



République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur et de La Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji - Laghouat

Faculté de Technologie

Département D'électrotechnique

DOMAINE : Sciences et Technologies.

FILIERE : Electrotechnique.

OPTION : Energies renouvelables en électrotechnique.

Mémoire de Master

Présenté par :

Makhloufi Khedidja

Nasri Safana

Thème

**Étude et modélisation avec dimensionnement des
systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène
appliqués dans le système micro-réseau.**

Jury de soutenance :

<i>Nom et Prénom</i>	Grade	Qualité
<i>Kouzi Katia</i>	PROF	Président
<i>Bouchiba Oumelkheir</i>	MCB	Examinatrice
<i>Birane Mouhoub</i>	MCA	Encadreur

Année Universitaire : 2022/2023.

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant de nous avoir donnée le courage et la patience durant toutes ces années d'études, et que grâce à lui à travail a pu être réalisé. Ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Nous tenons à remercier **Dr. Mouhoub BIRANE** mon encadreur, Et Nous voudrions remercier spécialement, qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements, **Dr. Oum El Kheir Bouchiba** pour avoir accepté de diriger notre travail, pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité pour son aide et ses chers conseils pour développer le présent mémoire avec succès.

Mes remerciements vont aussi : **Dr. Aïssa Ameer, Dr. Rougab Ilyes, Dr. Saddam Bensaoucha, Dr. Tahar Merizgui.**

Nous n'oublierons pas de remercier les membres du jury qui vont mes abonnés en acceptant de jury ce travail.

Nous voudrions remercier tout particulièrement tous les membres de nos familles ainsi que nos parents de leur soutien et leurs encouragements tout au long de notre cursus.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail reflétant mon effort consenti durant le cursus universitaire à :
A l'âme de mon très cheré père que dieu l'accueille dans son vaste paradis. Aucune
dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai
toujours pour vous

A ma tendre mère : tu représentes pour moi la source tendresse et l'exemple de
dévouement qui n'a pas cessé de m'encourage ;

A mes frères, et sœurs : 'Rayhana ; Abdelatif, Soumia, Mohamed Ayoub, Abdessamad'

A ma chère binôme ma dulcinée 'Safana', qui a partagé avec ma les moments difficiles de
ce travail et sa famille

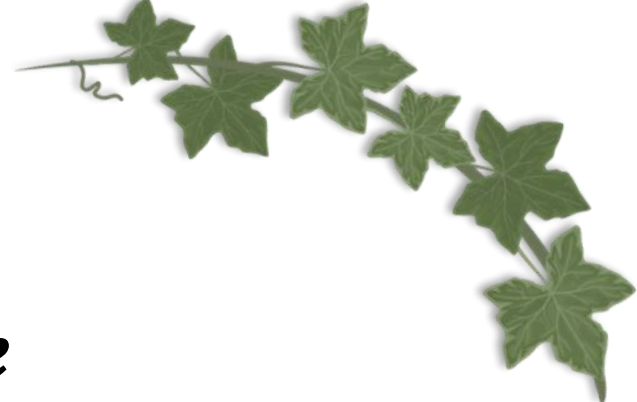
A ceux qui m'ont donnée sans rien en retour que ce travail soit une part de ma
reconnaissance envers eux : Mon oncle 'Mohamed' ; et doctorat 'Azouz Makhloufi'.

A tous mes enseignants, du primaire à l'université.

A tous les amis que j'ai eus dans ma vie.

A mes camarades de la faculté des sciences et technologie de l'Université de Laghouat.

Khadidja Makhloufi



Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents dont le sacrifice, l'amour et le soutien sont le carburant
de ma réussite.

A ma frère Moaoueia, et mes sœurs Atika, Omama, safia, khadidja.

A tous mes Amis et Amies.

A ma très chère amie (khadidja makhloufi).

Toute ma famille (Nasri)

Et à tous ceux qui de près ou de loin ont participé à cet aboutissement.



Safana Nasri

الملخص

للمحد من انبعاثات الغاز الملوث من إنتاج طاقة الوقود الأحفوري، يمكن أن تكون الطاقة المتجددة حلاً جذاباً. ومع ذلك، تنشأ بعض المشاكل مع استخدام الطاقات المتجددة التي يمكن أن تقلل من أداؤها، مثل تلك المتعلقة بالأحوال الجوية والحد من ضوء النهار.

هذا العمل هو دراسة ومحاكاة نظام منزل مستقل مدعوم بأنظمة هجينة. ستتراكم الكهرباء المولدة وغير المستهلكة من قبل المستخدم في نظام تخزين الهيدروجين ويعاد استخدامها حسب الحاجة. والهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحقيق الحجم الأمثل لنظام الطاقة، وبالتالي، تعظيم القدرة على تلبية الطلب على الطاقة وتقليل تكلفة الاستثمار إلى أدنى حد.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، نظام هجين، النظام الكهروضوئي، هيدروجين، خلايا الوقود، المحلل الكهربائي، دراسة اقتصادية.

Résumé

Pour réduire les émissions de gaz pollués causées par la production d'énergie des combustibles fossiles, les énergies renouvelables peuvent être une solution attrayante. Toutefois, certains problèmes apparaissent avec l'utilisation des énergies renouvelables qui peuvent réduire au minimum leurs prestations, telles celles liées aux conditions météorologiques et à la limitation de la lumière du jour.

Ce travail est l'étude et la simulation du système d'une maison autonome alimenté par Les systèmes hybrides PV/H2. L'électricité produite et non consommée par l'utilisateur s'accumuleront dans un système de stockage d'hydrogène pour la réutiliser au besoin. L'objectif principal de ce travail consiste à atteindre le dimensionnement optimal du système énergétique, par conséquent, de maximiser la capacité de répondre à la demande d'énergie et de réduire au minimum le coût de l'investissement.

Mots-clés : Les énergies renouvelables, système Hybride, Système photovoltaïque Hydrogène, Pile à combustible, électrolyseur, étude économique.

Abstract

To reduce polluted gas emissions from fossil fuel energy production, renewable energy can be an attractive solution. However, some problems arise with the use of renewable energies that can minimize their performance, such as those related to weather conditions and the limitation of daylight.

This work is the study and simulation of the system of an autonomous house powered by hybrid PV/H2 systems. Electricity generated and not consumed by the user will accumulate in a hydrogen storage system for reuse as needed. The main objective of this work is to achieve the optimal sizing of the energy system, therefore, to maximize the ability to meet energy demand and minimize the cost of investment.

Keywords: renewable energy, hybrid system, Photovoltaic system, hydrogen, fuel cell, electrolyze, economic study.

Table des matières

Remerciements.....	ii
المخلص	v
Table des matières	vi
Liste des abréviations.....	x
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
Introduction générale	1
Chapitre 1 Généralités sur les systèmes photovoltaïques	3
1.1 Introduction	4
1.2 Historique	5
1.3 Les rayonnements solaires	6
1.3.1 Les Différents types de rayonnement solaire	7
1.3.2 Spectre du rayonnement solaire	8
1.4 Principe de la conversion photovoltaïque	10
1.5 Cellules photovoltaïques	11
1.6 Les types de technologie des cellules photovoltaïques	12
1.6.1 Cellule à base de silicium monocristallin	13
1.6.2 Cellule à base de silicium polycristallin	13
1.6.3 Cellule à base de silicium amorphe	13
1.7 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque	14
1.7.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.....	14
1.7.2 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque	16
1.7.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque.....	16

1.8	Module photovoltaïque	18
1.8.1	Association des cellules photovoltaïques.....	18
1.9	Comportement d'un générateur photovoltaïque.....	20
1.9.1	Caractéristique courant-tension	20
1.9.2	Caractéristique puissance – tension	21
1.9.3	Influence de l'éclairement sur les courbes I(V) et P(V)	21
1.9.4	Influence de la température sur les courbes I(V)et P(V)	22
1.9.5	Protection classique d'un générateur photovoltaïque	23
1.10	L'effet d'ombrage.....	24
1.11	Différents types de système photovoltaïque.....	24
1.11.1	Système PV autonome	24
1.11.2	Système PV raccordé au réseau	26
1.11.3	Système PV hybride.....	26
1.12	Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	27
1.12.1	Avantages.....	27
1.12.2	Inconvénients	28
1.13	Les convertisseurs.....	28
1.13.1	Convertisseur DC/DC	28
1.13.2	Convertisseur DC/AC	29
1.14	Conclusion.....	30
Chapitre 2 L'hydrogène comme l'énergie de future		31
2.1	Introduction	32
2.2	Historique	32
2.3	Caractéristiques de L'Hydrogène.....	33
2.4	Production d'hydrogène	33
2.4.1	Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures).....	34
❖	Le vaporeformage de gaz naturel	34
❖	Oxydation partielle	35
2.4.2	Production d'Hydrogène à Partir Du Charbon	35
2.4.3	Production à partir des énergies renouvelables.....	35
2.4.4	Production par l'électrolyse de l'eau	36

2.5	Stockage de l'hydrogène	46
2.5.1	Le stockage sous forme gazeux	46
2.5.2	Le stockage sous forme liquide.....	46
2.5.3	Le stockage sous forme d'hydrures métalliques	46
2.5.4	Le stockage sous basse pression	47
2.6	Conclusion.....	47
Chapitre 3 Modélisation de l'électrolyseur et la pile à combustible		48
3.1	Introduction	49
3.2	Modélisation d'électrolyseur.....	49
3.2.1	Modèle d'électrolyseur	50
3.3	Modélisation de pile à combustible.....	53
3.4	Conclusion.....	57
Chapitre 4 Dimensionnement et simulation de système étudié.....		58
4.1	Introduction	59
4.2	But du dimensionnement.....	59
4.3	Critères du choix du logiciel HOMER.....	60
4.4	Présentation du logiciel HOMER.....	60
4.5	Caractéristiques principales de HOMER	60
4.6	Création du système	61
4.7	Construction du schéma de conception du système	61
4.8	Description du système hybride PV/H	62
4.9	Caractéristique de la région de Laghouat	63
4.9.1	Donnée géographique (Localisation).....	63
4.9.2	Donnée météorologique	64
4.10	Besoins énergétiques et profil de charge	65
4.11	Dimensionnement du générateur photovoltaïque	66
4.12	Dimensionnement de la pile à combustible et l'électrolyseur	68
4.13	Réservoir de stockage.....	69
4.14	Gestion d'énergie du système hybride.....	70
4.15	Caractéristiques techniques des composants utilisés.....	71

4.15.1	Surface du panneau photovoltaïque	71
4.15.2	L'électrolyseur	73
4.15.3	Le convertisseur	74
4.15.4	Réservoirs d'hydrogène	74
4.15.5	Piles à combustible	75
4.16	Optimisation du système	75
4.17	Résultats de simulation du système hybride PV/Hydrogène.....	76
4.18	Conclusion	86
Conclusion générale.....		87
Références bibliographiques.....		88

Liste des abréviations

PV	photovoltaïque
GPV	générateur de photovoltaïque
V	tension délivrée par la cellule PV (V)
I	courant délivrée par la cellule PV (A)
R _S	Résistance en série
R _P	Résistance en parallèle
q	charge d'électron
K	constant de Boltzmann
T	température en Kelvin
V _{oc}	tension en circuit ouvert
I _{cc}	courant de court-circuit
E	Irradiation solaire (KW/m ²)
N _p	Nombre de module parallèle dans le champ PV
N _s	Nombre de module série dans le champ PV
FF	Facteur de forme
P	Puissance
η	rendement
I _{ph}	Photo-courant produit par la cellule
I _{sat}	courant de saturation des diodes dépendent de la température
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
PAC	pile à combustible
PEM	membrane échangeuse de protons
ELE	électrolyseur
HOMER	Hybrid Optimisation of Multiple Energy Ressources

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 – La répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde. [4]</i>	9
<i>Tableau 2 - Caractéristiques principales des piles à combustibles. [14]</i>	45
<i>Tableau 3 - Besoins énergétiques d'un habitat individuel.</i>	65
<i>Tableau 4 - Calcule de nombre de panneaux PV nécessaire.</i>	68
<i>Tableau 5 - Caractéristique des panneaux PV.</i>	73
<i>Tableau 6 - Caractéristique des électrolyseurs.</i>	73
<i>Tableau 7 - Caractéristique des convertisseurs.</i>	74
<i>Tableau 8 - Caractéristiques des réservoirs d'hydrogène.</i>	74
<i>Tableau 9 - Caractéristiques des piles à combustibles.</i>	75
<i>Tableau 10 - composition du système.</i>	76
<i>Tableau 11 - Bilan énergétique du système étudié.</i>	77
<i>Tableau 12 - Coût de chaque composant du système étudié.</i>	82

Liste des figures

<i>Figure 1 – les types de rayonnement solaire.</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2 – Spectres solaires extraterrestre et terrestre.</i>	<i>9</i>
<i>Figure 3 – le principe de conversion de la photovoltaïque.</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 – la cellule photovoltaïque.</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 – Différents technique de cellules photovoltaïque. [2]</i>	<i>12</i>
<i>Figure 6 – Technologies des cellules PV : (a) Monocristalline ; (b) Polycristalline ; (c) amorphe.</i>	<i>14</i>
<i>Figure 7 – circuit équivalent d'une cellule PV à deux diodes.</i>	<i>14</i>
<i>Figure 8 – Caractéristique I-V en association en série des cellules.</i>	<i>18</i>
<i>Figure 9 – Caractéristique I-V en association en parallèle des cellules.</i>	<i>19</i>
<i>Figure 10 – Caractéristique I-V pour l'association mixte.</i>	<i>20</i>
<i>Figure 11 – Caractéristique Courant –Tension d'un module photovoltaïque.</i>	<i>20</i>
<i>Figure 12 – Caractéristique puissance –Tension d'un module photovoltaïque.</i>	<i>21</i>
<i>Figure 13 – Résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV en fonction de différentes irradiances à T=25°C.</i>	<i>22</i>
<i>Figure 14 – Résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV en fonction de différentes températures à E=1000W/m².</i>	<i>22</i>
<i>Figure 15 – Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diodes anti-retour.</i>	<i>23</i>
<i>Figure 16 – Système autonome avec batterie.</i>	<i>25</i>
<i>Figure 17 - Système autonome sans batterie.</i>	<i>25</i>
<i>Figure 18 - Système PV raccordé au réseau.</i>	<i>26</i>
<i>Figure 19 - Système PV hybride.</i>	<i>27</i>
<i>Figure 20 – Schema d'un hacheur, (a) – buck, (b)- boost, (c)- buck-boost.</i>	<i>29</i>
<i>Figure 21 – Schéma symbolique de l'onduleur.</i>	<i>30</i>

Figure 22 - sources de production d'hydrogène dans le monde en 2020 et 2021.	34
Figure 23 - Électrolyse de l'eau à partir d'énergie renouvelable.	36
Figure 24 – Structure monopolaire.	37
Figure 25 – Structure bipolaire.	38
Figure 26 - principe de l'électrolyse alcaline.	39
Figure 27 - principe de l'électrolyse à haute température selon le type de	40
Figure 28 - principe schématique de l'électrolyse PEM.	41
Figure 29 - Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM.	42
Figure 30 - Diagramme d'une PAC de PEM	44
Figure 31 - L'électrolyse PEM.	49
Figure 32 - Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur.	50
Figure 33-Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique	51
Figure 34 – bibliothèque de logiciel HOMER PRO	61
Figure 35 – montage électrique du système.	61
Figure 36 - Principaux composants du système PV/hydrogène.	62
Figure 37 - Localisation géographique du site en étude.	63
Figure 38 - Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie (insolation en Wh/m^2).	64
Figure 39 - Profil de la charge.	66
Figure 40 - configuration choisit du système.	76
Figure 41 - production énergétique mensuelle du système.	77
Figure 42 - Excès énergétique mensuelle pour le système étudié.	78
Figure 43 - Energie photovoltaïque mensuelle produite par les panneaux photovoltaïques dans le système étudié.	79
Figure 44 - Quantité d'hydrogène produite en fonction de l'énergie photovoltaïque du système étudié.	80
Figure 45 - Consommation énergétique mensuelle de l'électrolyseur pour le système étudié.	80
Figure 46 - Quantité mensuelle d'hydrogène produite par l'électrolyseur pour le système étudié.	81

<i>Figure 47 - Production énergétique mensuelle de la pile à combustible pour le système étudié.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 48 - Puissance de tous les composants du système hybride.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 49 - Puissance de tous les composants du système hybride.....</i>	<i>84</i>

Introduction générale

L'énergie est au centre de l'économie pour tous les pays et à la base de toute activité humaine, ces sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire une demande toujours croissante. Les pays développés sont ainsi passés du bois au charbon, à des hydrocarbures plus avancés, à l'hydroélectricité, enfin au nucléaire. Cependant, les réserves de combustible fossiles et nucléaire sont limitées. En plus, l'utilisation des combustibles fossiles est responsable des pluies acides et du réchauffement de la planète, et l'exploitation de l'énergie nucléaire présente des risques d'accident graves sans parler de ceux induit par la gestion des déchets résultants dont la dangerosité radioactive peut durer plusieurs milliers d'années.

Les énergies renouvelables, sont une alternative prometteuse vu que la planète est à bout de souffle et dans l'objectif de limiter le danger des énergies fossiles sur l'environnement, L'énergie éolienne, solaire, thermique et géothermique, marémotrice hydroélectrique et la biomasse sont autant de forme d'exploitation du potentiel énergétique répartis sur différents sites.

L'exploitation de ces énergies se fait en mono source ou en hybride et en mode autonome ou bien connectés au réseau. Car leur production est directement liée aux conditions météorologiques et la situation géographique de site donné, ces sources sont intermittentes. Ainsi, le mixage de plusieurs sources assure une bonne couverture durant toutes les saisons de l'année.

Dans ce projet, nous présentons une étude d'un système hybride basé sur la production et le stockage de l'hydrogène pour faire fonctionner une pile à combustible de type PEM dans le but d'alimenter d'une maison située dans un site isolé. La production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques. Pour consolider notre étude, nous avons utilisé le logiciel HOMER (Hybride Optimisation of Multiple Energy Ressources), qui est un logiciel de dimensionnement, simulation et d'optimisation.

Ce travail a été organisé et structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre nous exposons une étude générale sur les systèmes photovoltaïques et les applications de ces systèmes.

Après dans le deuxième chapitre nous faisons une étude bibliographique sur l'hydrogène (production, stockage et transport).

Par la suite en troisième chapitre est consacré à la présentation de modélisation de l'électrolyseur et la pile à combustible.

Le quatrième chapitre est consacré l'étude d'un système de production d'hydrogène solaire par le couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur PEM. Nous avons présenté des modèles mathématiques qui décrivent les comportements électriques du panneau photovoltaïque et de l'électrolyseur. La fin du chapitre concerne la simulation de couplage direct pour la production de l'hydrogène à l'aide du logiciel HOMER et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin en terminera ce travail par une conclusion générale et perspectives avenir.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

Dans les zones rurales, en particulier dans les pays en développement, où la majorité de la population atteint 80 %, plus d'un milliard de personnes manquent de services énergétiques de base pour répondre et améliorer leurs sociétés et leurs économies. Le coût de l'expansion régionale, parfois très élevé en raison de la faible densité de population, conduit souvent diverses organisations à explorer des alternatives.

Les systèmes d'énergie renouvelable (principalement photovoltaïques ou Hydrogéné) peuvent être une bonne solution pour fournir des charges énergétiques petites à moyennes. Il peut fournir une alimentation électrique ininterrompue, est facile à installer et à entretenir et présente une grande fiabilité.

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde ils sont la forme d'énergie la moins nocive pour l'environnement. Peuvent être utilisés pour diverses applications telles que la production d'électricité, le chauffage des habitats et l'approvisionnement en carburant des transports.

Dans ce chapitre, nous décrivons des généralités sur le système photovoltaïque.

1.2 Historique

Bien que la base théorique de l'effet photoélectrique soit connue depuis le début du siècle, le scientifique français Edmond Becquerel a été le premier à découvrir l'effet photoélectrique en 1839. Il a découvert que certains matériaux peuvent générer une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Puis Albert Einstein, qui a étudié l'effet photoélectrique, a découvert que la lumière a non seulement une nature ondulatoire, mais que son énergie est transportée par des particules, les photons. Ce n'est qu'en 1954 que le premier téléphone cellulaire raisonnablement efficace a été développé aux Bell Telephone Laboratoires dans le New Jersey. Le processus de nettoyage des monocristaux de silicium est pratiqué depuis la seconde moitié du siècle dernier.

En 1956, Loferski a publié diverses tables de conversion d'efficacité photovoltaïque pour tous les matériaux semi-conducteurs. Au début des années 1970, un rendement de 20 % était alors atteint en laboratoire à l'aide de cellules monocristallines à base d'arséniure de gallium (GaAs). Le rendement est nettement inférieur lorsque ces cellules sont fabriquées à l'échelle industrielle.

Cellules constituées de deux couches ont également été testées : l'une en sulfure de cadmium (SCd) et l'autre en sulfure de cuivre (SCu₂). Ces cellules ont l'avantage d'utiliser très peu de matière active et de permettre un processus de fabrication plus simple. Cependant leur faible efficacité ne permet pas une utilisation à l'échelle industrielle. La commercialisation des cellules photovoltaïques a commencé avec l'avènement du silicium monocristallin et elles occupent encore aujourd'hui la position de leader sur le marché. En conséquence, des matériaux polycristallins sont apparus, moins chers à produire mais encore peu performants. Les cellules en silicium amorphe utilisées dans les appareils à très faible consommation d'énergie sont récemment apparues sur le marché.

Les premières applications concrètes de l'énergie photovoltaïque sont apparues dans les engins spatiaux, leur permettant d'alimenter des équipements de contrôle, de mesure et de transmission de données. C'est également à cette époque que débute la production industrielle des premiers panneaux hors sol à usage domestique.

Si ces panneaux n'étaient pas suffisamment compétitifs pour une production de masse au début des années 1980, ils permettaient tout de même d'électrifier les maisons isolées. La quête de produits plus efficaces et moins chers se poursuit, même s'il n'y a que quelques entreprises dans le monde qui peuvent couvrir les coûts de recherche élevés. [1]

1.3 Les rayonnements solaires

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k. [1]

- Diamètre de soleil : $D_s = 1.39.10^9 m$.
- Diamètre de la terre : $D_t = 1.27.10^7 m$.
- Distance moyenne soleil-terre : $D_{ms} = 1.5.10^{11} m$.

