit efficace, il est important de développer des adsorbants avec de grandes zones spécifiques. Dans ce sens,

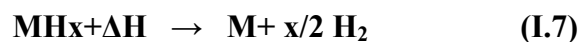
les nanotubes et les nano fibres sont sous considération pour le stockage de l'hydrogène. Ces matériaux, bien que prometteurs, sont toujours à l'état de recherche et développement.

I.3.3. stockage par hydrure

C'est le stockage sous forme atomique de l'hydrogène dans des composés connus sous le nom d'hydrure. Pendant le processus de formation de ce dernier, la réaction suivante a lieu :



Le processus de décharge d'hydrogène peut être représenté par la réaction suivante :



Lors des processus de chargement et déchargement, la pression P est liée à la température T par l'équation de Van't Hoff :

$$\ln P = \Delta H/RT - \Delta S/R \quad (I.8)$$

Ou: ΔH et ΔS sont respectivement l'enthalpie et l'entropie du processus d'hydruration.

R est la constante du gaz.

Il y' a deux classe d'hydrure. Il y'a les hydrures métalliques et les hydrures complexes :

- **Hydrures métalliques:** ce sont des hydrures à liaisons métalliques. Ces hydrures, agissant comme une éponge, sont capables d'absorber les atomes d'hydrogène dans les défauts du réseau. L'absorption d'hydrogène, connue aussi comme l'hydruration, a lieu à des températures et pressions caractéristiques. Plusieurs familles d'hydrures de métal existent ou sont en cours de développement. Si la capacité de stockage des hydrures métalliques est très satisfaisante, leur densité volumique et leur capacité de désorption sont loin de cela.

- Hydrures complexes : ils sont des structures avec des métaux alcalins (généralement lithium et sodium). L'hydrogène est un élément du groupe 13 (généralement le bore et aluminium). Son stockage dans les hydrures complexes est effectué par des réactions chimiques et l'occupation du site sans treillis comme le cas dans les hydrures métalliques. Dans ce cas, le processus est également limité par les faibles densités d'énergie, la lenteur cinétique de remplissage et cout élevé des hydrures.
- Autres procédés de stockage : Autres types d'hydrures tels que la famille des aminoboranes (NHX BHX) sont en cours de développement. Ils constituent un moyen très prometteur de stockage de l'hydrogène en particulier pour les applications. En effet, certains de ces hydrures, tels que le composé $\text{NH}_3 \text{BH}_3$ peuvent absorber au moins 20% en poids, sont stables dans des conditions normales et peuvent désorber à des températures modérées.

L'hydrogène est utilisable soit directement dans des moteurs à combustion interne soit comme combustible dans une pile à combustible (PAC). Une PAC est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en énergie électrique et thermique sans apport d'énergie extérieure.

I.4. Les applications d'hydrogène [1]

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Comme il peut être aussi utilisé de deux différentes manières :

- Comme produit chimique dans l'industrie : là il entre en tant que réactif dans les procédés chimiques tels que le raffinage du pétrole ou la production d'ammoniac.
- Comme vecteur d'énergie : dans ce cas, l'hydrogène est un carburant ou une source d'énergie.

Actuellement, l'hydrogène est presque entièrement utilisé pour des fins industrielles. L'application majeure de l'énergie est limitée au secteur spatial,

cependant, l'hydrogène va jouer un rôle central, il est placé pour devenir un vecteur énergétique universel.

I.4.1. Applications chimiques

L'hydrogène réagit avec de nombreux éléments non métalliques. Il se combine avec l'azote en présence d'un catalyseur pour former de l'ammoniac, avec le soufre pour former du sulfure d'hydrogène, avec le chlore pour former du chlorure d'hydrogène et avec l'oxygène pour former de l'eau. La réaction entre l'oxygène et l'hydrogène a lieu à température ambiante et seulement en présence d'un catalyseur, tel que le platine finement divisé. Lorsque l'on enflamme un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène, il se produit une explosion. L'hydrogène se combine également avec certains métaux tels que le sodium et le lithium pour former des hydrures. L'hydrogène agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cuivre : le gaz entraîne l'oxygène et laisse le métal à l'état libre. L'hydrogène réagit avec les composés organiques insaturés pour former les composés saturés correspondants.

Dans de nombreuses réactions d'électrolyse, l'hydrogène est un sous produit important. Des quantités considérables d'hydrogène sont utilisées dans la synthèse de l'ammoniac et du méthanol. L'hydrogénation des huiles pour la production de graisses comestibles, du charbon pour former le pétrole de synthèse et des huiles du pétrole pour enrichir la fraction d'essence sont des procédés qui nécessitent de grandes quantités d'hydrogène. [1]

I.4.2. Utilisations énergétiques

I.4.2.1. Piles à combustibles : Il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec une production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur selon une réaction chimique universellement connue :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte. C'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient mais le principe reste inchangé.

Le Tableau I.3 ci après détaille les divers types de piles couramment développées. Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un même point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50%. [1]

Type de pile	Electrolyte	T (°C)	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transport. Gamme : 1-100KW
Acide polymère (PEMFC et DMFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transport, stationnaire Gamme : 10mW-100KW
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (liquide)	200	Stationnaire, transport Gamme : 200KW – 10MW
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondus (liquide)	650	Stationnaire Gamme : 500KW-10MW
Oxyde solide (PCFC)	Céramique (solide)	400 à 600	Stationnaire, transport. Gamme : 1KW-10MW
Oxyde solide (SOFC)	Céramique (solide)	600 à 1000	Stationnaire, transports. Gamme : 1KW-10MW

Tableau I.3 : les différents types de piles à combustibles.[10]

I.4.2.2. Autres applications énergétiques : Les domaines potentiels d'application de l'hydrogène comme énergie sont extrêmement nombreux et variés, à commencer par tous ceux qui sont déjà couverts par le pétrole (et ses dérivés) et le gaz : [1]

- Le transport, avec des moteurs thermiques alimentés directement en hydrogène, comme le démontre le constructeur BMW depuis des années, ou avec des piles à combustibles couplées ou non à des batteries dans des

montages hybrides, comme l'ont démontré une quinzaine de constructeurs automobiles dans le monde.

- L'industrie, qui consomme aujourd'hui la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde et qui pourrait reconvertir sans grande difficultés ses systèmes actuellement alimentés en fuel ou gaz naturel.
- L'agriculture, qui, à travers des engrais, utilise déjà des sous produits de l'hydrogène, comme des dérivés de l'ammoniac.

I.5. Transport et distribution de l'hydrogène [1]

L'hydrogène est difficile à stocker et à transporter, en raison de sa faible densité énergétique par unité de volume. Le transport s'effectue généralement en bouteilles ou en pipelines sous forme comprimée: le gaz peut être comprimé de quelques dizaines de bars à 350 ou 700 bars pour être acheminé. D'autres part, il est possible de liquéfier l'hydrogène à -253°C mais cette transformation est très énergivore. Notons également la possibilité de transporter l'hydrogène sous forme d'hydrure métallique (la réaction d'hydruration est en effet réversible).

Le réseau de gaz naturel peut aussi contenir de l'hydrogène jusqu'à 20% en volume mais cela nécessite de le purifier en aval du réseau. Notons qu'il faut dix fois plus d'espace pour stocker de l'hydrogène gazeux par rapport à l'essence.

Les modes de transport possibles dépendent de la distance, la géographie du trajet, la nature du destinataire, occasionnel ou permanent et des quantités à délivrer. Ils sont les suivants :

- Le transport maritime pour lequel on utilise la forme cryogénique, essentiellement pour des raisons d'encombrement.
- Le transport routier, aussi bien pour la forme cryogénique que pour la forme gaz comprimé. Ce transport est le plus utilisé et se fait actuellement en bouteilles acier sous 200 bars mais la technologie en bouteilles composites, beaucoup plus légère, est en train d'être mise en place pour un transport sous 400 bars, ce qui augmente la capacité par camion et donc diminue sensiblement le prix de ce transport.
- Le transport par gazoducs : ce mode est ancien puisqu'il a été mis en œuvre, pour la première fois en 1938 par les allemands. Aujourd'hui, le

réseau de l'Europe de l'ouest mesure 1600Km, il est exploité essentiellement par air liquide. D'autres réseaux du même type existent sur d'autres continents.

La distribution se résume essentiellement à la station services pour véhicules à piles à combustible, c'est-à-dire à la fourniture d'hydrogène gazeux sous 350 ou 700 bars. La technologie est aujourd'hui bien maîtrisée : fin 2013, plus de 180 stations (dont environ 80 publiques) sont opérationnelles dans le monde, fonctionnent en toute sécurité et permettent un plein d'hydrogène, 5Kg généralement en moins de 5 minutes. L'hydrogène y est soit fabriqué sur place via une énergie renouvelable par électrolyse, ou via un reformer alimenté en gaz, naturel ou issu de la biomasse, soit amené par camion, sous forme pressurisée ou liquide. Il n'y avait, début 2014, que 3 stations privées en France.

I.6. Projets et programmes à l'échelle internationale

Les applications de l'hydrogène sont multiples et trop nombreuses pour être détaillées.

Néanmoins, il faut citer les deux programmes phares qui ont déjà permis la fabrication et la commercialisation de dizaines de milliers de systèmes à hydrogène :

- Les cogénérateurs chaleur-électricité à pile à combustible à hydrogène déployés au Japon depuis 2010 dans le cadre du programme Ene-Farm : plus de 50000 foyers en étaient déjà équipés début 2014.
- Les centaines de véhicules légers et bus à pile à combustible qui circulaient début 2014 dans plusieurs pays comme le Japon (avec Toyota et Nissan), la Corée du Sud (avec Hyundai), l'Allemagne (avec Daimler) et les Etats-Unis (avec Ford et General Motors) principalement. [2]

Conclusion

Dans le cadre de notre étude, nous avons constaté que le dihydrogène présente des atouts majeurs qui lui assurent un bel avenir en tant que vecteur énergétique intermédiaire. En effet, ses applications recouvrent un large éventail des besoins énergétique humains : il est utilisable dans le domaine des transports, des applications stationnaire et portables, sans compter son rendement énergétique élevé. De plus, c'est une énergie propre si sa production s'opère à partir d'une énergie non polluante comme le rayonnement solaire. Cet avantage est capital suite aux récentes polémiques à propos de l'effet de serre.

Introduction

Aujourd'hui et dans le monde entier, l'électricité est un besoin fondamental au développement économique. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse. Cependant, les énergies fossiles assurent actuellement la majorité de cette production, mais face à l'épuisement de ces ressources énergétiques et aux problèmes de l'environnement, on fait appel aux énergies renouvelables qui représente une alternative écologique meilleure.

L'exploitation de ces énergies en particulier l'énergie solaire permettrait de fournir de l'électricité partout, et particulièrement aux sites isolés, et d'éviter ainsi la création de nouvelles lignes électriques.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique grâce à l'ensemble de cellules dites photovoltaïques (PV), basée sur un phénomène physique appelé aussi <<effet photovoltaïque>>. La tension générée par cette cellule peut varier en fonction du matériau utilisé lors de sa fabrication. L'association de plusieurs cellules (PV) série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque.

II.1. Historique du photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par ANTOINE BECQUEREL et son fils EDMOND en 1839. Ils ont découvert que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand ils sont exposés à la lumière. CHARLES FRITS fut le premier à matérialiser le concept en 1883, mais les rendements étaient très pauvres. ALBERT EINSTEIN expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais ce n'est qu'en 1941 que RUSSEL OH créa le premier prototype du panneau solaire moderne, fabriqué à l'aide de silicium.

La première cellule photovoltaïque a été développée aux Etats- Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires BELL, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des <<impuretés>>. C'est une technique appelée le <<dopage>>, qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires.

II.2. Le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile tant d'autres, il a un diamètre de 1390000Km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant en chaque seconde 564millions tonnes d'hydrogène en 560millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25millions degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde le soleil est allégé de 4milliards de tonnes dispersés sous forme de rayonnements. Sa lumière a une vitesse de 300000Km/S, met environ 8minutes pour parvenir à la terre. [3]

II.2.1. Nature du rayonnement solaire

La fusion nucléaire du soleil libère une énergie colossale qui nous parvient 8 minutes plus tard sous forme d'ondes électromagnétiques que l'on appelle aussi rayonnements solaires ou radiation.

Ce rayonnement est composé de plusieurs types de rayons, certains sont filtrés ou arrêtés par l'atmosphère et les nuages, alors que d'autres ne le sont pas. Les rayons solaires sont classés en fonction de leur longueur d'onde (les ondes courtes et les ondes longues), plus un rayon est long plus il pénètre profondément dans la peau et plus il l'endommage.

