



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Électrique

MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de Master

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : Electrotechnique Industriel

Présenté par

BRIDJA Saadia

Intitulé du sujet

**Contribution d'un système électrique PV/PAC pour améliorer la
gestion de l'énergie**

Soutenu le 06/07/2023

Devant le jury composé de :

Président :	HADRI Baghdad	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	MISSOUM Ibrahim	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	NEDDAR Houaria	MAA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Avant tous, nous tenons nos remerciements à notre Dieu ALLAH de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

*À la suite, je tiens à remercier vivement Mme : **NEDDAR Houaria** m'encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.*

*Je tiens également à remercier les membres de jury, Mr. **HADRI Baghdad** et Mr. **MISSOUM Ibrahim** Pour l'honneur qu'ils j'ai fait en acceptant de siéger à ma soutenance.*

Et tous les professeurs du département de Génie électrique. À tout ce qui fut à un moment ou à un autre et à tout instant partie prenante de ce travail.

Je plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Saadia BRIDJA

Dédicaces

Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses bénédictions et la grâce de la réussite.

*À mon cher **père Abd kader**, qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter les difficultés ;*

*À ma chère **mère Yamina**, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au monde ; Mes chers frères : Djamel, Mohamed, Abd Alah ; et ma chère sœur Fairouze.*

À mes tantes et mes oncles.

À toute ma famille et tous ceux que j'aime.

À mon ami Momen, pour m'avoir participé ce travail

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer.

Tous mes amis, chacun en son nom.

Pour tous les enseignants du département de génie électrique.

Je dédie cet humble travail.

Saadia BRIDJA

Résumé :

Les énergies renouvelables connaissent une croissance rapide à l'échelle mondiale, motivée par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le réchauffement climatique. Cependant, ces sources d'énergie peuvent être intermittentes dans certaines circonstances, ce qui a conduit à l'adoption de systèmes hybrides comme solution. Ce travail présente l'étude d'un système hybride composé d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible et d'une batterie, alimentant une charge électrique. La gestion de chaque composant a été réalisée pour une utilisation optimale selon les besoins. L'étude a été réalisée en utilisant Matlab/Simulink et a impliqué l'utilisation de convertisseurs.

Les mots-clés :

Générateur photovoltaïque, pile à combustible, système hybride et batterie.

ملخص:

تشهد الطاقة المتجددة نموًا سريعًا على مستوى العالم ، مدفوعًا بالحاجة إلى تقليل انبعاث غازات الاحتباس الحراري لمكافحة ظاهرة الاحتباس الحراري. ومع ذلك ، يمكن أن تكون مصادر الطاقة هذه متقطعة في ظل ظروف معينة ، مما أدى إلى اعتماد أنظمة هجينة كحل. يقدم هذا العمل دراسة نظام هجين مكون من مولد كهربائي ضوئي وخلية وقود وبطارية تزود حمولة كهربائية. تم تنفيذ إدارة كل مكون للاستخدام الأمثل حسب الحاجة. أجريت الدراسة باستخدام Matlab / Simulink وتضمنت استخدام المحولات.

الكلمات الرئيسية:

مولد الطاقة الكهروضوئية ، خلية وقود ، نظام هجين ، بطارية.

Abstract :

Renewable energy is experiencing rapid growth globally, driven by the need to reduce greenhouse gas emissions to combat global warming. However, these power sources can be intermittent under certain circumstances, which has led to the adoption of hybrid systems as a solution. This work presents the study of a hybrid system composed of a photovoltaic generator, a fuel cell and a battery, supplying an electrical load. The management of each component has been carried out for optimal use as needed. The study was carried out using Matlab/Simulink and involved the use of converters.

The associated keywords :

Photovoltaic generator, fuel cell, hybrid system, battery.

Sommaire

Résumé	
Sommaire	
Symboles et notations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

CHAPITRE I Généralité sur Photovoltaïque

I.1. Introduction	5
I.2. Le rayonnement solaire	5
I.2.1. Facteurs influents sur le rayonnement solaire	6
I.2.2 Potentiel solaire en Algérie	6
I.3. Générateur photovoltaïque	7
I.3.1 Cellules photovoltaïques	8
I.3.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
I.3.1.3. Matériaux et technologies des cellules photovoltaïques	10
I.3.1.4. Technologies photovoltaïques	12
I.3.2. Convertisseurs DC/DC	12
I.3.2.1. Différents types des hacheurs	13
I.3.3. Stockage	14
I.3.3.1 Composition	15
I.3.4 Principe de fonctionnement	16
I.3.5 Caractéristiques électrique	17
I.3.6 Caractéristiques de GPV	18
I.3.6.1 Caractéristiques électriques I(V) et P(V)	18
I.3.6.2 Caractéristique courant-tension d'un module	20
I.4 Influence de GPV	20
I.4 .1 Influence de la température sur le générateur PV	20
I.4.2 Influence de l'irradiation sur le générateur PV	21
I.4.3 Influence de l'association mixte (Série et Parallèle)	22
I.5 Conclusion	23

Chapitre II Système hybride photovoltaïque et pile à combustible

II.1. Introduction	24
II.2. Définition du système hybride	24
II.3. Composition du système hybride général	24
II.4. Principe fonctionnement du système hybride photovoltaïque et pile à combustible	26

Sommaire

II.5. L'objectif du système hybride.....	27
II.6. Avantages du système hybride photovoltaïque et pile à combustible.....	28
II.7. Pile à combustible	29
II.7.1. Différents types de pile à combustible.....	29
II.7.1.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).....	29
II.7.1.2 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC).....	30
II.7.1.3 Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC).....	31
II.7.1.4 Pile à combustible à méthanol direct (DMFC)	32
II.7.1.5 Pile à combustible à réforme interne (PAFC)	32
II.7.2. Principe de fonctionnement.....	33
II.7.3. Structure de la pile à combustible	34
II.7.3.3 Plaques bipolaires.....	36
II.7.4 Auxiliaires d'une pile à combustible PEM	36
II.7.5. Pertes de la pile à combustible	37
II.7.6. Caractéristiques électriques de la pile à combustible	38
II.7.6.1 Tension électrique	38
II.7.6.2 Courant électrique	38
II.7.6.3. Puissance électrique	39
II.7.6.4 Efficacité électrique.....	39
II.7.6.5 Température de fonctionnement	39
II.8. Stockage d'hydrogène	40
II.9. Technologies d'électrolyseur	42
II.9.1. Définition d'électrolyseur	42
II.9.2. Différents types d'électrolyseur	42
II.9.3. Caractéristiques électriques électrolyseur	44
II.10. Modélisation de système hybride	46
II.10.1. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	47
II.10.2. Modélisation de la pile à combustible	49
II.10.2.1 Résistance interne.....	49
II.10.2.2 Pertes ohmiques.....	49
II.10.2.3 Surtension d'activation	49
II.10.2.4 Résistance d'activation	49
II.10.2.5. Pression d'hydrogène	49
II.10.2.6. Pression de l'oxygène	50
II.10.2.7 Pression de l'eau	50
II.10.2.8 Potentiel thermodynamique	51

Sommaire

II.10.2.9 Tension d'une cellule unitaire de la PEM	51
II.10.2.10 Tension d'un empilement (stack) :	51
II.10.2.11 Puissance d'une pile à combustible PEM :	51
II.10.2.12 Rendement d'une pile à combustible PEM	51
II.10.3 Modélisation du système de stockage (hydrogène et batterie)	52
II.10.3.1. Batteries	52
II.10.3.2 Stockage gaz.....	52
II.11 Conclusion	53
Chapitre III	22

Chapitre III Simulation du système hybride

III.1 Introduction	54
III.2 Paramètre des sources	55
III.2.1 Paramètres du panneau photovoltaïque.....	55
III.2.3 Paramètres de la pile à combustible	55
III.3 Calcul de L et C des convertisseurs	55
III.4 Caractéristiques techniques	56
III.5 Résultat de simulation	56
III.5.1 Générateur photovoltaïque (GPV).....	56
III.5.1.1 Allure de l'éclairement (G)	56
III.5.1.2 Schéma et résultat de simulation PV	57
III.6 Schéma et les résultats de simulation PV+Batt	57
III.6.1 Simulation de photovoltaïque et batterie sans charge.....	58
III.6.2 Résultat du simulation Photovoltaïque irradiation 1000w/m ²	58
III.6.3 Résultat du simulation Batterie.....	59
.....	59
Commentaire.....	59
Le niveau de stockage de la batterie varie en fonction d'état de charge :	59
Lors de l'état de charge, le niveau de stockage de la batterie (SOC) augmente.	59
• Dans le cas de la charge, la tension de la batterie est de 12.45 V avec un courant de -8 A (une puissance négative de 100 W).....	59
III.6.4 Simulation de photovoltaïque et batterie avec la charge « R »	59
III.6.5 Résultat de la simulation photovoltaïque « R »	61
Commentaire.....	61

Sommaire

Les mêmes résultats pour le GPV dans le cas de la batterie est en de charge (La constante de l'irradiation à 1000 w/m ² , la valeur de puissance de GPV est fixe de 112 w tandis que le courant 3,6 A et la tension égale 30 V).	61
III.6.6 Résultat de la simulation batterie avec la charge « R »	61
III.6.7 Résultat de la simulation du charge «R» avec photovoltaïque et la batterie .	62
III.7 Simulation de Pile à Combustible.....	63
III.7.1 Résultat de simulation de la pile à combustible	63
III.8 Système hybride	64
III.8.1 Schéma et résultat de simulation.....	64
III.8.2 Simulation de système hybride sans raccordement avec GPV.....	65
III.8.2.1 Résultat de simulation	65
III.9 Conclusion.....	70

Symboles et notations

Symboles et notations

Panneaux

Rs	: Résistance en série.
Rsh	: Résistance en parallèle.
Id	: Courant de diode.
A	: Facteur d'idéalité la cellule.
q	: La charge électrique de l'électron).
S	: Ensoleillement dans le plan des panneaux.
Sref	: Ensoleillement de référence.
Tref	: Température de référence.
T	:Température ambiante(K).
Iph	: L'intensité du photo-courant.
Icc	: Courant de court-circuit.
Ki	: La constante de Boltzmann.
E	: L'énergie du photon.
h	: la constante de Planck.
μ	: La fréquence (en hertz).
Ns	: Nombre des cellules identiques en série.
N(p)	:Nombre des cellules identique en parallèle.
vs	: La tension de sortie.
VDC	: La tension de la charge.
vi ve	: La tension d'entré.
Vpv	: Ma tension du panneau photovoltaïque.
IL	: Le courant dans l'inductance.
Van,V bn,V cn	: tension de référence .
Vdc	: Tension de bus continu.
Idc	: Courant modulé par le redresseur.
Sa,Sb,Sc	: Fonctions logiques correspondant à l'état de l'amorçage.
Ipv	: le courant du système PV.
Ires	: le courant de réseau électrique.
Icharge	: le courant de la charge.

Batterie

P : pression (Pa)

Symboles et notations

z	: facteur de compressibilité
n	: nombre de mole (mol)
R	: constantes des gaz parfaits (8,314 J.K-1mol-1)
V	: volume du stockage (m ³)
T_{cr}	: température critique (K)
p_{cr}	: pression critique (Pa).
P_{nom}	: puissance nominale de l'onduleur en watts
U_{nom}	: tension nominale de la batterie.

Pile a combustible

m'	: Débits d'hydrogène, d'oxygène et de l'eau d'entrée .
N₀	: le nombre de cellules en série,
I	: courant électrique [A],
F	: constante de Faraday [964872 C] et
U	: taux d'utilisation.
B	: la constante d'activation de tension
C	: facteur d'échelle [m.s ⁻¹]
I	: le courant électrique [A].
Kr	: une constante de modélisation.
P*H₂	: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène [atm].
P*O₂	: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène [atm].
I₀	: Courant d'échange définissant à vide les échanges électrode – électrolyte [A].
I_n	: Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de Gaz et/ ou d'électrons à travers l'électrolyte [A].
À	: Pente de la droite de « Tafel ».
R_m	: Résistance totale de la pile à combustible [Ω].
B	: Constante de transport ou de transfert de masse.
IFC	: Densité du courant de fonctionnement permanent [A/cm ²].
I_{lim}	: Densité du courant limite [A].

Liste des abréviations

Liste des abréviations

- GPV** : Générateur photovoltaïque.
- SEH** : Système Energie Hybride.
- PV** : Photovoltaïque.
- CC** : Courant Continu.
- CA** : Courant Alternatif.
- DC/DC** : Convertisseur Courant continu/ Courant continu.
- DC/AC** : Convertisseur Courant continu/ Courant Alternatif.
- EDC** : État de Charge des batteries (State Of Charge).
- SOC** : State Of Charge.
- GPV** : Générateur Photovoltaïque.
- MPP** : Maximum Power Point.
- MPPT** : Maximum Power Point Tracking.
- P&O** : Perturbation et Observation.
- FC** : Fuel Cell.
- PAC** : Pile À Combustible.
- AFC** : Alcaline Fuel Cells (piles alcalines).
- PEMFC** : Piles à membrane échangeuse de protons (proton exchange membrane fuel cells).
- PAFC** : Phosphorique Acid Fuel Cells (piles à acide phosphorique).
- SOFC** : Solid Oxide Fuel Cells (piles à électrolyte solide).
- DMFC** : Direct-Methanol Fuel Cell (piles à méthanol direct).
- PI** : Proportionnelle intégrale.
- Jonction PN** : Jonction positive/négative.
- SHSER** : Un système hybride à sources d'énergie renouvelable
- AC** : Alternative courant.
- CS** : Convertisseur statique.