1.3.1 Les Différents types de rayonnement solaire

- A. **Rayonnement direct** : Rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.
- B. **Rayonnement diffus** : rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- C. **Rayonnement réfléchi** : ou l'albédo du sol : le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- D. **Rayonnement global** : la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillements diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement, car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point. [1]

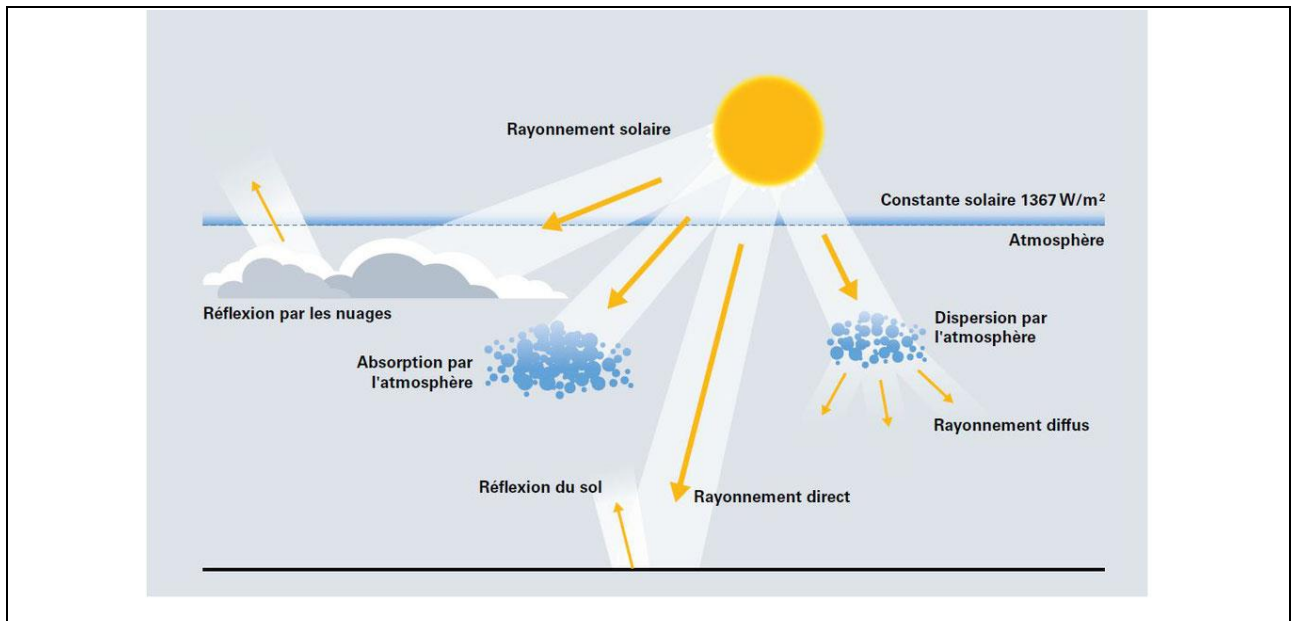


Figure 1 – les types de rayonnement solaire.

1.3.2 Spectre du rayonnement solaire

Le spectre du soleil est sa décomposition en longueur d'ondes ou en couleurs. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisés par leur gamme de longueurs d'onde selon la relation : [2]

$$E = h\gamma = \frac{hC}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : la constante de Planck [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$].

λ : la longueur d'onde [m].

γ : la fréquence [Hz].

C : la vitesse de la lumière [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

La courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilé selon les données recueillies par les satellites, est répartie comme suit :

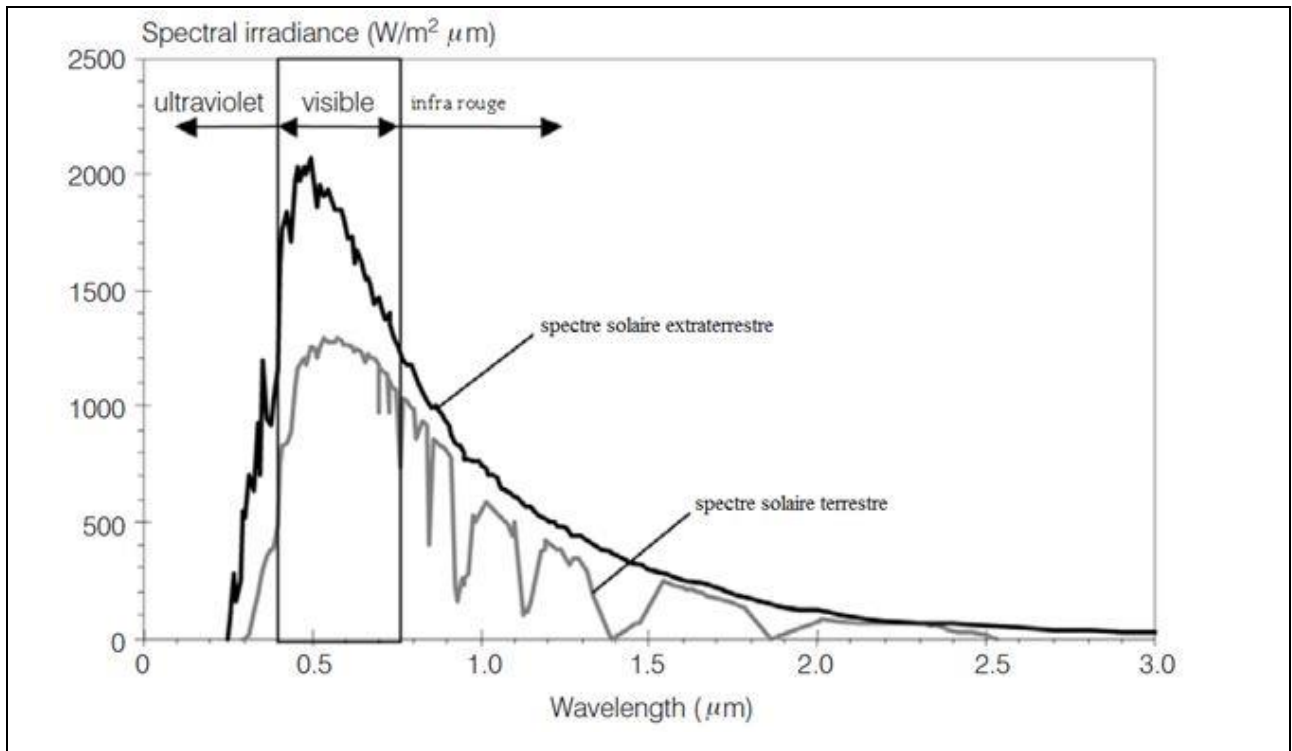


Figure 2 – Spectres solaires extraterrestre et terrestre.

Tableau 1 – La répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde. [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%

1.4 Principe de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charge électrique positive et négative sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dite respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. [1]

La zone initialement dopée ne devient chargée positivement et la zone initialement dopée p 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 (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendre ainsi une paire électron - trou. 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, donne naissance à une différence de potentiel le courant électrique circulant. [5] Voir la figure (3)

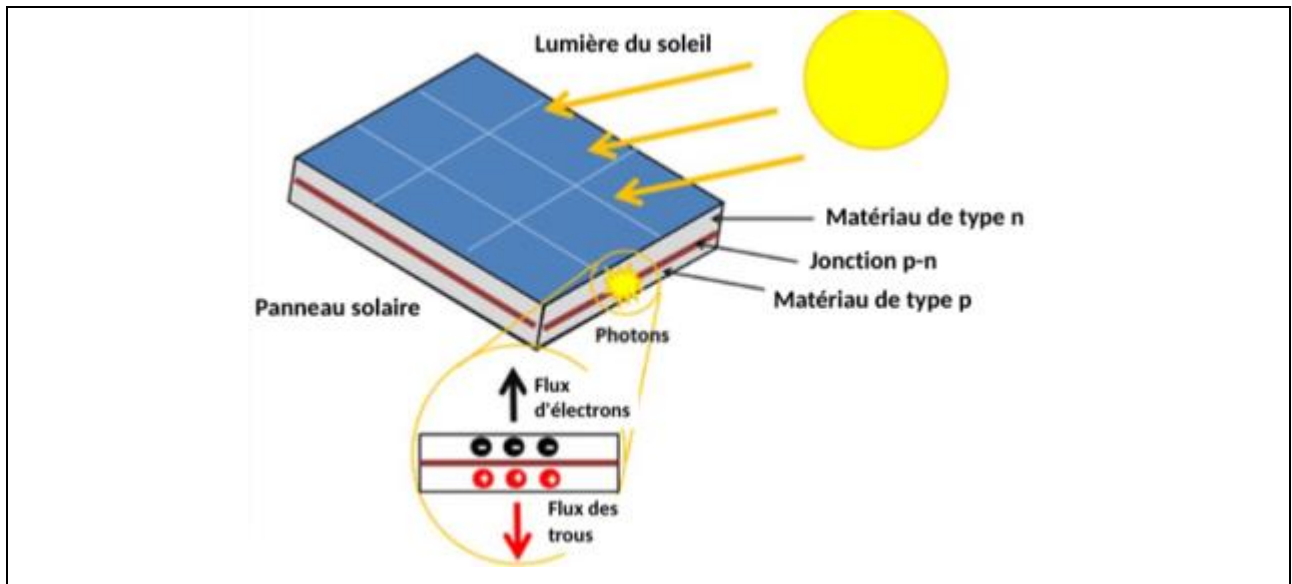


Figure 3 – le principe de conversion de la photovoltaïque.

1.5 Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électroniques réalisés à l'aide des composants semi-conducteurs qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand elles sont éclairées. [5]

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (exemple : dopé au bore) et l'autre couche dopée N (exemple : dopé phosphore, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentielle. 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. [2]

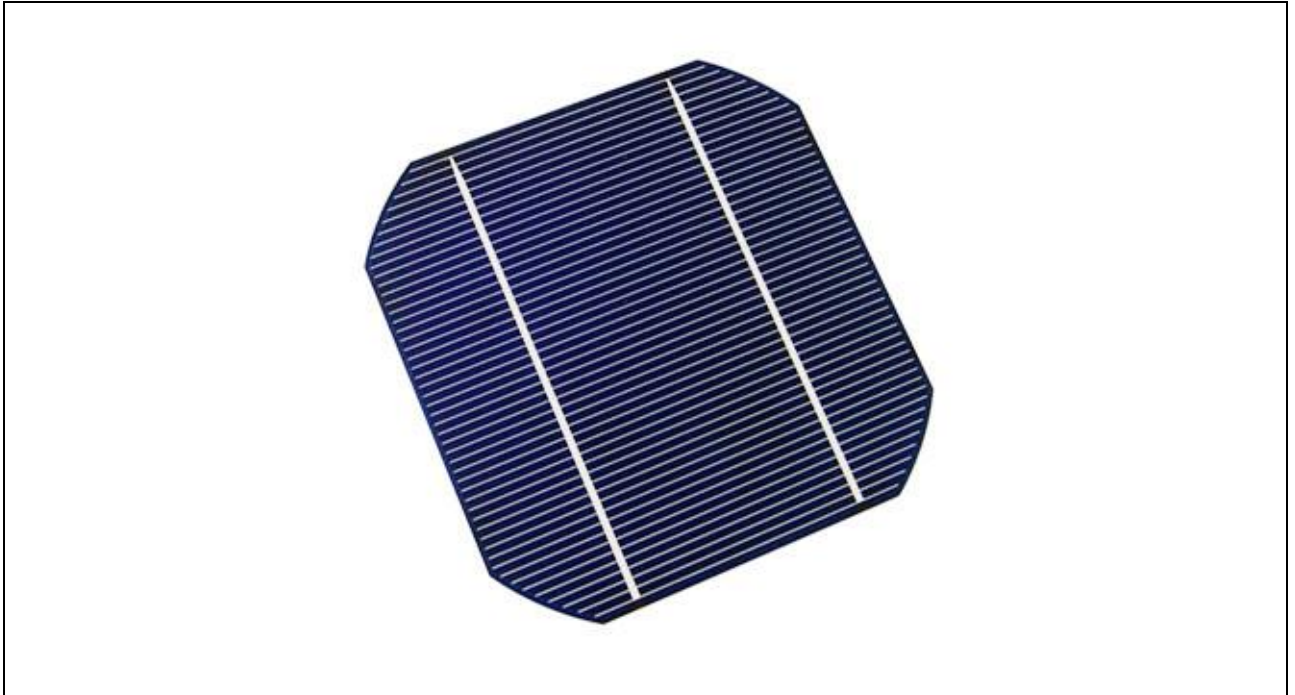


Figure 4 – la cellule photovoltaïque.

1.6 Les types de technologie des cellules photovoltaïques

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

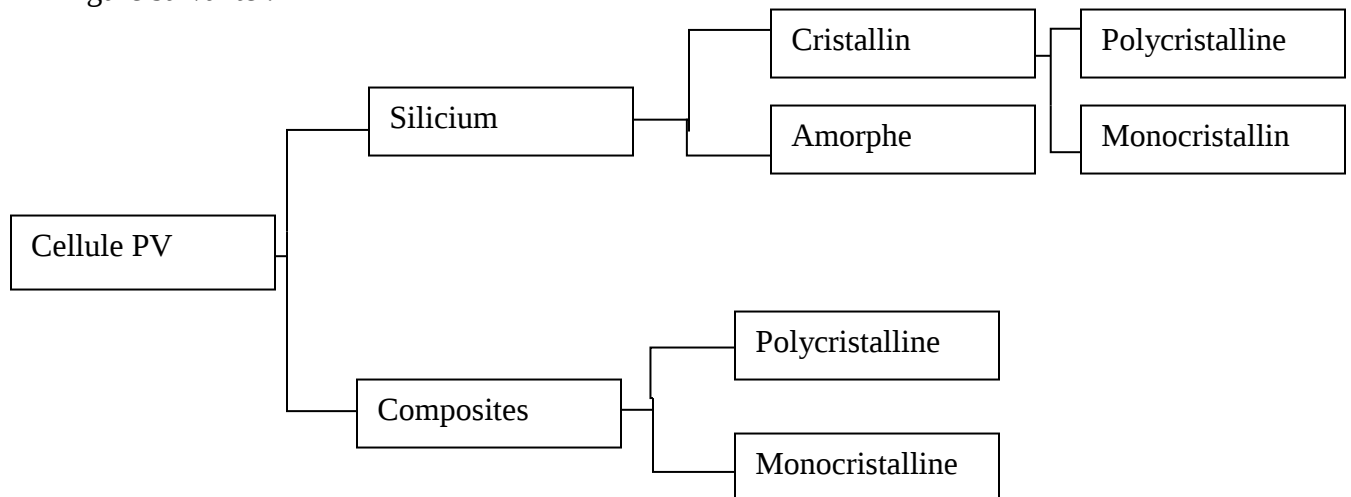


Figure 5 – Différents technique de cellules photovoltaïque. [2]

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

1.6.1 Cellule à base de silicium monocristallin

- Première génération de photopiles.
- Rendement excellent de 16% et jusqu'à 21%.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées, de surface bleu-gris uniforme. [6]

1.6.2 Cellule à base de silicium polycristallin

- Rendement de 11% et jusqu'à 15%.
- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie. [6]

1.6.3 Cellule à base de silicium amorphe

Ces cellules sont constituées d'un support en verre ou synthétique sur lequel est déposée une fine couche de silicium (les atomes ne s'organisent plus aussi régulièrement que dans un cristal). Ils ont une finition foncée uniforme.

- Rendement de seulement 6 à 10% par module.
- Coût de production bien plus bas.
- Appliquées dans les petits produits de consommation : montres, calculatrices, mais peu utilisées dans le cadre des installations solaires.
- Mieux réagir à la lumière diffuse et donc, elles sont plus performantes à une température élevée.[6]

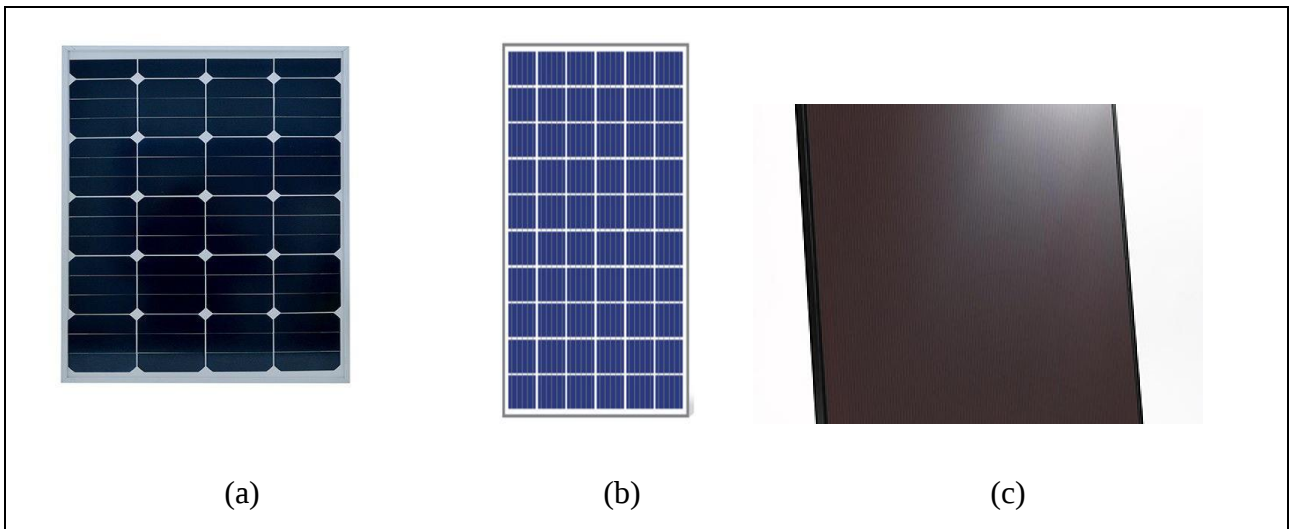


Figure 6 – Technologies des cellules PV : (a) Monocristalline ; (b) Polycristalline ; (c) amorphe.

1.7 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque

1.7.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

La (figure 7) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec deux diodes. Deux résistances sont insérées dans ce schéma.

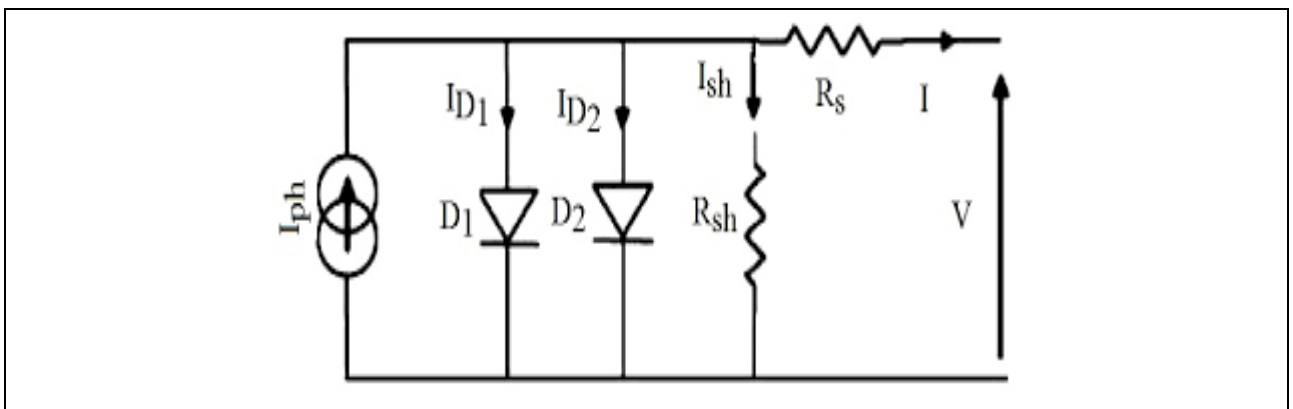


Figure 7 – circuit équivalent d'une cellule PV à deux diodes.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{d1} + I_{d2} + I_{Rp} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{Rp} \quad (1.2)$$

L'expression de courant I en fonction de la tension V s'écrit sous la forme suivante :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\eta_1 k T}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{\eta_2 k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1.3)$$

Avec

I : courant délivré par la cellule PV.

V : Tension délivrée par la cellule PV.

R_s : Résistance série.

R_p : Résistance shunt ou parallèle.

η_1, η_2 : facteurs de pureté de la diode, $\eta_1 = 1$ et $\eta_2 = 2$.

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

k : constante de Boltzmann $= 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

T : température absolue de la cellule en Kelvin (K).

E : éclairement ($E_0 = 1000 \text{ W/m}^2$).

I_{ph} : photo-courant produit par la cellule PV donnée par l'équation suivant :

$$I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot \left[1 + (T - T_0) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \right] \quad (1.4)$$

Avec

I_{ph0} : photo-courant généré à $T_0 = 298K(25^\circ C)$, $I_{ph0} = 3.25A$.

I_{s1}, I_{s2} : courants de saturation des diodes dépendent de la température données par :

$$I_{s1} = K_1.T^3.e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad \text{et} \quad I_{s2} = K_2.T^{\frac{5}{2}}.e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

E_g : énergie de gap du semi-conducteur ou $E_g = 1.1eV = 1.75.10^{-19}$ joules.

$$K_1 = 1.2A/cm^2.K^3 \quad K_2 = 2.9A/cm^2.K^{5/2}$$

1.7.2 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

- La résistance série R_s .
- La résistance shunt R_{sh} .
- Le courant de saturation I_{sat} .
- L'éclairement W .
- La température T .

1.7.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

1.7.3.1 Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V = 0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [5]

$$I_{cc} = I_{ph} \tag{1.5}$$

1.7.3.2 Tension de circuit ouvert V_{co}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [5]

$$V_{co} = V_t \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (1.6)$$

1.7.3.3 Puissance maximale d'une cellule photovoltaïque

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{max} multipliée par le courant de court-circuit.

Le produit ($V_{max} \times I_{max}$) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit (V_{co}, I_{sc}). [5]

$$P_{max} = V_{co} I_{sc} \quad (1.7)$$

1.7.3.4 Rendement énergétique

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{inc}} \quad (1.8)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. [5]

1.7.3.5 Facteur de forme

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale). [5]

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{cc} V_{co}} \quad (1.9)$$

1.8 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.

1.8.1 Association des cellules photovoltaïques

1.8.1.1 Association en série

Une association de N_s cellules en série, 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. [7]

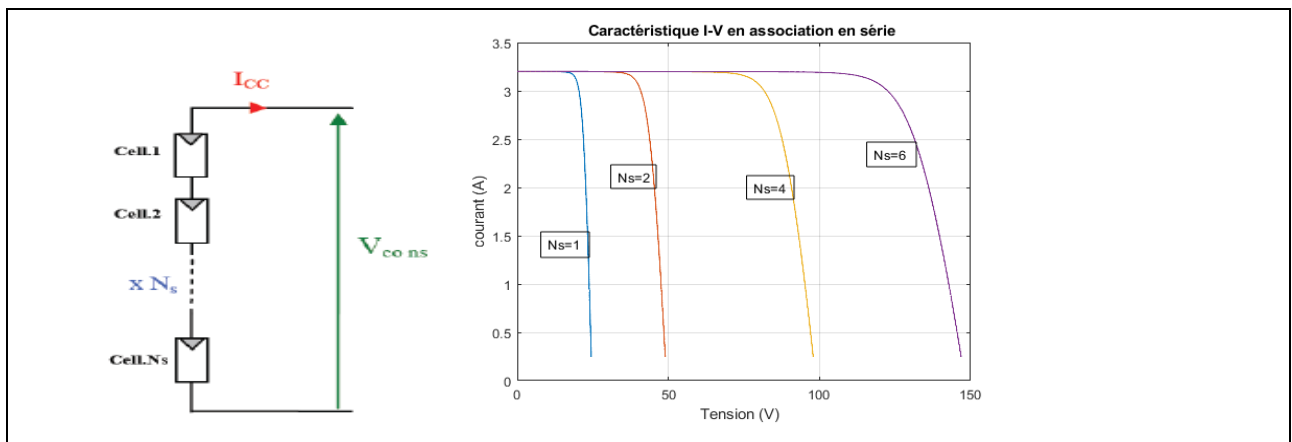


Figure 8 – Caractéristique I-V en association en série des cellules.