Les rayons à ondes courtes comprennent les rayons X, rayons bêta, rayons UV et les rayons gamma.

Les rayons à ondes longues qui parviennent à la surface de la terre sont principalement les ultraviolets A et B (UVA et UVB), la lumière visible et les infrarouges (IR). [3]

II.2.2. Spectre du rayonnement solaire

Le spectre du soleil est sa décomposition en longueurs d'onde ou en couleurs. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde selon la relation :

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{II.1})$$

h : est la constante de Planck.

λ : la longueur d'onde.

ν : la fréquence.

C : la vitesse de la lumière.

La courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est répartie comme suite : [4]

Ultra violet	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$	48%
Infra rouge	$0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45.6%

Tableau II.1 : la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde.[4]

II.2.3. Comportement du rayonnement solaire à la surface de la terre

Le rayonnement solaire incident subit une série de modification après son entrée dans l'atmosphère :

Dans la haute atmosphère (stratosphère), la grande partie des rayons UV est absorbée par la fine couche d'ozone les transformant en IR.

Au niveau de l'atmosphère (troposphère), du sol, des océans et des végétaux, les radiations qui composent le rayonnement solaire sont réfléchies. Les radiations non réfléchies sont transmises par l'atmosphère et rencontrent généralement les petites particules qui les réémettent dans toutes les directions (c'est le phénomène de diffusion dont l'importance est inversement proportionnelle à la longueur d'onde).

Enfin, le flux solaire incident subit une absorption faible au niveau de l'atmosphère, forte au niveau de l'océan, des végétaux et des continents qui s'échauffent.

La planète terre reçoit une partie du rayonnement solaire que captent toutes ses enveloppes externes (atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère). [3]

II.2.4. Mesure du rayonnement solaire

II.2.4.1. Techniques de mesure

II.2.4.1. a. Mesure au sol

1. Pyranomètre : Un pyranomètre est un capteur de flux thermique, utilisé pour la

mesure de la quantité d'énergie en lumière naturelle. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total (global) en W/m^2 . Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres selon le filtre utilisé.

2. Pyrhéliomètre : Un pyrhéliomètre est un instrument destiné à mesurer l'irradiance solaire directe. Il est généralement constitué d'une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi pointé vers le soleil. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil. La lumière pénètre dans l'instrument par une fenêtre et est ensuite dirigée sur la thermopile qui convertit la chaleur en un signal électrique qui est enregistré. Celui-ci est ensuite converti en une mesure équivalente exprimée en W/m^2 .

3. Albédomètre : L'albédomètre est composé de deux pyranomètres. Le premier orienté vers le haut mesure le rayonnement solaire incident, le second orienté vers le bas mesure le rayonnement solaire réfléchi.

Notion d'albédo : on appelle albédo le rapport de l'énergie réfléchie par une surface à l'énergie du flux incident. L'albédo exprime la capacité d'un corps à réfléchir ou à absorber un rayonnement (les corps réflecteurs ont un albédo fort (voisin de 1)).

Exemple :

Surface	Albédo
Nuages et neige fraîche	0.8
Océan et eau calme	0.1
Glace et sable	0.3

Tableau II.2 : albédo de quelques corps.

L'albédo moyen de la terre est de 0.3 c'est-à-dire que la terre absorbe 70% du rayonnement solaire incident et ne réfléchit que 30%. Le rayonnement absorbé par une matière est transformé en chaleur. Cette chaleur élève la température de la surface réceptrice qui en retour émet un flux d'énergie radiative. Celle-ci se propage sans utiliser de support. Les caractéristiques du rayonnement dépendent de la surface émettrice, ainsi la terre émet un rayonnement thermique infrarouge.

II.2.4.1.b. Mesure satellitaire

Parmi les méthodes d'estimation du rayonnement solaire à partir des images satellitaires, l'une des plus utilisées est la méthode Heliosat, originellement développée à MINES ParisTech. Le principe de cette méthode est de construire un indice d'ennuage qui est issu de la comparaison entre ce qui est observé par le capteur du satellite et ce qui devrait être observé dans des conditions de ciel clair et des conditions de ciel fortement couvert. Cet indice est ensuite converti empiriquement en l'indice de clarté qui est défini comme le rapport de l'éclairement reçu au sol sur celui reçu au sommet de l'atmosphère. L'indice d'ennuage peut décrire l'atténuation du rayonnement descendant, et nous pouvons ainsi estimer l'éclairement au sol. [5], [6].

II.2.5. Estimation du rayonnement solaire

II.2.5.1. Modèle d'Angström : La formule d'Angström a été employée dans des applications pratiques pendant plusieurs années pour estimer l'irradiation solaire globale quotidienne, mensuelle et annuelle à partir des mesures de la durée d'insolation. Cette formule, relie l'énergie globale moyenne sur un plan horizontal pour un jour quelconque avec nuage à l'énergie globale pour un jour clair selon la relation suivante : [7]

$$\frac{G}{G_0} = a + b \cdot \sigma \quad (\text{II.2})$$

Tel que :

a et b : sont des paramètres du modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés à partir d'une base de donnée.

G_0 : l'irradiation solaire globale mensuelle hors atmosphère ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$).

G : l'irradiation solaire mensuelle au sol ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$).

σ : fraction d'insolation.

II.2.5.2. Modèle de Hottel : Ce modèle considère la notion d'atmosphère normalisé, définit par les concentrations des gaz, les conditions de pression, de température, d'humidité, de concentration des particules et des propriétés optiques. Ce modèle est valable pour des altitudes inférieures à 2.5 Km. [8]

II.3. Principe de la conversion photovoltaïque (PV)

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Ce matériau comporte deux parties, l'une présente un excès d'électrons et l'autre un déficit, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la deuxième, les électrons en excès dans la partie N diffusent dans la partie P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone dopée initialement P devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formée.

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite (gap) communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trous. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel. [9]



Figure II.1 : principe de la conversion PV.[9]

III.3.1. Le silicium et ses propriétés

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au

cadmium ou au sélénium. En plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquable. Le silicium constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable. [10]

Pour passer de la silice, matière première vers le silicium cristallin, on doit suivre ces étapes essentielles :

- **La silice** : nommée aussi dioxyde de silicium SiO_2 est l'élément le plus répondu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Elle se présente sous forme d'un minéral dur, on le trouve en quantité dans :
 - Les roches sédimentaires détritiques (sable, grès).
 - Les roches métamorphiques (elles sont formées par recristallisation et généralement la déformation de roches sédimentaire ou de roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches).
 - Les roches magmatiques.
- **Extraction et purification du silicium**: Le silicium est un élément chimique qui n'existe pas à l'état pur dans la nature, il est extrait de la silice grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :



Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3000°C , et sa puissance peut aller jusqu'à 30MW, à fin d'enclencher les réactions chimiques.

Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide, sa pureté est de 98% mais il faut le purifier d'avantage est cela grâce à des procédés de purification pour aboutir à un résultat de 99.99%.

- **Obtention des lingots de silicium** : Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).
 - Silicium polycristallin : le silicium liquide est mis dans un creuset graphite. Il est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures.

On obtient au final des lingots cubique. Cette forme est recherché afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.

- Silicium monocristallin : une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse.
- **Obtention des wafers photovoltaïques :** Les lingots de silicium polycristallin et les germes du silicium monocristallin obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur appelées wafers. La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil.

L'étape du sciage joue un rôle déterminant dans le coût de la production de la cellule photovoltaïque.

- **Dopage du silicium :** Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi conducteur dopé est alors appelé semi conducteur extrinsèque.

Il existe deux types de dopage :

- Dopage de type N : il consiste à remplacer un atome pentavalent au sein de la structure cristalline du silicium. Cet atome ayant cinq électrons sur sa couche externe va s'associer avec quatre atomes du silicium, laissant ainsi un électron libre. Cet ajout donne à la structure une charge globale négative.
- Dopage de type P : il consiste à ajouter un atome trivalent au sein de la structure cristalline du silicium. Cet atome ayant trois électrons sur sa couche externe va s'associer avec quatre atomes de silicium laissant ainsi place à la création d'un trou. Cet ajout donne à la structure une charge globale positive.

Ce dopage se fait selon les trois méthodes suivantes :

- La diffusion : on utilise un four dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est ancienne et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.
- La croissance epitaxiale : cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface et non pas une insertion. La température du four doit avoisiner les 1200 °C.
- Le bombardement ionique : une source produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de cette technique est qu'elle se déroule à température ambiante mais elle peut aussi causer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline.

II.3.2. Cellules solaires photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électroniques réalisés à l'aide des composants semi-conducteur qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand elles sont éclairées.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (exemple : dopée au bore) et l'autre couche dopée N (exemple : dopée phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (partie N) et des trous (partie P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable (varie entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau utilisé) entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. [9]



Figure II.2 : La cellule photovoltaïque.

Il existe différentes technologies constituant les cellules photovoltaïques illustrées par la figure suivante :

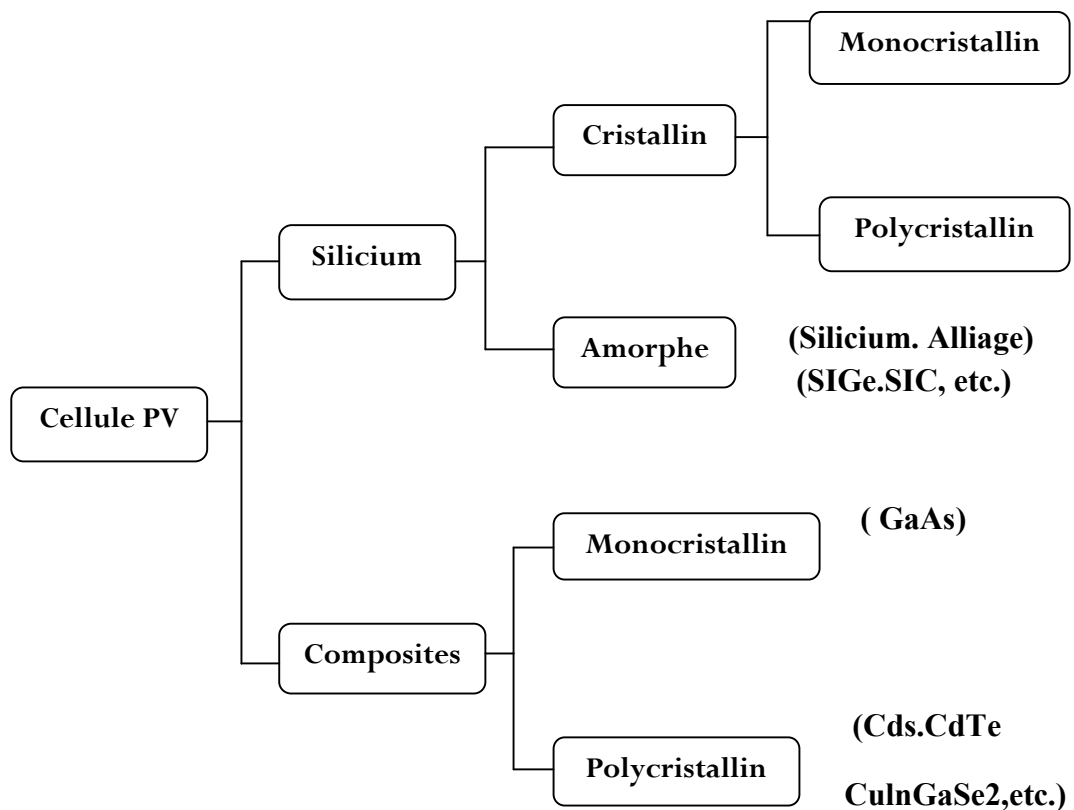


Figure II.3 : Différents technique de cellules photovoltaïque. [11]

On distingue les trois catégories principales qui se disputent le marché. Elles ont des caractéristiques, des durées de vie, et des sensibilités différentes.

II.3.2. a. Cellule à base de silicium monocristallin : Elle est constituée d'un seul cristal offrant à la cellule un arrangement parfait des atomes. Elle présente un rendement légèrement supérieur au silicium poly-cristallin (environ 19%). Néanmoins, elle reste assez onéreuse en raison de son exigence de grande pureté et l'importante quantité d'énergie nécessaire à sa fabrication.[11]



Figure II.4 : cellule monocristallin.