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralité sur Photovoltaïque

Figure 1.1 : Système solaire hybride.	5
Figure 1.2 : Spectre électromagnétique. (Ly.2014)	6
Figure 1.3 : Carte solaire de l'Algérie au mois de juillet	7
Figure 1.4 : Cellule photovoltaïque	9
Figure 1.5. : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	9
Figure 1.6 : Processus d'absorption de la lumière dans un matériau	10
Figure 1.7 : Progrès des rendements de l'énergie solaire et des cellules solaires pour divers	11
Figure 1.8 : Structure de base des principales filières photovoltaïques actuelles.	12
Figure 1.9 : Evolution de la demande mondiale de silicium de qualités électronique et PV	13
Figure 1.10 : Différents types de hacheurs.	13
Figure 1.11 : Hacheur série.	14
Figure 1.12 : Hacheur parallèle.	14
Figure 1.13 : Hacheur à stockage inductif.	15
Figure 1.14 : Composition interne d'une batterie plomb-acide.	16
Figure 1.15 : Cellule électrochimique à plomb de base.	17
Figure 1.16 : Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis le phénomène de charge et décharge, (a) Courbe de charge, (b) Courbe de décharge.	17
Figure 1.17 : Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire	19
Figure 1.18 : Caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension d'un panneau PV	19
Figure 1.20 : Influence de la température - Puissance en fonction de la tension.	20
Figure 1.21 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement.	20
Figure 1.22 : Influence de l'irradiation- Puissance en fonction de la tension.	21
Figure 1.23 : Association des modules solaires en Mixte (Série et Parallèles)	22
Figure 1.24 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $I=f(V)$	22
Figure 1.25 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $P=f(V)$	22

Chapitre II : Système hybride photovoltaïque et pile à combustible

Figure 2.1 : Composition du système hybride en générale	26
Figure 2.2 : Description du système PV-FC	27
Figure 2.3 : Schéma de principe de conversion directe en électricité	29
Figure 2.4 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC	30
Figure 2.5 : Structure d'un empilement de cellule PEMFC	30
Figure 2.6 : Principe de la pile à combustible SOFC.	31
Figure 2.7 : Principe de pile à combustible MCFC	31
Figure 2.8 : Principe de Pile à combustible à méthanol direct (DMFC)	31

Liste des figures

Figure 2.9 : Principe de la pile à combustible à réforme interne (PAFC)	32
Figure 2.10 : Fonctionnement d'une pile à combustible	32
Figure 2.11 : Schéma principe pile à combustible .	34
Figure 2.12 : Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène	35
Figure 2.12 : Schéma synoptique d'un système à pile à combustible	36
Figure 2.13 : Courbe de polarisation d'un PEMFC. (Courbe bleue).	37
Figure 2.14 : Caractéristiques statiques de la tension (en haut) en fonction du courant du stack (température du stack 64° C)	38
Figure 2.14 : de la puissance débitée en fonction du courant du stack (température du stack 64° C)	38
Figure 2.15 : Courbes de polarisation pour une cellule de pile à combustible	39
Figure 2.16 : Courbe de la température en fonction du temps $T = f(t)$	40
Figure 2.17 : Schéma de fonctionnement d'une cellule d'un électrolyseur	40
Figure 2.18 : Système de production d'électricité à base d'hydrogène vert	42
Figure 2.19 : Influence de la température et de l'intensité sur les rendements potentiel et faradique d'un électrolyseur alcalin	43
Figure 2.20 : Influence de la pression et de l'intensité sur un électrolyseur alcalin	45
Figure 2.21 : Schéma d'une caine de conversion photovoltaïque avec MPPT	46
 Chapitre III : Simulation du système hybride	
Figure 3.1: Allure de l'éclairement dans un jour	56
Figure 3.2 : Schéma de simulation de GPV	57
Figure 3.3 : Résultats de simulation de GPV	57
Figure 3.4 : Schéma de simulation de la batterie	58
Figure 3.5 : Résultat de simulation de la GPV et la batterie en cas de charge dans 1000w /m ²	58
Figure 3.6 : Résultats de simulation de la batterie en cas de charge.	59
Figure 2.7 : Les données de la charge utiliser($R=1.67\Omega$ et $L=0H$)	60
Figure 3.8 : Résultats du simulation de la batterie en cas de décharge	60
Figure 3.9 : Résultats de simulation de GPV et la batterie en cas de décharge.	61
Figure 3.10 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge.	62
Figure 3.11 : Résultats de simulation de la charge si le système en cas de décharge.	63
Figure 3.12 : schema de la simulation de la pile combustible	63
Figure 3.13 : L'allure de la pile à combustible	64
Figure 3.14 : Résultats de la simulation de la pile à combustible.	64
Figure 3.15 : Schéma de simulation de système hybride	65
Figure 3.16 : L'alimentation de charge « R » avec PV, BATTERIE et PILE A Combustible.	65
Figure 3.17 : Résultats de simulation de GPV avec coupure Ir après 2 s	66
Figure 3.18 : Résultats de simulation de Batterie avec coupure Ir après 2 s.	66
Figure 3.19 : Résultats de simulation de répartition de Batterie après 2 s	67
Figure 3.20 : Résultats de simulation de pile a combustible avec coupure Ir après 2s	68
Figure 3.21 : Résultats de simulation de pile à combustible et batterie après 2s	68
Figure 3.22 : Résultat du simulation de la charge « R » du système hybride proposer.	69

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1.1 potentiel solaire :	06
Tableau 1. 2 : Les différentes générations des cellules photovoltaïques	10
Tableau 2.1 : Différents types de piles à combustible	33
Tableau 2.2 : Comparatif des 3 technologies de l'électrolyseur	43
Tableau 3.1 : paramètres du panneau photovoltaïque	55
Tableau 3.1 : Paramètres de la Batterie	55
Tableau 2.3 : Paramètres de la pile à combustible	55
Tableau 3.4 : Caractéristiques du module RCU-4500	56

Introduction

Générale

Introduction générale

La demande mondiale en énergie connaît une croissance exponentielle dans toutes les régions du monde, en raison de l'augmentation de la population mondiale et de l'activité industrielle des pays en développement, ce qui entraîne une forte augmentation des besoins énergétiques.

Traditionnellement, cette énergie est fournie par des sources fossiles telles que le pétrole et le gaz. Cependant, la consommation excessive de ces ressources limitées conduit à leur épuisement progressif et intensifie les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la pollution de l'atmosphère et au changement climatique. Face à ces conséquences, il est impératif de développer des sources d'énergie alternatives, également appelées énergies renouvelables.

L'utilisation des énergies renouvelables comme solution écologique de remplacement des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire présente de nombreux avantages. En effet, ces sources d'énergie sont inépuisables, non polluantes et très adaptées à la production décentralisée. De plus, les technologies nécessaires à leur utilisation quotidienne sont désormais bien développées. L'exploitation de ces énergies renouvelables pour la production d'électricité s'avère particulièrement rentable dans les sites isolés, où l'extension du réseau électrique serait économiquement peu viable.

Cependant, comme toutes les sources d'énergie, les énergies renouvelables présentent également quelques inconvénients. Tout d'abord, le coût des installations nécessaires peut être relativement élevé, même si elles offrent une durabilité sur plusieurs années. De plus, la disponibilité de la plupart de ces sources d'énergie verte dépend des conditions climatiques. Par exemple, les jours sans vent ou sans suffisamment de lumière solaire peuvent sérieusement limiter la production d'énergie éolienne et solaire, et ces sources peuvent ne pas être disponibles à tout moment de la journée.

Pour remédier à ces défis, il était nécessaire de trouver une solution adaptée et optimale, ce qui a conduit à l'idée d'un système hybride. Ce système hybride a démontré une grande efficacité pour surmonter les limitations des sources d'énergie renouvelables individuelles et garantir un approvisionnement énergétique fiable et continu.

En 1839, il a découvert le principe de l'électrolyse inversée, qui est à la base du fonctionnement des piles à combustible. Cependant, à cette époque, la technologie était expérimentale et n'a pas connu d'applications pratiques. par la suite,

Introduction générale

En 1954, les scientifiques aux États-Unis ont créé la première cellule solaire en silicium qui avait un rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité d'environ 6%.

Le développement des systèmes hybrides, combinant l'énergie photovoltaïque, les batteries et les piles à combustible, remonte aux dernières décennies. L'utilisation généralisée des panneaux solaires photovoltaïques a ouvert la voie à l'intégration de ces systèmes hybrides pour une production d'électricité plus stable et fiable.

Dans ce contexte, notre travail a consisté à faire une simulation d'un système hybride combinant l'énergie photovoltaïque, batterie et pile à combustible pour assurer l'alimentation électrique d'une motopompe en continu. Pour ce la, notre travail sera structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une généralité sur photovoltaïque et la batterie suivi par chapitre 2 qui est consacré à la définition de système hybride. Dans le chapitre 3, une simulation d'un système hybride combinant les trois (03) énergies (Photovoltaïque, batterie et pile à combustible) a été réalisée.

CHAPITRE I

Généralité sur Photovoltaïque

I.1. Introduction

La conversion photovoltaïque permet d'obtenir de l'électricité directement et indépendamment d'équipements fiables et performants. Il existe deux types d'installations :

- Non Autonomes, connecté directement au réseau électrique
- Autonomes, ils ne sont pas connectés au réseau électrique et doivent répondre aux besoins de la charge.

Dans de tels endroits, l'énergie solaire peut jouer un rôle important pour le consommateur : éclairage général et domestique, pompage de l'eau, etc. Différents types de systèmes d'alimentation solaire autonomes ont la possibilité de se connecter directement à une charge appropriée ou de se connecter à un adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking).



Figure 1.1 : Système solaire hybride [1].

I.2. Le rayonnement solaire

Le soleil est l'une des nombreuses étoiles. Son diamètre est de $13 \times 10^9 km$, soit environ 50 fois celui de la Terre. Il est constitué d'un mélange de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'éléments 100, tous des éléments chimiques depuis Langevin et Perrin (basé sur la relativité). Le soleil peut être alimenté en énergie grâce à la fusion nucléaire. Aujourd'hui, les gens s'accordent à dire que le soleil est une bombe thermonucléaire à hydrogène et hélium en transition. Convertit 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium

par seconde ; La réaction a lieu en son cœur à une température d'environ 25 millions de degrés Celsius. C'est pourquoi le soleil émet 4 millions de tonnes de rayonnement par seconde et la vitesse de la lumière est de 300 000 km/s et il faut environ 8 minutes pour atteindre la terre. Sa distribution spectrale dans l'atmosphère est représentée sur la figure et la longueur d'onde maximale est d'environ 0,5 μm . La température du corps noir à la surface du Soleil est d'environ 5780° k :

- Diamètre du soleil $D_s = 139.10^9 m$.
- Diamètre de la Terre $D_T = 127107 m$.
- La distance moyenne du Soleil à la Terre $L_{ts} = 151011 m$.

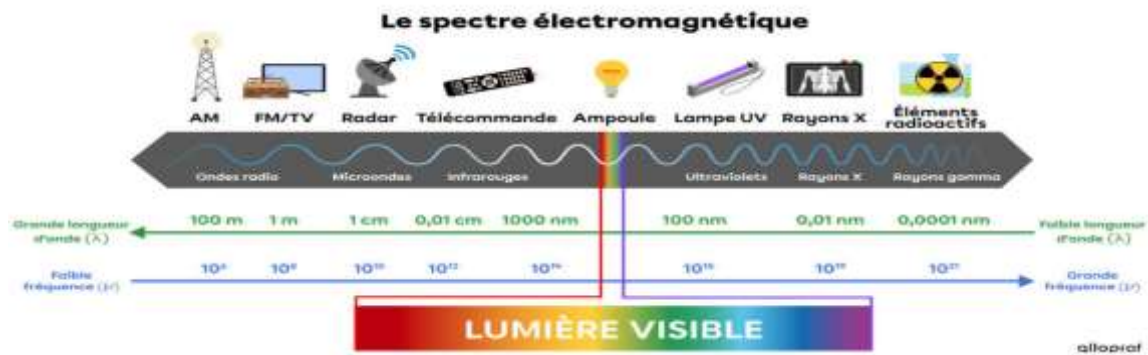


Figure 1.2 : Spectre électromagnétique. (Ly.2014)[2]

I.2.1. Facteurs influents sur le rayonnement solaire

On distingue :

- La localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude),
- La saison, l'heure et l'altitude du lieu,
- Les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...).

I.2.2 Potentiel solaire en Algérie

Le potentiel d'énergies renouvelables du pays est dominé par l'énergie solaire. Grâce à sa situation géographique, l'Algérie possède l'une des zones solaires les plus élevées au monde. Le soleil brille plus de 2 000 heures par an dans presque tout le pays, et il peut atteindre 3 900 heures dans les hautes terres et le désert du Sahara. Dans l'ensemble du pays, l'énergie journalière disponible est d'environ 5 kWh/m² sur la surface horizontale, d'environ 1700 kWh/m²/an dans la région nord et d'environ 1700 kWh/m²/an dans la région sud. Cette ressource d'énergie solaire représente plus de 5 milliards de GWh, soit près de 108 fois la

consommation d'électricité du pays. Les évaluations du Centre allemand de l'aviation (DLR) fournissent les informations suivantes :

- Une zone de 1 km² au Sahara peut produire 50 MW d'électricité, soit 200-300 GWh/an.
- Dans la zone saharienne de 1 km², 200 000 émissions de TCO₂ sont évitées par an.

Tableau 1.1 .potentiel solaire :

Régions	Région cotière	Hauts Plateaux	Sahara
Supecificie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'enselement(heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne recue(Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

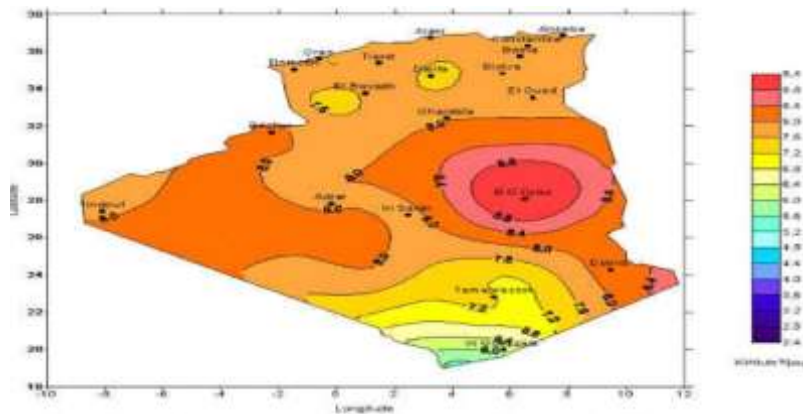


Figure 1.3: Carte solaire de l'Algérie au mois de juillet [2]

I.3. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en électricité utilisable. Il est composé de cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques, qui sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe les cellules solaires, elle excite les électrons présents dans le matériau, générant ainsi un courant électrique.

Les générateurs photovoltaïques sont utilisés pour produire de l'électricité dans les installations solaires résidentielles, commerciales et industrielles. Ils sont souvent installés sur les toits des bâtiments ou sur des structures spécialement conçues, appelées trackers solaires, qui suivent le mouvement du soleil pour maximiser la capture de lumière.

Les générateurs photovoltaïques peuvent être raccordés au réseau électrique, ce qui signifie qu'ils fournissent de l'électricité à la fois pour la consommation immédiate et pour un surplus qui peut être injecté dans le réseau. Ils peuvent également être utilisés en système hors réseau, où l'électricité est stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure lorsque le soleil n'est pas disponible.

L'efficacité des générateurs photovoltaïques dépend de facteurs tels que l'intensité de la lumière solaire, la température ambiante et l'angle d'inclinaison des cellules solaires. Les progrès technologiques dans le domaine de l'énergie solaire ont permis une amélioration significative de l'efficacité des générateurs photovoltaïques et une réduction des coûts, ce qui en fait une source d'énergie renouvelable de plus en plus attractive.

I.3.1 Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Elles sont fabriquées à partir de semi-conducteurs tels que le silicium.