1.8.1.2 Association 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 identique connecté en parallèles, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. [7]

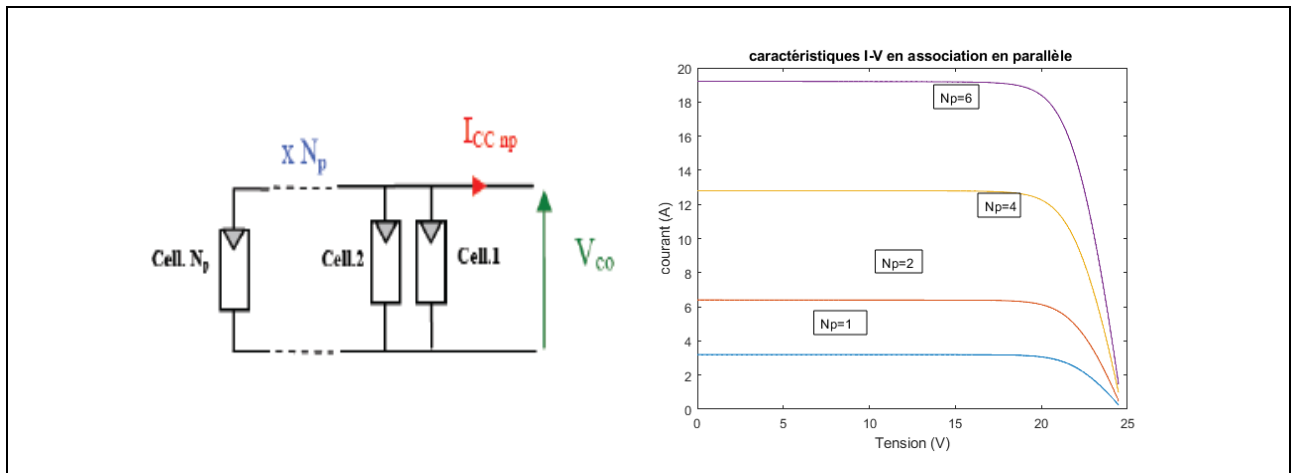


Figure 9 – Caractéristique I-V en association en parallèle des cellules.

1.8.1.3 Association mixte (série / parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque. [8]

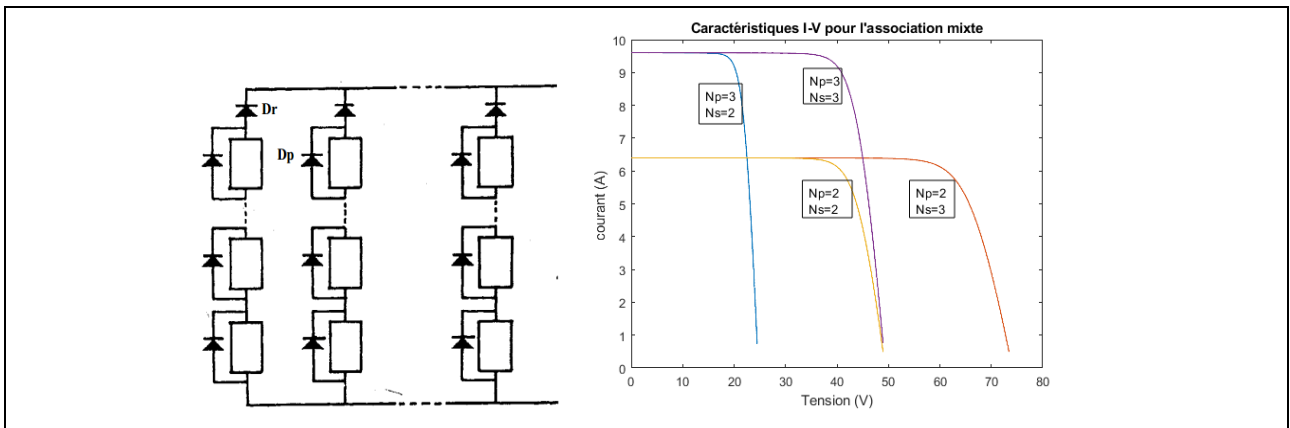


Figure 10 – Caractéristique I-V pour l'association mixte.

1.9 Comportement d'un générateur photovoltaïque

1.9.1 Caractéristique courant-tension

La figure (11) représente la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

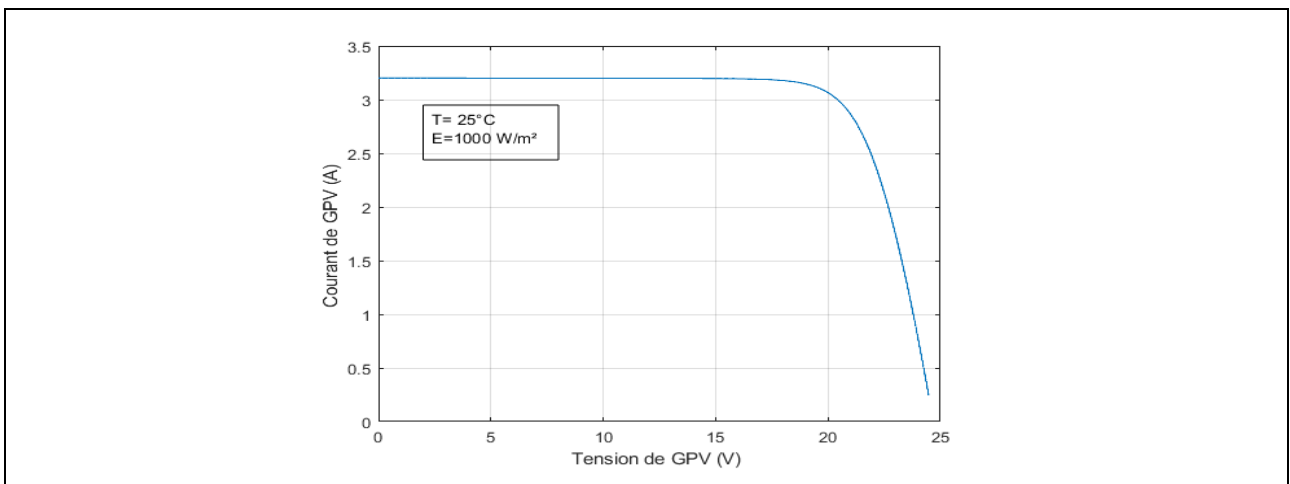


Figure 11 – Caractéristique Courant –Tension d'un module photovoltaïque.

1.9.2 Caractéristique puissance – tension

La figure (12) représente la courbe $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

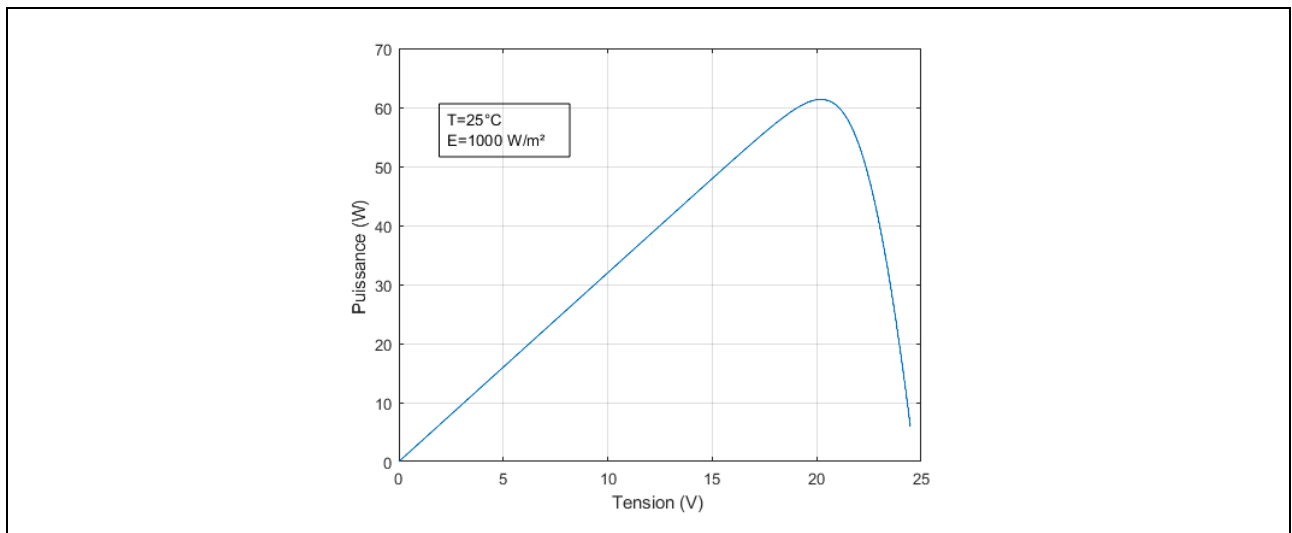


Figure 12 – Caractéristique puissance –Tension d'un module photovoltaïque.

1.9.3 Influence de l'éclairement sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation, pour un module donné, l'influence de l'éclairement représenté simplement par une source de courant proportionnelle à l'irradiation peut être faite en première approximation. Les graphes suivants représentent les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ respectivement d'un module photovoltaïque pour une température constante ($T=25^\circ\text{C}$) et un ensoleillement variable. [8]

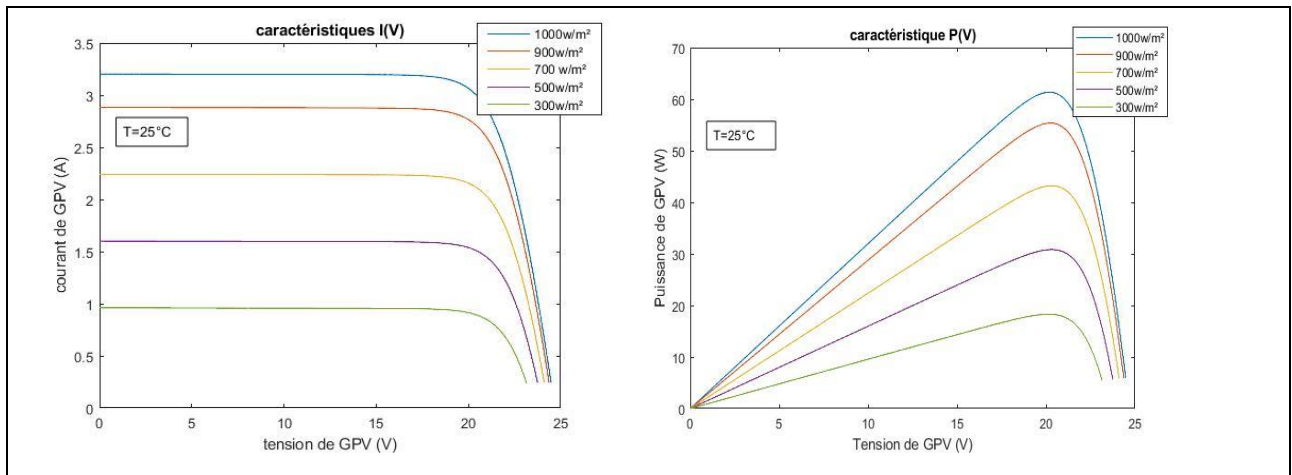


Figure 13 – Résultats de simulation des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV en fonction de différentes irradiances à $T=25^{\circ}\text{C}$.

1.9.4 Influence de la température sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le figure (14) donnant l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de température à un éclairement constant ($1000\text{W}/\text{m}^2$) on remarque que.

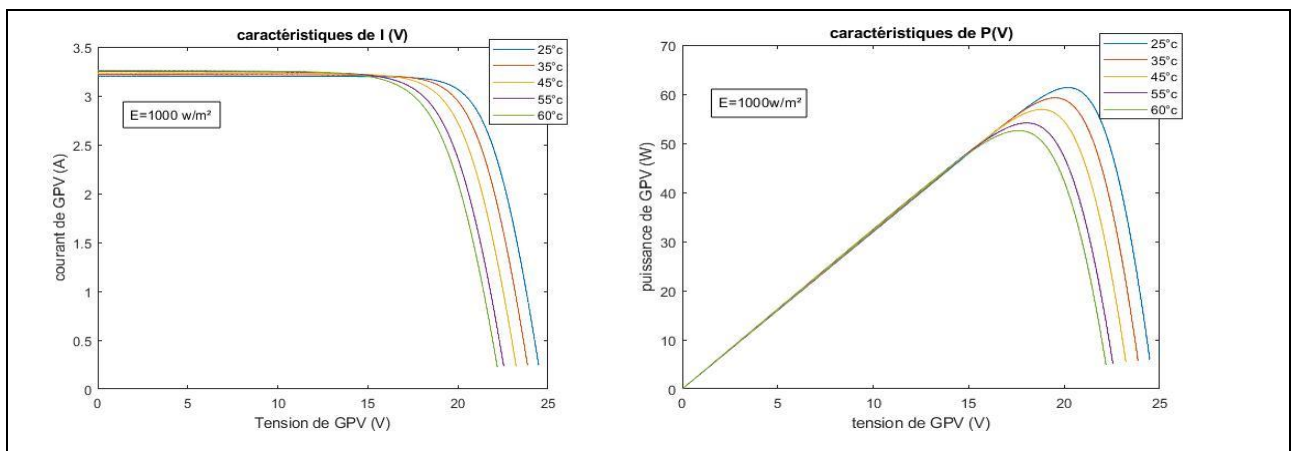


Figure 14 – Résultats de simulation des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV en fonction de différentes températures à $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte, car elle a une relation avec la température des cellules.

Il est important de savoir que la puissance du module diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C. [8]

1.9.5 Protection classique d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diodes anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettent de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds. [8]

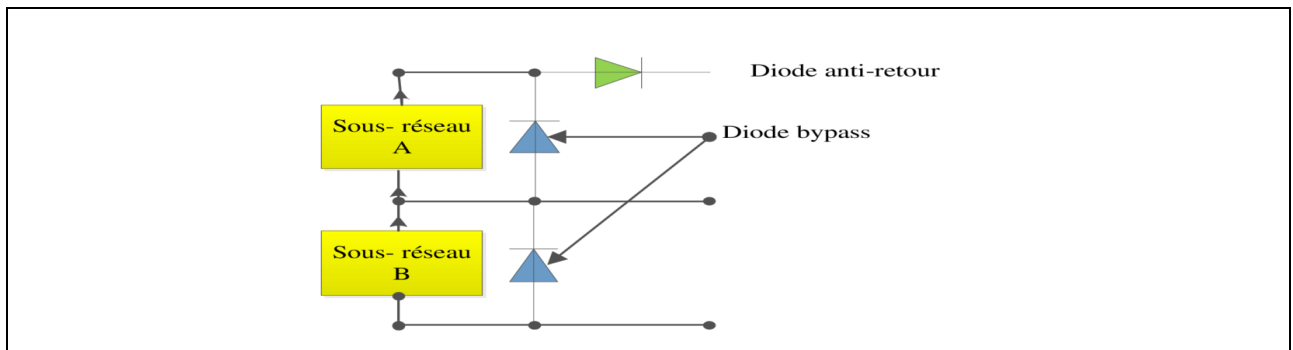


Figure 15 – Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diodes anti-retour.

1.10 L'effet d'ombrage

Il est dû à un éclairage non uniforme sur les panneaux, et ceci est causé par les conditions nuageuses, mauvaise orientation des modules, les feuilles d'arbre, accumulation de la neige et du sable. . . etc. Dans le cas de la présence de l'ombrage, la diode de bypass qui occupe la partie ombragée devient passante et elle est traversée par le courant généré par les cellules non ombragées, court-circuitant alors la partie ombragée. Les défauts de cette diode dans le cas de l'ombrage conduisent au phénomène de hot spot qui rend la partie protégée par ces diodes agissante comme un récepteur bloquant le courant généré par les autres cellules, ce qui entraîne un sur-échauffement local et des dommages sur le module. [15]

1.11 Différents types de système photovoltaïque

1.11.1 Système PV autonome

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- Un système photovoltaïque autonome avec stockage.
- Un système photovoltaïque sans stockage (au fil du soleil). [7]

➤ Système autonome avec batterie

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée (Figure 16). Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. [7]

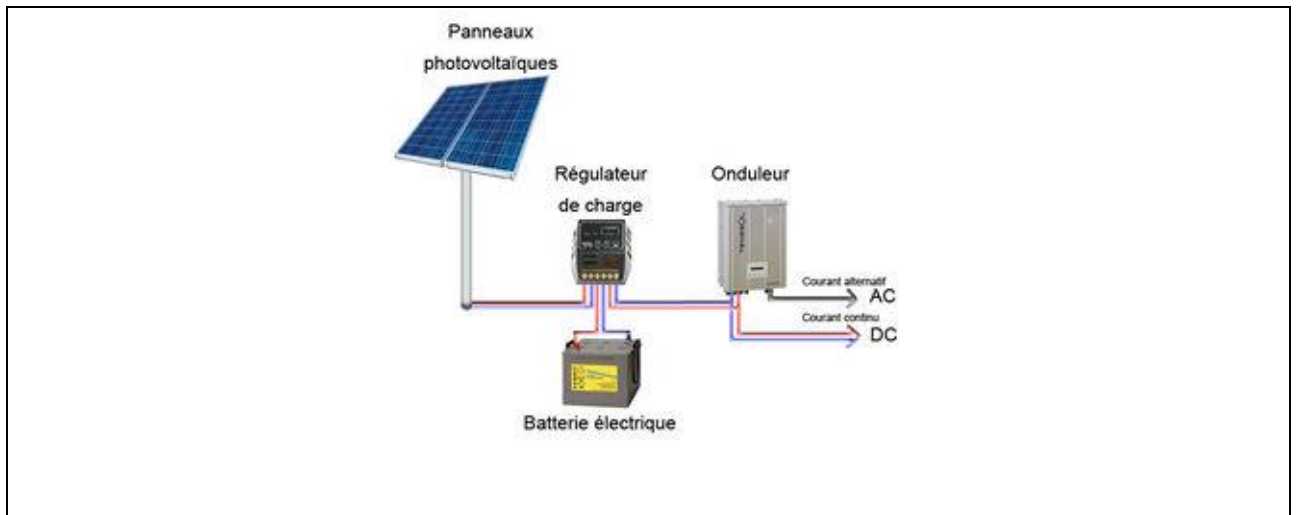


Figure 16 – Système autonome avec batterie.

➤ Les systèmes autonomes sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie 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. [7]

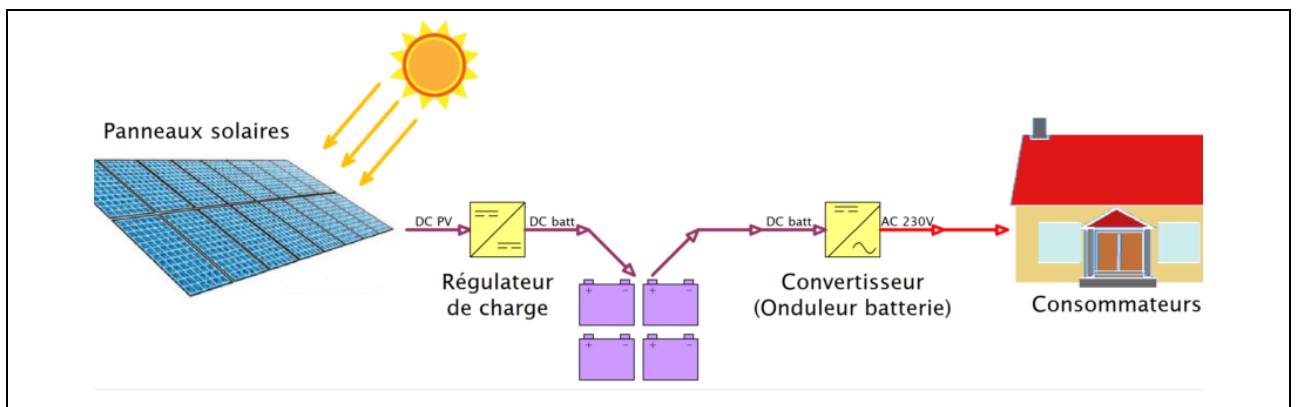


Figure 17 - Système autonome sans batterie.

1.11.2 Système PV raccordé au réseau

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique. [7]

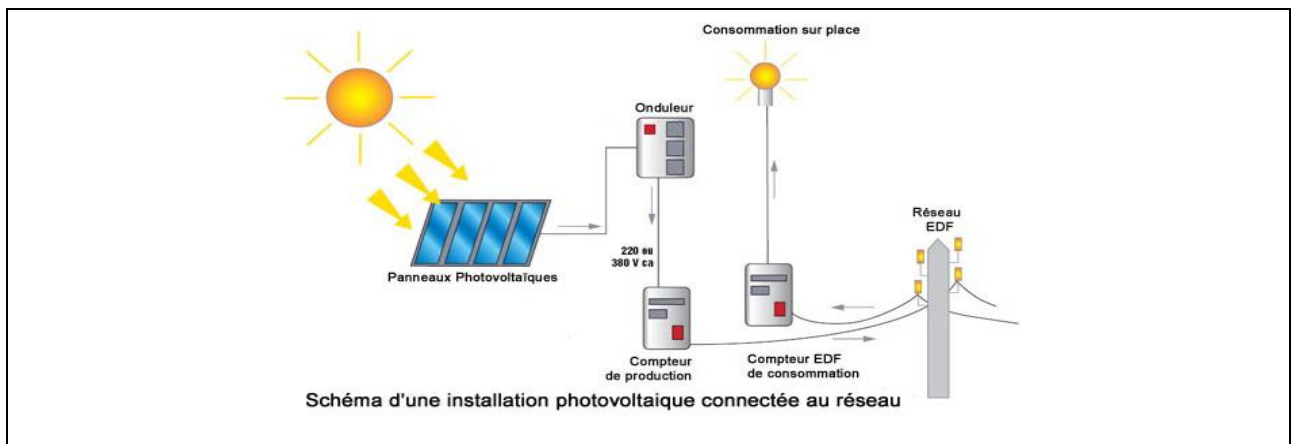


Figure 18 - Système PV raccordé au réseau.

1.11.3 Système PV hybride

Les systèmes PV hybrides intègrent un générateur PV avec un autre : éoliennes, groupes électrogènes... Et parfois même le réseau public. En règle générale, les systèmes de batterie stockent l'énergie afin de ne pas perdre d'énergie provenant de sources aléatoires telles que l'énergie solaire ou éolienne.

La difficulté de tels systèmes est d'équilibrer les différentes sources d'énergie pour les optimiser, car nous savons tous que la source de chaleur (diesel, gaz, etc.) Et le réseau public sont toujours les recours du dernier recours. [7]

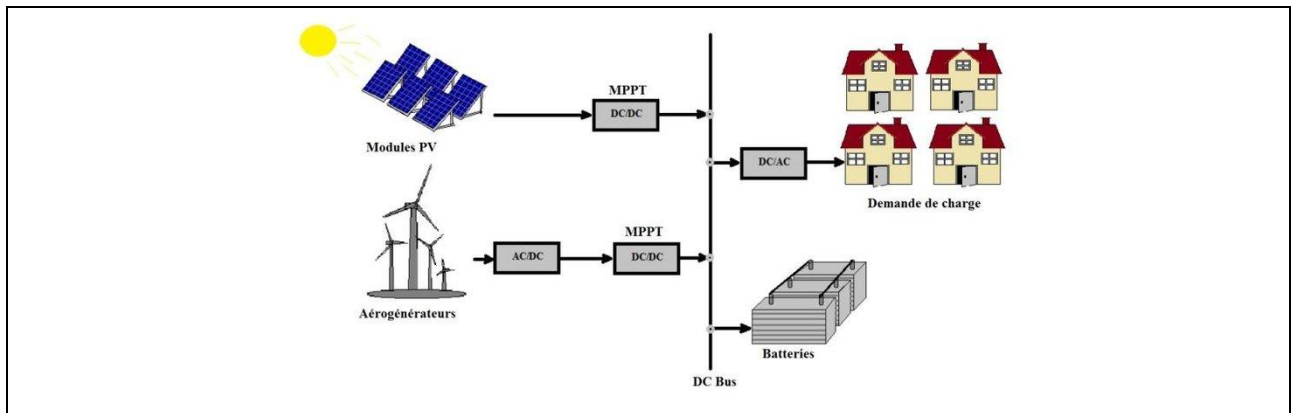


Figure 19 - Système PV hybride.