II.3.2.b. Cellule à base de silicium polycristallin : Elle est constituée de plusieurs monocristaux juxtaposés dans différentes orientations donnant à la cellule un aspect mosaïque. Le silicium polycristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial en raison de son bon rendement (environ 15%) pour des coûts de fabrication maîtrisés. Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix. [11]



Figure II.5 : cellule polycristallin.

II.3.2.c. Cellule à base de silicium amorphe : Les cellules amorphe sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire. Elles se caractérisent par un fort coefficient

d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. [11]

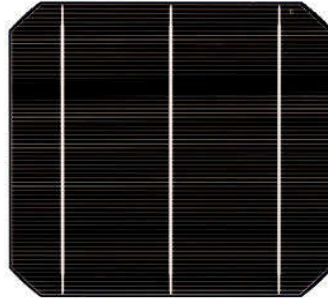


Figure II.6 : cellule amorphe.

Le tableau II.3 ci-dessous résume les différents types de cellules à base de silicium qu'on vient de voir tout en haut. Il nous donne leur rendement, leur durée de vie, leurs avantages et leurs inconvénients. [10]

Types	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
Rendement	15% - 19%	15% - 19%	7% - 10%
Durée de vie	35ans	35ans	<10ans
Avantages	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin, plus que l'amorphe.)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins. Bon rendement en diffus.
Inconvénients	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

Tableau II.3 : classification de différents types de silicium.[10]

En plus de ces trois types principaux, on doit citer aussi :

- 1. Les cellules photovoltaïques organiques :** Ce sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. La première percée de cette technologie a eu lieu en 1992 par Sariciftci et Al, avec la préparation d'un dispositif composé d'une

hétérojonction entre un polymère donneur d'électron et un fullerène accepteur d'électron.

On distingue dans les semi conducteurs organiques les polymères ou les molécules, qui se déposent par centrifugation et les matériaux constitués de petites molécules déposées par thermo-évaporation.

Utilisant comme substrat du plastique, ces cellules offrent la perspective d'une production en continu qui permettrait enfin l'accès à des panneaux solaires à un prix raisonnable. [12]

Il en existe principalement trois types :

- ✓ Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- ✓ Les cellules photovoltaïques organiques à base de polymère.
- ✓ Les cellules photovoltaïques hybrides.

Parmi ces cellules organiques, on peut citer:

▪ **Cellule de Graetzel ou cellule nanocristalline à colorant :**

Reproduisant le phénomène de la photosynthèse, les cellules organiques développées dans les années 90 par Michael Graetzel ont connu depuis de nombreux succès. En effet des rendements de plus de 10% ont été obtenus. Ces cellules utilisent un oxyde semi conducteur inorganique, un électrolyte et un colorant.

Le colorant (sensibilisateur) est greffé sur une couche de fines particules de TiO_2 . Le rayonnement solaire excite ce sensibilisateur et le promeut à un état qui lui permet de délivrer un électron directement au TiO_2 qui joue le rôle de cathode. Le sensibilisateur est régénéré grâce à un médiateur D régénéré à l'anode.

L'intérêt de ces cellules vient du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposé en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Et grâce à des couts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. En revanche, elles possèdent à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques. [12]

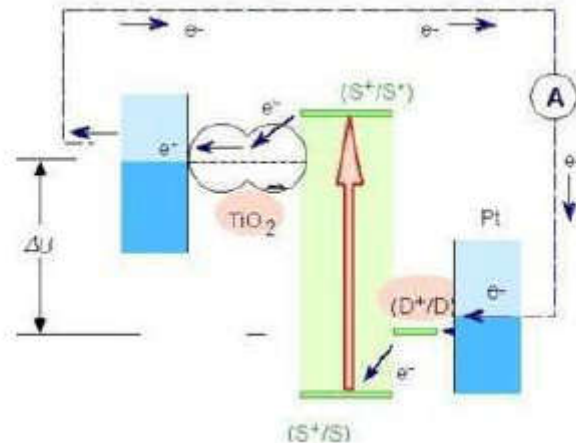


Figure II.7 : Schéma de principe d'une cellule à colorant.

- 2. Les cellules réalisées en technologie couches minces :** Vu que la lumière est absorbée dans le silicium après n'avoir traversé que quelques microns de matière alors que l'épaisseur totale de la cellule cristalline est d'environ 150 μm - 200 μm , voire plus, et la production de silicium cristallin consomme d'importantes quantités d'énergie à partir de la matière première, l'idée d'utiliser une technologie couche mince a été exploitée et ce depuis les années 1980, et surtout celle basée sur le silicium amorphe, un matériau caractérisé par un gap de 1.7eV.[12]

Il en existe plusieurs technologies :

- **Le silicium amorphe (a-si) :** En couche mince, le si amorphe répond à tous les éclaircissements extérieurs et intérieurs. Sa technologie de fabrication est moins onéreuse et permet de réaliser des panneaux en petit format.

Le silicium amorphe est non cristallin et il est produit par pulvérisation cathodique de silicium ou de décomposition du silane. C'est aujourd'hui l'une des filières les plus économiques.[12]

- **Le silicium cristallin :** Le silicium cristallin en couche mince repose sur le principe de déposer une couche mince de silicium poly cristallin sur divers substrats de silicium métallurgique peu purifié, quartz, céramique ou métal.

Les modules à base de silicium en couches minces présentent l'avantage de garder un bon niveau de production lorsque la luminosité est faible ou lorsque la température est élevée.[12]

- **La technologie CIS (cuivre indium sélénium) :** La technologie CIS est déjà fabriquée industriellement et son rendement est de 10% environ. Sa fiabilité n'a pas été démontrée sur le long terme. Sous une lumière diffuse, elle présente une meilleure efficacité que la technologie silicium.

La fabrication des cellules repose sur des techniques de dépôt sous vide. La couche semi conductrice ne fait que 2 à 3 microns, contre 200 à 300

microns dans le cas du silicium cristallin. Les producteurs s'efforcent d'améliorer le contrôle du procédé, à fin d'augmenter le rendement de fabrication, celui des cellules et leurs stabilité dans le temps.

L'Irdep à Chatoux dans les Hauts de Seine est un laboratoire qui développe la fabrication de cellule CIS par dépôt électrolytique (dépôt sous pression atmosphérique et non plus sous vide pour réduire encore les couts de production et arriver à moins de 1euro par Watt crête) : projet CISel. [12]

- **La cellule à double jonction (tandem) :** Les cellules en silicium amorphe ont été profondément améliorées par l'addition d'une deuxième cellule composée de silicium sous forme microcristalline. Caractérisé par un gap égal à celui du silicium cristallin, le silicium microcristallin ($\mu\text{c-si}$) peut être visualisé comme un assemblage de grains de silicium cristallin en forme de piliers, entre lesquels se trouve une certaine quantité de silicium amorphe.

La cellule tandem permet l'absorption de photons dans des gammes de longueurs d'ondes complémentaires. Ainsi, l'énergie solaire est exploitée avec un rendement supérieur d'environ 30% – 50% par rapport à celui d'une cellule amorphe simple.

Cette cellule est constituée d'une succession de plusieurs couches principales. Le substrat est habituellement du verre sur lequel est déposée une première couche d'oxyde conducteur transparent (TCO) formant le contact avant. Ensuite, le silicium amorphe (a-si) puis le microcristallin ($\mu\text{c-si}$) qui est déposé par PECVD (dépôt chimique en phase vapeur) et qui forme la partie active de la cellule.

Chaque cellule contient d'abord une couche de silicium dopée positivement par les atomes de bore, puis une couche absorbante intrinsèque et finalement une couche dopée négativement avec des atomes de phosphore. Le champ électrique établi dans cette jonction assure la séparation, puis l'extraction vers les couches de TCO, des porteurs de charge créés par l'absorption dans les couches de silicium amorphe puis microcristallin d'un photon d'énergie plus élevée que leurs gaps respectifs. [12]

II.3.3.Le rendement

La qualité d'un module photovoltaïque peut être définie par sa capacité à restituer le maximum de la puissance lumineuse absorbée. L'irradiation G (W/m^2) représente la puissance lumineuse reçue par le panneau par unité de surface. Ce qui donne pour un panneau d'une surface A (m^2), une puissance totale nommée $G.A$. Le rendement maximum de la conversion de l'énergie des photons en quantité d'électrons extrait d'un panneau solaire est alors noté η_{pv} , et est défini selon l'équation :

$$\eta_{pv} = \frac{P_{max}}{G.A} \quad (II.4)$$

Où P_{max} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie d'un panneau PV.

L'irradiation G (W/m^2) représente la puissance lumineuse reçue par le panneau par unité de surface. [10]

II.3.4. Caractéristique électrique et paramètres de la cellule PV

II.3.4.1. La caractéristique courant-tension

La courbe de la caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement, cellule PV à une température donnée, air ambiant circulant à une vitesse donnée). En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de la température à la surface de la cellule, ainsi, chaque courbe courant tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

A température fixée, pour les deux régimes (sous obscurité et sous éclairage), la caractéristique courant-tension a l'allure suivante (Figure II.9) :

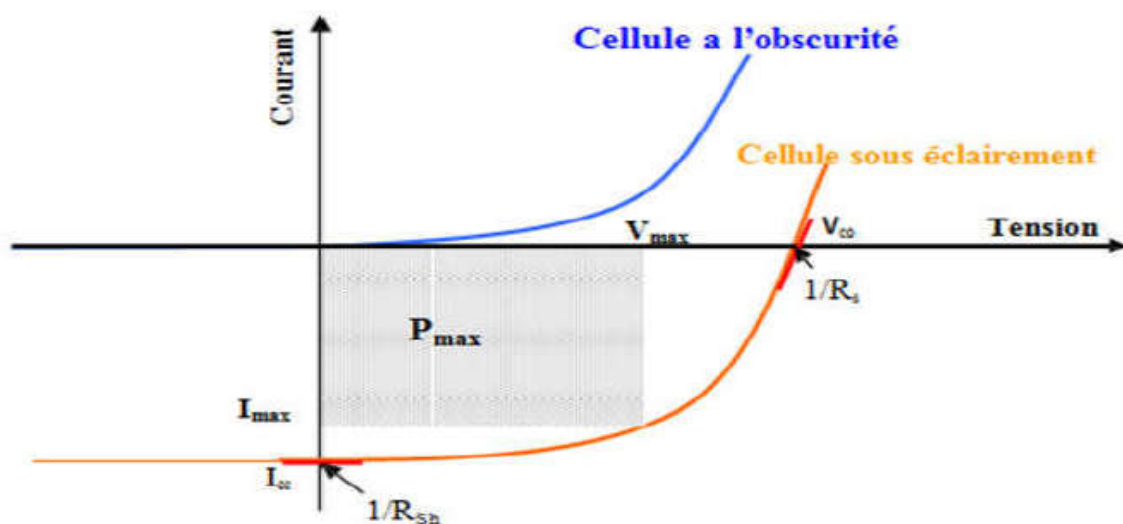


Figure II.8 : caractéristique courant-tension d'une cellule PV. [10]

II.3.4.1.a. Caractéristique idéale : La caractéristique I-V idéale d'une cellule solaire photovoltaïque est donnée par : [10]

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{nU_t}} - 1 \right) - I_{ph} \quad \text{avec} \quad U_t = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.5})$$

Tel que :

U_t : le potentiel thermodynamique.

I_{ph} : la densité de photo-courant.

K : la constante de Boltzmann.

q : la charge élémentaire de l'électron.

n : facteur d'idéalité ($1 \leq n \leq 2$).