Lorsque la lumière du soleil frappe une cellule photovoltaïque, elle génère un courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques sont utilisées dans les générateurs photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire.

Il existe différents types de cellules solaires, dont les cellules monocristallines, polycristallines et à couche mince.

L'efficacité des cellules photovoltaïques varie en fonction de divers facteurs, tels que le matériau utilisé et les conditions environnementales.

Les avancées technologiques visent à améliorer l'efficacité et à réduire les coûts des cellules photovoltaïques.

Les cellules photovoltaïques sont des sources d'énergie renouvelable propre et durable.

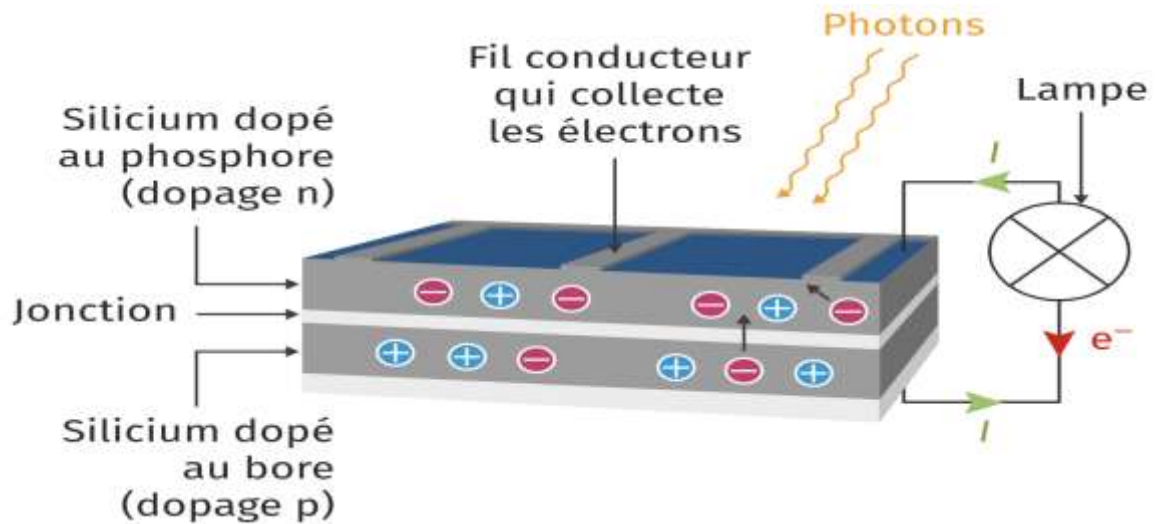


Figure 1.4 : Cellule photovoltaïque [3]

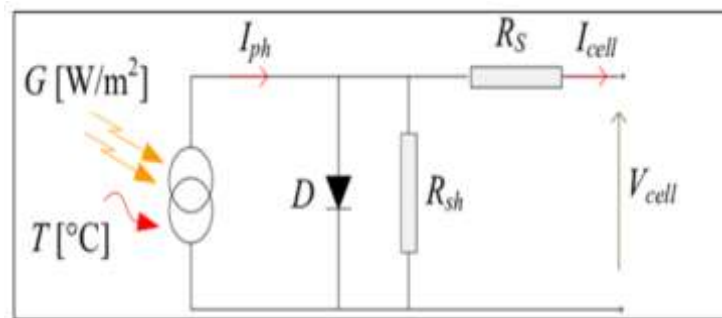


Figure 1.5. : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [4].

I.3.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique:

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbées charges électriques libres se forme les charges.
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

Un dispositif photovoltaïque doit être constitué :

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- D'une structure de collecte de résistance électrique la plus faible possible [5]

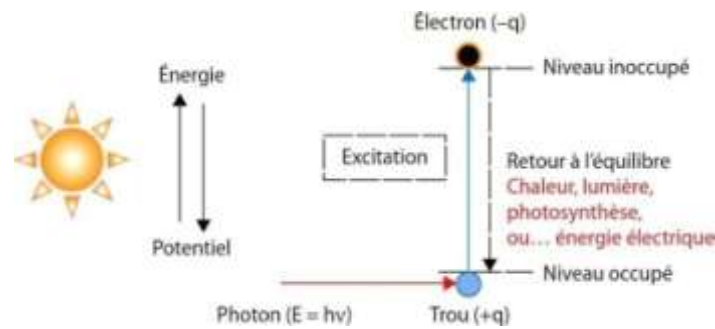


Figure 1.6 : Processus d'absorption de la lumière dans un matériau [6]

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant. L'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque à fin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons-trous créée. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. [7]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région:

- Dans la zone n où p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont chassés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils sont majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créés par incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photo-courant.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [8].

I.3.1.3. Matériaux et technologies des cellules photovoltaïques

Plusieurs recherches ont été effectuées sur la technologie des cellules photovoltaïques pour améliorer le rendement et diminuer les coûts. Pour augmenter les rendements, la tendance doit comporter des couches minces en tandem silicium amorphe, silicium microcristallin et aux cellules à multicouches associant des semi-conducteurs de sensibilités complémentaires.

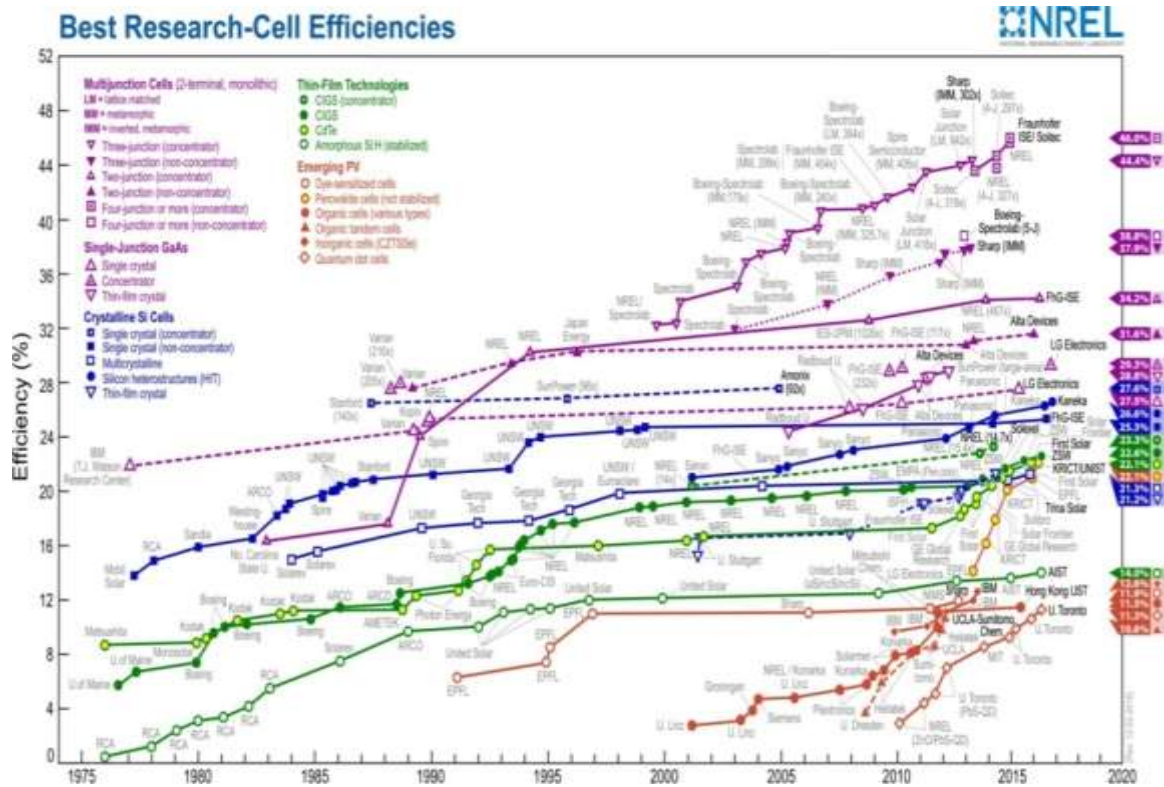


Figure 1.7 : Progrès des rendements de l'énergie solaire et des cellules solaires pour divers dispositifs de recherche ou de laboratoire (NREL) [9].

On peut classer les générations des cellules solaires dans le tableau (1.2).

Tableau 1.2 : Les différentes générations des cellules photovoltaïques [10].

La première génération	Les wafers de silicium monocristal (c -Si) ou bien multi-cristallin (mc-Si).
La deuxième génération Couches minces	Le silicium amorphe (a-Si). Le silicium microcristallin (μ c-Si). Le tellure de cadmium (CdTe). Le Cuivre-gallium-indium-diséléniure (CIGS) et leurs alliages.
La troisième génération	Cellules solaires à base des nano-cristaux. Cellules solaires à base des concentrateurs (CPV). Cellules photo-électrochimiques (PEC) Cellules solaires organiques. Cellules solaires à base de colorant sensibilisé (Dye-sensitized) DSSC.
La quatrième génération	Hybride - cristaux inorganiques dans une matrice de polymère.

I.3.1.4. Technologies photovoltaïques

Le silicium a dominé la plupart des applications de semi-conducteurs depuis plus de 60 ans. C'est le second matériau le plus abondant de la croûte et l'enveloppe terrestre, stable et non toxique, sa technologie est très développée, et dans sa forme cristalline il a une bande interdite presque idéale ($E_g = 1,12$ eV) pour la conversion d'énergie solaire photovoltaïque. Il n'est donc pas surprenant de constater que le silicium a été le matériau photovoltaïque dominant dans les applications de cellules solaires pendant la majeure partie de cette période. La réalisation de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin reste toujours la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet l'absorption optique du silicium permet une exploitation satisfaisante du spectre du soleil. Ce matériau abondant sur terre et sans doute le mieux connu scientifiquement suite aux recherches sur les technologies de fabrication pour l'industrie du semi-conducteur (Conibeer et Willoughby .2014). On distingue différents types :

- Silicium Monocristallin
- Silicium Poly cristallin
- Silicium Amorphe

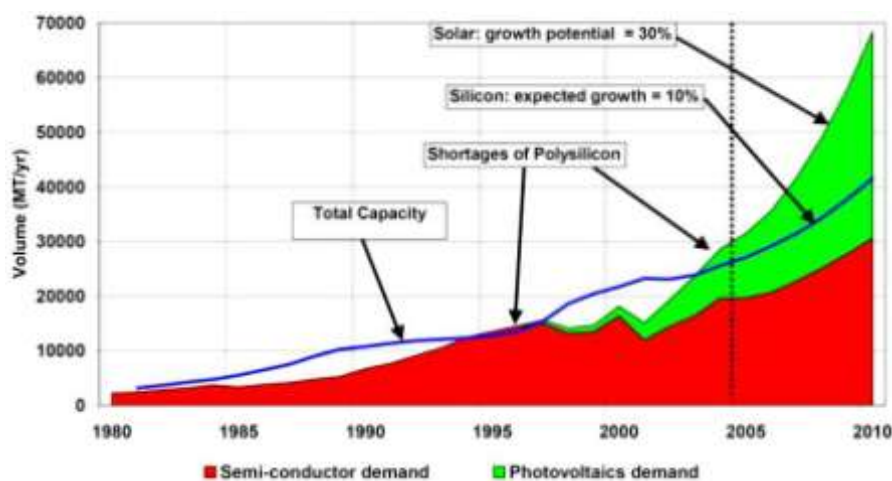


Figure 1.9 : Evolution de la demande mondiale de silicium de qualités électronique et photovoltaïque [12].

I.3.2. Convertisseurs DC/DC

Le hacheur est un convertisseur DC-DC qui peut réguler le transfert d'énergie entre alimentation DC et récepteur, l'alimentation et le récepteur peuvent être de nature capacitive (source de tension) ou de nature inductive (source de courant) [13].

I.3.2.1. Différents types des hacheurs

Selon le chemin de l'énergie électrique entre la source d'alimentation et la charge, on peut distinguer les hacheurs: réversibles et non réversibles (**Figure 1.10**).

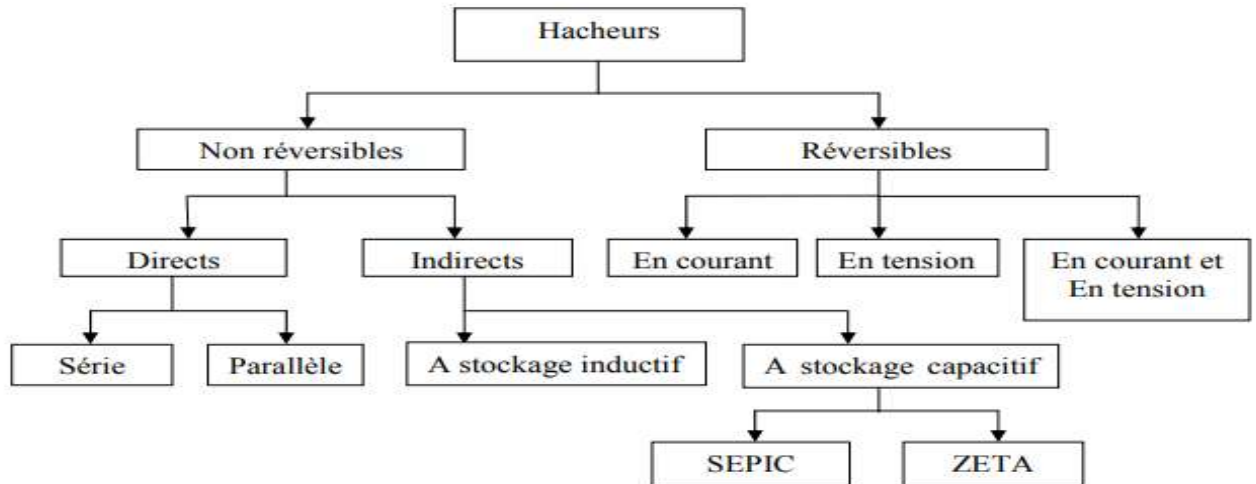


Figure 1.10 : Différents types des hacheurs.

a) Les hacheurs à liaison directe :

Le hacheur de liaison directe est une matrice de commutation connectée au générateur et le destinataire. On distingue:

Hacheur dévolteur ou série (Buck)

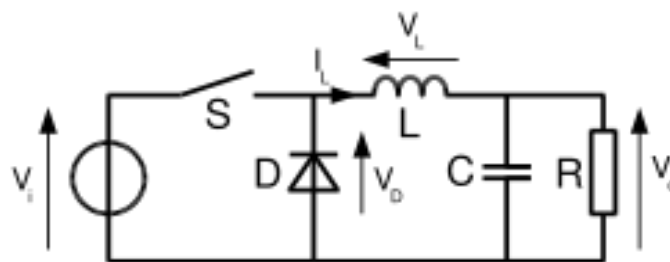


Figure 1.11 : Hacheur série.