1.12 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

1.12.1 Avantages

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages :

- Ils sont non polluants sans émission ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité du système.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés. [9]

1.12.2 Inconvénients

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%.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 220 V alternatif. [9]
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel. [2]

1.13 Les convertisseurs

1.13.1 Convertisseur DC/DC

Un convertisseur DC-DC (hacheur) a pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de sortie peut être fournie au réseau alternatif redressé et filtré. La batterie fournit une alimentation stable. Trois types de convertisseurs CC-CC non isolés. [10]

- **Les abaisseurs** (BUCK) dans lesquels $V_o < V_i$.
- **Les élévateurs** (BOOST) dans lesquels $V_o > V_i$.
- **Abaisseur-élévateur** (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comportent plusieurs topologies.

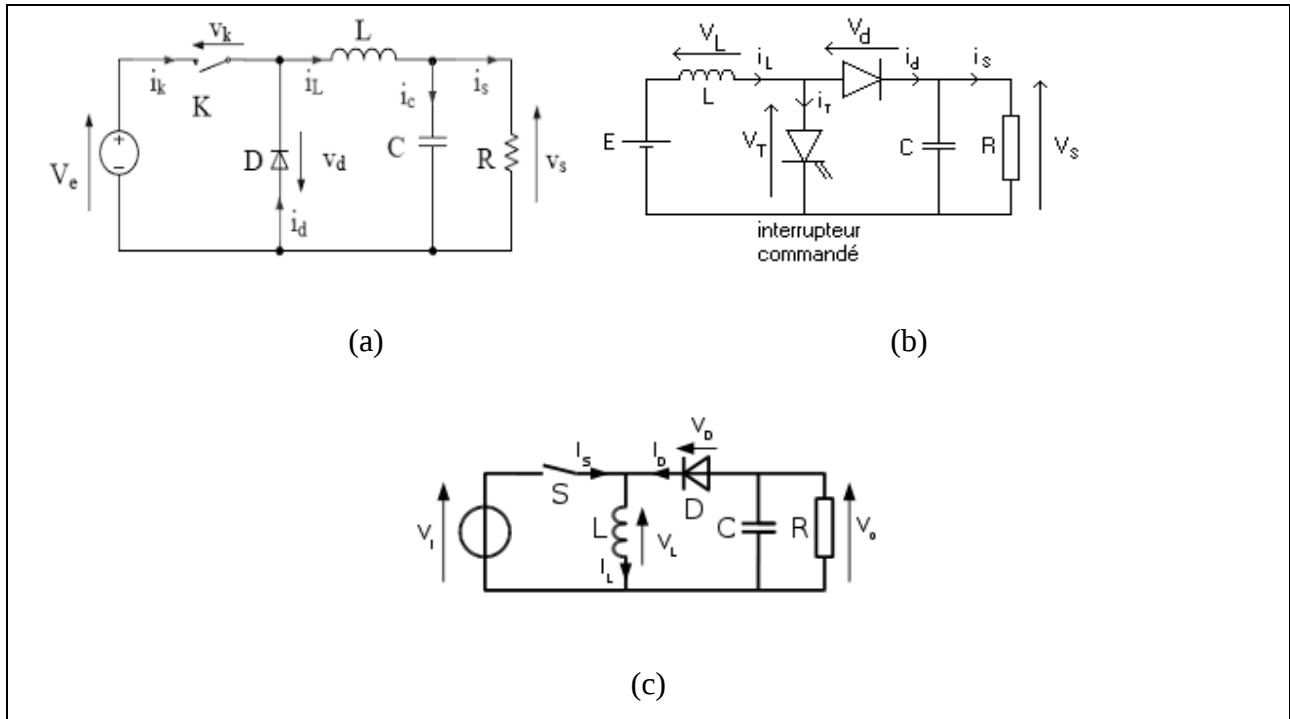


Figure 20 – Schema d'un hacheur, (a) – buck, (b)- boost, (c)- buck-boost.

1.13.2 Convertisseur DC/AC

Un convertisseur d'énergie est un appareil généralement placé entre un champ photovoltaïque et une charge (sans stockage et charge continue, on l'appellerait un convertisseur DC-DC), ou entre une batterie et une charge (on l'appellerait un convertisseur DC-DC) onduleur ou convertisseur DC-AC). L'onduleur est généralement associé à un redresseur, qui convertit le courant alternatif en courant continu, et son rôle est de charger la batterie et d'alimenter le circuit continu de l'appareil pendant les périodes prolongées d'absence de soleil [10].

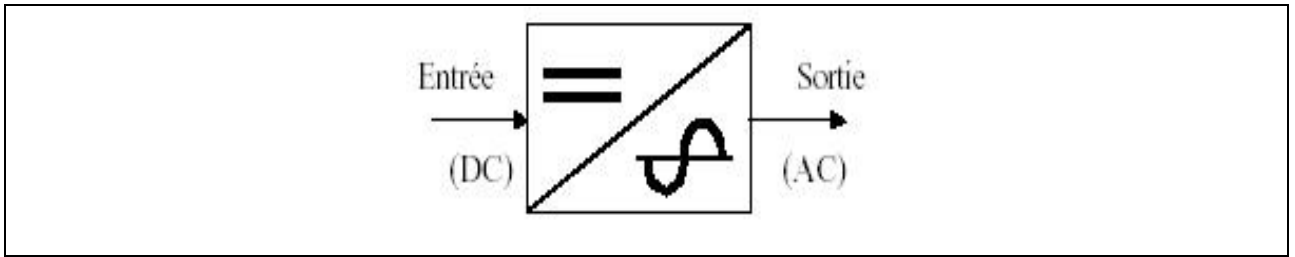


Figure 21 – Schéma symbolique de l'onduleur.

1.14 Conclusion

Nous avons expliqué dans ce chapitre le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres influents sur leurs performances. Puis nous avons cité les différents éléments contenus généralement dans les configurations des systèmes photovoltaïques, afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV de production d'électricité solaire.

Chapitre 2

L'hydrogène comme l'énergie de future

2.1 Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple et le plus facilement disponible dans l'univers. Son noyau est constitué d'un proton et ses atomes n'ont qu'un seul électron. La molécule de dihydrogène (H_2) est composée de deux atomes d'hydrogène, et ce que nous appelons habituellement l'hydrogène est le dihydrogène.

L'hydrogène durable représente une solution complémentaire pour produire et stocker des énergies renouvelables. Il peut contribuer au mix-énergétique pour constituer l'alternative énergétique la plus adéquate sur les plans économiques ainsi qu'écologiques. L'hydrogène durable peut être facilement stocké sur de grandes durées. Il peut être aussi utilisé soit comme carburant pour les véhicules soit pour refaire de l'électricité via les piles à combustible. Cependant, malgré que l'hydrogène est l'élément le plus abondants sur la Terre, il n'a pas de gisement, contrairement aux combustibles fossiles qui permettant d'obtenir l'hydrogène directement. L'hydrogène, en effet, se trouve, dans la nature, presque systématiquement couplé avec d'autres atomes tels que le carbone dans le cas du gaz naturel ou l'oxygène dans le cas de l'eau. Pour le générer, il est donc impératif d'avoir une source d'hydrogène comme le gaz naturel ou l'eau.

2.2 Historique

L'histoire de l'hydrogène remonte au début du 16ème siècle quand l'alchimiste suisse Paracelse étudia l'action du vitriol, en fait de l'acide sulfurique, sur des copeaux de fer. Il nota seulement qu'il fut intrigué par ce gaz inodore qui s'en dégageait. Il faut ensuite attendre le milieu du 18ème siècle pour que le chimiste britannique Henry Cavendish reprenne les travaux de Paracelse, et que le chimiste suisse Théodore Turquet de Mayerne, en 1703, mette en évidence l'inflammabilité de ce gaz baptisé « air inflammable ». Ces travaux furent ensuite poursuivis par de nombreux chimistes, dont le français Lavoisier. Il en résulta une communication à l'Académie des Sciences en 1783 ; c'est alors qu'il fut appelé gaz hydrogène, ce qui signifie ; gaz qui produit de l'eau. [1]

2.3 Caractéristiques de L'Hydrogène

En effet, l'hydrogène possède de nombreuses propriétés :

- C'est l'atome le plus abondant (sous forme d'eau) sur Terre.
- Molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois celle du gaz naturel.
- Non polluant et non toxique.
- Il brûle dans l'air pour ne produire que de l'eau.
- C'est le gaz le plus léger, ce qui est un plus en termes de sécurité (gros Diffusivité dans l'air).
- Facilité de transport (notamment par pipeline).
- Diverses méthodes de production. [11]

2.4 Production d'hydrogène

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.

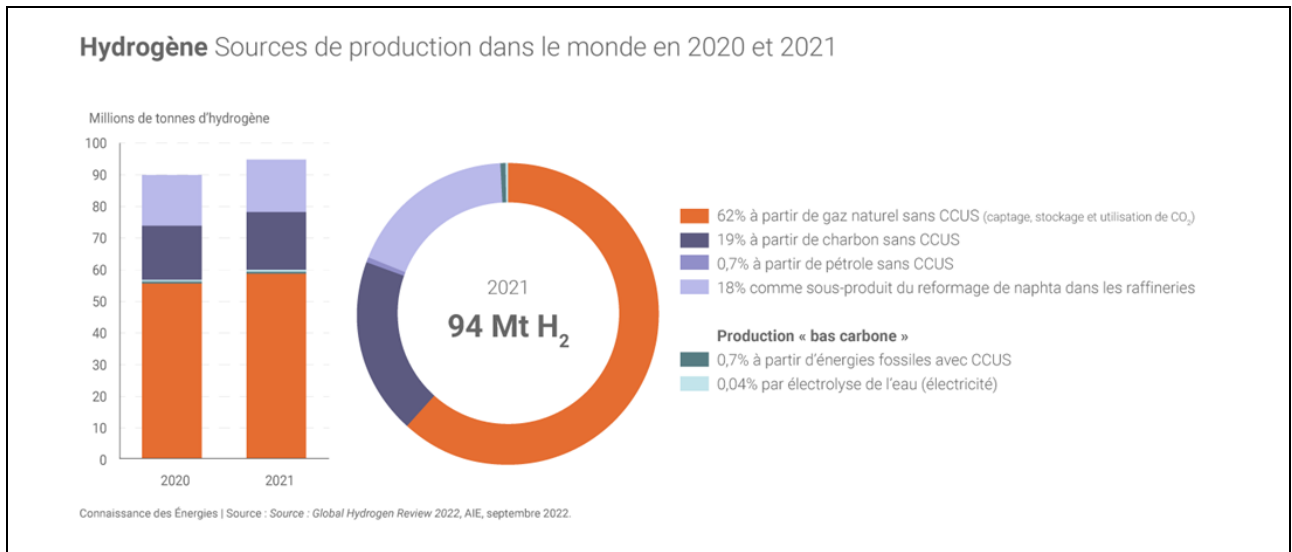


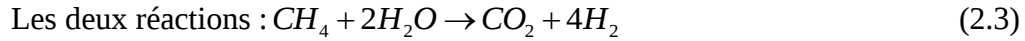
Figure 22 - sources de production d'hydrogéné dans le monde en 2020 et 2021.

2.4.1 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 CO_2 comme sous-produit ce qui peut présenter des avantages économiques mais pas très écologiques. [7]

❖ Le vaporeformage de gaz naturel

Le gaz naturel contient principalement du méthane. Cependant, une désulfuration est généralement requise avant d'entrer dans l'unité de reformage à la vapeur (reformage à la vapeur). Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à réaliser sont la production de gaz de synthèse et la conversion du CO . Il est à noter que ces réactions sont en équilibre, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire à la réaction chimique se produire, la charge partielle ne réagira pas et se mélangera au produit. Dans le cas du reformage à la vapeur, cela entraîne la sortie de l'unité de la majeure partie du méthane (CH_4) et du monoxyde de carbone (CO). [7]



❖ Oxydation partielle

L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. A haute température (classiquement de 900 à 1500 °C) et à pression élevée (classiquement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène (I.4) en tant qu'oxydant et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur. Le CO produite est encore converti à H_2 comme décrit dans l'équation : [7]



2.4.2 Production d'Hydrogène à Partir Du Charbon

18 % de l'hydrogène mondial est produit à partir du charbon, contre 4 % en Europe. Le principal inconvénient de son utilisation est qu'il produit du dioxyde de carbone. Cependant, le charbon étant mieux réparti à la surface de la terre que le gaz naturel ou le pétrole, il représente une solution à l'indépendance énergétique des pays. [7]

2.4.3 Production à partir des énergies renouvelables

Il existe des inquiétudes quant à la limitation de l'utilisation des hydrocarbures en raison de la limitation des stocks disponibles et en raison des émissions de gaz à effet de serre dues à leur utilisation, d'où l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique. Dans cette perspective de protection de l'environnement, la technologie de production d'hydrogène adopte les sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, géothermique et hydraulique) sont en cours de développement. [11]

Une utilisation classique consiste évidemment à produire de l'électricité à partir de sources renouvelables et à utiliser cette électricité pour effectuer l'électrolyse de l'eau selon la technologie décrite ci-dessus.

2.4.4 Production par l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et oxygène (O_2) lors d'une réaction d'oxydo-réduction. L'idée serait donc de combiner un dispositif de récupération de l'énergie renouvelable telle qu'un système de panneaux photovoltaïques pour l'énergie solaire, ou un parc d'éoliennes pour l'énergie du vent, à un module d'électrolyse de l'eau. De l'hydrogène pur sera produit grâce à l'électricité fournie par une énergie renouvelable, tel qu'illustré sur la figure (23). [11]

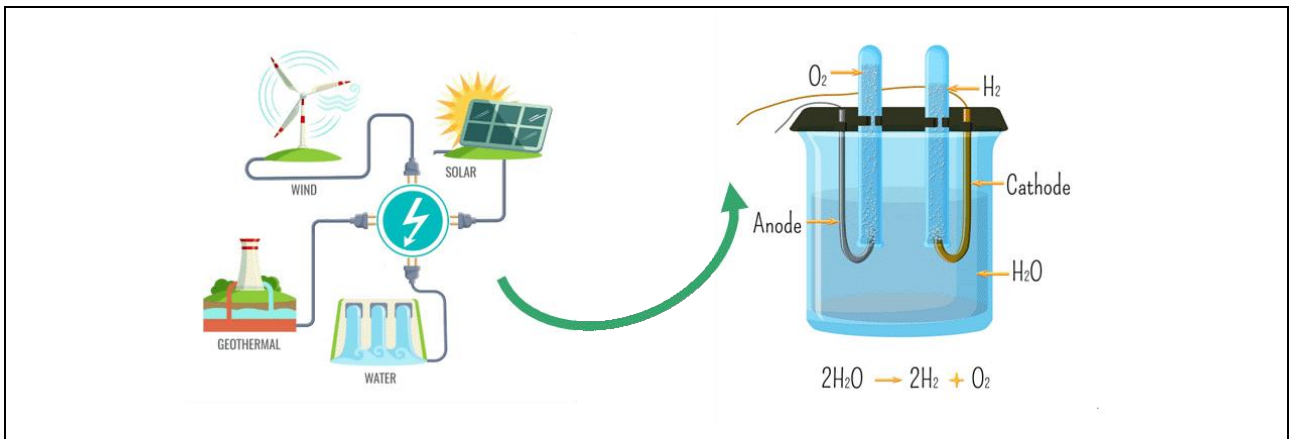


Figure 23 - Électrolyse de l'eau à partir d'énergie renouvelable.

2.4.4.1 Structures des électrolyseurs

Les électrolyseurs d'eau peuvent aussi être distingués selon leur structure interne.

❖ Electrolyseurs à structure parallèle avec plaques monopolaires

Cette configuration a été utilisée avec les premiers appareils d'électrolyse disposant de plaques monopolaires. Comme la Figure (26) illustre, les anodes sont montées au pôle positif de la source d'alimentation, tandis que les cathodes sont au pôle négatif. Les cellules d'électrolyse fonctionnent ainsi en parallèle. [12]

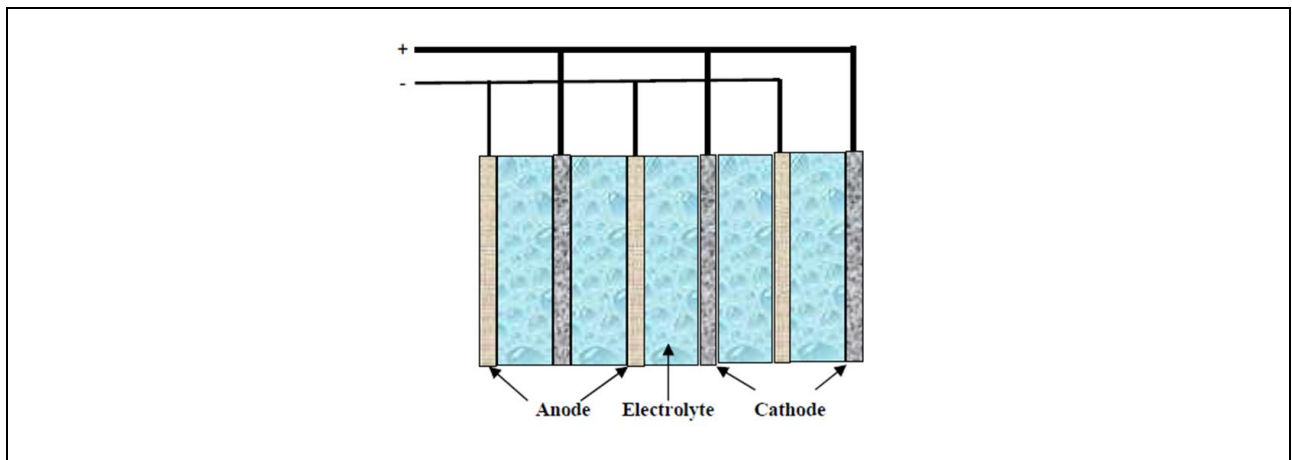


Figure 24 – Structure monopolaire.

❖ Electrolyseurs à structure série avec plaques bipolaires

Les systèmes bipolaires, développés ensuite, utilisent des plaques jouant le rôle d'anode d'un côté et de cathode de l'autre : les plaques bipolaires. Les cellules d'électrolyse fonctionnent alors en série (schéma type Figure 27). La conduction électrique s'opère à l'intérieur de l'électrode au travers de son épaisseur, permettant ainsi une limitation de la chute ohmique. [12]

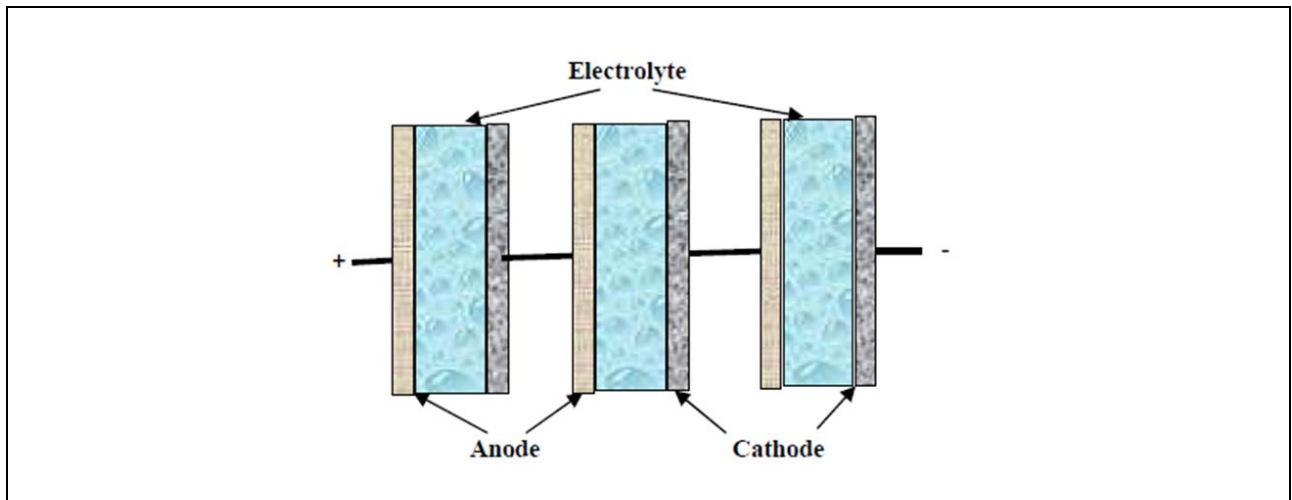


Figure 25 – Structure bipolaire.

2.4.4.2 Les différents Technologies des électrolyseurs

❖ Electrolyseurs Alcalins

L'électrolyse alcaline est la technologie l'a 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'électrolyseur est une solution aqueuse d'hydrogène de potassium (KOH). La condition ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+). Les réactions anodiques sont décrites ci-dessous : [7]



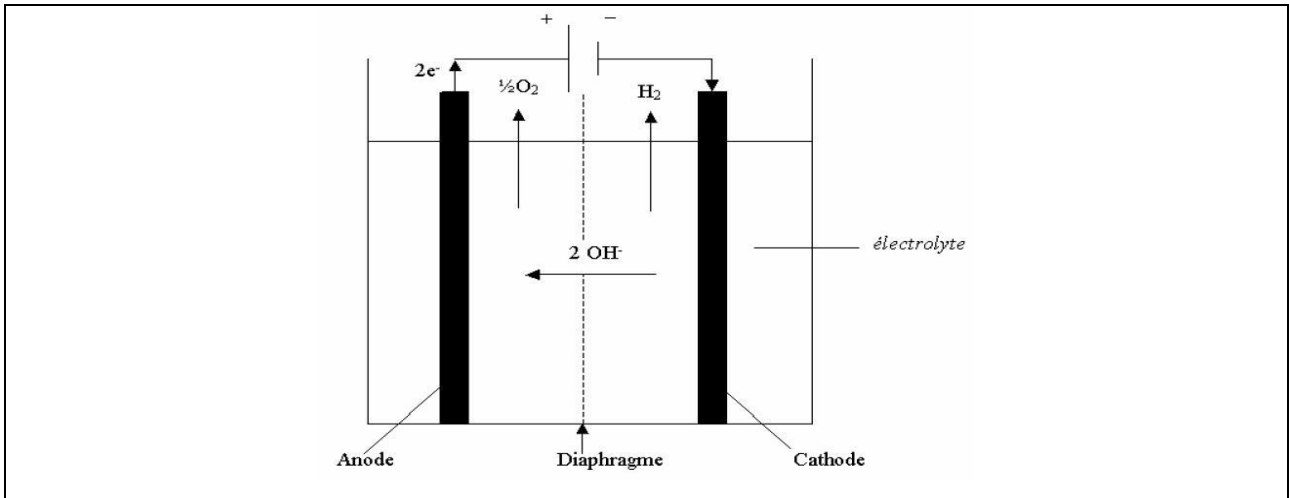


Figure 26 - principe de l'électrolyse alcaline.