Si la cellule est en court-circuit (short circuit), c'est-à-dire $V=0$, $I=I_{cc}$, on obtient le courant de court-circuit suivant :

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (\text{II.6})$$

Autrement, si la cellule est en circuit-ouvert c'est-à-dire $V=V_{co}$ et $I=0$, on aura la tension du circuit ouvert suivante :

$$V_{co} = n \cdot U_t \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

Entre le point $(I_{cc}; 0)$ et le point $(0; V_{co})$, on représente la caractéristique I-V. Parallèlement de cette représentation, on calcule la puissance maximale donnée par :

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (\text{II.8})$$

Et par conséquent, on peut facilement déduire le facteur de forme et le rendement de conversion, qui sont donnés respectivement par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II.9})$$

Et :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} \quad \text{avec } P_i : \text{ la puissance lumineuse incidente.}$$

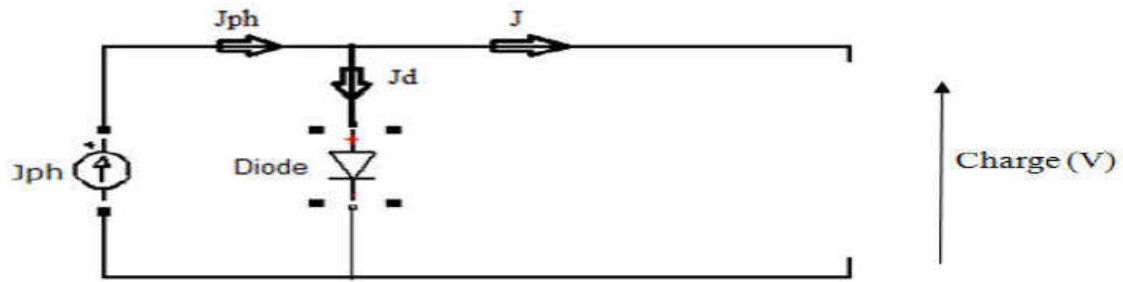


Figure II.9 : le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale.[10]

II.3.4.1.b. Caractéristique réelle : Dans les cellules solaires réelles, le schéma équivalent doit être modifié pour inclure la résistance série R_s , et la résistance shunte R_{sh} (résistance de courant de fuite), d'où l'équation caractéristique devient : [10]

$$I = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} [I_s (e^{\frac{V - I R_s}{n U_t}}) - 1] + \frac{V}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (II.10)$$

Si: $V = 0$, alors $I = I_{cc}$ et l'équation devient:

$$I_{cc} = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} [I_s (e^{\frac{-I_{cc} R_s}{n U_t}}) - 1] - I_{ph} \quad (II.11)$$

Aussi, si $I = 0$ alors $V = V_{co}$ et l'équation devient :

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} [I_s (e^{\frac{V_{co}}{n U_t}}) - 1] + \frac{V_{co}}{R_{sh}} - I_{ph} = 0 \quad (II.12)$$

De la même manière que le cas précédent, on peut calculer la puissance P_{max} , le facteur de forme FF et le rendement de conversion η . [10]

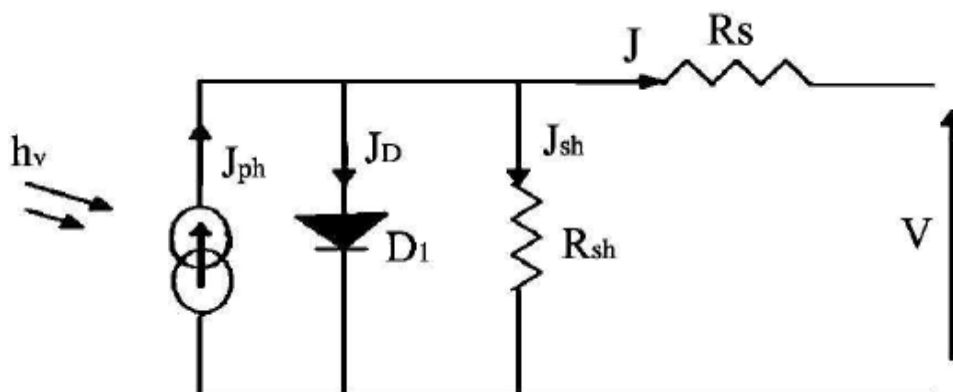


Figure II.10 : le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.[10]

II.4. Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules dans les quels sont interconnectés plusieurs cellules photovoltaïques, et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, permet d'obtenir une plus grande puissance.

II.4.1. Le module photovoltaïque

Un module est un assemblage de cellules permettant d'obtenir une énergie exploitable, sous tension utilisable. Les cellules individuelles sont généralement connectées dans une chaîne en série (typiquement 36 ou 72), pour atteindre la tension de sortie désirée.

II.4.1.1. Montage en série : Une association de N_s cellules en série (Figure II.12), permet d'augmenter la tension du générateur PV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume ces caractéristiques électriques. [10]

$$V_{coNs} = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{II.13})$$

Et :

$$I_{cc} = I_c \quad (\text{II.14})$$

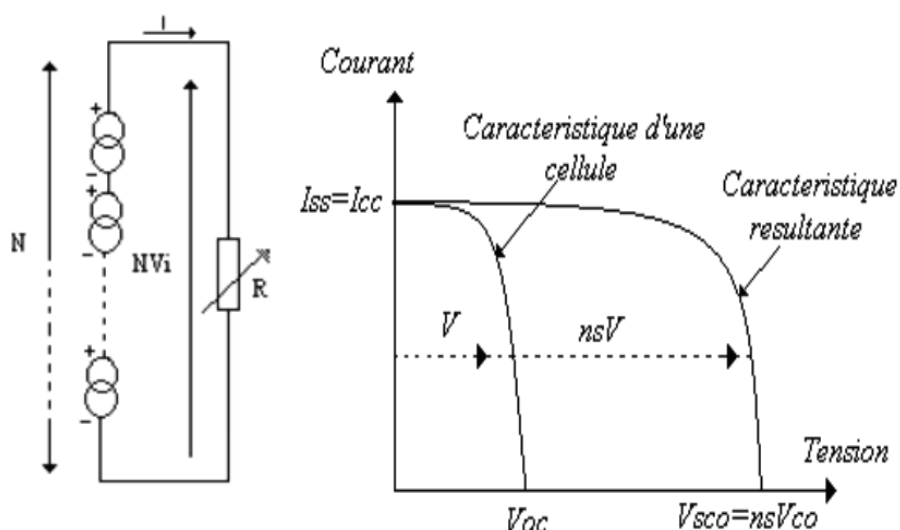


Figure II.11 : caractéristiques de groupement série des cellules.[10]

II.4.1.2. Montage en parallèle : Une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, avec : [10]

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (II.15)$$

Et :

$$V_{co} = V_{co} \quad (II.16)$$

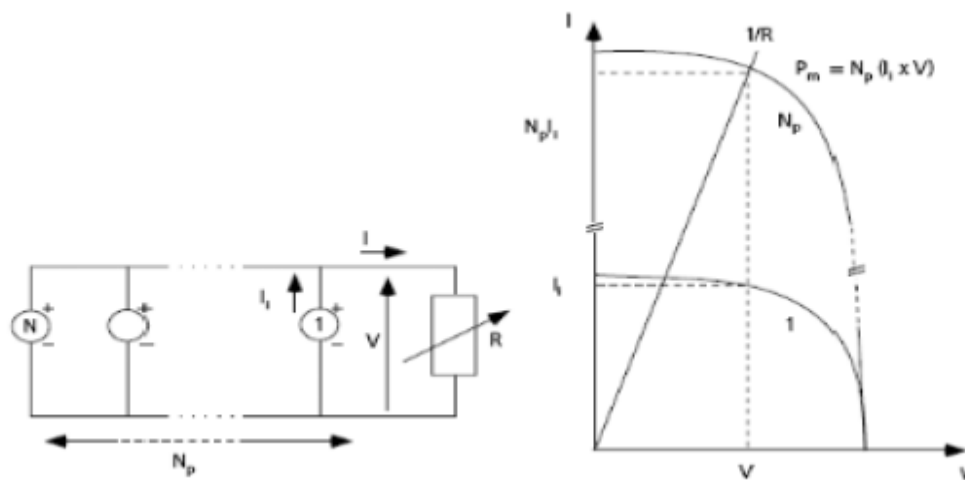


Figure II.12: caractéristiques de groupement parallèle des cellules.[10]

II.4.2. Influence de l'éclairement sur les modules photovoltaïques

La Figure II.13 présente un exemple de courbes (I ; V) pour différents niveaux d'éclairement à une température fixe. Quand l'éclairement augmente, le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance. [13]

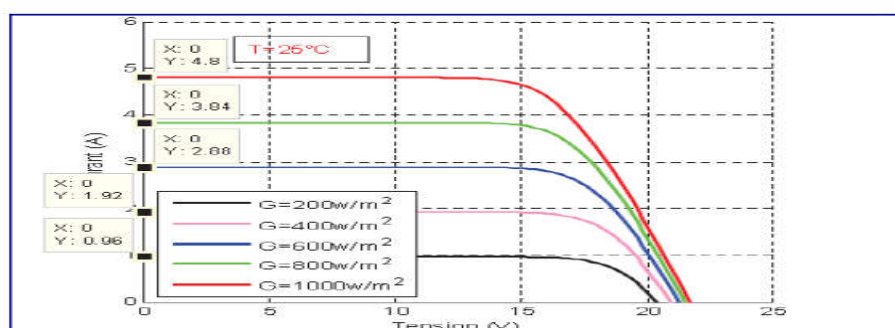
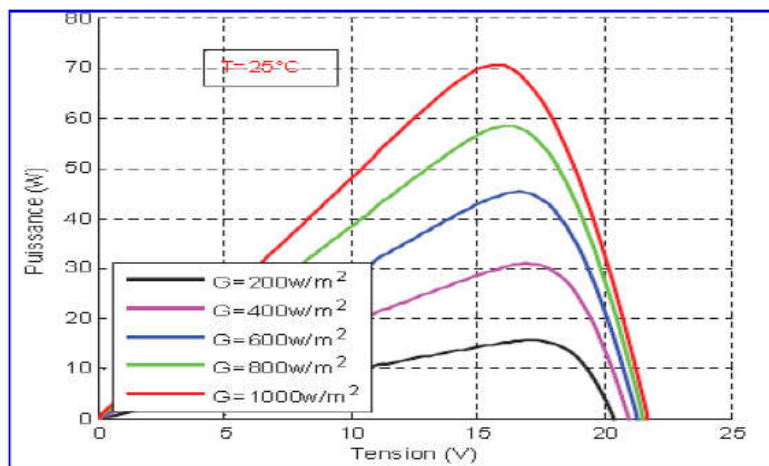


Figure II.13 : caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairements.[13]

Figure II.14 : la caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement. [13]

II.4.3. Influence de la température sur les modules photovoltaïques

Pour un niveau d'ensoleillement donné, on constate que le courant dépend de la température mais ce n'est pas le cas de la tension. A chaque fois que la température augmente, on remarque que le courant augmente aussi légèrement, mais par contre la tension de circuit ouvert diminue, ce qui influe négativement sur la puissance du générateur qui diminue elle aussi. [13]

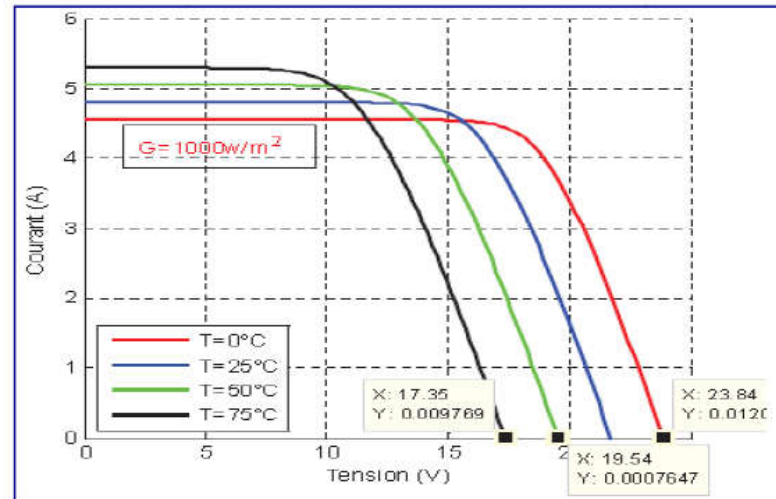


Figure II.15 : influence de la température sur la caractéristique électrique. [13]

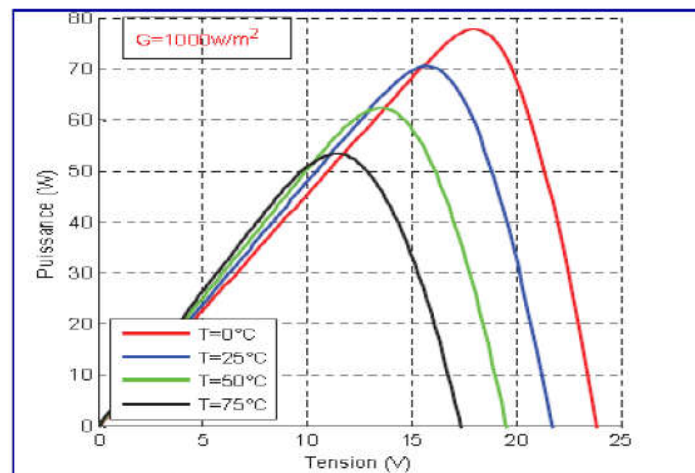


Figure II.16 : la caractéristique $P=f(V)$ en fonction de la température. [13]

II.5. Les systèmes CPV

Un système photovoltaïque concentré convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique de la même manière que la technologie photovoltaïque classique. La différence avec le CPV vient de l'ajout d'un système optique qui concentre une large zone de rayons solaires sur chaque cellule des panneaux. Ces systèmes CPV peuvent être comparés à des télescopes, qui suivent la position du soleil et apportent la lumière

concentrée à la cellule. Le degré de concentration atteint varie tellement que trois classes ont été développées.