On en déduit que :

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et en courant.

S : pourra s'agir d'un transistor de puissance (bipolaire, MOSFET, IGBT, ...) ou d'un thyristor.

D : la caractéristique d'une diode.

Hacheur survolteur ou parallèle (Boost)

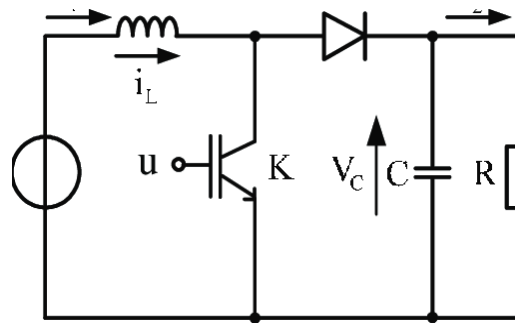


Figure 1.12 : Hacheur parallèle.

Le hacheur parallèle est un convertisseur DC-DC de type boost direct. De La source d'entrée est de type DC (inductance en série avec l'alimentation) [14].

b) Hacheurs à liaison indirecte :

Le hacheur à liaison directe ne permet pas le réglage de la transmission d'énergie entre différents types de sources d'alimentation, une tension et un autre courant. Si on veut réguler le transfert d'énergie entre deux sources d'énergie de même nature, on doit utiliser des convertisseurs indirects.

Hacheur parallèle-série ou à stockage inductif (Buck-Boost)

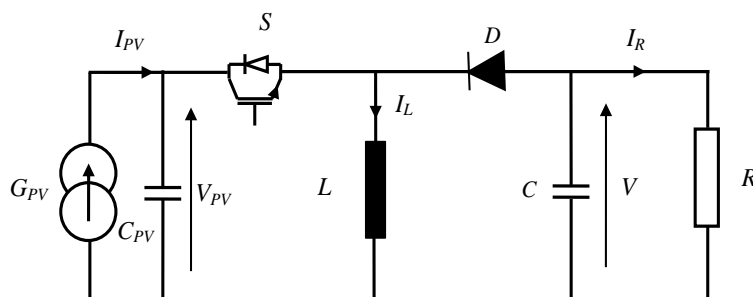


Figure 1.13 : Hacheur à stockage inductif.

C'est un montage abaisseur-élevateur de la tension de sortie. De plus c'est un montage inverseur de tension. Le convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible ou plus grande. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs buck et boost est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E .

I.3.3. Stockage

L'un des inconvénients majeur des systèmes photovoltaïques réside dans les pénuries permanentes de l'énergie solaire, qui sont dues aux diverses raisons. Parmi les quelles on dénote :

- L'apport périodique de l'énergie solaire (alternances jour/nuit, été/hiver) ;

- L'effet météorologique aléatoire,
- durée d'ensoleillement qui est subordonnée aux différentes saisons (position du soleil par rapport au zénith), ...etc.
- En conséquence, chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport solaire, le stockage de l'électricité se révèle alors très important. Pour cela le système tampon le plus couramment utilisé pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques bien connue dans le domaine automobile.
- Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs "réversibles" c'est à dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Ces réactions consistent des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie.
- De nombreux types d'accumulateurs électrochimiques existent (Pb, CdNi, NiZn,...), toutefois un des plus anciens et des plus couramment utilisés dans l'automobile est l'accumulateur au plomb. Celui-ci subit des perfectionnements constants pour améliorer ses performances en vue de l'utilisation la mieux adaptée au photovoltaïque.

I.3.3.1 Composition

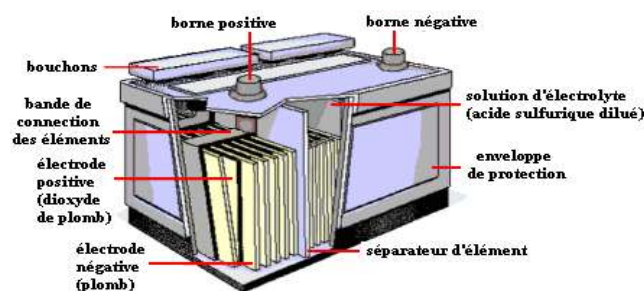


Figure 1.14 : Composition interne d'une batterie plomb-acide.

Une batterie plomb-acide est généralement composée de:

- L'électrode positive est une plaque rectangulaire en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont disposées des lamelles ou des tubes constitués par des oxydes de plomb.

- L'électrode négative est une plaque de plomb à surface gaufrée dont les alvéoles sont garnis de plomb spongieux.
- L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie.
- Organisation : L'énergie qu'on peut emmagasiner dans un accumulateur étant proportionnelle à la surface des électrodes, on a intérêt à augmenter leurs dimensions. Pour éviter un trop grand encombrement, on constitue deux faisceaux de plaques parallèles positives et négatives intercalées. L'ensemble des plaques est immergé dans l'électrolyte contenu dans un bac en matière isolante (verre ou matière plastique).

I.3.4 Principe de fonctionnement

Pendant la décharge, la concentration de l'acide sulfurique décroît. Inversement, l'acide sulfurique se reforme pendant la charge. Le moyen le plus sûr de vérifier l'état de charge est de mesurer la densité de l'électrolyte, ce qui permet de connaître la concentration en acide.

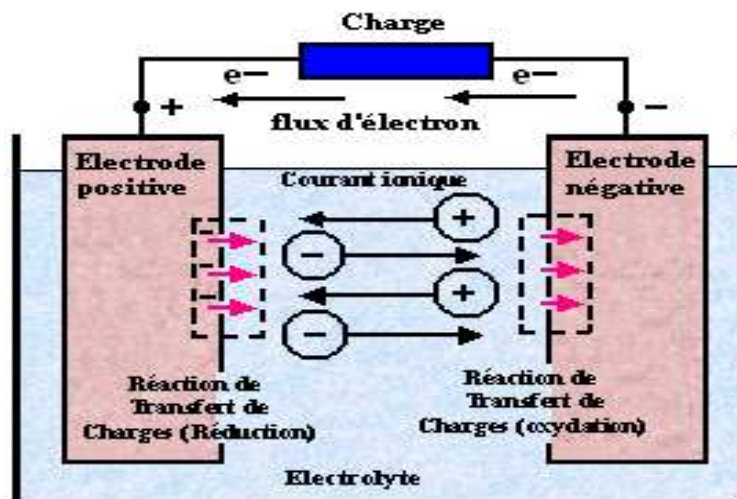


Figure 1.15 : Cellule électrochimique à plomb de base [19].

En fin de charge, si on prolonge le passage du courant, l'hydrogène et l'oxygène résultant de la décomposition de l'eau finissent par se dégager à l'état gazeux sur les électrodes (Electrolyse). Si la décharge se produit trop longtemps, ou si on ne surveille pas la concentration d'acide sulfurique, celui-ci peut attaquer les plaques en donnant du sulfate de

plomb qui n'est plus détruit par la suite. L'accumulateur en sulfate, il finit par devenir inutilisable.

I.3.5 Caractéristiques électrique

➤ Tension $U(t)$:

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,7V et 2,4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement

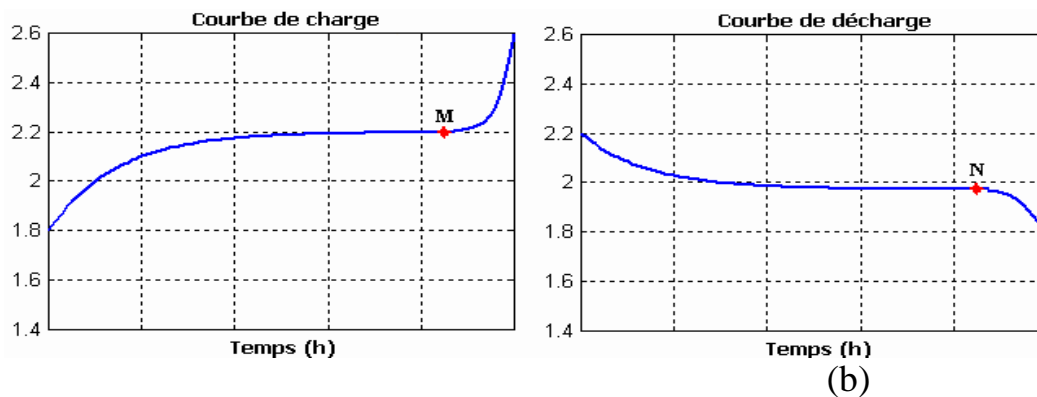


Figure 1.16 : Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis le phénomène de charge et décharge, (a) Courbe de charge, (b) Courbe de décharge. [19]

➤ Charge :

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V.

En fin de charge (point **M**) figure 1.14 (a), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V en charge cyclique. En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément.

➤ Décharge :

Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps comme l'indique la figure 1.14. (b). Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. À partir du point **N**, elle diminue brusquement (1,8 V), il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques.

En pratique, on ne descend pas en général en dessous de 20 % de la capacité batterie. Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où baisse de tension.

➤ **Résistance interne :**

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible et négligeable en général, dans les applications numériques. Cette faible résistance interne présente d'ailleurs un inconvénient : quand les deux bornes sont accidentellement réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible, l'intensité du courant débité est considérable, l'accumulateur, mis ainsi en court-circuit, est rapidement rendu hors usage.

➤ **Capacité :**

C'est la quantité d'électricité, évaluée habituellement en ampères- heures (Ah), qu'un accumulateur chargé peut faire circuler pendant la période de décharge. La capacité d'un élément est fonction du régime de décharge, la capacité nominale (C_n) d'une batterie étant donnée, généralement pour :

- Un régime de décharge en 10 h ($C/10$).
- Un régime de décharge plus élevé ($I > C/10$) la capacité diminue.
- Un régime de décharge plus faible ($I < C/10$) la capacité augmente.

I.3.6 Caractéristiques de GPV

I.3.6.1 Caractéristiques électriques I(V) et P(V)

La principale caractéristique d'une cellule solaire est la caractéristique I-V, dont la valeur montre comment la cellule solaire réagit à toutes les charges possibles dans certaines conditions d'ensoleillement et de température. Nous expliquons les trois points importants de la courbe de la **figure 1.16** :

- Point de fonctionnement optimal où la cellule produit le maximum de puissance (point 5).
- Le point où la tension est nulle et le courant est le plus grand (court-circuit, point 4).
- Le point où le courant est nul et la tension maximale (tension en circuit ouvert, point 1).
- De plus, la caractéristique de courbe IV peut être divisée en deux régions :
- Région (1-2) où l'élément est considéré comme une source de tension.

- L'intervalle (3-4) dans lequel la cellule est considérée comme une source de courant.

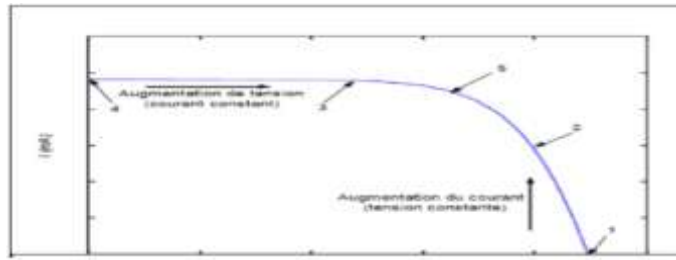


Figure 1.17 : Caractéristique typique I-V d'une cellule solaire [18]

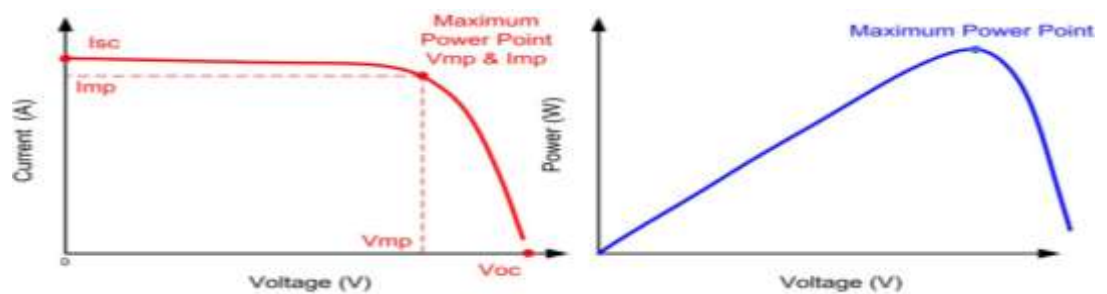


Figure 1.18 : Caractéristiques électriques courant-tension et puissance-tension d'un panneau photovoltaïque [15]

Nous pouvons définir :

- **Puissance maximale** : La puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque est le produit de la tension de sortie de panneau photovoltaïque V_{op} et du courant de sortie de panneau photovoltaïque I_{op} comme indiqué dans la formule (1.1) :

$$P_{max} = V_{op} * I_{op} \quad (1.1)$$

- **Puissance crête** : La puissance électrique produite par un module est variée en fonction du rayonnement solaire, la puissance crête d'un module est la puissance donnée sous un éclairage de 1000 W / m^2 et pour la température de référence de 25°C de la cellule.
- **Rendement** : le rendement passe par le point de puissance maximum et il dépend des conditions de fonctionnement électrique (courant, tension) des cellules. Il existe des principaux facteurs qui influencent directement sur le rendement de la cellule photovoltaïque, comme [16].

Absorption incomplète des photons : seuls les photons avec une énergie E tel que ($E=h\nu$) supérieure à E_g (E_g : largeur de la bande interdite) sont absorbés. Par exemple, il représente l'énergie spatiale. Avec : E : l'énergie du photon.

h : la constante de Planck, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ [J.s].

ν : la fréquence (en hertz). ^

Excès d'énergie : l'excès d'énergie des photons absorbés ($h\nu-E_g$) n'est pas utilisé pour former des paires électron-trou. Disparaît sous forme de chaleur.

Réflexion sur la surface : seule une partie du flux entrant est absorbée dans le matériau. L'autre partie réfléchi par la surface est souvent perdue. Cette perte due au semi-conducteur peut être réduite par des traitements de surface pour forcer le rayonnement dans le semi-conducteur.

I.3.6.2 Caractéristique courant-tension d'un module

Le courant produit par un module varie en fonction des schémas courant / tension et puissance / tension. Cela dépend de la lumière du soleil et de la température des cellules.