❖ 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. [7]

- Electrolyte à conduction d'ions superoxydes



- Electrolyte à conduction protonique



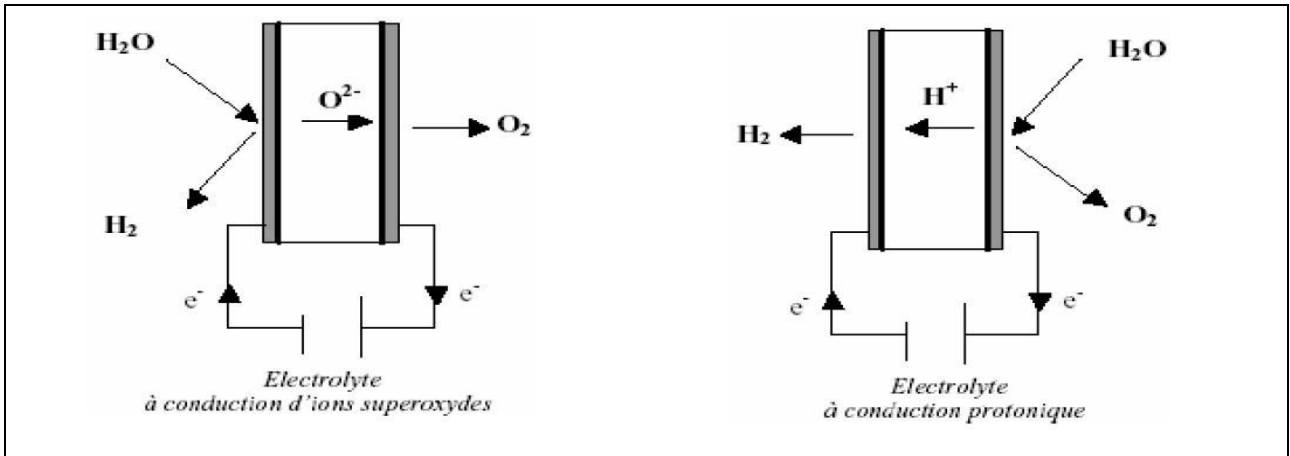
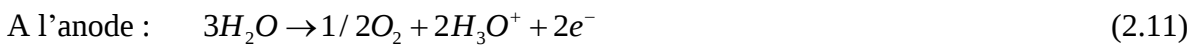


Figure 27 - principe de l'électrolyse à haute température selon le type de l'électrolyte.

❖ Electrolyseurs PEM

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les réactions 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. [7]

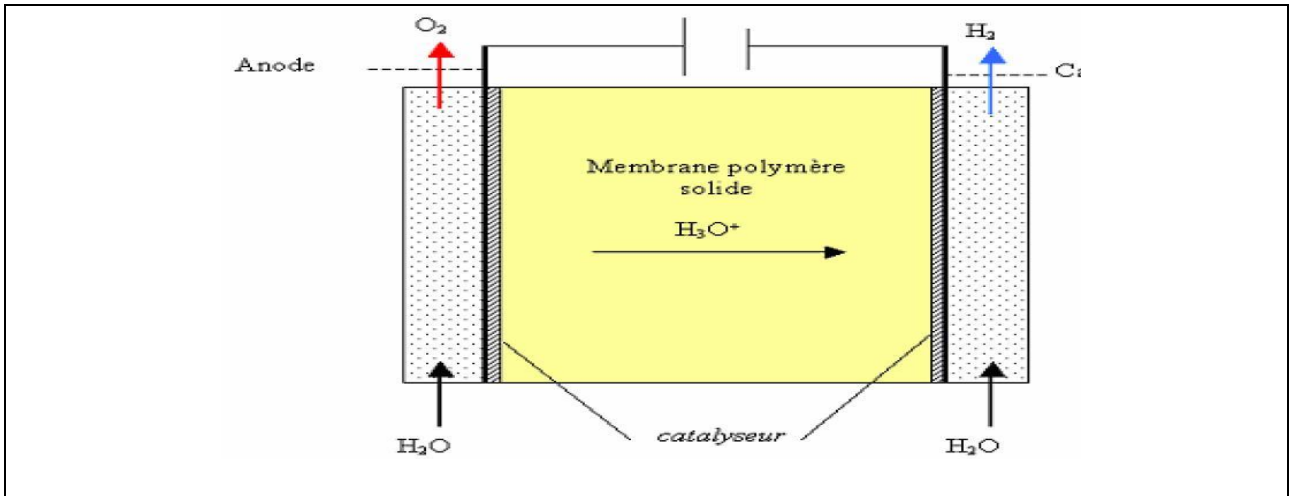


Figure 28 - principe schématique de l'électrolyse PEM.

2.4.4.3 Principe de fonctionnement de l'électrolyseur PEM

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM consiste à séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau par apport d'énergie électrique, à des températures relativement basses, typiquement inférieure à 100°C.

Dans une cellule d'électrolyse de l'eau, le courant électrique est utilisé pour effectuer la dissociation de l'eau en ses constituants élémentaires que sont l'hydrogène (H_2) et l'oxygène (O_2) moléculaires. En milieu acide, cette réaction se décompose en deux demi-réactions :



La demi-réaction (2.13) se produit à l'anode et la demi-réaction (2.14) se produit à la cathode. En milieu acide, les protons solvates sont transférés de l'anode à la cathode par migration à travers l'électrolyte (membrane polymère) sous l'effet du champ électrique.

De manière générale, l'électrolyse de l'eau permet la production de gaz d'une grande pureté, en comparaison avec d'autres procédés tels que le reformage d'hydrocarbures pour la production d'hydrogène, bien que l'électrolyse soit actuellement plus coûteuse. Elle est représentée dans la Figure 29.

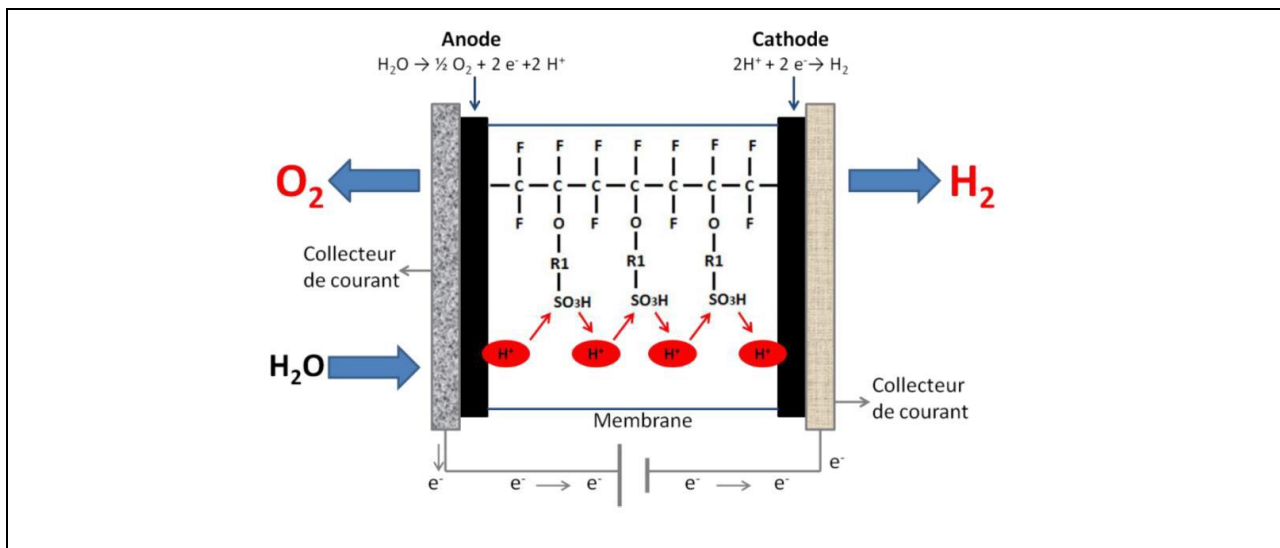


Figure 29 - Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM.

2.4.4.4 Technologie des piles à combustibles

❖ Aperçu historique

Les recherches sur les piles à combustible ont été commencées en 18^{ème} et 19^{ème} siècles grâce au progrès archivé dans les domaines de l'électrochimie et catalyseurs chimiques. L'origine de cette technologie spécifique peut être créditée à l'œuvre de Christian Friedrich Schönbein (1799-1868) et Sir William Robert Grove (souvent appelé père de la pile à combustible, 1811-1896). Ces deux scientifiques ont donné au monde une technologie à fort potentiel pour résoudre aux besoins énergétiques de demain, en exploitant les réactions chimiques entre l'hydrogène et l'oxygène.

Schönbein a été la première personne à décrire avec précision l'effet de la pile à combustible dans son article au début de 1839 intitulé {On the Voltaic Polarization of certain Solid and Fluid Substances}. Cette publication a été suivie de peu d'un article dans lequel Grove a suggéré, qu'il avait trouvé un moyen de produire de l'électricité par les constituants de l'eau i.e. l'hydrogène et l'oxygène. Ces deux publications ont ouvert la porte de plusieurs travaux dans ce contexte tels que : travaux de L. Mond en 1889, de Jacques en 1896, de E. Baur et J. Tobler en 1933.

De plus, malgré les contributions importantes mentionnées ci-dessus, le véritable développement de la pile à combustible a été lancé au début de 1960, lorsque l'organisme gouvernemental Américain « the National Aeronautics and Space Administration (NASA) » a commencé de rechercher un moyen d'énergie efficace pour les vols spatiaux. Les problèmes majeurs dans cette époque étaient le poids trop lourd des batteries, le rendement faible & le coût trop cher de l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie nucléaire à cause de ces risques. La pile à combustible a commencé à apparaître comme une solution optimale qui peut être utilisée pour surmonter les problèmes cités ci-dessus. Ainsi, la NASA a financé un bon nombre de contrats de recherche qui aboutissent au développement de la première membrane échangeuse de protons ou « membrane d'électrolyte polymère ». Ce type de pile à combustibles était de petite taille et utilisait de l'oxygène et de l'hydrogène purs. De plus, le prix de ce générateur était relativement élevé dans les premières années de son invention, ce qui a fait limiter son utilisation seulement aux applications spatiales. Néanmoins, la crise d'énergie de 1973 a relancé le développement de ce système de production, et depuis cette date, la recherche sur les piles à combustible a gagné des succès dans une large variété d'applications. [13]

❖ Principe de fonctionnement

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 (O_2 , 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. [13]

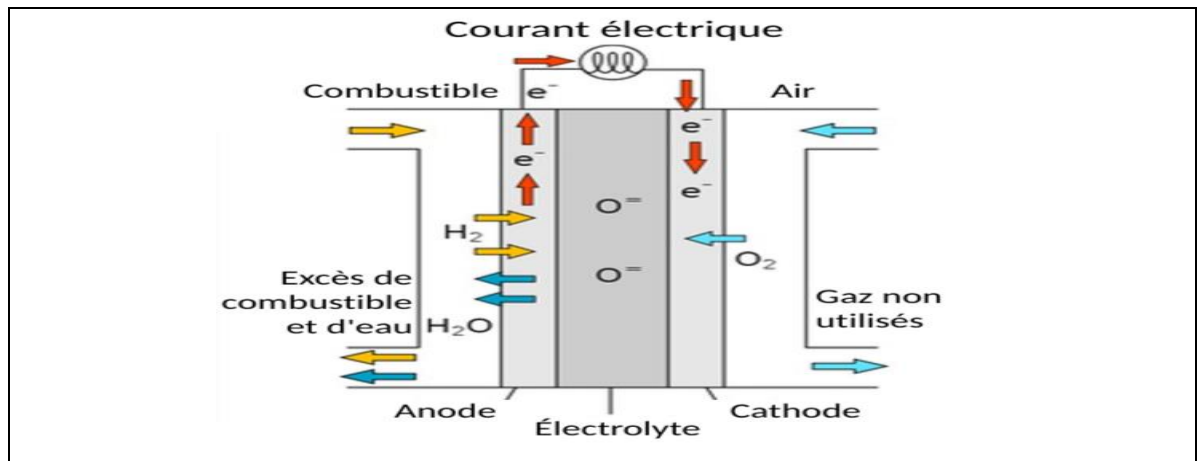


Figure 30 - Diagramme d'une PAC de PEM.

▪ Types des piles à combustible

Selon la nature de l'électrolyte utilisé, différents types de piles à combustible peuvent être construits. Le Tableau (2) résume certain nombre de piles à combustible existantes dans l'industrie, tout en précisant le combustible possible, température de fonctionnement, gamme de puissance, rendement électrique, et applications possibles. [13]

Tableau 2 - Caractéristiques principales des piles à combustibles. [14]

Type de PAC	AFC	DMFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Solution KOH (Liquide)	Membrane en polymère (solide)	Membrane en polymère (solide)	Acide phosphorique (liquide)	Sel de carbonate fondu (liquide)	Céramique (solide)
Combustible	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène	Hydrogène/gaz naturel	Hydrogène/gaz naturel/Méthanol ...	Hydrogène/gaz naturel/Méthanol ...
Température De Fonctionnement	50-250°C	70-90°C	60-120°C	150-220°C	600-800°C	700-1050°C
Marge de Puissance	1W-10KW	1W- plusieurs KW	1W-10MW	200KW- 10MW	500KW-10MW	1KW-100MW
Rendement	55-60%	30-45%	30-45%	35-75%	50-60%	50-70%
Application Possible	Spatial, défonce, et équipements portables	Transport et Spatial, équipements portables	Transport, stationnaire, et équipements portables	Transport, cogénération, stationnaire	Cogénération, stationnaire	Cogénération, stationnaire

Par ailleurs, malgré la présence de nombre important des piles à combustible actuellement dans le marché, la pile de type PEM reste la plus utilisée par les chercheurs dus à ses propriétés uniques tels que : la densité énergétique élevée, le volume réduite, bon rendement, démarrage rapide, et sa réponse aux contraintes environnementales. Ainsi, dû au degré d'acceptation, cette étude ne s'intéresse qu'aux piles à combustible de type PEM. [13]

2.5 Stockage de l'hydrogène

2.5.1 Le stockage sous forme gazeux

La régulation de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Cependant, il existe de nombreuses limites. L'hydrogène est léger et volumineux, et il doit être comprimé au maximum pour réduire la taille des réservoirs de stockage. Des progrès ont été faits : de 200 bar, la pression de la bouteille distribuée dans l'industrie, la pression est montée à 350 bar aujourd'hui, et les développements portent désormais sur des réservoirs capables de supporter une pression de 700 bar. De plus, l'hydrogène est le plus petit élément de l'univers, il faut donc trouver des matériaux capables de le retenir sans risque de fuite. [7]

2.5.2 Le stockage sous forme liquide

Pour cette technologie, beaucoup d'énergie est consommée pour le refroidissement jusqu'à la température nécessaire au fonctionnement : -253°C . Le stockage de l'hydrogène sous cette forme est possible mais nécessite un développement plus poussé. En effet, cette approche est déjà utilisée dans l'espace. Mais l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier après l'hélium. Il est donc possible de le stocker à l'aide d'hydrogène liquide, mais cela coûte très cher, ce qui le rend actuellement indisponible pour un usage personnel. Il faut aussi ajouter le fait que près de 3% à 4% de l'hydrogène s'évapore chaque jour. [11]

2.5.3 Le stockage sous forme d'hydrures métalliques

Dans cette méthode, l'hydrogène est "piégé" dans les vides de la poudre d'alliage métallique comprimée, comme une éponge absorbant l'eau. Cette technologie est très avantageuse, en particulier la structure simple et le haut niveau de sécurité. Les voitures ne sont actuellement toujours pas en mesure d'utiliser les hydrures qui existent aujourd'hui pour des raisons de poids. [11]

2.5.4 Le stockage sous basse pression

Cette technique pourrait remplacer le stockage sous pression d'air. Il s'agirait de stocker l'hydrogène dans des matériaux capables de l'absorber et de le restituer si nécessaire. Il peut s'agir d'un matériau carboné ou d'un alliage métallique. Nous utilisons le conditionnel car cette méthode de stockage n'est qu'un objet de recherche et n'a pas encore été développée. [11]

2.6 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 énergétiques humains : il est utilisable dans le domaine des transports, des applications stationnaires 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.

Chapitre 3

Modélisation de l'électrolyseur et la pile à combustible

3.1 Introduction

Le stockage d'énergie saisonnier est essentiel pour les procédés utilisant l'énergie solaire ou toute autre source d'énergie renouvelable. La combinaison de l'hydrogène et des piles à combustible offre une excellente alternative à ce problème. L'objectif de ce chapitre est de modéliser les électrolyseurs et les piles à combustible de manière générique.

3.2 Modélisation d'électrolyseur

Un électrolyseur est un appareil qui utilise l'énergie électrique pour réaliser des réactions chimiques. Dans notre étude, les électrolyseurs utilisés électrolysent l'eau pour produire de l'hydrogène.

Les PEM sont fabriquées à partir de membranes composites où les matériaux forment une matrice de polymère ou de membranes en polymère pur. Le Nafion est l'un des matériaux les plus couramment utilisés par les constructeurs de membrane échangeuse de protons, la figure représentant la structure d'un électrolyseur PEM. [11]

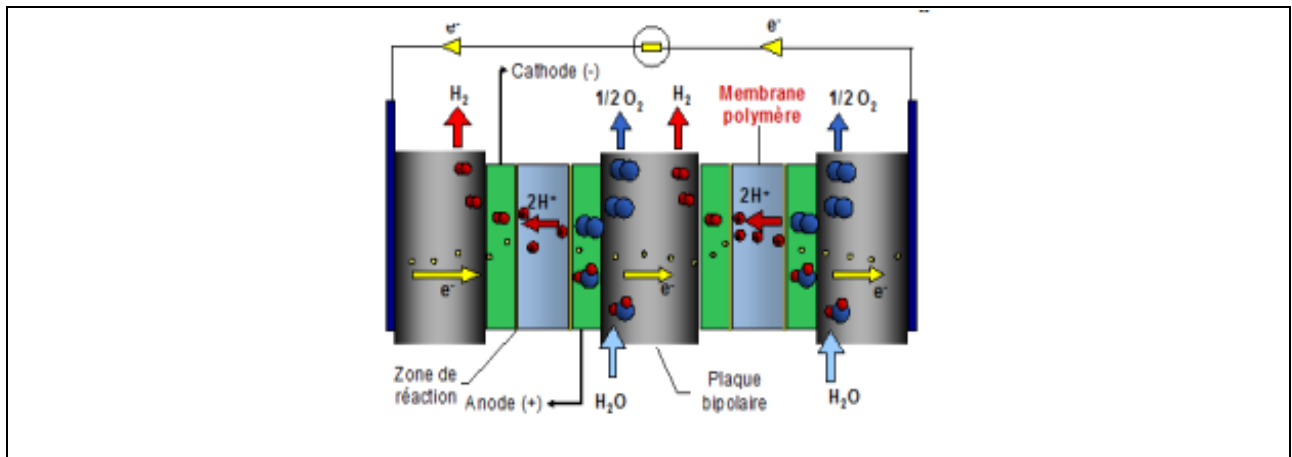


Figure 31 - L'électrolyse PEM.

3.2.1 Modèle d'électrolyseur

Un électrolyseur à eau composé d'un certain nombre d'électrolyseurs connectés en série et en parallèle. Le modèle d'électrolyseur ici est basé sur unicellulaire. Calcule la tension et le débit nécessaires. La teneur en hydrogène et en oxygène est calculée par cellule, tandis que la valeur totale de l'unité d'électrolyse est simplement multipliée par le nombre de batteries en série et en parallèle. [7]

Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur sont représentées ci-dessous :

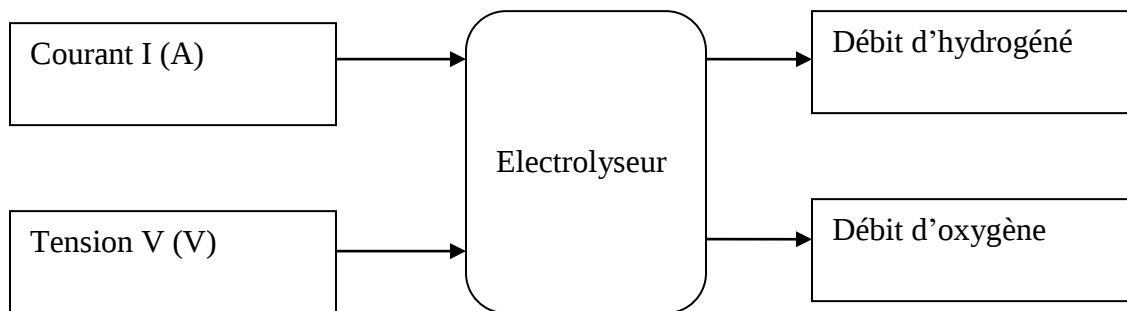


Figure 32 - Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur.

L'électrolyseur utilisé dans cette étude est de type PEM membrane échangeur de proton de gamme de laboratoire.

Le schéma équivalent d'électrolyseur :

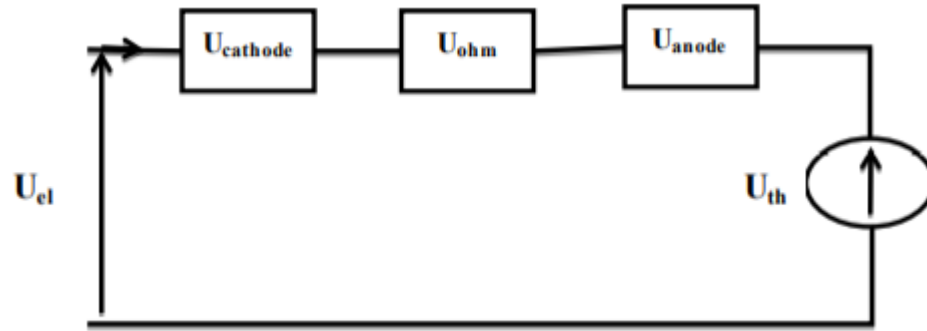


Figure 33-Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur d'après le modèle électrochimique

La tension de cellule d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes : [7]

$$U_{el} = U_{th} + U_{anode} + U_{cathode} + U_{ohm} \quad (3.1)$$

Où

U_{th} : Tension théorique.

U_{anode} : Surtension anodique (V).

$U_{cathode}$: Surtension cathodique (V).

U_{ohm} : Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur R_{el} .

Suivant la loi de Tafel, la tension de cellule s'exprime en fonction de la densité de courant par : [7]

$$V_e = a + b \times \log(I) + c \times I \quad (3.2)$$

Les paramètres a, b et c pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression).

Pour un électrolyseur constitué de nombre des cellules série s et parallèles p .

D'après la loi de Tafel, pour cette Configuration d'électrolyseur, est donnée par l'équation suivante : [7]

$$V_{N_{cellules}} = s \times \left(a + b \times \log \left(\frac{I_e}{p} \right) + c \times \frac{I_e}{p} \right) \quad (3.3)$$

$V_{N_{cellule}}$: La tension totale d'électrolyseur.

I_e : Le courant total d'électrolyseur.

▪ Volume de production d'hydrogène

Par l'utilisation de la loi des gaz parfaits le volume de gaz produit est calculé par l'équation suivante :

$$V = \frac{nRT}{p} = \frac{ItRT}{zFp} = Q \times t \quad (3.4)$$

Tel que
$$n = \frac{I * t}{z * F} \quad (3.5)$$

Par l'utilisation de la méthode d'intégration de trapèze, on a calculé le volume d'hydrogène pendant un intervalle du temps. [7]

▪ Débit de production d'hydrogène

$$Q = \frac{N_{cellules} \times R \times I_f \times T}{z \times F \times p} = \frac{N_{cellules} \times 8.32 \times I_f \times T}{2 \times 96500 \times 0.1013} \quad (3.6)$$

V : volume d'hydrogène produit (ml).