II.5.1. Système CPV à faible concentration

Cette technologie à faible (basse) concentration produit de 1.8 à 2 fois plus d'énergie qu'une installation photovoltaïque classique, simplement en ajoutant des miroirs appelés miroirs de Fresnel. L'intérêt de cette technologie est qu'elle permet de produire une électricité peu coûteuse car les miroirs sont à très bas prix.

Les cellules PV ont une conception spécifique qui leur permet de résister à des concentrations de 5 Sun (soleil).

II.5.2. Système CPV à moyenne et haute concentration

La moyenne et haute concentration augmente le rayonnement solaire par un facteur de 100 à 1000. Nous pouvons préciser que la moyenne concentration a pour maximum 300 soleils, et la technologie haute concentration est un traqueur hautement précis qui permet d'éviter les pertes de rayonnement, et sa puissance varie de 600 à 3000 Watt.

Ces procédés utilisent généralement des lentilles de Fresnel à la place des miroirs mais bien sûr beaucoup de systèmes sont mis en place.

II.5.3. Les concentrateurs solaires

Les concentrateurs solaires focalisent les rayons du soleil dans un point comme pour la tour solaire, ou dans une ligne comme les concentrateurs cylindro-paraboliques et les miroirs de Fresnel. Les concentrateurs en lignes possèdent généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels. Ce facteur représente le rapport entre la surface de captation et la surface d'absorption. Les systèmes utilisant les concentrateurs solaires sont capables de générer des températures au voisinage de 1000°C, ces systèmes ont été initialement développés pour la production d'électricité. Les caractéristiques techniques principales de ces centrales solaires à concentration sont présentées dans ce tableau :

Type de champs solaire	Facteur de concentration	Capacité d'unité (MW)	Température d'opération (°C)
Miroirs de Fresnel	25-100	10-200	270-550
Cylindro-parabolique	70-80	10-200	390-550
Tour solaire	300-1000	10-150	550-1000

Tableau II.4 : caractéristiques des centrales solaires à concentration.

II.5.3.1. Les miroirs cylindro-paraboliques : Le concentrateur cylindro-parabolique se distingue par sa simplicité, il se présente comme un module ayant un réflecteur de forme parabolique disposé cylindriquement. Cette géométrie lui permet de focaliser l'énergie solaire incidente selon une génératrice linéaire où est placé un tube absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur. Le CCP est généralement doté d'une poursuite solaire pour adapter l'inclinaison du concentrateur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au plan d'ouverture du concentrateur.

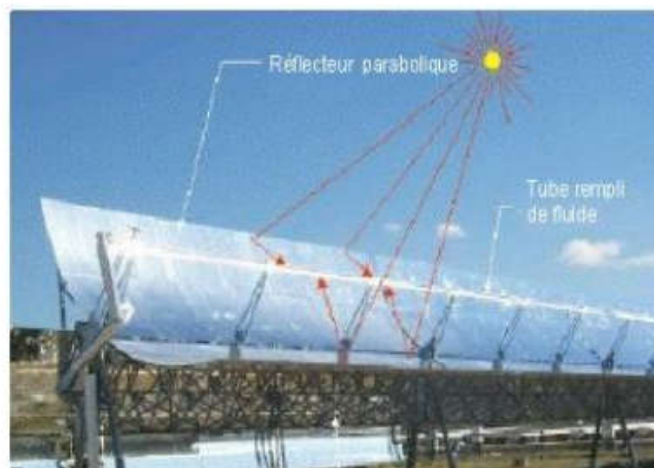


Figure II.17 : schéma d'un concentrateur cylindro-parabolique.

II.5.3.2. Les centrales à tour : Dans ce type de centrale, on utilise de nombreux miroirs qui concentrent le rayonnement solaire sur une chaudière placée en haut d'une tour. Ces miroirs ou héliostats sont conçus pour tourner avec le soleil et ainsi, réfléchir les rayons du soleil sur le foyer de la chaudière. Le rayonnement solaire doit être dirigé vers le foyer en haut de la tour avec une grande précision. Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800°C à 1000°C.



Figure II.18 : centrale solaire à tour.

II.5.3.3. Les miroirs de Fresnel : Les miroirs de Fresnel permettent de mettre à plat une parabole en la découpant en plusieurs tronçons. L'espace occupé est restreint comparé à une parabole classique et la prise au vent se voit réduite puisque chaque mouvement de miroir est contrôlé par des moteurs. On peut donc orienter les miroirs pour réguler la concentration ou passer en position sécurité en les positionnant à plat (cas de vent violent). Les rendements sont inférieurs aux réflecteurs de types paraboliques mais l'industrialisation de ce procédé est nettement plus accessible, moins chère et facile à l'installation.



Figure II.19 : aperçu des miroirs de Fresnel.

II.5.3.4. La lentille de Fresnel : La lentille de Fresnel, ou lentille à échelons, est un type de lentille inventé par Augustin Fresnel en 1822 pour remplacer les miroirs utilisés dans l'éclairage des phares de signalisation marine qui absorbaient jusqu'à 50% du flux lumineux. Sa conception lui permet d'obtenir une courte distance focale pour un large diamètre, sans le poids et le volume nécessaires à une lentille standard.



Figure II.20 : aperçu des lentilles de Fresnel.

II.6. Les batteries

Une batterie solaire est un appareil destiné à stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques. Le courant qui y entre ou qui en sort est continu et non alternatif. Les batteries sont indispensables dans les installations autonomes, car les modules photovoltaïques ne fonctionnent que lorsqu'il y a de la lumière, et pour consommer de l'électricité le soir, il faut que ces batteries aient emmagasinées l'énergie électrique la journée.

Le stockage est réalisé par la batterie d'accumulateurs. Cette batterie est un ensemble d'accumulateurs électriques destinés à stocker de l'énergie et à la restituer ultérieurement. Comme on peut la définir aussi comme étant un générateur électrochimique réversible qui fonctionne grâce aux réactions électrochimiques de ses électrodes. Il y a une conversion de l'énergie chimique en énergie électrique.

Les principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont : [14]

II.6.1. Les batteries au plomb-acide

Une batterie au plomb-acide est un ensemble d'éléments de deux volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives assemblées en alternance.

Facile à trouver, à entretenir et disposant d'un bon circuit de recyclage, la batterie au plomb domine le marché. Le plomb est toxique mais il est stocké de façon totalement étanche. Ce type de batterie présente le meilleur rapport qualité/prix. Le seul défaut qu'elle présente est le poids et le volume, mais dans la majorité des cas elle reste le meilleur choix. [14]

On distingue deux principaux types de batteries au plomb-acide :

Les accumulateurs au plomb ouvert : ils sont ainsi nommés car l'électrolyte est liquide et doit être renouvelé. [14]

- Les accumulateurs plomb étanches : de technologie électrolyte gélifié ou à recombinaison de gaz, ils ont les mêmes caractéristiques que les accumulateurs plomb ouvert mais ils sont étanches. Ils peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne nécessitent absolument aucun entretien (pas d'eau à rajouter). Ce qui est un avantage certain pour des alimentations PV avec un minimum de maintenance.[14]



Figure II.21 : batterie au plomb-acide.

II.6. 2. Les batteries au Nickel-Cadmium (NiCD)

Ces batteries ont une structure physique semblable à celles du plomb-acide. Au lieu du plomb, on utilise de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives, et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. Ces batteries souffrent d'un effet mémoire, c'est-à-dire qu'il faut complètement les décharger avant de les recharger, car dans le cas contraire leur capacité diminue définitivement. A cause de leur prix et de la toxicité du cadmium, ces batteries ont été remplacées par les batteries Nickel-Hydrure-Métallique NiMH. [10]

II.6. 3. Les batteries au Nickel-Hydrure-Métallique NiMH

Ces batteries remplacent les batteries NiCD car elles sont moins toxiques. Elles sont cependant assez chères et sont utilisées dans les installations haut de gamme. Leur durée de vie est beaucoup plus grande que celles des batteries au plomb (50% de plus). Mais leur capacité est extrêmement faible et leur auto décharge très forte. Leur utilisation commerciale se fait d'avantage autour des batteries de téléphones et des ordinateurs portables que dans les installations solaires. [2]

II.7. Les convertisseurs

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge, alors il portera le nom de convertisseur continu/continu (DC/DC), soit entre la batterie et la charge et il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu/alternatif (DC/AC).

II.8. Différentes configurations des systèmes photovoltaïques

Généralement une installation PV comprend les éléments suivants :

- ✓ Un générateur PV.
- ✓ Un convertisseur statique continu/continu.
- ✓ Un convertisseur statique continu/alternatif.
- ✓ Un système de régulation et de stockage.
- ✓ Une source d'appoint.

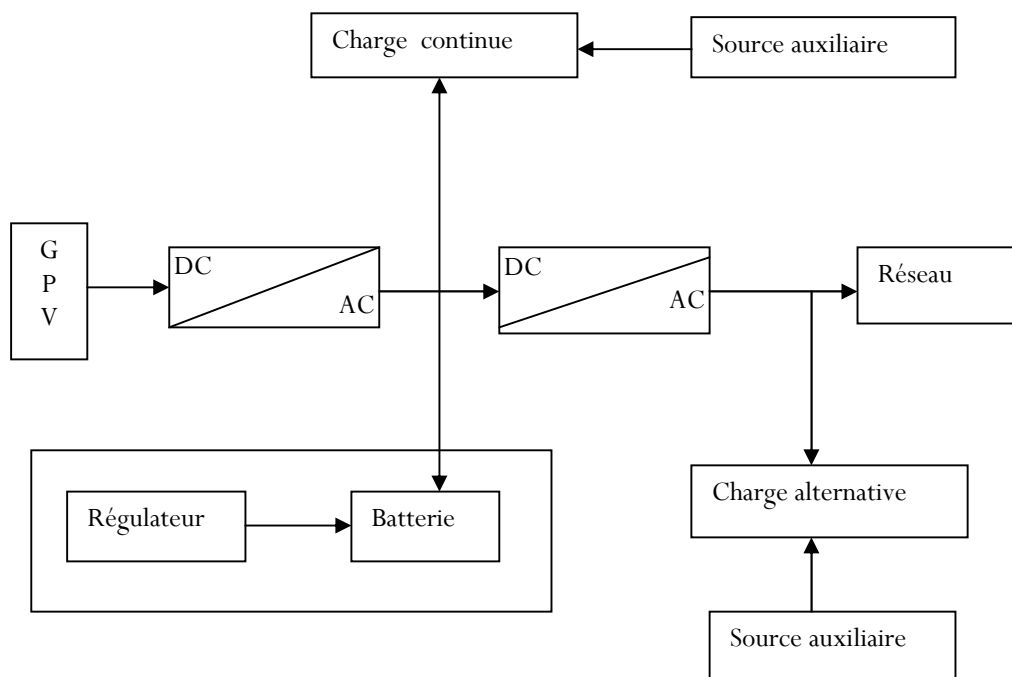


Figure II.22 : schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.[11]

II.8. 1. Système autonome sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batteries sont représentés par une charge de type continu et sont alimentés directement par le générateur photovoltaïque (GPV), car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge. [11]

II.8. 2. Système autonome avec batterie

Ces systèmes sont représentés par une charge de type continu ou une charge de type alternatif. La batterie sert à stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. Cette énergie emmagasinée peut être utilisée à tout moment, même en l'absence du rayonnement solaire. [11]

II.8. 3. Système fonctionnant au fil du soleil

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit. [11]

II.8. 4. Système avec appoint électrique

Pour ces systèmes, on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisance d'énergie électrique (manque de rayonnements solaires ou batteries déchargées). Ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu ou de type alternatif.

Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau, soit par une autre source d'énergie comme l'hydrogène. [11]

II.9. les applications d'énergie solaire photovoltaïque

Les applications pour un usage domestique sont nombreuses : pompage de l'eau, lampe solaire de jardin (abri, piscine, garage), d'intérieur (chevet, table, bureau), de poche, murale, ou encore avec détecteurs de mouvements. La technologie se révèle déclinable presque à l'infini. Les performances dépendent essentiellement de la capacité de stockage de la batterie. [10]

II.10. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

II.10.1. Avantage: Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages dont on peut citer :

- Ils sont non polluants et silencieux.
- Ils sont très fiables.
- Ils n'exigent presque aucun entretien.

- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles.
 - Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
 - Ils offrent une autonomie et un fonctionnement indépendant du réseau ou ils peuvent être utilisés comme systèmes de secours en cas de panne électrique.
- [14]

II.10.2. Inconvénient : Les systèmes PV présentent toute fois des inconvénients tels que :

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10 à 15% avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur PV est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel. [14]

Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique, par l'ensemble de cellules dites photovoltaïques (PV). On a présenté ensuite le fonctionnement, les performances et les différents types de chaque composant de ce système. Ces connaissances nous permettent d'éclaircir notre objectif vu les avantages présentés par l'énergie solaire photovoltaïque en dépit du cout du système. Cette dernière contrainte nous pousse à retrouver une meilleure architecture permettant d'extraire le maximum des performances afin d'optimiser le système et de réduire les dépenses.

CHAPITRE III :
Etude du système
PV- hydrogène

Introduction

L'hydrogène peut être produit à partir de l'énergie électrique générée par les systèmes éoliens et photovoltaïques.

Dans ce chapitre, nous allons faire une présentation d'un système de production d'hydrogène solaire en faisant l'association entre panneaux solaires, électrolyseur et pile à combustible.

III.1. Les principaux composants

III.1.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu, constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement. Il sert de modules de base pour les installations PV et notamment dans les centrales solaires.

III.1.2. Convertisseurs DC/DC

Les convertisseurs de tension DC/DC sont utilisés lorsque la tension du système ne correspond pas aux besoins des consommateurs, ils sont fait soit pour élever ou pour abaisser une tension. Ils s'assurent également que tous les équipements DC disposent d'une alimentation d'énergie stable.

On distingue trois types de convertisseurs DC/DC :

III.1.2.1. Convertisseurs dévolteurs (Buck-Converter) : Un convertisseur Buck ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

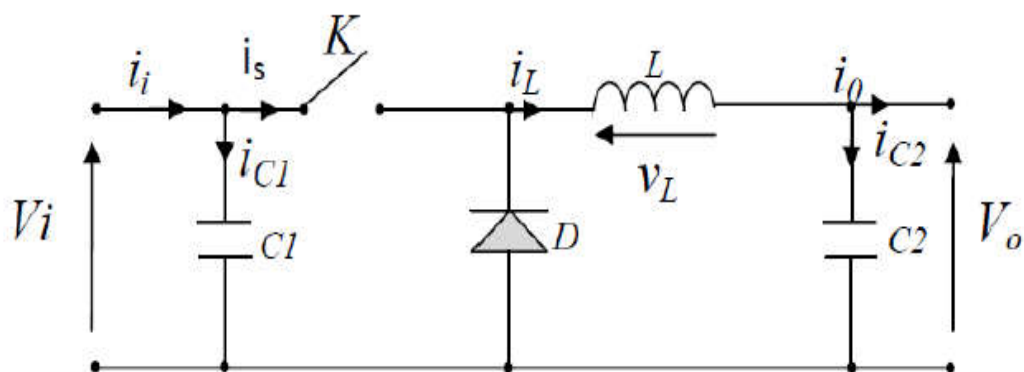


Figure III.1 : schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck. [9]

III.1.2.2. Convertisseur survoleur (Boost-Converter) : Un convertisseur Boost ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

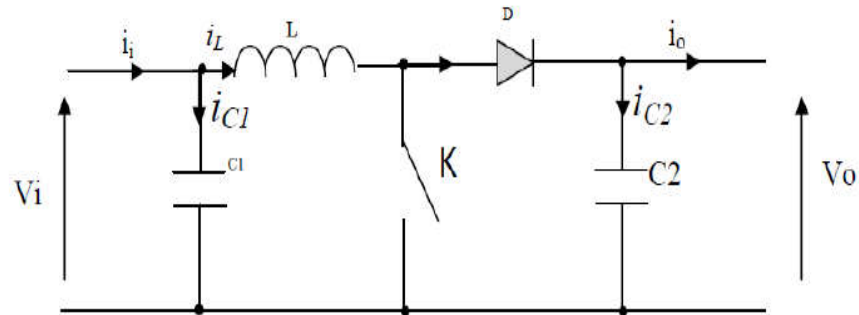


Figure III.2 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost. [9]

III.1.2.3. Convertisseur Buck-Boost : Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension de plus faible ou de plus grande valeur mais de polarité inverse.

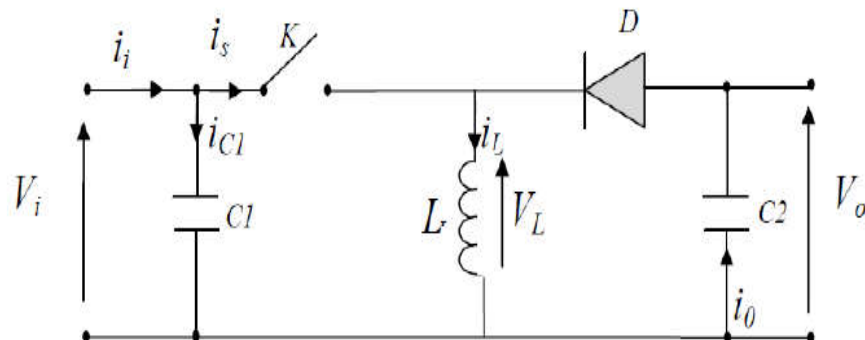


Figure III.3 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost. [9]

III.1.3. Electrolyseurs

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. [3]

III.1.3.1. Les différentes technologies d'électrolyseurs [3]

III.1.3.1.a. Electrolyseurs alcalins : L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore.

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

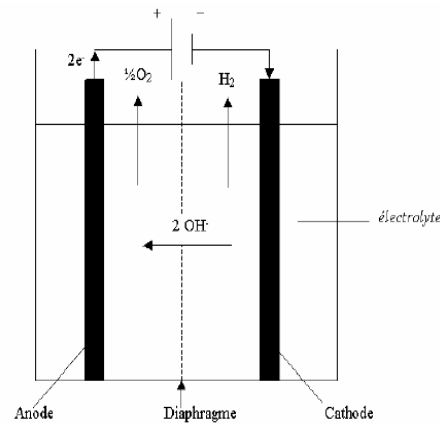
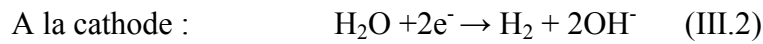
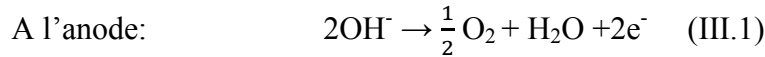
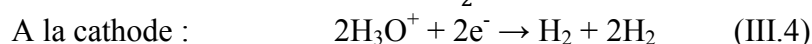
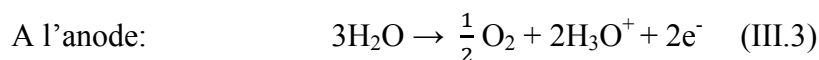


Figure III.4 : principe de l'électrolyse alcaline. [3]

III.1.3.1.b.Électrolyseurs PEM : Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les réactions suivantes :



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

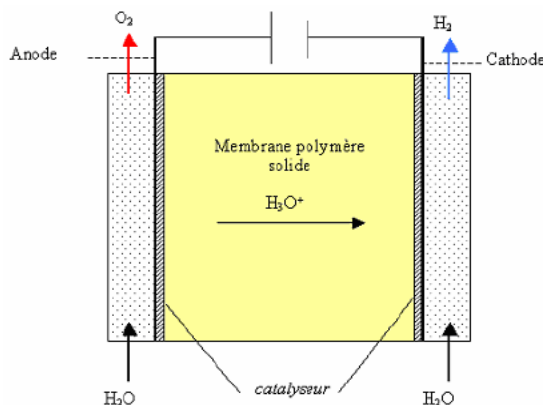
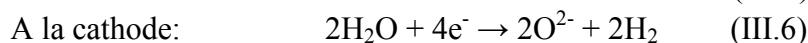
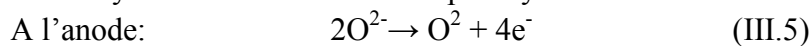


Figure III.5 : principe schématique de l'électrolyse PEM. [3]

III.1.3.1.c. Electrolyseurs à haute température : Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions superoxydes O^{2-} . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte :

- Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :



- Electrolyte à conduction protonique:

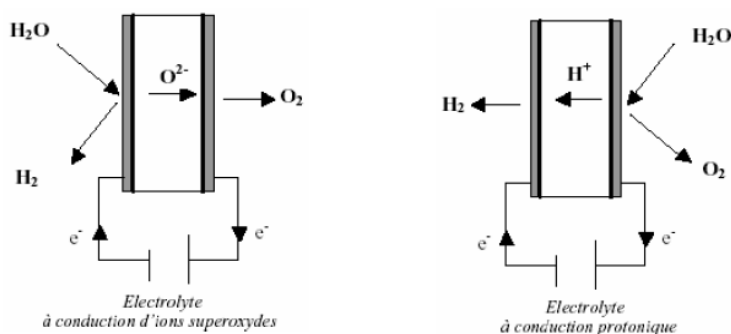
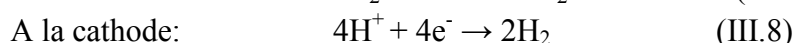
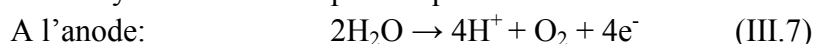


Figure III.6 : principe de l'électrolyse à haute température selon le type de l'électrolyte. [3]

III.1.4. Piles à combustible

III.1.4.1. Description générale : La pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée en combustibles (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel et hydrogène). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, ou l'on trouve l'énergie électrique stockée sous forme chimique, et à noter que ces appareils doivent être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste radio). [15]

III.1.4.2. Différents types de piles à combustible : [15] La classification des piles à combustibles se fait généralement selon la nature de l'électrolyte car celui-ci détermine, d'une part, la température à laquelle la pile fonctionne et, d'autre part, le type d'ion assurant la conduction ionique. La classification repose essentiellement sur :

- La nature de la membrane : liquide ou solide.
- La température de fonctionnement de la pile : basse (60°C – 250°C) ou haute (600°C – 1000°C).

Il existe six types de piles à combustibles qui se différencient entre elles par leur température de fonctionnement et par l'électrolyte donnant son nom à la pile :

1. Les piles à combustibles à membranes échangeuse de protons (PEMFC).
2. Les piles à combustibles alcalines (AFC).
3. Les piles à combustibles à acide phosphorique (PAFC).
4. Les piles à combustible à carbonates fondus (MCFC).
5. Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC).
6. Les piles à combustible à membrane électrolyte polymère (PEM).

III.1.4.3. Piles à combustibles de type PEM : [15] Parmi toutes les familles existantes, la pile à combustible de type PEM suscite de nombreux travaux de recherche et de développement.

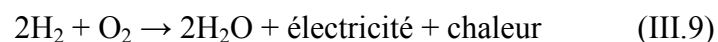
Nous nous intéressons à cette pile parce que comparée aux autres piles à combustibles, elle a plusieurs caractéristiques attractives comme :

- Densité de puissance plus élevée.
- Fort rendement de transformation d'énergie chimique en énergie électrique.
- Basse température, rapide et facile à démarrer.
- Polymère solide ce qui réduit les soucis liés à la construction, au transport et à la fiabilité.
- Plus compacte et légère : une meilleure densité de puissance volumique.



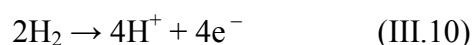
Figure III.8 : image d'une PEMFC démontable.

III.1.4.4. Principe de fonctionnement de la pile : [15] Le principe de la pile à combustible a été démontré en 1839. Le processus peut être décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En fait, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon cette réaction chimique :

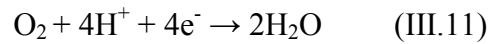


Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur, séparées par un électrolyte dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre sous l'effet du champ électrique créé.

- L'anode : où se passe l'oxydation est alimentée en combustible (H_2 , CH_3OH , ...), selon la relation suivante :



- La cathode : où se passe la réduction est alimentée en comburant (O₂, air, ...), selon cette réaction :



- Le catalyseur : pour que les deux réactions soient possibles, il faut un catalyseur (composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même). Afin que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de zones actives doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'interface électrode-électrolyte.