I.4 Influence de GPV

Les générateurs photovoltaïques sont influencés par plusieurs facteurs, notamment la température, l'irradiation solaire et l'association mixte de différentes technologies photovoltaïques. Voici comment ces influences peuvent se manifester :

I.4.1 Influence de la température sur le générateur PV

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques. Les figures 1.17 et 1.18 montre l'effet de la température sur les propriétés de la cellule PV. Influence de la température sur le générateur PV La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques. **Les figures 1.19 et 1.20** montre l'effet de la température sur les propriétés de la cellule PV. En changeant la température de 0°C à 75°C , les caractéristiques I-V et P-V sont données dans les figures suivantes :

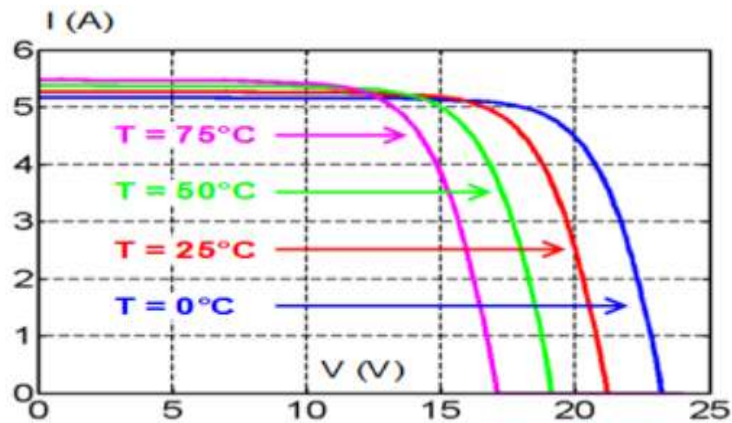


Figure 1.19 : Corrélation-Tension-Température-panneau solaire .[15]

C'est pour cette raison que souvent la production photovoltaïque est plus élevée au printemps que l'été.

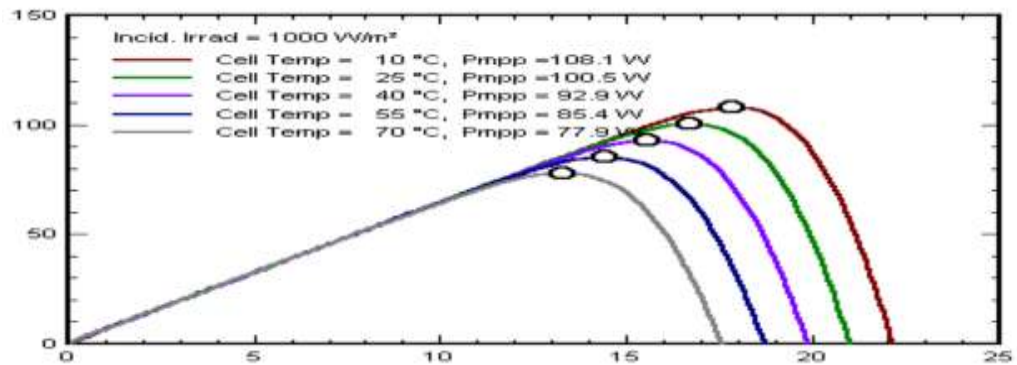


Figure 1.20 : Influence de la température - Puissance en fonction de la tension [17].

I.4.2 Influence de l'irradiation sur le générateur PV

Les figures 1.21 et 1.22 illustrent l'éclairement sur le panneau à une température $T = 25^\circ\text{C}$. En changeant l'éclairage entre 200 w / m^2 et 1000 w / m^2 [4]

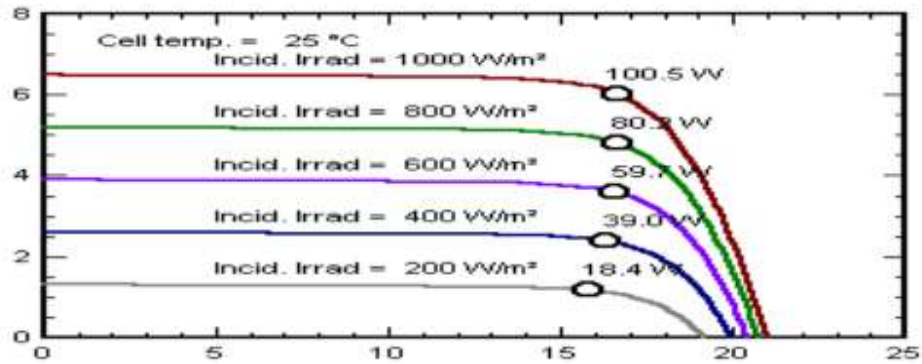


Figure 1.21 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à température constante en fonction de l'éclairement [17].

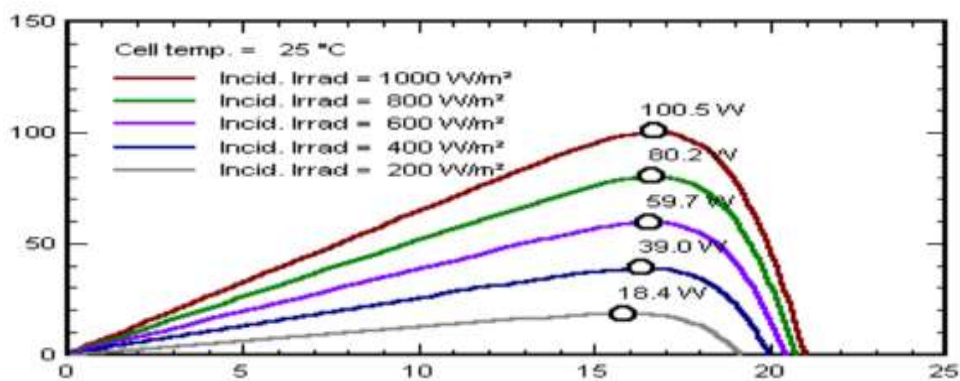


Figure 1.22 : Influence de l'irradiation- Puissance en fonction de la tension [17].

I.4.3 Influence de l'association mixte (Série et Parallèle)

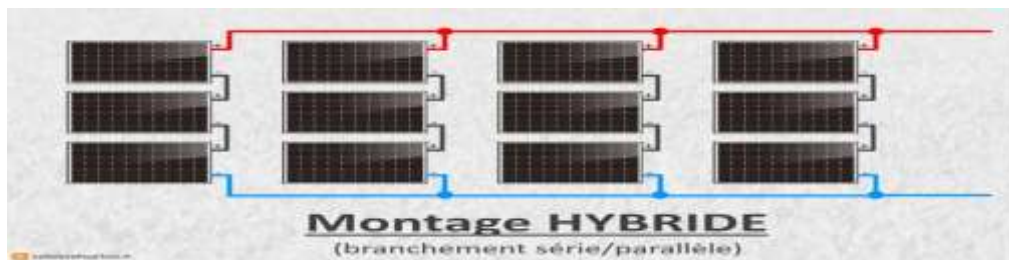


Figure 1.23 : Association des modules solaires en Mixte (Série et Parallèles)[18]

Les figures 1.24 et 1.25 illustrent les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série/parallèle :

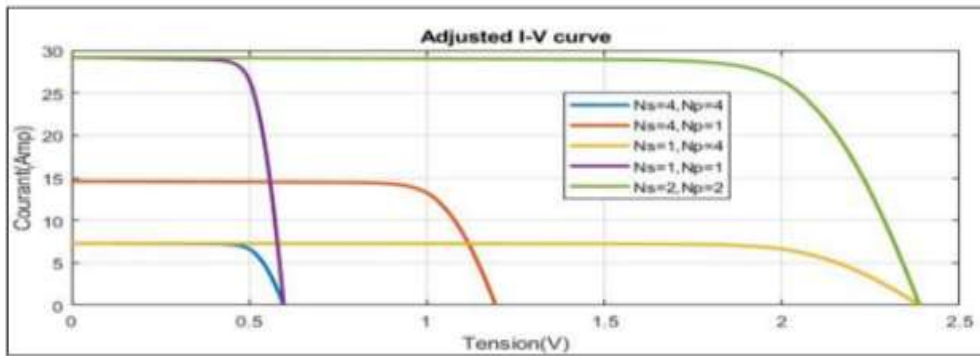


Figure 1.24 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $I=f(V)$ [18]

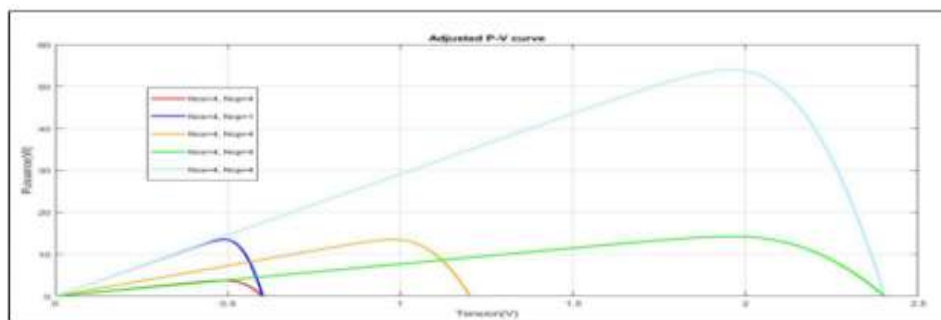


Figure 1.25 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $P=f(V)$ [18]

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les principes fondamentaux de l'énergie solaire, les convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques et la construction des caractéristiques électriques des panneaux solaires. Dans le prochain chapitre, nous aborderons le sujet des systèmes hybrides combinant l'énergie photovoltaïque et les piles à combustible.

Chapitre II

Systeme hybride
photovoltaïque et pile à
combustible

II.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques et les piles à combustible sont deux technologies de production d'énergie propre et renouvelable qui jouent un rôle crucial dans la transition vers une société plus durable et économe en énergie.

D'un autre côté, les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui utilisent une réaction chimique pour produire de l'électricité. Les piles à combustible sont utilisées dans diverses applications, y compris les véhicules électriques à pile à combustible, les systèmes de cogénération et les dispositifs portables, offrant une alternative propre et efficace aux moteurs à combustion interne.

Les deux technologies, contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à promouvoir la durabilité énergétique.

Les systèmes photovoltaïques peuvent dépendre de l'ensoleillement et progresser des coûts initiaux d'installation, bien que les avancées technologiques aient réduit ces obstacles. Les piles à combustible, quant à elles, sont confrontées à des défis tels que la production d'hydrogène durable et bon marché, ainsi que le développement de systèmes de stockage efficaces.

II.2. Définition du système hybride

Un système hybride est un système qui combine deux ou plusieurs sources d'énergie différentes pour répondre aux besoins énergétiques d'un système ou d'une application spécifique. Ces sources d'énergie peuvent être de types différents, tels que les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, biomasse) et les sources d'énergie conventionnelles (gaz, diesel). L'objectif d'un système hybride est d'optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie afin d'améliorer l'efficacité énergétique, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de garantir un approvisionnement énergétique fiable et continu. Les systèmes hybrides sont utilisés dans une variété de domaines, tels que la production d'électricité, les véhicules hybrides, les systèmes de chauffage et de refroidissement, et les applications industrielles.

II.3. Composition du système hybride général

La composition d'un système hybride général peut varier en fonction de son application spécifique, qu'il s'agisse d'un véhicule hybride, d'un système de production d'énergie ou d'une autre utilisation. Cependant, voici une composition générale que l'on retrouve souvent dans les systèmes hybrides :

- Source d'énergie principale : Un système hybride comprend une source d'énergie

principale qui peut être un moteur à combustion interne (essence, diesel, gaz naturel, etc.) ou un générateur électrique alimenté par des combustibles fossiles. Cette source d'énergie principale fournit généralement une puissance de base constante.

- Source d'énergie secondaire : Un système hybride intègre également une source d'énergie secondaire plus propre et généralement renouvelable. Cela peut inclure des batteries, des supercondensateurs, des panneaux solaires, des éoliennes ou d'autres technologies de production d'énergie renouvelable. La source d'énergie secondaire est utilisée pour compléter ou remplacer la source d'énergie principale, en fournissant de l'énergie supplémentaire ou en prenant le relais lorsque les conditions le permettent.
- Système de stockage d'énergie : Un système hybride comprend un système de stockage d'énergie pour stocker l'énergie produite par la source d'énergie secondaire ou récupérée lors de la régénération. Les batteries sont souvent utilisées comme système de stockage d'énergie dans les véhicules hybrides, tandis que d'autres systèmes de stockage, tels que les réservoirs d'hydrogène, peuvent être utilisés dans d'autres applications.

Système de gestion de l'énergie : Un système hybride nécessite un système de gestion de l'énergie pour coordonner et optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie. Ce système de gestion surveille les conditions de charge, les niveaux de stockage d'énergie, les demandes de puissance et prend des décisions pour optimiser l'efficacité et les performances du système hybride.

- Composants auxiliaires : Outre les éléments mentionnés ci-dessus, un système hybride peut comprendre d'autres composants auxiliaires tels que des convertisseurs d'énergie, des inverseurs, des régulateurs de tension, des systèmes de refroidissement, des systèmes de contrôle et d'autres composants nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système hybride.

Il est important de noter que cette composition générale peut varier selon les spécifications et les technologies utilisées dans chaque système hybride particulier

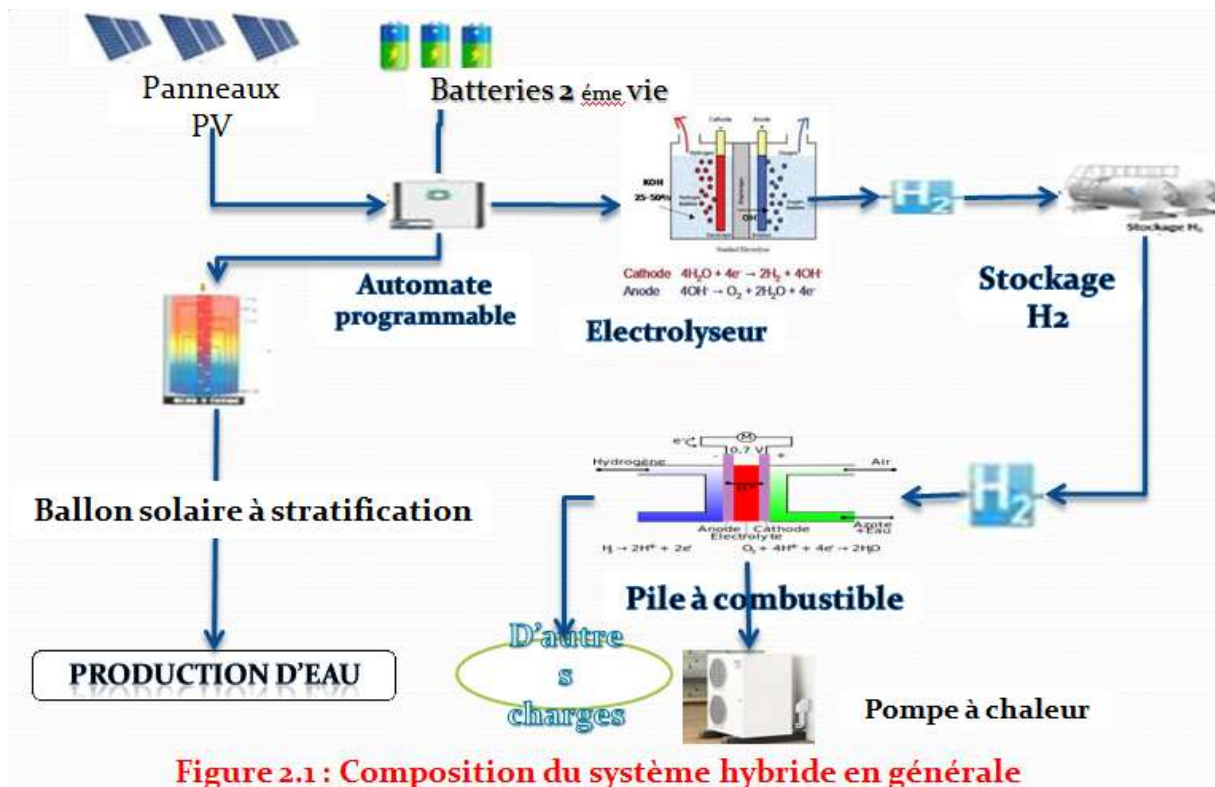


Figure 2.1 : Composition du système hybride en générale

II.4. Principe fonctionnement du système hybride photovoltaïque et pile à combustible

Les panneaux solaires photovoltaïques captent l'énergie solaire et la convertissent directement en électricité. Cette électricité peut être utilisée pour alimenter les appareils électriques du bâtiment ou être stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure.