Q : débit de production d'hydrogène (ml/s).

T : température de l'électrolyseur.

R : constant des gaz parfaits.

z : nombre d'électron requis pour libérer une molécule.

$N_{cellule}$: nombre de cellule d'électrolyseur $s \times p$.

F : constant de Faraday.

P : pression atmosphérique.

T : temps correspondant à la production de volume V .

I_f : Le courant de fonctionnement d'électrolyseur. [7]

▪ Le rendement d'électrolyseur

Le rendement d'électrolyseur est donné par l'équation suivants : [7]

$$\eta_{el} = \frac{1.23 \times s}{V_f} \quad (3.7)$$

V_f : la tension du point de fonctionnement.

s : nombre de cellules séries.

3.3 Modélisation de pile à combustible

Les piles à combustible PEM sont des convertisseurs d'énergie qui permettent directement de convertir en électricité une quantité d'énergie chimique stockée sous forme d'hydrogène. Elles sont utilisées en tant que générateur d'électricité pour les raisons essentielles suivantes :

- Un rendement de conversion élevé par rapport aux autres technologies.
- Une densité de puissance massique importante.
- Contrairement à la pile AFC, elle est insensible à la présence d'oxyde de carbone dans l'air.
- Température de fonctionnement convient aux applications industrielles et domestiques.
- Sa membrane solide imperméable aux fuites dues aux vibrations. [13]

De plus, pour analyser, tester, et évaluer la performance d'une pile à combustible PEM spécifique, deux modèles de modélisations sont couramment utilisés. La première approche est un modèle électrochimique qui permet d'observer l'effet de différents phénomènes thermiques, chimiques, et physique sur la performance de générateur. Le deuxième modèle est une approche électrique qui simule le comportement électrique de système. Ce travail s'intéresse au modèle électrique de la pile, qui peut être décrit comme suit : [13]

$$V_{fc} = N_s [E_n - V_{act} - V_{con} - V_{ohm}] \quad (3.8)$$

V_{fc} : la tension de sortie de la pile.

E_n : la tension de circuit ouvert.

V_{act} : la tension d'activation.

V_{con} : perte de conductivité.

V_{ohm} : perte ohmique.

- **Tension de circuit ouvert E_n**

En pratique, on peut exprimer la tension sous la forme : [13]

$$E_n = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-3} \times T \times \ln(P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}) \quad (3.9)$$

T : est la température de générateur PEM exprimée en Kelvin.

P_{H_2}, P_{O_2} : les pressions de l'anode et de la cathode en (atm).

- **Pertes d'activation** V_{act}

La tension V_{act} est une chute due aux pertes d'activation qui apparait dans un temps limité. Elle est créée par les réactions lentes déroulant sur la surface des électrodes. Ces réactions nécessitent une énergie d'activation pour se produire. Le modèle mathématique de ce phénomène peut être exprimé par l'équation semi-empirique ci-dessous :[13]

$$V_{act} = -\left[\xi_1 + \xi_2 \times T + \xi_3 \times T \times \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \times T \times \ln(I_{fc})\right] \quad (3.10)$$

Avec

I_{fc} : Courant de sortie de la PAC (A).

T : Température intérieure de la PAC (K).

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, et \xi_4$: Coefficients empiriques à déterminer.

C_{O_2} : Concentration d'oxygène, qui peut être estimée par l'équation :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp^{(-498/T)}} \quad (3.11)$$

Ou, P_{O_2} est la pression de l'oxygène (atm).

- **Pertes de concentration** V_{con}

Les pertes de concentration sont principalement causées par les impuretés, qui deviennent significatives dans le cas où l'intensité du courant est importante. Lorsque la demande en courant augmente, le maintien nécessaire de la concentration des réactifs devient difficile à gérer, conduisant, par conséquent, à un effondrement rapide de la tension aux bornes de la PAC. [13]

L'équation modélisant ces réactions est transcrite comme suit :

$$V_{con} = -\beta \times \ln \left(1 - \frac{I_{fc}}{J_{\max}} \right) \quad (3.12)$$

$J_{\max}$: est la densité du courant maximale de la pile.

β : un paramètre à identifier.

- **Pertes ohmiques V_{Ω}**

Les pertes ohmiques sont dues à la circulation des protons à travers la résistance de la membrane R_m , et le passage des électrons à travers les électrodes métalliques et les contacts extérieurs ayant une résistance. La chute de tension V_{Ω} résultante est définie par l'utilisation de la loi d'ohm.

$$V_{\Omega} = (R_m + R_c) I_{fc} \quad (3.13)$$

$$R_m = \frac{L \times \rho_M}{A} = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{fc}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{fc}}{A} \right)^{2.5} \right] \times L}{\left[\lambda - 0.634 - 3 \left(\frac{I_{fc}}{A} \right) \exp \left[4.18 \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right] \right] \times A} \quad (3.14)$$

Avec

R_m : Résistance de la membrane (Ω).

R_c : Résistance des contacts métalliques (Ω).

L : Epaisseur de la membrane (cm).

A : Surface de la membrane (cm²).

ρ_M : Résistivité de la membrane ($\Omega \times \text{cm}$).

λ : Qualité d'eau qui varie entre 10^{-23} . [13]

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous sommes intéressées dans qu'aux piles à combustible PEM et électrolyseurs. Cette technologie semble effectivement être la plus mure et la plus proche du stade commercial.

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.).

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à étude de notre système hybride : GPV électrolyseur/pile à combustible pour un site isolé sous l'environnement HOMRE et on discutera ainsi les résultats obtenus.

Chapitre 4

Dimensionnement et simulation de système étudié

4.1 Introduction

Les installations photovoltaïques autonomes ont pour rôle d'alimenter des récepteurs électriques de façon fiable. Etant donné que la production de cette énergie se repose sur les conditions météorologiques et climatiques son association à une autre source d'énergie, soit renouvelable ou conventionnelle, est une nécessité absolue. Afin d'assurer la continuité de l'alimentation électrique, l'insertion d'un système de stockage et/ou hydrogène comme sources d'appoint, devienne une nécessité. Un système hybride s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation sans interruption. L'objectif est de dimensionner un système hybride suffisamment fiables afin d'alimenter une habitation isolée, et assurer une bonne gestion d'énergie du système à étudier.

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

4.2 But du dimensionnement

Le dimensionnement est une étape primordiale dans la conception des systèmes photovoltaïques. En effet, le dimensionnement optimal de tels systèmes s'obtient lorsque les différents composants tels que les panneaux, les batteries, l'onduleur, le régulateur et les câbles sont choisis de façon adéquate pour une ressource solaire donnée et un profil de consommation donné. Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité d'un système photovoltaïque en site isolé, il constitue une étape cruciale lors de la mise en place du système. Ainsi, lorsque l'on cherche à optimiser le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, le but est de déterminer l'ensemble des paramètres de dimensionnement du système afin de minimiser les différents coûts, tout en assurant l'alimentation du consommateur sans interruption.

4.3 Critères du choix du logiciel HOMER

Les objectifs fixés pour notre étude, nous ont permis de porter notre choix sur le logiciel HOMER, car il satisfait les conditions suivantes : [2]

- 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.

4.4 Présentation du logiciel HOMER

HOMER (Hybride Optimisation 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.

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. [2]

La version utilisée dans notre projet est HOMER PRO 3.11.12.

4.5 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 couteuse parmi différentes combinaisons de systèmes de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergies ou plus. [2]

4.6 Création du système

D'après la bibliothèque de logiciel HOMER, on peut insérer les différents éléments de notre système tel que la charge, les modules photovoltaïques, les piles à combustible, les électrolyseurs, les convertisseurs, les systèmes de stockage d'hydrogène. [2]

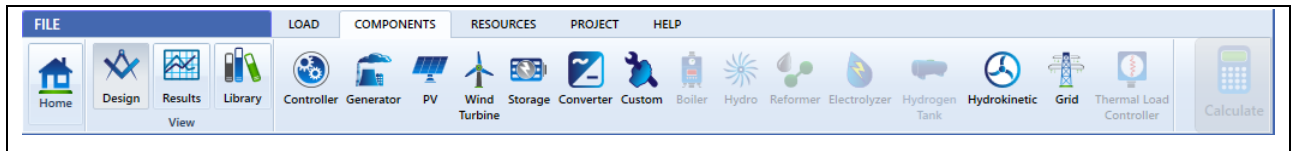


Figure 34 – bibliothèque de logiciel HOMER PRO

4.7 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. [2]

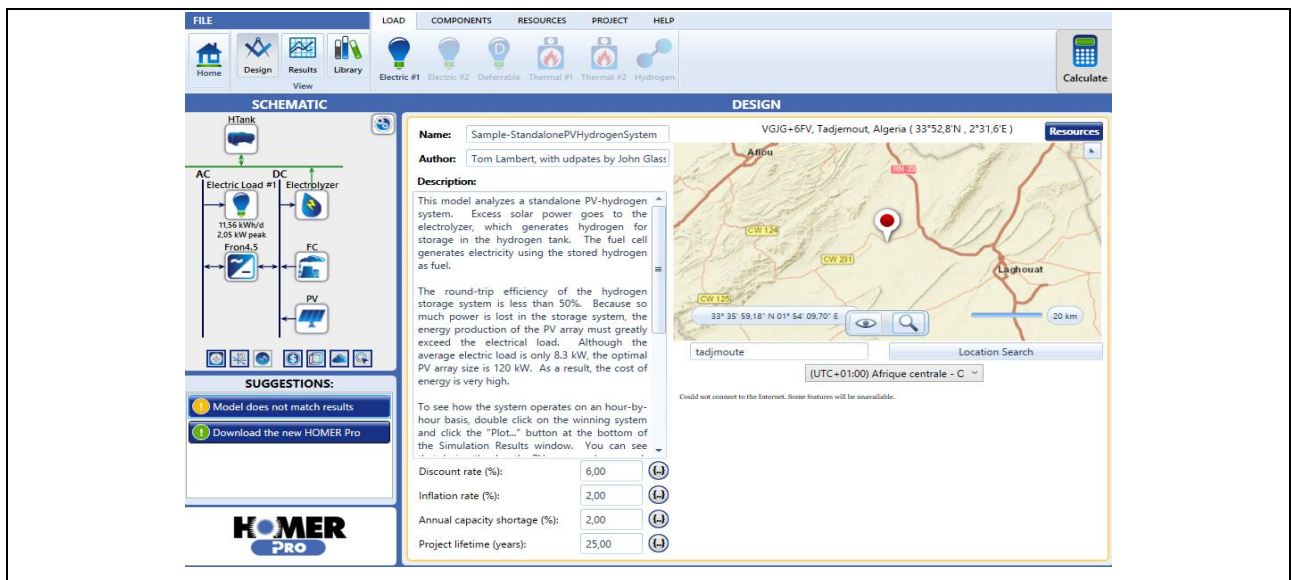


Figure 35 – montage électrique du système.

4.8 Description du système hybride PV/H

Dans le cadre de HOMER, tous les modèles des composants sont combinés pour former un modèle dédié à un système hybride PV/hydrogène qui répond à des demandes énergétiques variables au cours d'une journée type. La figure (36) montre le système hybride photovoltaïque/hydrogène, composé d'un GPV, d'un électrolyseur, d'une unité de stockage d'hydrogène et d'une pile à combustible. Dans le système étudié, GPV alimente directement les utilisateurs. Les excédents solaires sont stockés sous forme chimique. Parce que si le PV fournit plus de puissance que la charge n'en nécessite, il y aura un excès de puissance qui pourra alimenter l'électrolyseur. Lorsque les cellules photovoltaïques ne sont pas en mesure de répondre aux besoins de charge, l'électrolyseur fournira l'hydrogène stocké dans le réservoir de stockage pour alimenter la pile à combustible et générer l'électricité nécessaire à la charge.

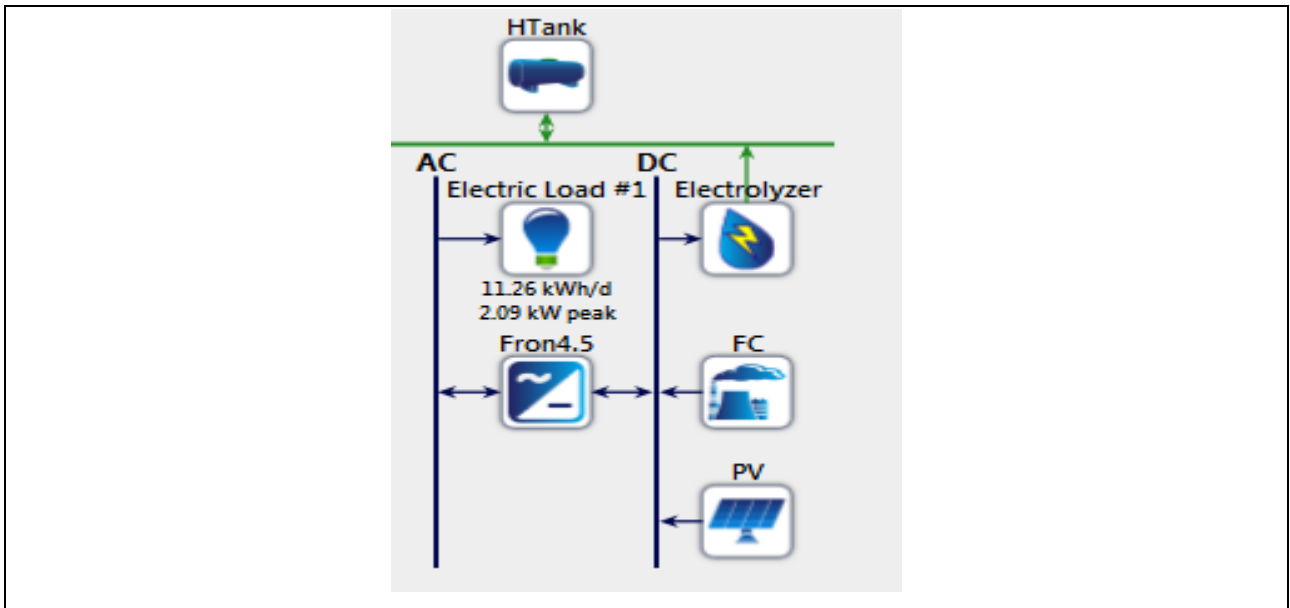


Figure 36 - Principaux composants du système PV/hydrogène.

4.9 Caractéristique de la région de Laghouat

Le dimensionnement du système est basé sur les données météorologique et géographiques effectuées pour le site Tajmoute.

4.9.1 Donnée géographique (Localisation)

Notre habitation est située dans La commune de Tajmoute, située dans la wilaya de Laghouat, à 48 km au nord-ouest de la ville de Laghouat.

Coordonnées du site :

- Latitude : 33.52°N .
- Longitude : 2.31°E .
- Altitude : 993m.

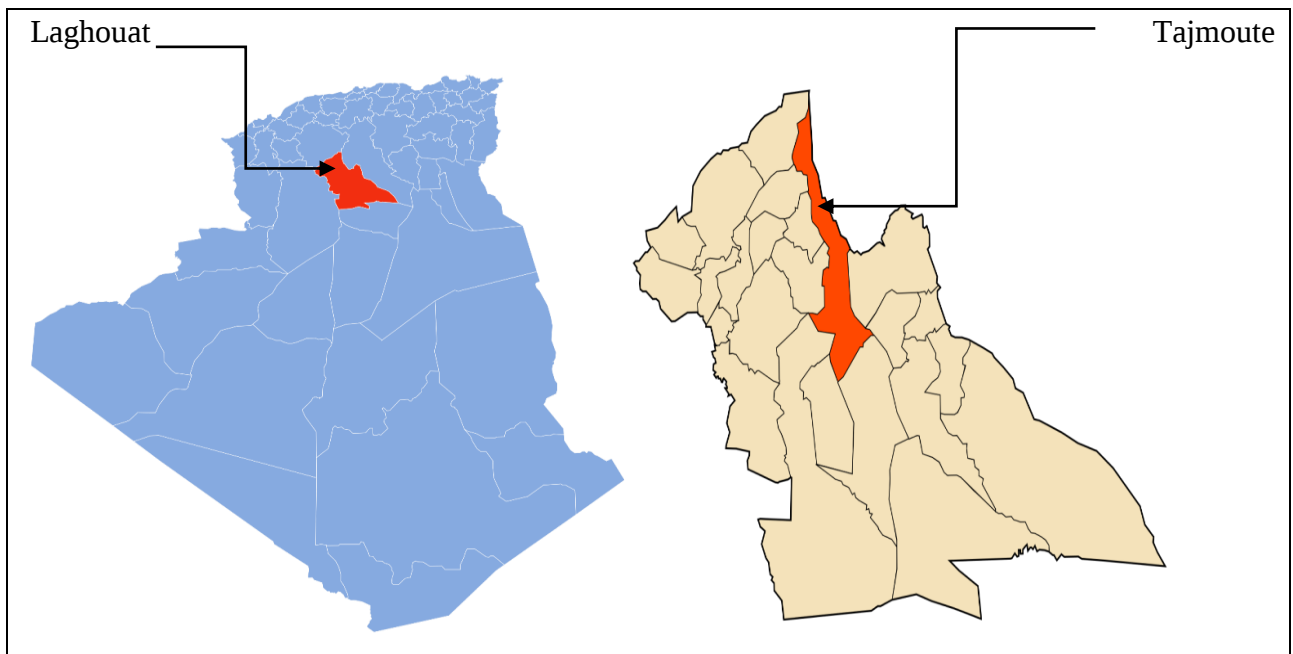


Figure 37 - Localisation géographique du site en étude.

4.9.2 Donnée météorologique

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). La figure (38), représente : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie (insolation en Wh/m^2), on remarque que la partie sud est caractérisée par des valeurs d'insolations importantes.

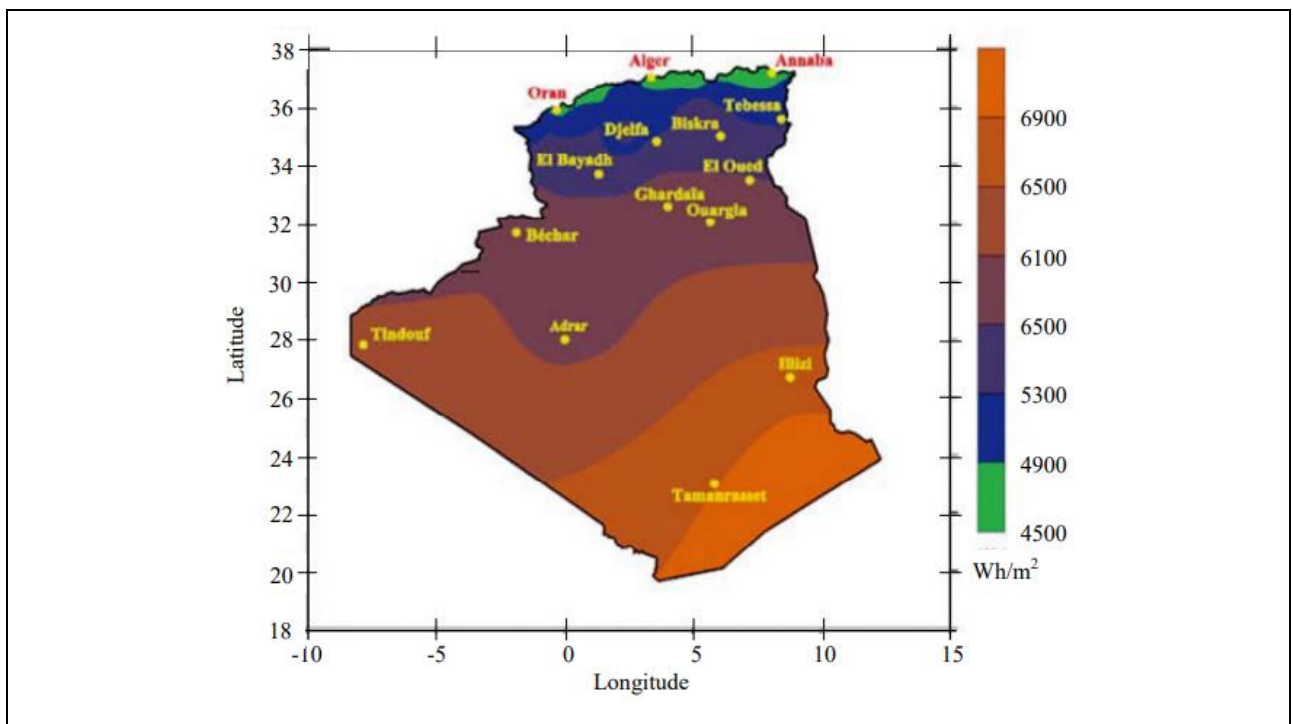


Figure 38 - Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale en Algérie (insolation en Wh/m^2).

4.10 Besoins énergétiques et profil de charge

Une étape importante dans la conception du système est l'estimation des besoins en énergie de l'utilisateur. Le tableau (3) suivant montre le cahier de charge des besoins énergétiques de deux jours de l'année d'une maison située dans le site étudié, les jours choisis sont le 30 Décembre (jour hivernal) et le 21 Juin (jour estival).

Tableau 3 - Besoins énergétiques d'un habitat individuel.

Equipement	Puissance (W)	Nombre	Heurs/ jour		Consommation (Wh/j)	
			Eté	Hiver	Eté	Hiver
Eclairage	10	6	3	4	180	240
Télévision	100	1	5	5	500	500
PC portable	100	1	4	4	400	400
Machina à laver	700	1	1	1	700	700
Réfrigérateur	150	1	24	24	3600	3600
Surpresseur	750	1	4	4	3000	3000
Climatiseur	1090	1	4	0	4360	0
Téléphone	15	2	4	4	120	120
Chauffage électrique	1000	1	0	3	0	3000
Totale	3915	/	/	/	12860	11560

La consommation électrique d'un habitat varie d'une saison à l'autre en fonction de la durée de la journée et de l'utilisation de certains appareils électriques, une maison consomme environ 11560 Wh/jour en hiver et 12860 Wh/jour en un jour d'été.

Des études de simulation précises nécessitent une base de temps plus élevée des données de charge des utilisateurs. Par conséquent, le profil de charge envisagé lors de l'étude doit être fourni sur une base horaire. La figure (39) montre la consommation horaire sur une période de 24 heures pour deux jours sélectionnés.