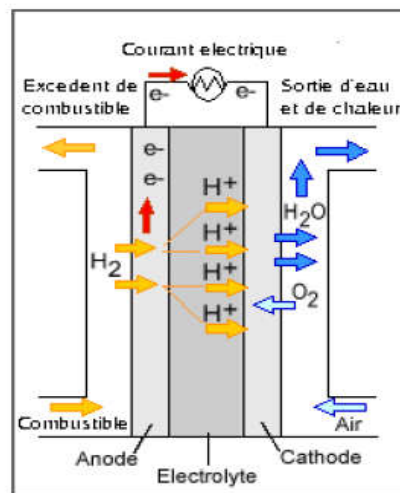


Figure III.7 : Diagramme d'une PEMFC.

Conclusion

Les recherches scientifiques et techniques ont contribué à faire apparaître les piles à combustible comme une solution prometteuse aux problèmes de l'énergie et de la pollution.

Des applications potentielles ont été imaginées dans plusieurs secteurs comme le transport, la production décentralisée d'électricité, les appareils nomades (téléphone, ordinateurs portables, etc.), etc.

Dans ce contexte nous nous sommes intéressées dans ce travail qu'aux piles à combustible à membranes échangeuses de protons PEM. Cette technologie semble effectivement être la plus mure et la plus proche du stade commercial. Elle est considérée comme étant la mieux adaptée pour le secteur d'automobile.

CHAPITRE IV:
Simulation et analyse du
système PV- hydrogène

Introduction

Etant donné les différents efforts des dernières années à travers le monde pour diminuer la dépendance au pétrole, beaucoup de ressources ont été mises de l'avant pour développer les énergies renouvelables et principalement, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque.

Les technologies des panneaux solaires photovoltaïques ont beaucoup évolué et ces outils aussi. Il existe des logiciels pour la simulation, pour l'évaluation des coûts et des différentes données économiques, certains sont destinés à l'industrie, d'autres sont développés pour la surveillance et le contrôle des systèmes installés ou encore pour l'évaluation de site.

Dans notre étude, nous avons choisis de travailler avec le logiciel «Hybrid Optimization Of Multiple Energy Ressources » qui se nomme HOMER.

IV.1. Critères du choix du logiciel HOMER [16]

Les objectifs fixés pour notre étude, nous ont permis de porter notre choix sur le logiciel HOMER, car il satisfait les conditions suivantes :

- Langue : français ou anglais.
- Accessibilité à tous.
- La simulation de systèmes hybrides connectés au réseau ou hors réseau.
- L'évaluation des coûts et l'optimisation des systèmes.
- Simulation de systèmes dans plusieurs pays.

IV.1.1. Présentation du logiciel HOMER

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources) est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il se présente sous la forme d'un exécutable complètement autonome, capable de faire le dimensionnement, l'optimisation et la simulation des systèmes avec des énergies renouvelables ou avec des énergies fossiles. [16]

Un des grands atouts de ce logiciel est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou non pour une variété d'applications.

La première version a été développée en 1992 pour NREL (US National Renewable Energy Laboratory), il a ensuite subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. [16]

La version utilisée dans notre projet est HOMER 3.6.3 sortie en juillet 2016.

IV.1.2. Caractéristiques principales de HOMER

Les caractéristiques de ce logiciel permettent de faire l'optimisation et la simulation des systèmes hybrides, et terminent avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés.

La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergie fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergies ou plus.

IV.2. Les données relatives à l'ensoleillement moyen au site de Tizi Ouzou

Selon la Figure IV.1, le rayonnement solaire à Tizi Ouzou varie entre 2.010 KWh/m²/j au mois de décembre et 7.00 KWh/m²/j au mois de juillet.



Figure IV.1 : radiation globale horizontale mensuelle à Tizi Ouzou.

IV.3. Construction du schéma de conception du système

Sur le logiciel HOMER, nous avons défini chaque élément de notre installation : le potentiel photovoltaïque, l'électrolyseur, la pile à combustible et la charge à alimenter.

D'autres données sont notamment nécessaires tel que les coordonnées du site et la durée de vie des composants et ainsi que leurs coûts.

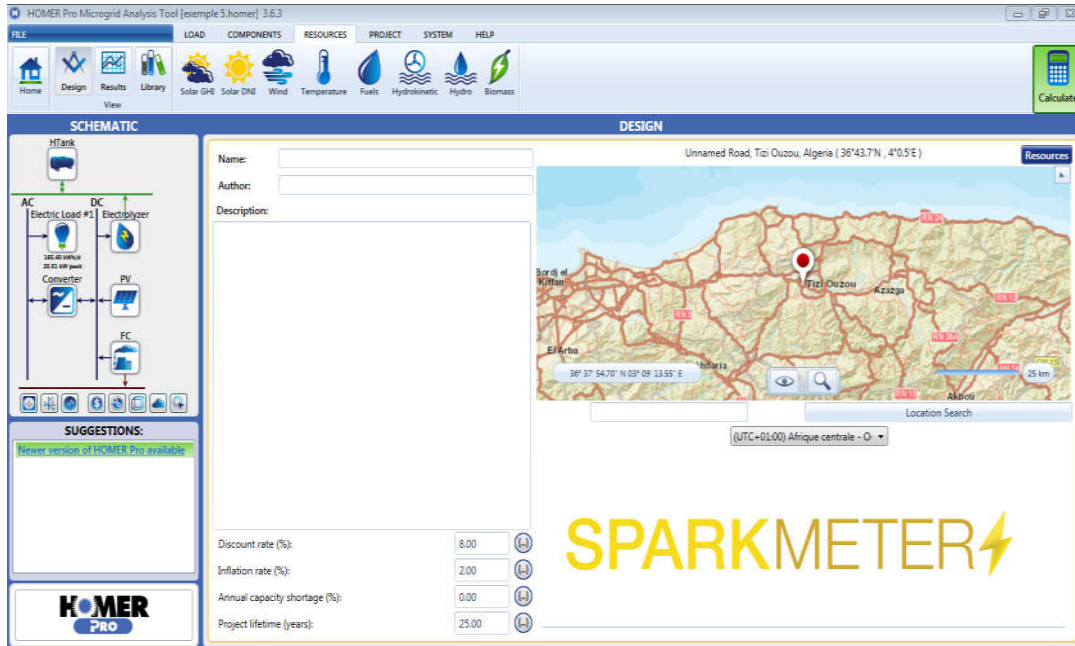


Figure IV.2 : montage électrique du système.

IV.4. Configuration du système en fonction du cout net actuel

A partir de la simulation, HOMER permet de visualiser le comportement horaire de chaque équipement de l'installation pour toutes les configurations simulées. De ces résultats, HOMER présente une analyse financière et classe les différentes configurations par ordre croissant du cout net actuel.

Pour chacune de ses solutions possibles, HOMER fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants de l'installation (PV, pile à combustible, convertisseur, électrolyseur et réservoir de stockage) et propose plusieurs configurations classées de la plus performante à la moins performante. Par exemple dans notre cas, il nous a proposé la solution suivante :

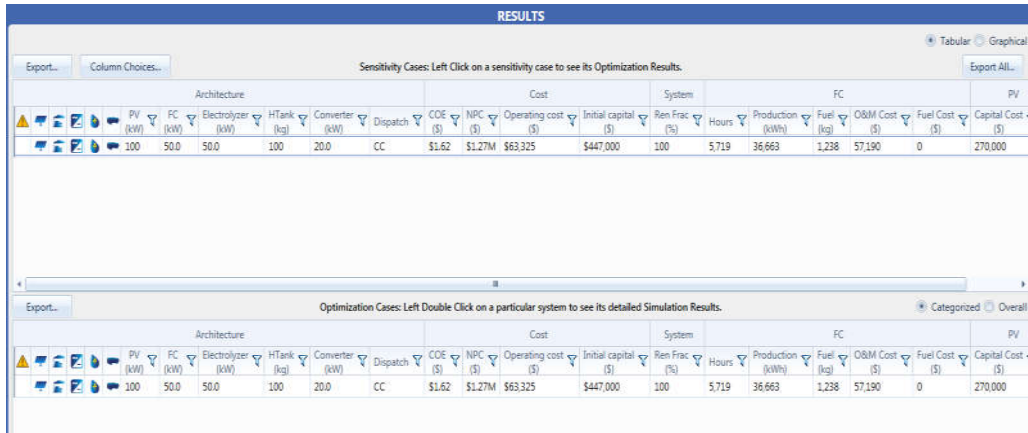


Figure IV.3 : configuration proposée par le logiciel HOMER.

La figure ci-dessus permet de visualiser la configuration la plus faisable pour notre système. La conception PV/pile à combustible /convertisseur/électrolyseur/stockage est la plus rentable et la plus optimale.

Pour notre étude, nous avons choisi une charge de 165.40 KWh/jour dont le pic est de l'ordre de 20.51 KW.

D'après les résultats présentés sur la Figure IV.3, la configuration la plus optimale permettant de couvrir la charge est comme suit :

Composants	Capacités
Panneau photovoltaïque	100 KW _C
Pile à combustible	50 KW
Convertisseur	20 KW
Electrolyseur	50 KW
Stockage	100 Kg

Tableau IV.1 : architecture du système PV-Hydrogène.

IV.5. Production et consommation d'énergie électrique

La production et la consommation d'énergie sur une année sont détaillées sur les tableaux IV.2 et IV.3.

Production Summary

Component	Production (kWh/yr)	Percent
Generic flat plate PV	148 157	80.1
PEMFC	36 726	19.9
Total	184 884	100

Tableau IV.2 : énergie annuelle produite.

Consumption Summary

Component	Consumption (kWh/yr)
AC Primary Load	60 348
DC Primary Load	0
Total	130 261

Tableau IV.3 : énergie annuelle consommée.

Sur le tableau IV.2 est présenté les quantités d'énergie électrique produites (production summary) par le système pour le site de Tizi Ouzou.

Ainsi, pour une charge de 165.40 KWh/jour, nous remarquons que 80.1% des besoins énergétiques du site sont fournis par le générateur photovoltaïque et le reste est assuré par la pile à combustible.

Sur la figure IV.4 nous donnons la puissance moyenne mensuelle produite par chaque source :

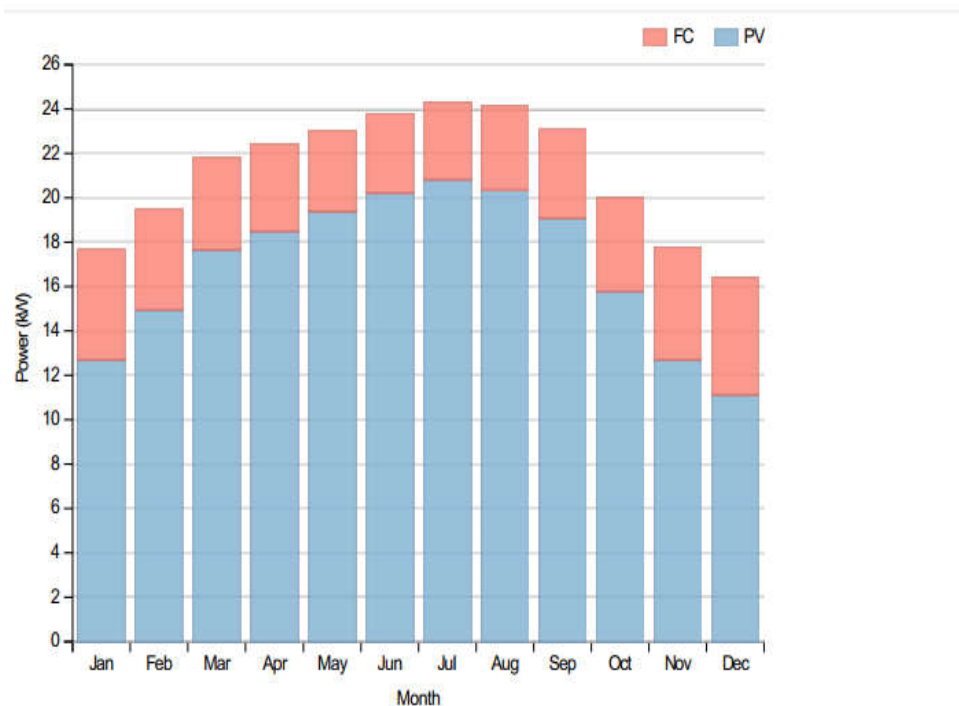


Figure IV.4 : puissance moyenne mensuelle produite par chaque source.