La pile à combustible utilise l'hydrogène comme combustible pour produire de l'électricité. L'hydrogène peut être un produit de l'électrolyse de l'eau, qui sépare les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide de l'excédent électrique solaire.

L'hydrogène produit par l'électrolyse peut être stocké dans des réservoirs spéciaux pour une utilisation ultérieure. Cela signifie que les énergies du stockeur sont complètement énergétiques, sous forme d'hydrogène, qui peut être converties en alimentation électrique.

La combinaison de la pile à combustible et de l'énergie photovoltaïque peut offrir plusieurs avantages. Voici quelques raisons pour lesquelles ces deux technologies peuvent être intégrées :

- Production d'électricité continue : Les panneaux solaires photovoltaïques dépendent de la lumière du soleil pour produire de l'électricité, ce qui signifie que leur production varie en fonction des citadins et de l'ensoleillement. Intégrant une pile à combustible à la configuration, vous pouvez utiliser l'électricité excédentaire produite par les panneaux solaires pour produire de l'hydrogène, qui peut être stocké et utilisé

pour produire de l'électricité lorsque l'énergie solaire est insuffisante. Cela permet d'assurer une alimentation électrique plus constante et fiable.

- **Stockage d'énergie :** Les piles à combustible peuvent servir de système de stockage d'énergie à long terme. Lorsque les panneaux solaires produisent plus d'électricité que nécessaire, l'énergie excédentaire peut être utilisée pour produire de l'hydrogène via la pile à combustible. Cet hydrogène peut ensuite être stocké et utilisé lorsque l'énergie solaire est moins disponible, par exemple pendant la nuit ou par temps nuageux. Cela permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et de réduire les pertes dues à une production excédentaire ou insuffisante.

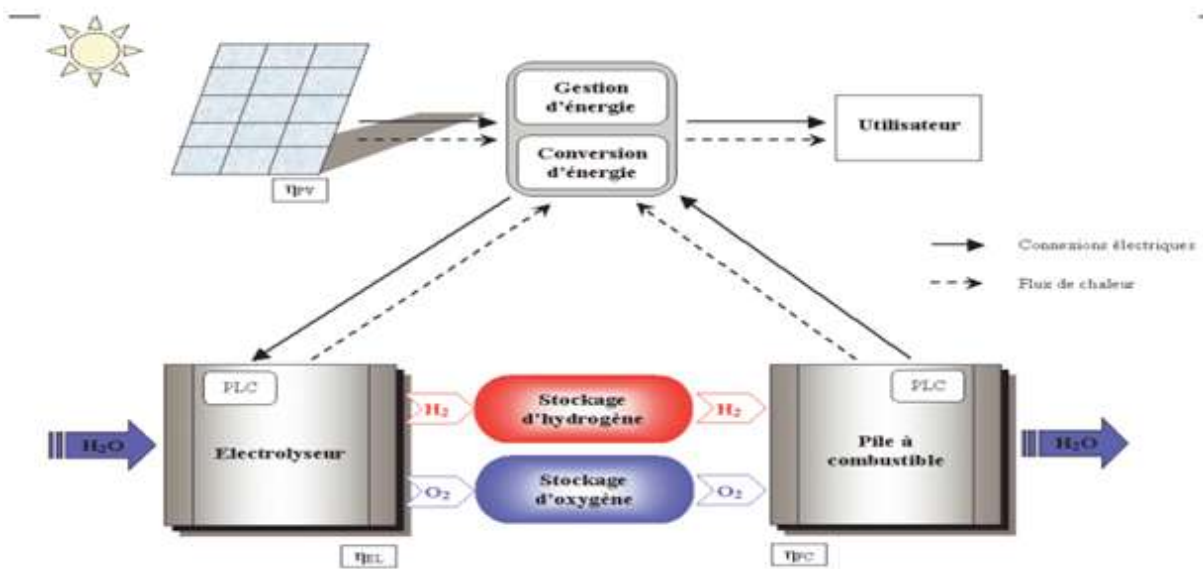


Figure 2.2 : Description du système PV-FC [19].

II.5. L'objectif du système hybride

L'objectif principal d'un système hybride est généralement d'améliorer l'efficacité énergétique, de réduire la consommation de combustibles fossiles et de minimiser les émissions de polluants ou de gaz à effet de serre. Voici quelques objectifs spécifiques couramment associés aux systèmes hybrides :

- **Réduction de la consommation de carburant :** En combinant une source d'énergie principale (comme un moteur à combustion interne) avec une source d'énergie secondaire plus propre (comme l'électricité d'une batterie ou d'une source renouvelable), un système hybride vise à réduire la quantité de carburant utilisée pour générer de l'énergie. Cela permet une meilleure économie de carburant et une réduction des coûts

d'exploitation.

- **Minimisation des émissions polluantes** : En utilisant des sources d'énergie plus propres et en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles, les systèmes hybrides contribuent à la réduction des émissions de polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NOx), les particules fines et les gaz à effet de serre. Cela a un impact positif sur la qualité de l'air et l'environnement.
- **Utilisation de sources d'énergie renouvelables** : En intégrant des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou les piles à combustible à hydrogène, les systèmes hybrides favorisent l'utilisation de sources d'énergie plus durables et réduisent la dépendance aux combustibles fossiles non renouvelables. Cela contribue à la transition vers une économie basée sur les énergies propres.
- **Optimisation de la performance et de l'autonomie** : Les systèmes hybrides permettent souvent d'optimiser la performance globale d'un système en utilisant les différentes sources d'énergie de manière synergique. Par exemple, une combinaison de moteur à combustion interne et de moteur électrique peut offrir une puissance accrue lors des accélérations tout en réduisant la consommation de carburant à vitesse de croisière. De plus, l'utilisation de systèmes de stockage d'énergie tels que les batteries permet une meilleure gestion de la puissance, une régénération d'énergie et une autonomie accrue.

En résumé, l'objectif principal d'un système hybride est d'optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire les émissions et favoriser l'utilisation de sources d'énergie plus propres et renouvelables.

II.6. Avantages du système hybride photovoltaïque et pile à combustible

- **Efficacité énergétique** : Le système hybride exploite l'énergie directe et l'hydrogène pour produire de l'énergie électrique, qui est une efficacité globale plus l'avantage de l'utilisation individuelle des technologies.
- **Stockage d'énergie solaire excédentaire** : L'électricité solaire excédentaire peut être stockée sous forme d'hydrogène, ce qui permet de disposer d'une réserve d'énergie pendant les périodes de faible ensoleillement ou de demande élevée.
- **Réduction des émissions de CO₂** : Le système hybride utilise l'hydrogène comme combustible propre, ne produit que l'eau comme sous-produit. Cela contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à préserver l'environnement.
- **Flexibilité énergétique** : Le système hybride offre une flexibilité énergétique en

utilisant à la fois l'énergie solaire et l'hydrogène. Il peut s'adapter aux fluctuations de la demande énergétique et quatorze aliments.

II.7. Pile à combustible

Une pile à combustible est un appareil qui converti l'énergie chimique d'un combustible en électricité à travers une réaction chimique contrôlée avec l'oxygène ou d'un autre oxydant. Les piles à combustibles se distinguent des batteries et des piles par le fait qu'elles ont besoin d'un apport constant de combustible pour fonctionner, mais que leur production d'électricité est constante tant que le combustible est approvisionné.

La pile à combustible est un générateur de courant à haut rendement énergétique. Celui-ci est généralement proche de 50%.



Figure 2.3 : Schéma de principe de conversion directe en électricité [20]

II.7.1. Différents types de pile à combustible

Il existe plusieurs types de piles à combustible, chacun fonctionnant avec différents types de combustibles et électrolytes. Voici quelques-uns des types les plus courants :

II.7.1.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Ce type de pile à combustible utilise une membrane polymère solide comme électrolyte. Elle fonctionne principalement avec de l'hydrogène comme combustible et de l'oxygène (ou de l'air) comme agent d'oxydation. Les PEMFC sont couramment utilisées dans les véhicules électriques à pile à combustible en raison de leur faible temps de démarrage et de leur rendement élevé.

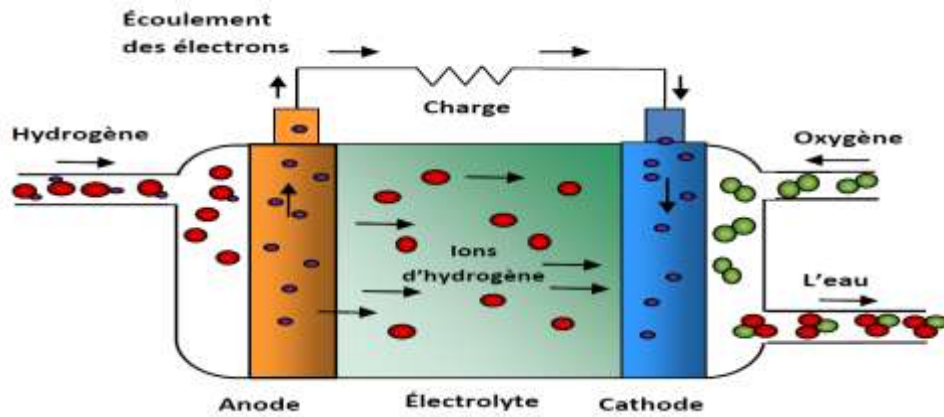


Figure 2.4 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC [22]

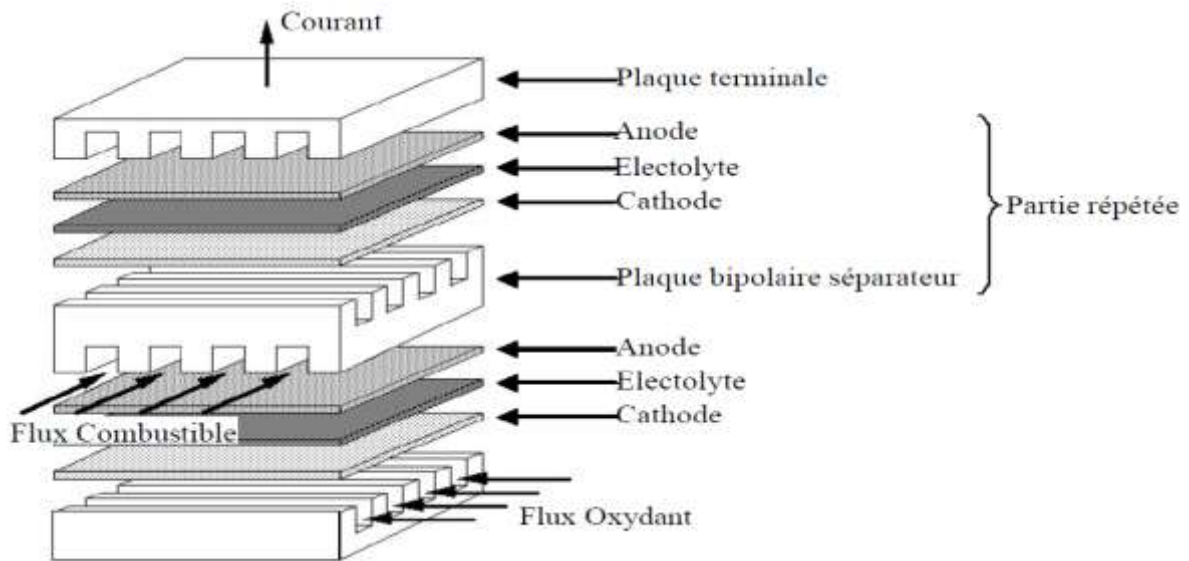


Figure 2.5 : Structure d'un empilement de cellule PEMFC [22]

II.7.1.2 Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)

Les SOFC utilisent un électrolyte en céramique solide à base d'oxyde. Elles peuvent fonctionner avec différents combustibles, notamment l'hydrogène, les gaz naturels et même les biocarburants. Les SOFC sont appréciées pour leur rendement élevé et leur compatibilité avec des sources de carburant diverses.

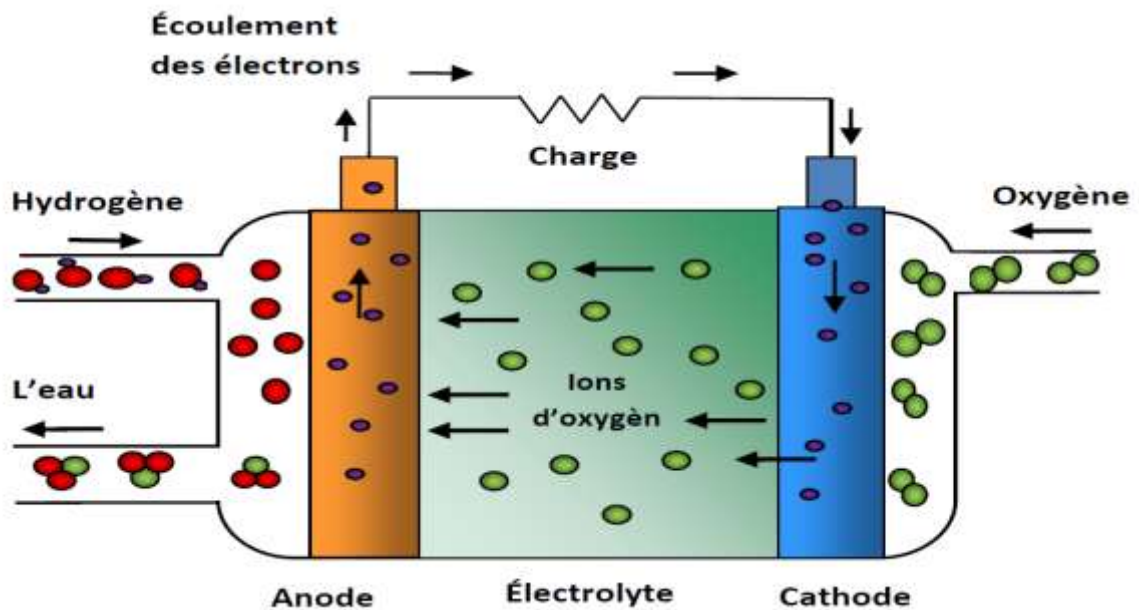


Figure 2.6 : Principe de la pile à combustible SOFC [22].