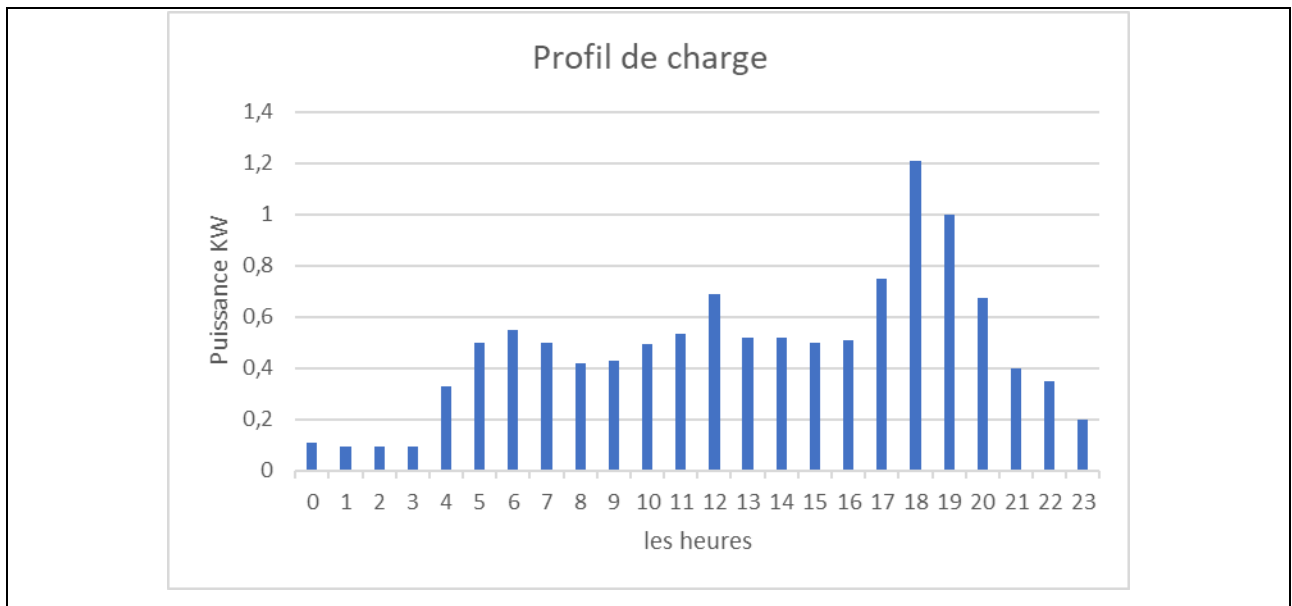


Figure 39 - Profil de la charge.

4.11 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Avant l'installation de tout système photovoltaïque, il est nécessaire de faire les étapes de dimensionner.

Le dimensionnement consiste à déterminer la taille du champ photovoltaïque et le stockage de la puissance en tenant compte des conditions d'ensoleillement, de la demande d'énergie et du coût des éléments.

Un système photovoltaïque fonctionne sous une règle fondamentale : l'énergie produite par le générateur PV devra être supérieur ou égale à l'énergie consommée par l'utilisateur. Pour dimensionner un GPV, il faut suivre les étapes suivantes :

✚ On calcule E_c ; l'énergie qui sera consommée par l'utilisateur chaque jour en Wh.

✚ On calcule E_p ; l'énergie à produire chaque jour en Wh où : $E_p = \frac{E_c}{k}$.

k : est un coefficient de correction qui tient compte les pertes d'énergie à cause de l'incertitude météorologique, vieillissement, poussière, pertes dans les câbles de connexion, rendement des convertisseurs, etc. En générale, ce coefficient varie entre 60 et 70%.

✚ On calcule P_c ; la puissance crête du générateur photovoltaïque où : $P_c = \frac{E_p}{H_i}$.

H_i : est l'irradiation solaire journalière moyenne de la région en kWh/m².jour.

✚ On calcule N_{pv} ; le nombre des panneaux PV comme suit : $N_{pv} = \frac{P_c}{P_{pv}}$.

P_{pv} : est la puissance crête du panneau PV utilisé.

D'après cette règle, on peut calculer le nombre des panneaux PV nécessaire pour l'alimentation de la maison en électricité.

L'irradiation globale journalière à la région de Laghouat est égale à 3.5 kWh/m²/jour au mois de Janvier et Décembre et 7.5 kWh/m²/jour au mois de Juin. Les panneaux PV utilisés sont de type AREI-230W.

Tableau 4 - Calcule de nombre de panneaux PV nécessaire.

	30 Décembre	21 Juin
Consommation (Wh/j)	11560	12860
Energie à produire (Wh/j)	17785	19785
La puissance crête (W)	5081	5653
Nombre de panneaux PV	22	24

4.12 Dimensionnement de la pile à combustible et l'électrolyseur

Le dimensionnement de la pile à combustible et de l'électrolyseur consiste à déterminer la puissance de chaque composant. La puissance du GPV est environ 5KW pour le 30 décembre et environ 5.6KW le 21 Juin. La puissance de la pile doit correspondre à la puissance maximale demandée par l'utilisateur, l'électrolyseur est de puissance égale à la différence maximale entre la puissance crête du GPV et la charge minimale de l'utilisateur afin de convertir la totalité de puissance excédentaire.

$$P_{pac} = P_{ch-max} \quad (4.1)$$

$$P_{ele} = P_{pv} - P_{ch-min} \quad (4.2)$$

La puissance de la pile à combustible est environ 1.2KW, celle de l'électrolyseur est 5 KW.

4.13 Réservoir de stockage

L'hydrogène produit par l'électrolyseur puis consommé par la pile à combustible est stocké dans des réservoirs appelés réservoirs à hydrogène. Ce dernier fournit de l'hydrogène à la pile à combustible pour répondre aux besoins de recharge des consommateurs lorsque le GPV ne produit pas d'énergie. Le modèle de stockage de gaz sous pression décrit ci-dessous a été développé par Griesshaber et Sick en 1991. Cependant, le modèle utilisé dans cette mémoire inclut la véritable équation des gaz de van der Waals. Par conséquent, pour calculer la pression, deux options sont incluses. [6]

Selon la loi des gaz parfaits, la pression P_r du réservoir de stockage de gaz peut être calculée à partir de :

$$P_r = z \cdot \frac{nRT}{V} \quad (4.3)$$

Selon l'équation d'état de van der Waals, la pression P_r des gaz réels stockés dans le réservoir peut être calculée par :

$$P_r = z \cdot \frac{nRT}{V - nb} - a \frac{n^2}{V^2} \quad (4.4)$$

Où

$$a = \frac{27 \cdot R^2 T_c^2}{64 P_c} \quad \text{Et} \quad b = \frac{RT_c}{8 P_c}$$

P_r : Pression du réservoir (Pascal).

n : Nombre de moles.

T : Température de fonctionnement (Kelvin).

V : Volume de stockage (m^3).

R : Constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J/K/mol}$).

z : Facteur de compressibilité en fonction de la pression ; $z \approx 1$.

T_c : Température critique (Kelvin).

P_c : Pression critique (Pascal).

4.14 Gestion d'énergie du système hybride

Dans les systèmes hybrides autonomes, une gestion efficace de l'énergie est nécessaire pour assurer la fiabilité et la rentabilité de l'électricité produite. La stratégie de gestion optimale pour le système PV/hydrogène est présentée ci-dessous, qui est conçue pour répondre à la demande de charge de la maison 24 heures sur 24h. Dans cette étude, la demande de charge doit être satisfaite principalement par GPV, et le déficit énergétique est comblé par les piles à combustible. La différence entre la production d'énergie photovoltaïque et la demande de charge à tout moment peut être calculée par la formule suivante : [6]

$$\Delta P(t) = P_{pv}(t) - P_{ch}(t) \quad (4.5)$$

Où ; $P_{pv}(t)$ et $P_{ch}(t)$ sont respectivement, la puissance produite par le GPV et puissance de la charge à chaque moment.

La stratégie, consiste à ce que l'utilisation de l'énergie générée par le GPV soit prioritaire par rapport à celle fournie par la pile à combustible pour satisfaire la demande d'énergie.

Si la puissance totale générée par le GPV est supérieure à la demande, la puissance supplémentaire sera envoyée à l'électrolyseur pour générer de l'hydrogène. L'électrolyseur est maintenu en fonctionnement tant que la puissance disponible existe et que la pression du réservoir augmente par rapport à la valeur initiale.

Si la puissance totale générée par le GPV est égale à la puissance demandée par la charge, il y'aura pas d'échange de puissance et la demande totale est satisfaite par le GPV.

Enfin, Si la puissance électrique totale générée par le GPV est inférieure à la demande, l'alimentation sera fournie par la pile et la pression du réservoir diminue à partir de la dernière valeur atteinte.

La puissance produite par la pile à combustible peut être calculée comme :

$$P_{pac}(t) = P_{ch}(t) - P_{pv}(t) \quad (4.6)$$

L'objectif est de réduire l'utilisation la pile à combustible aussi moins que possible le long de la journée. Il y a quatre modes de fonctionnement : [6]

- Le GPV fournit l'énergie électrique à la charge, l'électrolyseur et la pile à combustible sont à l'arrêt.
- Le GPV fournit l'énergie électrique à la charge et à l'électrolyseur (qui est en marche) et la pile à combustible à l'arrêt.
- Le GPV et la pile à combustible fournissent l'énergie électrique à la charge et à l'électrolyseur à l'arrêt.
- La pile à combustible fournit l'énergie électrique à la charge, le GPV et l'électrolyseur sont à l'arrêt.

4.15 Caractéristiques techniques des composants utilisés

4.15.1 Surface du panneau photovoltaïque

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leurs possibilités. Deux paramètres définissent la position des modules photovoltaïques :

- L'orientation (azimut) : le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest...),
- L'inclinaison : l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

A. Choix de l'inclinaison

Le choix de l'inclinaison des panneaux dépend du profil de consommation énergétique de l'utilisateur final, mais aussi du système de stockage considéré. Si un stockage saisonnier est utilisé, l'inclinaison des panneaux solaires est fixée de manière à maximiser la captation de l'énergie sur l'année,

Dans le cas du stockage journalier, l'inclinaison est alors fixée de manière à maximiser la captation de l'énergie durant les périodes les plus défavorables en termes de disponibilité de la ressource renouvelable associée à une forte consommation de l'utilisateur final. En l'occurrence est faible (journées d'ensoleillement courts, conditions météorologiques défavorables) tandis que la consommation est plus importante.

B. Choix de l'orientation

L'azimut permet d'ajuster la captation au niveau journalier. L'irradiation solaire maximale survenant généralement le midi (soleil au zénith), une orientation plein sud (dans l'hémisphère nord) permet donc de collecter le maximum d'énergie solaire au moment où l'irradiation est maximale. En utilisant directement l'énergie captée par le panneau, si les besoins d'un utilisateur sont plus importants le matin, on préférera orienter les panneaux au sud-est pour maximiser la captation à cet instant de journée,

Pour le dimensionnement de système on a choisi une orientation en plein sud, c'est-à-dire à un azimut de 0° .

Tableau 5 - Caractéristique des panneaux PV.

Technologie	Polycristalline
Coefficient thermique de la cellule	-0.46 %/K
NOCT	45±2 °C
Rendement dans les conditions standards	14.3 %

4.15.2 L'électrolyseur

L'électrolyseur est utilisé pour produire l'hydrogène nécessaire pour alimenter la pile à combustible. Sa taille doit être suffisante pour alimenter la charge maximale. La technologie d'électrolyse choisie dans notre étude est : L'électrolyse PEM. Les autres technologies (exemple d'électrolyse alcaline) ne s'accommodent pas à un régime discontinu, donc de la seule alimentation électrique à partir de renouvelable intermittent.

Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques techniques de l'électrolyseur utilisé :

Tableau 6 - Caractéristique des électrolyseurs.

Caractéristique	Valeur
Type	PEM
Rendement	85%
Mode de fonctionnement	DC
Durée de vie	15 ans

4.15.3 Le convertisseur

Dans le système étudié, Dans le système étudié, on a utilisé les onduleurs pour transformer le CC produit par les générateurs photovoltaïque et les piles à combustible en CA pour alimenter la charge, Le tableau (7) représente les caractéristiques techniques du convertisseur utilisé.

Tableau 7 - Caractéristique des convertisseurs.

Caractéristique	Valeur
Durée de vie	15 ans
Rendement (DC/AC)	85%
Rendement (AC/DC)	90%

4.15.4 Réservoirs d'hydrogène

L'hydrogène stocké doit être suffisant pour subvenir aux besoins des piles à combustible, les caractéristiques sont citées dans le tableau suivant.

Tableau 8 - Caractéristiques des réservoirs d'hydrogène.

Caractéristique	Valeur
Durée de vie	25 ans
Volume réservé	10%

4.15.5 Piles à combustible

Les piles à combustible doivent être d'une puissance pour alimenter le maximum de la demande énergétique de la charge, le tableau (9) présente les caractéristiques de la pile à combustible.

Tableau 9 - Caractéristiques des piles à combustibles.

Caractéristique	Valeur
Durée de vie	40000 Heurs
Consommation spécifique	0.06 Kg H ₂ /KWh
Mode de fonctionnement	AC

4.16 Optimisation du système

L'objectif du processus d'optimisation du système est de déterminer les valeurs optimales pour chaque composant afin d'obtenir une solution dimensionnée de manière optimale pour notre système.

La variable dimensionnelle qui doit être introduite dans notre simulation est :

- La puissance crête de la surface photovoltaïque.
- La puissance nominale des piles à combustible.
- La puissance nominale des convertisseurs.
- La puissance nominale des électrolyseurs.
- La taille du système de stockage d'hydrogène.

Dans le processus d'optimisation, HOMER PRO utilise plusieurs possibilités de dimensionnement et choisit les meilleurs résultats pour chaque scénario, selon le point de vue économique.

4.17 Résultats de simulation du système hybride PV/Hydrogène

Le système étudié est composé d'un champ PV, d'une unité d'électrolyseurs et d'une unité de piles à combustible, réservoir d'hydrogène et convertisseur. Après la simulation de notre système, le logiciel HOMER choisi la meilleure configuration comme illustre dans la figure suivante :

Architecture									Cost				System																		
			PV (kW)		FC (kW)		Electrolyzer (kW)		HTank (kg)		Fron4.5 (kW)		Dispatch		COE (\$)			NPC (\$)			Operating cost (\$/yr)			Initial capital (\$)		Ren Frac (%)			Total Fuel (L/yr)		
			20,0		20,0		10,0		20,0		4,50		LF		6,59 \$			437 813 \$				16 933 \$			171 072 \$		100			127	

Figure 40 - configuration choisit du système.

Le tableau (10) représente la composition de ce système ainsi que la taille de chaque élément.

Tableau 10 - composition du système.

Puissance crête du champ PV [kW]	Puissance nominale du convertisseur [kW]	Puissance nominale de l'électrolyseur [kW]	Taille du réservoir d'H ₂ [kg]	Puissance nominale de la PAC [kW]
20	4.5	10	20	20

Présente la production mensuelle électrique du système étudié dans la figure suivante :

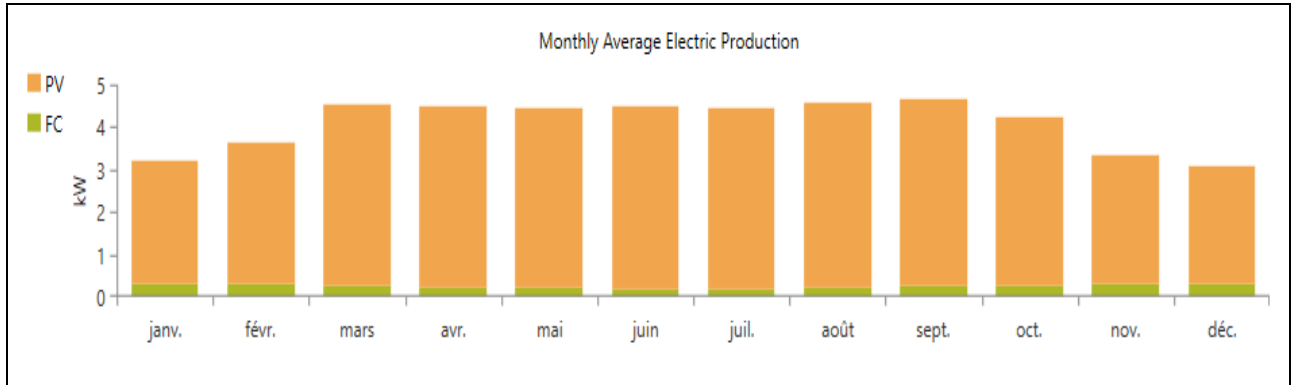


Figure 41 - production énergétique mensuelle du système.

Présente le bilan énergétique du système étudié le tableau suivant :

Tableau 11 - Bilan énergétique du système étudié.

Composant	Production		Excès
	PV	PAC	
Energie [KWh/ans]	33777	2115	24841
[%]	94.1	5.89	69.2

De ce tableau, on note que 94% de l'énergie annuelle produite par le système est de source photovoltaïque, tandis que seulement 5.89% est produit par les piles à combustible.

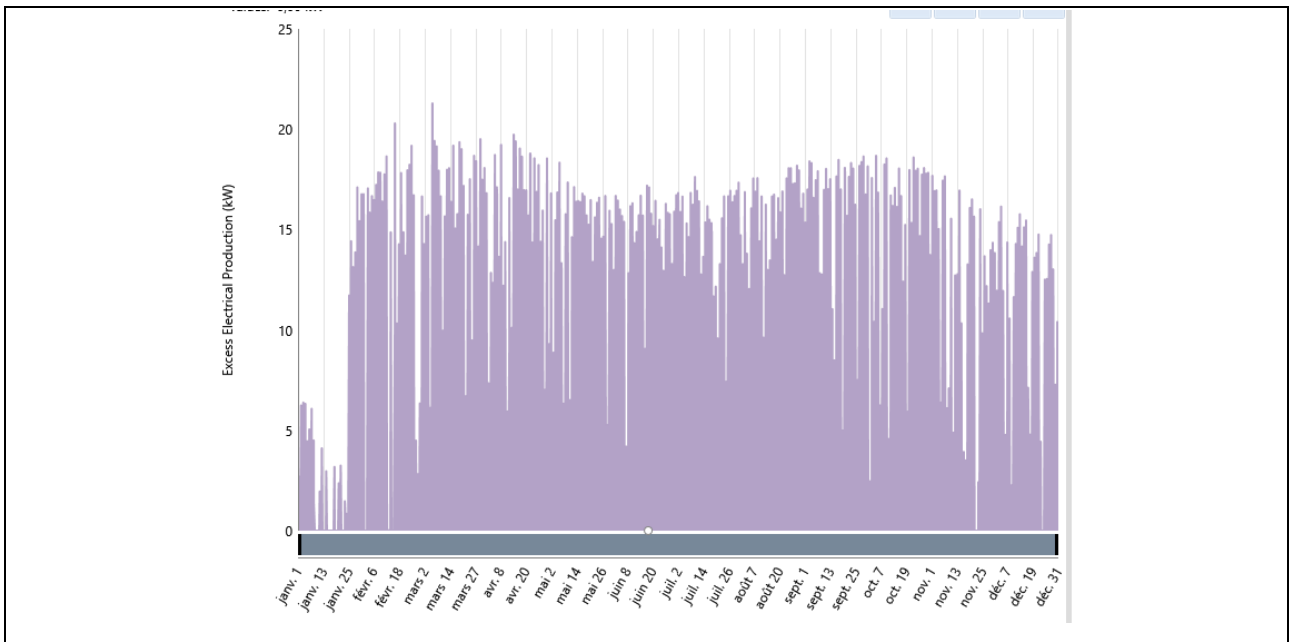


Figure 42 - Excès énergétique mensuelle pour le système étudié.

L'excès énergétique est important (fig. 42) est de l'ordre de 69.2%. Il est dû au dimensionnement du volume de stockage pendant le mois le plus défavorable.

A. Production du champ PV

En illustre dans la fig. (43) la production énergétique mensuelle du champ PV.

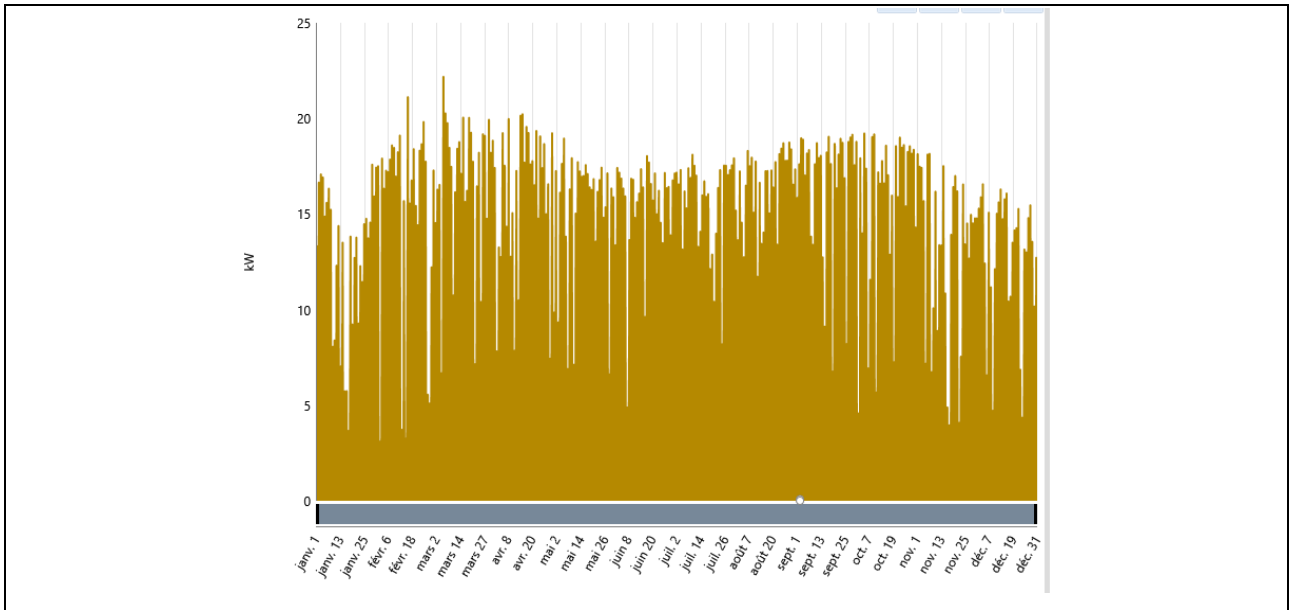


Figure 43 - Energie photovoltaïque mensuelle produite par les panneaux photovoltaïques dans le système étudié.

B. Production d'hydrogène

Les électrolyseurs fonctionnent quand la production photovoltaïque est supérieure à la demande énergétique de la charge.

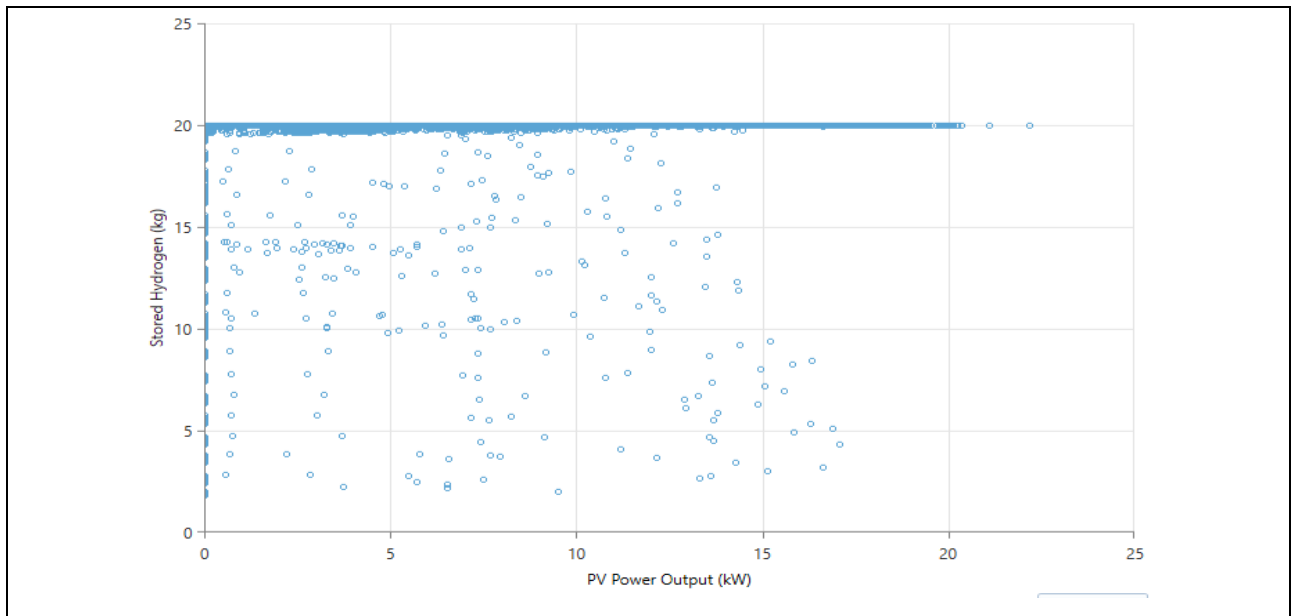


Figure 44 - Quantité d'hydrogène produite en fonction de l'énergie photovoltaïque du système étudié.