IV.5.1. Générateur photovoltaïque

Le tableau ci-dessous résume tous les paramètres de fonctionnement du générateur photovoltaïque étudié.

Generic flat plate PV Electrical Summary

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	104	kW
PV Penetration	245	%
Hours of Operation	4 364	hrs/yr
Levelized Cost	0.0224	€/kWh

Generic flat plate PV Statistics

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	100	kW
Mean Output	16.9	kW
Mean Output	406	kWh/d
Capacity Factor	16.9	%
Total Production	148 157	kWh/yr

Tableau IV.4 : caractéristique de fonctionnement du panneau photovoltaïque.

D'après les résultats, nous constatons que le panneau solaire fonctionne pratiquement pendant 49.81% de la totalité du nombre d'heure annuelle (8760h/an). Il est à l'arrêt pendant 180 jours dans l'année, avec un facteur de capacité de 16.9%.

IV.5.2. Pile à combustible

Dans le cas où la production du panneau photovoltaïque est faible, c'est la pile à combustible qui prend le relais et assure la production de puissance. Ainsi, elle est appelée à fonctionner à n'importe quel moment de la journée d'une manière optimisée selon le besoin de la charge.

Les paramètres de fonctionnements sont donnés sur le tableau ci-dessous :

PEMFC Electrical Summary

Quantity	Value	Units
Electrical Production	36 726	kWh/yr
Mean Electrical Output	6.43	kW
Minimum Electrical Output	0.00630	kW
Maximum Electrical Output	24.4	kW
Thermal Production	6 116	kWh/yr
Mean thermal output	1.07	kW
Min. thermal output	1.07	kW
Max. thermal output	1.07	kW

PEMFC Fuel Summary

Quantity	Value	Units
Fuel Consumption	1 460	kg
Specific Fuel Consumption	0.0397	kg/kWh
Fuel Energy Input	48 660	kWh/yr
Mean Electrical Efficiency	75.5	%

PEMFC Statistics

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	5 714	hrs/yr
Number of Starts	414	starts/yr
Operational Life	8.75	yr
Capacity Factor	14.0	%
Fixed Generation Cost	0.600	€/hr
Marginal Generation Cost	0	€/kWh

Tableau IV.5 : paramètres de fonctionnement de la pile à combustible.

La figure ci-dessous illustre la production journalière de la pile durant toute l'année. La couleur noir et la couleur bleu représentent les périodes à très faible production. La couleur rouge représente les pics. La production moyenne est représentée par la couleur verte.

PEMFC Output (kW)

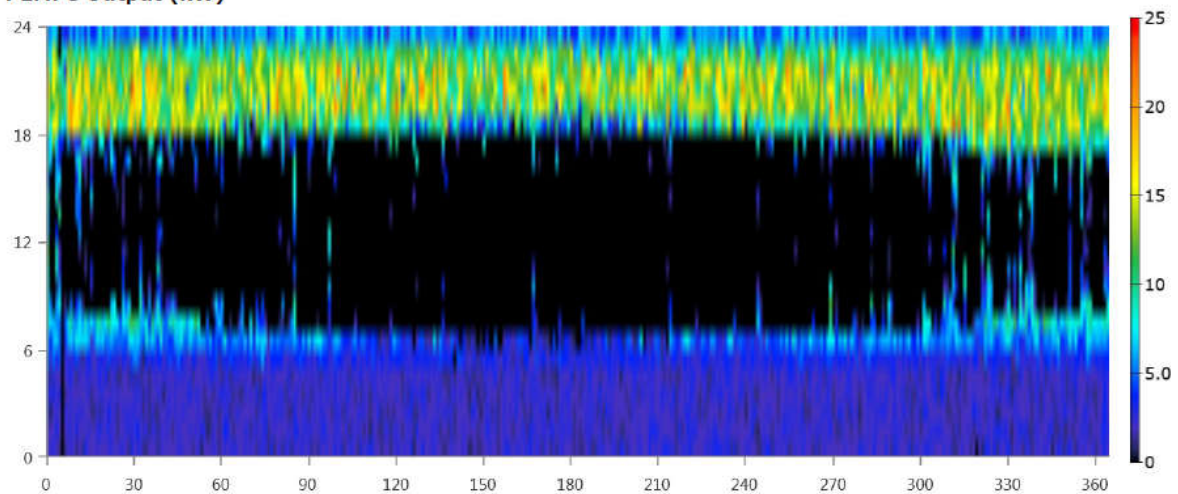


Figure IV.5 : production journalière de la pile.

IV.5.3. Electrolyseur

La figure ci-dessous illustre les paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur. Sa production annuelle est estimée à 1 507 Kg/an avec une consommation de 46.4 KWh/Kg. L'électrolyseur fonctionne pendant 2 461 h/an.

Summary

Quantity	Value	Units
Mean output	0.172	kg/hr
Minimum Output	0	kg/hr
Maximum Output	2.02	kg/hr
Total production	1 507	kg/yr
Specific consumption	46.4	kWh/kg

Statistics

Quantity	Value	Units
Rated capacity	100	kW
Mean input	7.98	kW
Minimum input	0	kW
Maximum input	93.8	kW
Total input energy	69 913	kWh/yr
Capacity Factor	7.98	%
Hours of operation	2 461	hr/yr

Tableau IV.6 : paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur.

IV.5.4. Convertisseur

Le convertisseur a une capacité de 20 KW, son énergie d'entrée est de 73 595 KWh/an, à sa sortie on récupère une énergie de 60 348 KWh/an avec une perte de 13 247 KWh/an. Le convertisseur fonctionne pendant 8 750 h/an avec une capacité de 34.4%.

System Converter Electrical Summary

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	8 750	hrs/yr
Energy Out	60 348	kWh/yr
Energy In	73 595	kWh/yr
Losses	13 247	kWh/yr

System Converter Statistics

Quantity	Value	Units
Capacity	20.0	kW
Mean Output	6.89	kW
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	20.0	kW
Capacity Factor	34.4	%

Tableau IV.7 : paramètres de fonctionnement du convertisseur.

IV.5.5. Réservoir d'hydrogène

La capacité de stockage du réservoir d'hydrogène s'élève à 100 Kg avec une capacité de stockage d'énergie de 3 333 KWh et une autonomie de 484 heures.

Properties

Quantity	Value	Units
Hydrogen storage capacity	100	kg
Energy storage capacity	3 333	kWh
Tank autonomy	484	hr

Statistics

Quantity	Value	Units
Content at beginning of year	10.0	kg
Content at end of year	56.8	kg

Tableau IV.8 : paramètres de fonctionnement du stockage d'hydrogène.

Conclusion

Les résultats de simulation présentés dans ce chapitre ont été effectués avec le logiciel HOMER. Ils ont permis de montrer que le système de production d'énergie étudié peut fonctionner pour différentes configurations. HOMER révèle que la réalisation du système PV-Hydrogène est possible et peut satisfaire la charge électrique exigée.

Le photovoltaïque et l'hydrogène sont complémentaires. Ils permettent une alimentation sans interruption de la charge.

Conclusion générale

Ces dernières années, l'utilisation des énergies renouvelables comme le photovoltaïque est en forte croissance pour la production de l'électricité. Afin d'assurer une production continue, ces systèmes doivent être hybridés avec d'autres sources d'énergie comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse, puis stocké et enfin réutiliser par une pile à combustible pour produire de l'énergie électrique verte.

Les besoins de production d'énergie électrique par les systèmes à hydrogène sont de plus en plus nécessaires, c'est pour cela que la production d'hydrogène par des moyens autonomes comme le couplage aux énergies renouvelables apporte des réponses propres, fiables et plus économiques.

Le présent travail a permis de démontrer que la combinaison de différentes sources d'énergie engendre un profit en terme efficacité énergétique, économique et environnementale. Comme il permet aussi de trouver une solution pour diminuer la forte dépendance au réseau de distribution électrique conventionnel.

Notre travail de simulation sur le logiciel HOMER nous a permis d'obtenir une production électrique annuelle de 184 884 KWh soit 148 157 KWh par le système PV (80.1% de la production totale) et 36 726 KWh par la pile à combustible (19.9% de la production totale), et sur cela nous pouvons dire que nous avons pu répondre au besoin de notre charge, dont la consommation est estimée à 60 371 KWh par année.

Cette étude nous a permis de connaître un nouveau logiciel qui est HOMER, et d'apprendre à l'utiliser et s'adapter à son interface.

En perspectives, nous dirons que notre travail pourra subir des améliorations. Au niveau de la procédure d'optimisation, du dimensionnement des systèmes, un outil automatisant la méthodologie proposée avec des interfaces conviviales pour l'utilisateur peut être développé.

Il serait aussi intéressant d'étudier le modèle développé avec plusieurs méthodes de dimensionnement et de comparer les résultats de simulation par logiciel

Conclusion générale

HOMER avec les résultats de simulation émanant d'autres logiciels tels que Matlab/Simulink à fin de concrétiser un système plus optimal.

Bibliographiques/ web graphie

1. Mémoire

[1]:R.Boudries, R.dizène, A. Khellaf and M. Belhamel, «**HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER** », Editor: Aiden M.Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc.

[2] : Julien LABBE. L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïques isole, thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, 2006.

[3] : Khadidja BOUZIANE. Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyseur de l'eau, thèse de magister, UKMO, 2011.

[4] : Mustapha BELARBI. Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome, thèse de doctorat es- sciences, UMBO, 2015.

[5] : Lamissa DIABATE. Détermination du rayonnement solaire à l'aide d'images satellitaires, thèse de doctorat en énergétique, ENSMP, 1989.

[6] : Zhipeng QU. La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol, thèse de doctorat, l'Ecole nationale supérieure des mines de paris, 2013.

[7] : Naima BENBOUZA. Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna, thèse de magister en électrotechnique, UB ,2008

[8] :S. BENLHAMIDI, N.MOUMMI, A.MOUMMI, K.AOUES, A.LABED. Réalisation d'une interface de simulation des performances des isolateurs plans.

[9] : Narimene DEBILI. Etude et optimisation en environnement Matlab/ Simulink d'un système de pompage photovoltaïque, thèse de magister en électronique, UC1, 2015.

[10] : Sabrina MILOUDI. Etude d'un système photovoltaïque autonome à base d'hydrogène vert. Thèse de master académique, UKMO, 2016.

[11] : Yousef KHERIDLA, Kaddour KHINECHE. Modélisation et simulation d'un système de production d'hydrogène par voie photovoltaïque, thèse de master académique, UKMO, 2014.

[12] : Loïc BAILLY. Cellules photovoltaïques organiques souples à grandes surfaces, thèse de doctorat, UBI, 2010.

[13] : Mohamed lakhdar LOUAZENE. Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes- application zone d'Ouargla, thèse de doctorat en science, UEHLB ,2015.

[14] : Kamel CHABANI, Tahar KECHEMIR, Missipça IZEROUEL. Etude et réalisation d'un régulateur de charge et d'un onduleur monophasé pour système photovoltaïque autonome, thèse de technicien supérieur électronique industrielle, INSFP OUAGUENOUN ,2017.

[15] : Zhiming ZHANG. Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible, thèse de doctorat, UEVE, 2010.

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

2. Sites web

- Pyranomètre. [13 octobre 2017], [15 aout 2018]. Disponible sur le site : (<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pyranomètre&oldid=141495746>).
- Pyrhéliomètre. [15 avril 2018], [15 aout 2018]. Disponible sur le site : (<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pyrhéliomètre&oldid=147550831>).
- Albédo mètre [23 juillet 2018], [15 aout 2018]. Disponible sur le site : (<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Albédo&oldid=150626912>).
- La fabrication des cellules photovoltaïques. Disponible sur le site : (www. Halou.com).
- Système CPV. [24 octobre 2017], [30 juillet2018]. Disponible sur le site : (https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Panneau_photovoltaïque_à_concentration&oldid=141839993).
- Convertisseur Boost. [17 octobre 2017], [consulté le 15 aout 2018]. Disponible sur le site : (https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Convertisseur_Boost&oldid=141607607).
- Convertisseur buck. [28 septembre 2017], [consulté 15 aout 2018]. Disponible sur le site : (https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Convertisseur_Buck&oldid=141031329).
- Convertisseur Buck-Boost. [consulté 24 février 2017], [15 aout 2018]. Disponible sur le site :(https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Convertisseur_Buck-Boost&oldid=134829316).