II.7.1.3 Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)

Les MCFC utilisent un électrolyte à base de carbonate fondu à haute température. Elles sont capables de convertir divers combustibles, tels que le gaz naturel et le biogaz, en électricité. Les MCFC ont un rendement élevé et peuvent également capturer le dioxyde de carbone émis lors de la production d'électricité.

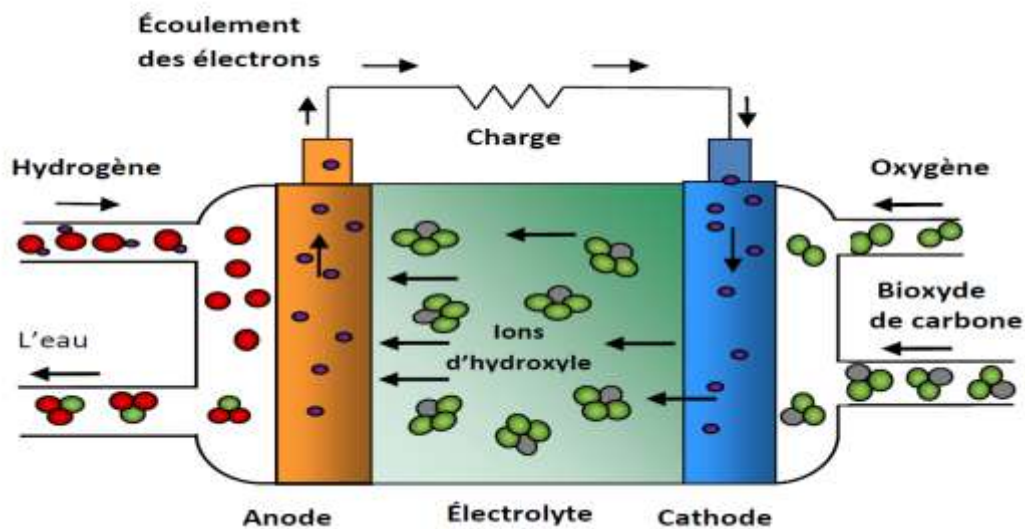


Figure 2.7 : Principe de pile à combustible MCFC [22].

II.7.1.4 Pile à combustible à méthanol direct (DMFC)

Les DMFC utilisent directement le méthanol liquide CH_3OH comme combustible. Elles sont utilisées principalement dans les petits appareils portables, tels que les téléphones et les ordinateurs portables, en raison de leur simplicité d'utilisation et de leur facilité de stockage du méthanol.



• Anode :

• Cathode : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$

Ce qui donne globalement : $2\text{CH}_3\text{OH} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$

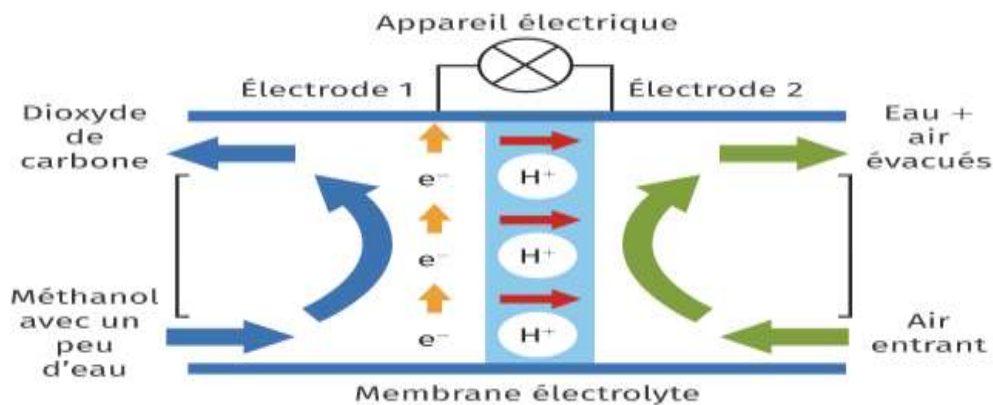


Figure 2.8 : Principe de Pile à combustible à méthanol direct (DMFC) [23]

II.7.1.5 Pile à combustible à réforme interne (PAFC)

Les PAFC utilisent un combustible hydrocarboné, tel que le gaz naturel ou le gaz de pétrole liquéfié (GPL), qui est converti en hydrogène à l'intérieur de la pile à combustible elle-même. Elles sont souvent utilisées pour la production d'électricité stationnaire, comme dans les installations industrielles.

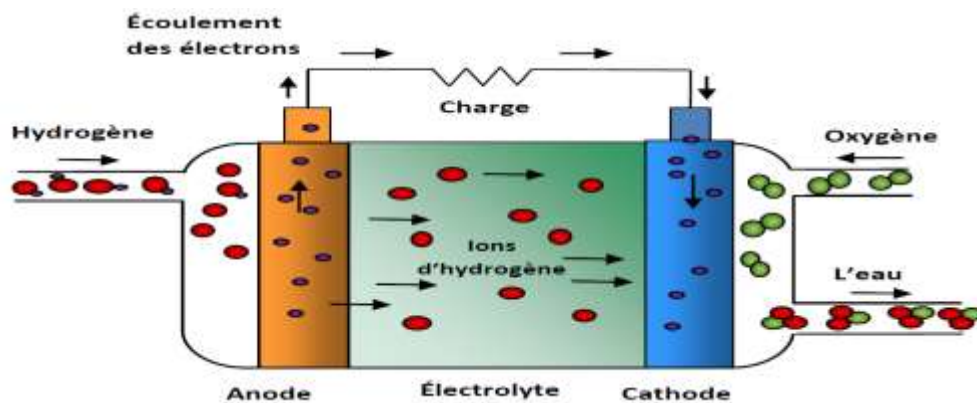


Figure 2.9 : Principe de la pile à combustible à réforme interne (PAFC) [22].

Il convient de noter que chaque type de pile à combustible présente des avantages et des inconvénients spécifiques, et leur utilisation dépendra des applications spécifiques et des exigences opérationnelles. Le **tableau 2.1** illustre les caractéristiques de chaque type de la pile à combustible.

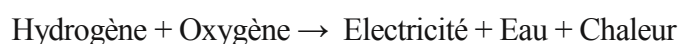
Tableau 2.1 : Différents types de piles à combustible

<i>qu'ils nous ont fait en</i>	<i>qu'ils nous ont fait en</i>	<i>qu'ils nous ont fait en</i>	<i>qu'ils nous ont fait en</i>	<i>qu'ils nous ont fait en</i>	<i>qu'ils nous ont fait en</i>	<i>qu'ils nous ont fait en</i>
PEMFC	Polymère conducteur de protons	40_90	100 mW à 10 MW	H ⁺	35 - 40	Portable, transport, stationnaire
SOFC	Céramique	600_1000	1 à 1000 KW	O ²⁻	45 - 65	Stationnaire, transport
DMFC	Polymère conducteur de protons	50_130	1 à 100W	H ⁺	20 - 30	Portable, (applications informatique)
AFC	Solution alcaline (hydroxyde potassium)	65_220	1 KW à 10 MW	OH ⁻	60 - 70	Stationnaire, transport, application spatiales
PAFC	(acide phosphorique)	200	10 KW à 10 MW	H ⁺	50	Stationnaire
MCFC	Mélange de carbonates	650	1 à 10 MW	CO ₃ ²⁻	65	stationnaire

II.7.2. Principe de fonctionnement

La pile à combustible fonctionne suivant le mécanisme de l'oxydoréduction (il repose sur une réaction électrochimique nommée oxydoréduction). Elle comporte deux électrodes : une anode oxydante et une cathode réductrice, séparées d'un électrolyte central par des catalyseurs. Liquide ou solide, le matériau conducteur de l'électrolyte permet de maîtriser le passage des électrons.

Le principe de la pile à combustible n'est pas nouveau, il a été mis en avant il y a plus de 150 ans par deux scientifiques, Christian Friedrich Schönbein et Sir William Grove. Il est basé sur une réaction chimique simple :



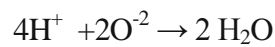
Une réaction de réduction d'oxygène se produit dans la pile, ce qui permet de produire de l'électricité et de la chaleur. A l'anode, la molécule d'hydrogène se brise au contact du catalyseur et libère des électrons qui forment un courant électrique. C'est l'oxydation.



Par contre, l'oxygène réagit à la cathode qui est en contact avec les électrons libérés lors de la réaction précédente. C'est la réduction (soustraction).



Enfin, lorsque les protons d'hydrogène atteignent la cathode, ils se combinent avec les ions oxygène pour former de l'eau.



Le principe est simple, sa mise en œuvre est plus complexe.

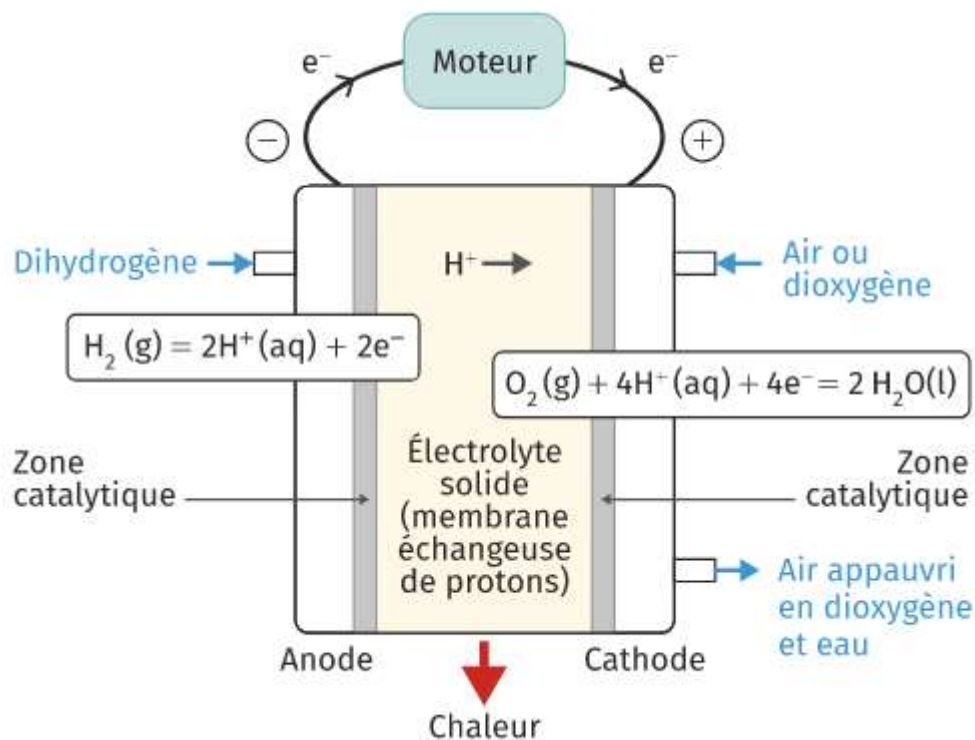


Figure 2.10 : Fonctionnement d'une pile à combustible [21]

II.7.3. Structure de la pile à combustible

La pile à combustible se compose de deux électrodes (anode et cathode), d'un électrolyte et d'un circuit électrique. Chaque type de pile a sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes.

Le coeur de la pile est constitué : d'une anode (électrode chargée positivement) et une cathode (électrode chargée négativement), séparées par un électrolyte (un matériau qui bloque le passage des électrons). L'assemblage de ces composants ainsi que leur nature dépend du type de pile. Ils ont cependant le même rôle

II.7.3.1 Electrodes

Les réactions électrochimiques se passent au niveau des électrodes : une oxydation à l'anode (où l'espèce chimique capte un ou plusieurs électrons) et une réduction à la cathode (où l'espèce chimique cède un ou plusieurs électrons).

Ces réactions sont normalement très lentes. Pour que l'hydrogène soit oxydé, il faut un catalyseur. Celui-ci qui permet alors de faciliter les échanges électroniques. De même pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques (l'étape lente) et est spécifique à la réaction et au niveau de la température de la pile.

Les deux réactions d'oxydoréductions se font dans la zone dite de « **contact triple** » où se trouvent les réactifs gazeux, les ions et les électrons. Dans cette zone se trouvent l'électrolyte (à travers lequel passent les espèces ioniques), les électrodes (ou plus précisément le catalyseur avec un apport ou un départ d'électrons) et l'arrivée des réactifs gazeux. Cette zone est primordiale pour le bon fonctionnement de la pile.

II.7.3.2 Electrolyte

L'électrolyte varie en fonction du type de pile : par exemple pour la pile utilisée dans l'automobile, une membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC est utilisée. Elle permet que les espèces ioniques (et non pas les électrons) passent de l'anode vers la cathode.

En solution ou à l'état liquide, l'électrolyte est conducteur et se dissocie en anions et en cations par l'action d'un courant électrique. L'électrolyte est un élément de l'électrolyse.

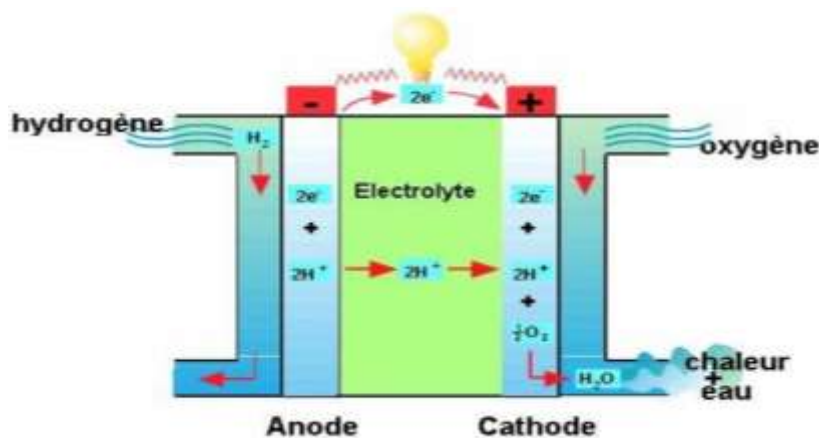


Figure 2.11 : Schéma principe pile à combustible [22].