L'électrolyseur consomme plus d'énergie pendant le mois de Janvier à cause de la demande importante de l'hydrogène pour le fonctionnement de la pile à combustible. La figure (45) représente la consommation mensuelle de l'électrolyseur pour le système

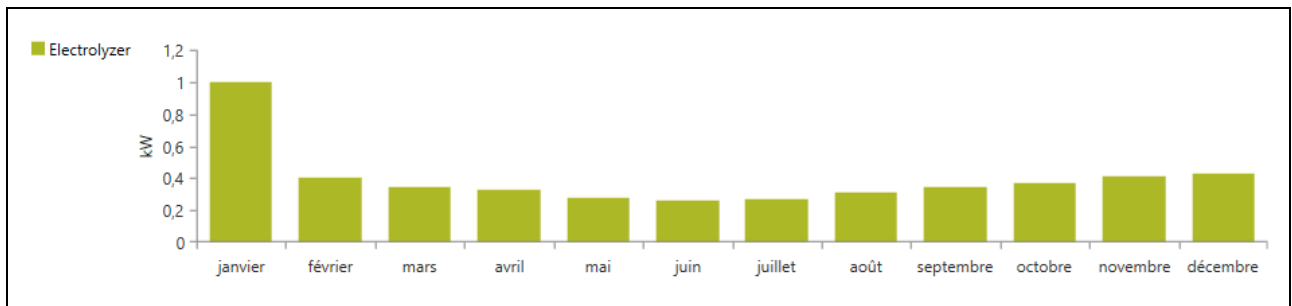


Figure 45 - Consommation énergétique mensuelle de l'électrolyseur pour le système étudié.

La quantité d'hydrogène produite dépend de l'énergie consommée par les électrolyseurs. La fig. (46) représente la moyenne mensuelle de la production annuelle d'hydrogène.

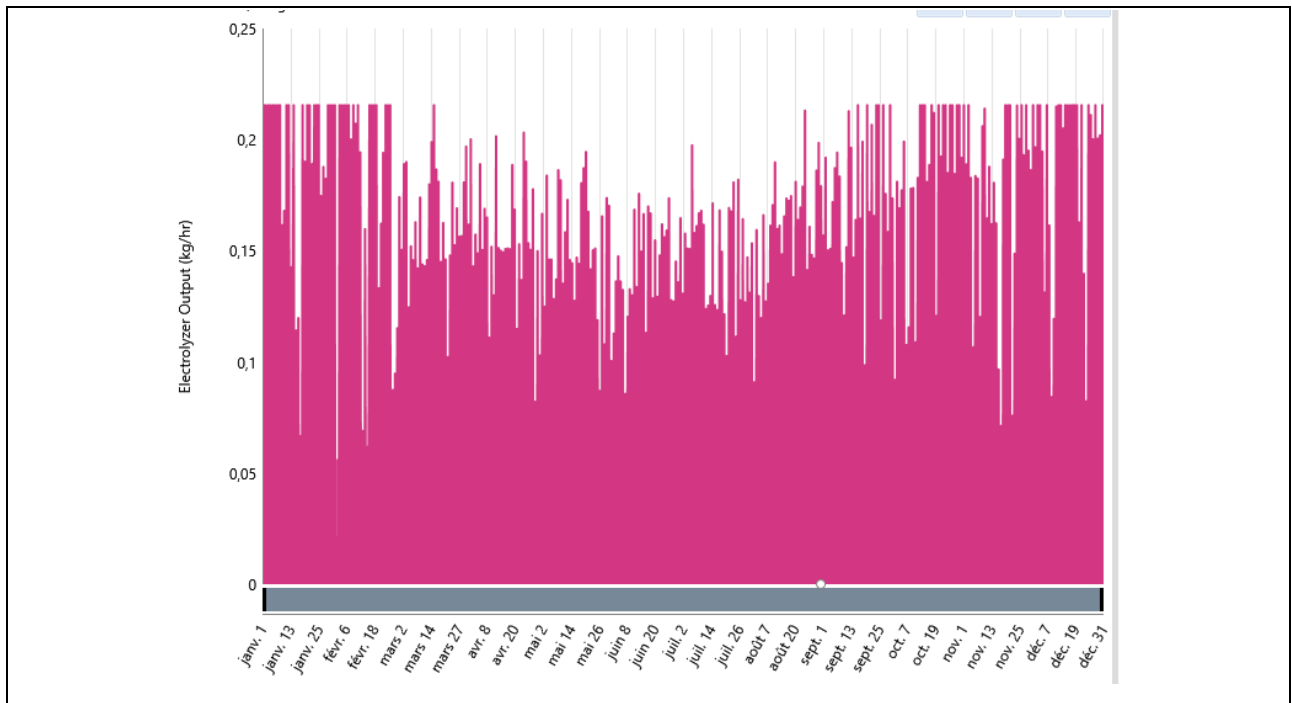


Figure 46 - Quantité mensuelle d'hydrogène produite par l'électrolyseur pour le système étudié.

C. Production énergétique des piles à combustible

Les piles à combustible fonctionnent quand la demande énergétique est supérieure à la production photovoltaïque. La figure au-dessous représente l'énergie annuelle produit par les piles à combustible.

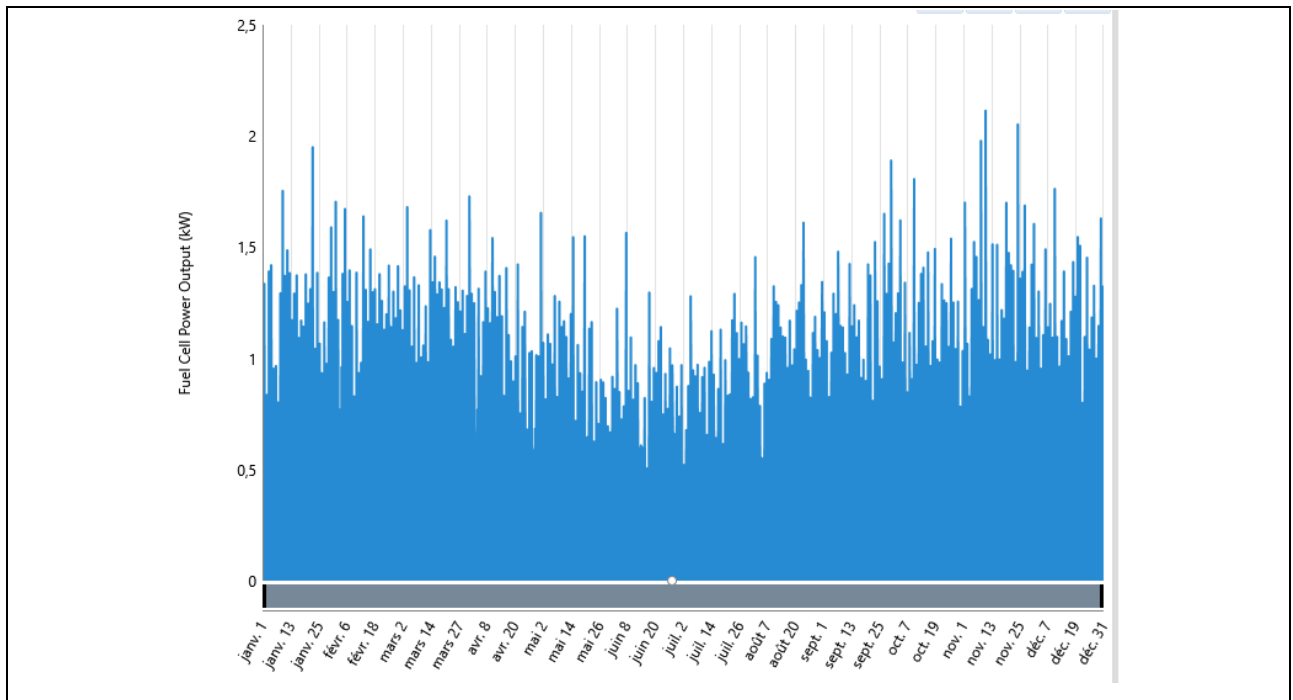


Figure 47 - Production énergétique mensuelle de la pile à combustible pour le système étudié.

D. Bilan économique

L'étude économique de ce système est détaillée au tableau (12). Le coût de chaque élément du système ainsi que le coût total en dollar.

Tableau 12 - Coût de chaque composant du système étudié.

Composant	PV	Convertisseur	Hydrogène		PAC	Total
Coût [\$]	60 000	1 072	ELE	Res H ₂	60 000	171 072
			20 000	30 000		

Deux journées choisies afin d'évaluer le comportement du système PV/Hydrogène à savoir le 30 décembre (jour hivernal) et le 21 juin (jour estival).

❖ Le 30 décembre

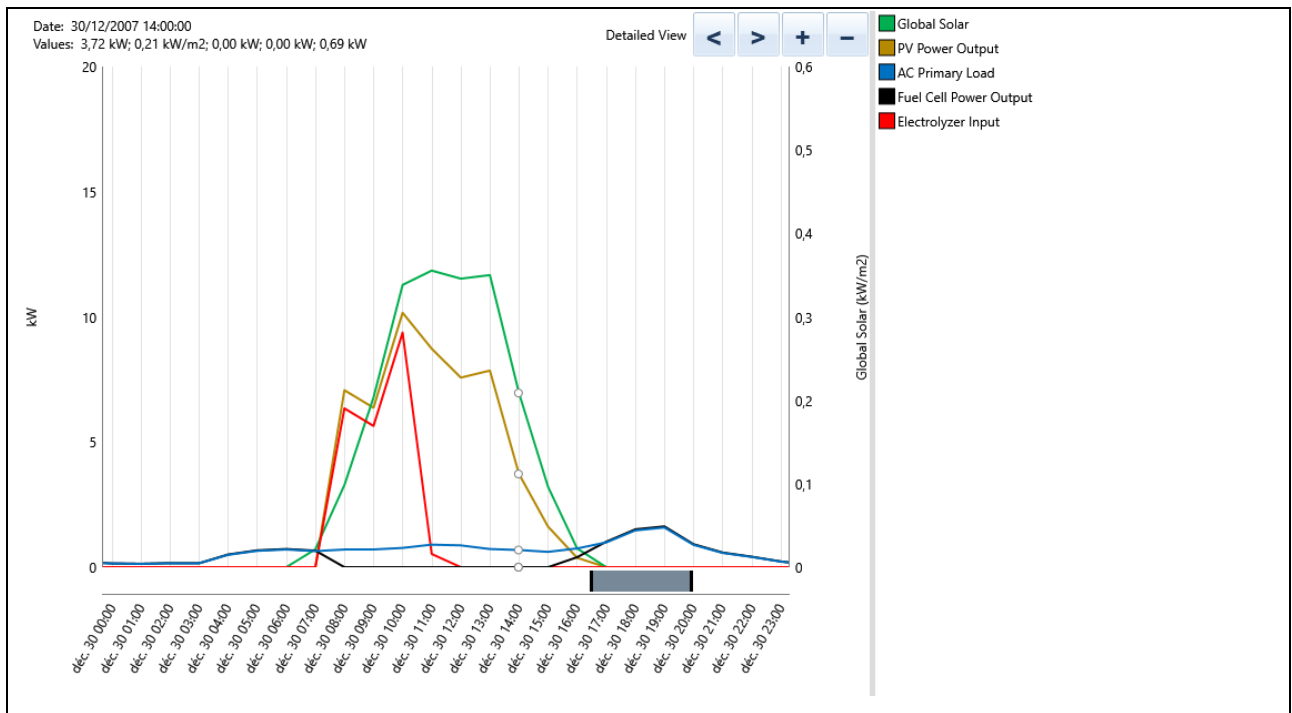


Figure 48 - Puissance de tous les composants du système hybride.

La figure (48) montre les variations de puissance du GPV, de l'électrolyseur, de la charge, et la pile à combustible durant 24 heures. On peut clairement voir que la production d'électricité de GPV est nulle avant le lever du soleil (de minuit à 6h00 du matin), car il n'y a pas de rayonnement solaire le GPV ne peut pas répondre à la demande de puissance de la charge variant entre 150 et 650W, ce qui provoque l'intervention de la pile à combustible, couvrant la puissance requise par la charge. L'électrolyseur est mis en veille lorsqu'il n'y a pas de production d'électricité pendant cette période. A partir de 06h00 du matin, l'éclairement solaire commence à apparaître et cause l'apparition d'un courant et par conséquent une puissance aux bornes du GPV. Progressivement, la pile à combustible ça arrête de fonctionner.

La demande de charge est entre 710 et 870 W entre 8h et 16h30, la puissance fournie par le GPV est largement supérieure à la charge, elle satisfait la demande de charge et l'électrolyseur utilise l'excès de puissance pour produire de l'hydrogène dans ce cas la pile à combustible est arrêtée.

À partir de 16h30, le rayonnement solaire continue de diminuer et le GPV ne peut pas répondre à la demande de charge car sa puissance est inférieure à la charge, donc la pile à combustible est nécessaire pour compenser le manque de puissance. Par conséquent, l'électrolyseur passe en mode veille et la production d'hydrogène ça arrête. Le GPV alimente la charge avec une petite puissance inférieure à celle demandée jusqu'à 17h00, et la pile à combustible continue son rôle complémentaire de GPV. De 17h00 Temps du soleil jusqu'à minuit, le GPV cesse de fonctionner et la demande de charge est satisfaite que par la pile à combustible.

❖ Le 21 Juin

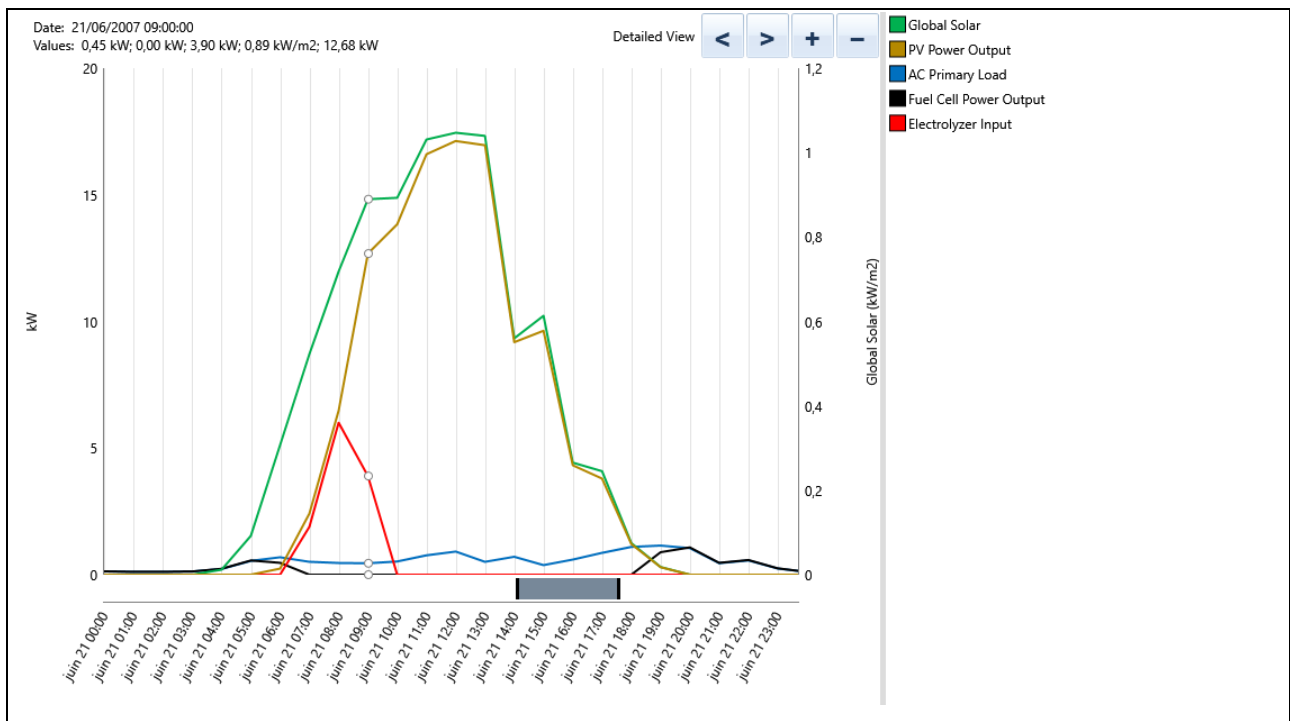


Figure 49 - Puissance de tous les composants du système hybride.

La figure (49) montre les variations de puissance du GPV, de l'électrolyseur, de la charge, et la pile à combustible durant 24 heures. La puissance du GPV est nulle de minuit à 05h00 car elle repose sur le rayonnement solaire qui est également nul. En conséquence, le GPV ne peut pas répondre à la demande de puissance de charge d'environ 450 W. La puissance de l'électrolyseur est égale à zéro, car il n'y a pas d'excès de puissance générée par le GPV donc l'électrolyseur ne fonctionne pas et il n'y a pas d'hydrogène produit. À partir de 05h00 du matin, l'éclairage solaire commence à fonctionner, générant un courant aux bornes du GPV, ce qui permet la production d'énergie. La pile à combustible continue de fonctionner pour combler le manque de puissance requise jusqu'à 07h00 parce que la puissance du GPV n'est pas encore suffisante pour répondre à la demande de charge. Par exemple, la demande de charge est d'environ 540 W à 05h00 du matin, tandis que le GPV fournit moins de 100 W, la pile doit fournir la puissance manquante pour le fonctionnement de la charge. En raison de la croissance continue du rayonnement solaire, le système hybride fonctionne à partir de 05h30 et jusqu'à 18h00. La puissance fournie par le GPV dépasse les 16 kW. La demande de la charge pendant cette période sera couverte par cette puissance. La pile à combustible ça arrête de fonctionner et l'électrolyseur commence à fonctionner. Tant que la puissance du GPV est supérieure à la puissance de la charge, le système évolue dans le même sens jusqu'à ce que le GPV ne puisse plus couvrir la demande de charge. Le GPV ne peut pas répondre à la demande de charge entre 19h00 et minuit, ce qui nécessite l'intervention de la pile à combustible pour compenser le manque de puissance.

4.18 Conclusion

Dans ce chapitre, on a implémenté une stratégie de contrôle et de transit d'énergie électrique afin de protéger notre système de stockage. Pour tester son efficacité, on a simulé le système global sous l'environnement (HOMRE), les courbes des sous-systèmes ont été relevées. Pour chaque étage du système on a relevé les courbes courant-tension-puissance. Les résultats de test de simulation de notre installation hybride PV/H2 montrent l'efficacité et la fiabilité de notre dispositif.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était l'étude le dimensionnement et la simulation numérique du fonctionnement d'un système de production d'énergie électrique autonome hybride, le système couple un champ photovoltaïque à un électrolyseur et une pile à combustible, il est géré par une méthode de gestion d'énergie afin d'assurer l'électrification d'une maison située dans un site isolé.

Le dimensionnement du système hybride PV/H₂ de production d'énergie électrique, est fait sur la base de connaissance de potentiel énergétique du site et après avoir évalué le besoin journalier, de notre habitation isolée.

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.

Comme perspective, nous espérons que notre travail de simulation et de dimensionnement soit complété par des tests de validation sur le terrain afin de connaître les performances réelles de notre système hybride et que la modélisation qu'on a effectuée soit enrichie.

Références bibliographiques

- [1] Garah Yaakoub, ‘ Etude d’une chaine de conversion d’énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique’ Mémoire de Master ; Université Larbi Ben M’Hidi - Oum El Bouaghi – Juin 2015
- [2] Katia Oumailia, Tinhinane Ouldlamara, ‘ Etude d’un système Photovoltaïque-Hydrogène’ Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. Septembre 2018
- [3] Mizat Manel, ‘ Etude et modélisation avec simulation de l’efficacité Énergétique d’une chaine de conversion Photovoltaïque pour l’alimentation d’un moteur à Courant continu.’ mémoire de master ; Université Amar Thelidji- Laghouat, 2021
- [4] M. Mustapha Belarbi, ‘Contribution à l’étude d’un générateur solaire pour site autonome’ Thèse de Doctorat Es-Sciences. Université des sciences et de la technologie d’Oran Mohamed Boudiaf. 10.09.2015
- [5] Debili Narimene, ‘Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque’, thèse de Magister en Electronique, université Constantine I, 2015.
- [6] Rougab Ilyes, ‘Etude et Modélisation d’un Système Hybride Photovoltaïque - Hydrogène en Site Isolé’ thèse de doctorat en sciences. Université Amar Telidji – Laghouat, juillet 2022
- [7] Brahimi Imad, Hamma Imad, ‘Production d’hydrogène à base d’un système de conversion photovoltaïque’ mémoire de master, Université A. MIRA-BEJAIA. 2022.
- [8] Birane Mouhoub, ‘Systèmes de conversion de l’énergie Photovoltaïque’. Support de Cours. Université Amar Telidji Laghouat. 2018/2019.
- [9] Bendjellouli Zakaria, ‘ contribution à la modélisation d’une cellule solaire’. Magistère En : Micro-électronique-photovoltaïque, université de Bechar, 28 / 06 / 2009
- [10] Bourad Kahina, ‘Dimensionnement d’un système photovoltaïque avec stockage’. Mémoire de Master. Université A. MIRA-BEJAIA. 2020/2021.

- [11] Kheridla Youcef, Khineche Kaddour, ‘ Modélisation Et Simulation D’un Système De Production D’hydrogène Par Voie Photovoltaïque’ Mémoire de master, université Kasdi Merbah Ouargla, 2013/2014
- [12] Samer Rabih, ‘Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs Photovoltaïques’ thèse de doctorat, l’université de Toulouse, 03 octobre 2008.
- [13] Danoune Mohammed Bilal, ‘Étude d’un système d’énergies renouvelables à base d’hydrogène vert’ thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah-Ouargla. 14/12/2021
- [14] Lachaize Jerome, ‘ Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction’. Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse (2004).
- [15] Amina Abadou & Mohammed Bouzghoub, ‘Etude et diagnostic d’un système photovoltaïque autonome’ mémoire de master, université de Jijel, promotion 2016
- [16] Bettouche Mohamed Amine, Redjradj Adel, ‘Etude, dimensionnement et simulation d'un système hybride photovoltaïque-diesel alimentant une habitation isolée’, mémoire de Master, Université A-MIRA de BEJAIA. Promotion 2015/2016.

Documents web

- [17] <https://www.encyclopédie-energie.org/lhydrogene/>.