II.7.3.3 Plaques bipolaires

Ces plaques sont collées aux supports de l'anode et de la cathode. Elles permettent de :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur
- Collecter le courant
- Gérer les flux

Généralement en graphite, ces plaques doivent conduire le courant, mais aussi permettre de diffuser des gaz jusqu'aux électrodes (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent résister aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique). Situées au cœur des piles à combustible, les plaques bipolaires assurent la conduction des électrons, ce qui permet l'alimentation en gaz et l'évacuation de l'eau formée. Des canaux sont gravés dans ces plaques pour permettre le passage des réactifs.

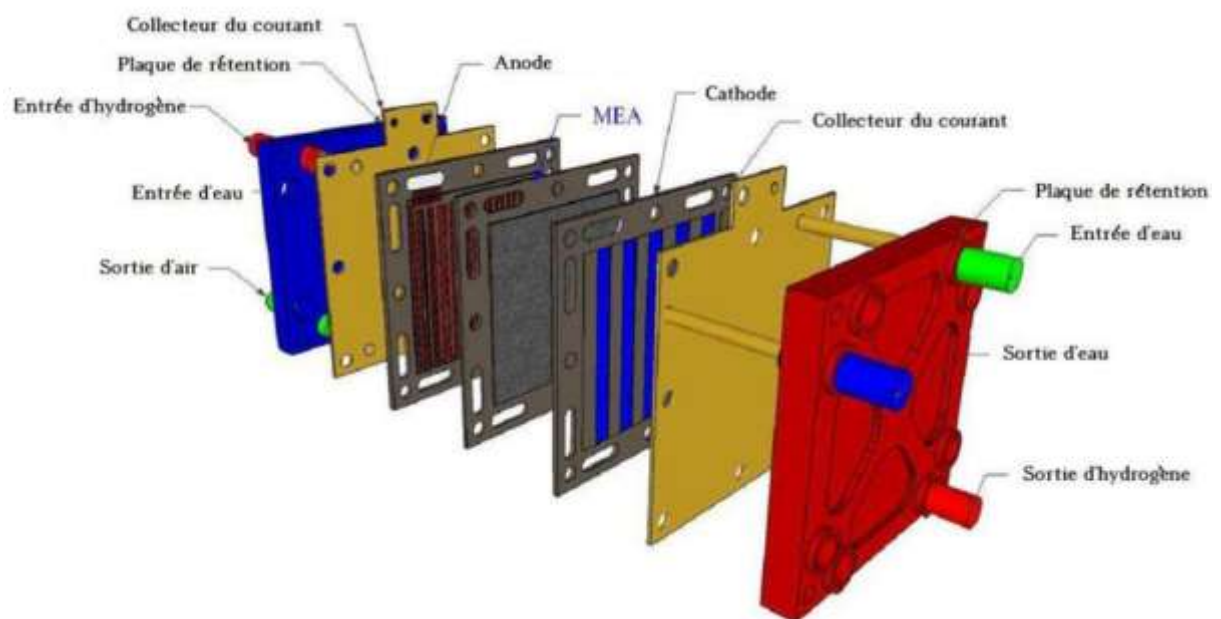


Figure 2.12 : Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène [22]

II.7.4 Auxiliaires d'une pile à combustible PEM

Les auxiliaires d'une pile à combustible PEM sont les différents appareils qui entourent le stack (figure 2.10). On rencontre généralement :

- Un compresseur ou une turbine qui alimente le circuit cathodique en air.
- Un système d'alimentation en hydrogène qui selon que l'hydrogène est fabriqué sur place ou non, comprend dans le premier cas un système de reformage et dans le

deuxième cas des réservoirs sous pression et un ou des détendeurs assurant le réglage de la pression de l'hydrogène à celle de fonctionnement de la pile.

- Un ou deux humidificateurs selon qu'un ou deux des gaz d'alimentation sont humidifiés afin de permettre un bon fonctionnement des membranes.
- Différents accessoires destinés à la distribution des gaz (électrovannes, tuyauteries...).
- Un circuit de refroidissement qui permet la régulation de la température de fonctionnement de la pile (circuit de refroidissement et de chauffage pour le démarrage, capteurs thermiques...).
- Un convertisseur statique qui permet la gestion de l'énergie délivrée par la PAC.
- Un élément de contrôle assurant la gestion des flux de gaz en fonction du courant demandé et la sécurité du système. La présence de ces appareils qui consomment une partie de l'énergie produite par la pile à combustible dégrade le rendement du système. Leur conception est donc souvent un élément clé dans le développement d'un système pile à combustible.

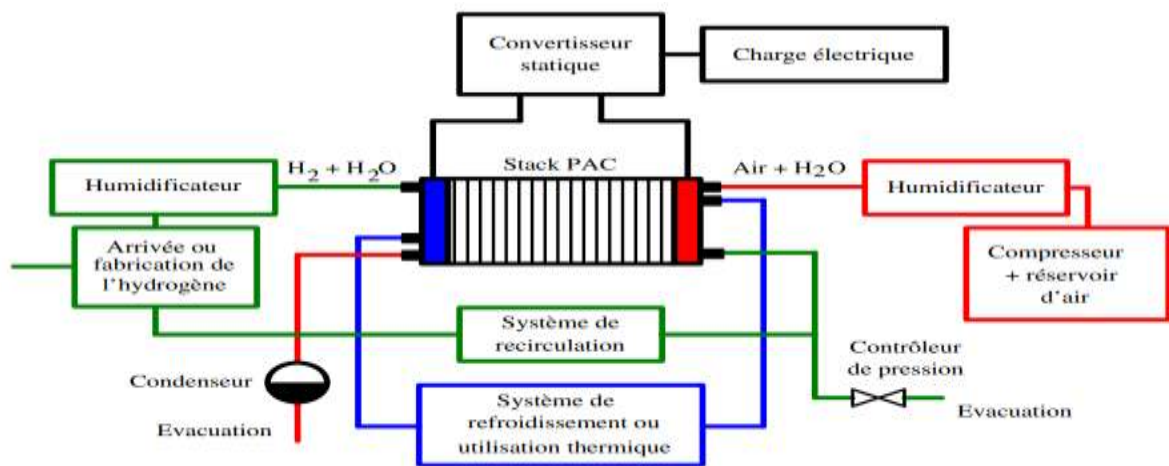


Figure 2.12 : Schéma synoptique d'un système à pile à combustible

II.7.5. Pertes de la pile à combustible

Lorsque la pile à combustible est en fonctionnement et génère un courant, des pertes de tension supplémentaires se produisent en raison des phénomènes irréversibles. À un courant nominal de 500 mA/cm^2 , la tension d'une cellule individuelle est d'environ 0,6 à 0,7 V. Pour obtenir des tensions plus élevées, plusieurs cellules sont connectées en série pour former des piles à combustible (stacks), comme illustré dans la **Figure 2.13**

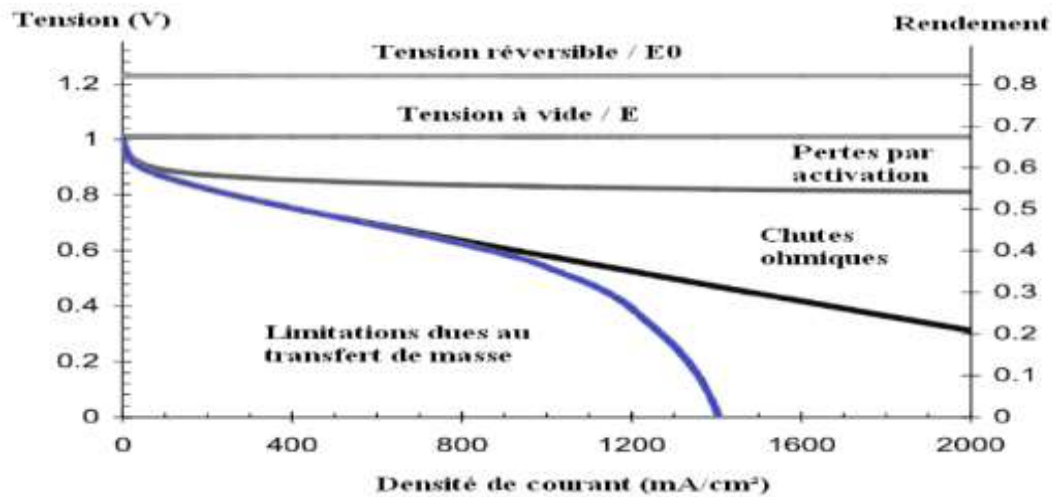


Figure 2.13 : Courbe de polarisation d'un PEMFC. (Courbe bleue)[25].

II.7.6. Caractéristiques électriques de la pile à combustible

II.7.6.1 Tension électrique

Les piles à combustible produisent une tension continue généralement faible, typiquement de l'ordre de quelques centaines de millivolts à quelques volts, en fonction du type de pile à combustible et de sa configuration.

II.7.6.2 Courant électrique

Le courant électrique produit par une pile à combustible dépend de plusieurs facteurs, notamment de la surface active des électrodes et de la résistance interne de la pile. Il est généralement mesuré en ampères (A).

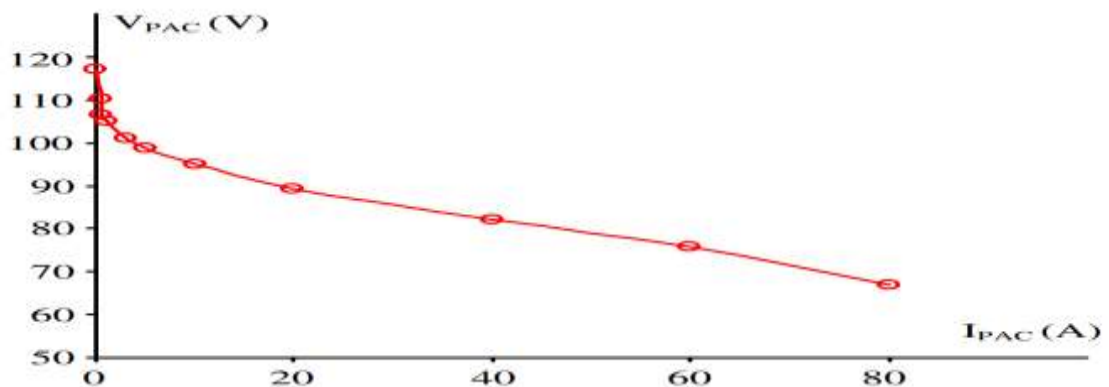


Figure 2.14 : Caractéristiques statiques de la tension (en haut) en fonction du courant du stack (température du stack 64° C)[26].

II.7.6.3. Puissance électrique

La puissance électrique fournie par une pile à combustible est le produit de la tension et du courant qu'elle génère. Elle est exprimée en watts (W) et dépend de la taille et de la configuration de la pile à combustible.

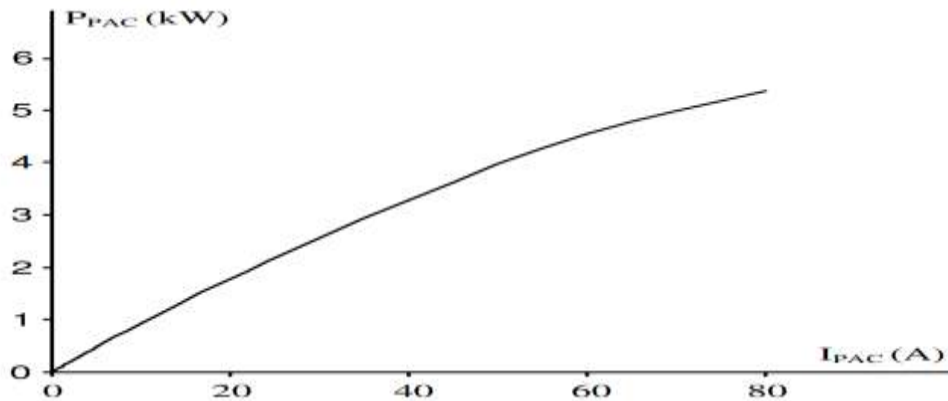


Figure 2.14 : de la puissance débitée (en bas) en fonction du courant du stack (température du stack 64° C)[26].

II.7.6.4 Efficacité électrique

L'efficacité électrique d'une pile à combustible représente la capacité de convertir l'énergie chimique en énergie électrique. Elle est généralement exprimée en pourcentage et varie en fonction du type de pile à combustible. Certaines piles à combustible, comme les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), ont des rendements électriques élevés.

II.7.6.5 Température de fonctionnement

Les piles à combustible ont une plage de température de fonctionnement spécifique. La performance électrique de la pile à combustible peut être affectée par la température, avec une efficacité réduite à des températures extrêmes. **La figure 2.15** ci-dessous représente les courbes de polarisation pour une cellule de pile à combustible alimentée en gaz sec ($RH(H_2)=0\%$ $RH(air)=40\%$). La température moyenne est de 60°C. Un gradient de température de 5°C peut être imposé entre les plaques d'alimentation anodique et cathodique (cas $T_c > T_a$ ou $T_c < T_a$)

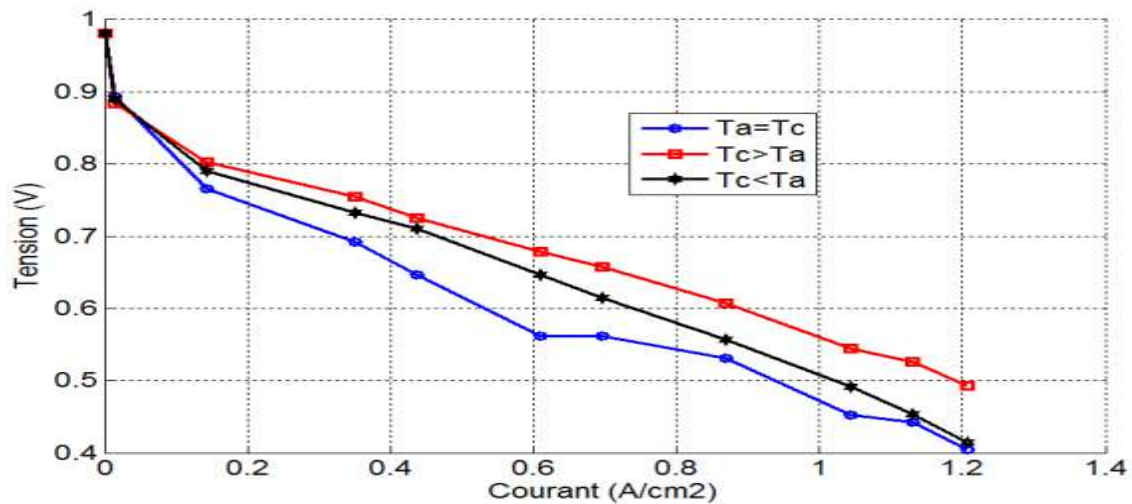


Figure 2.15 : Courbes de polarisation pour une cellule de pile à combustible

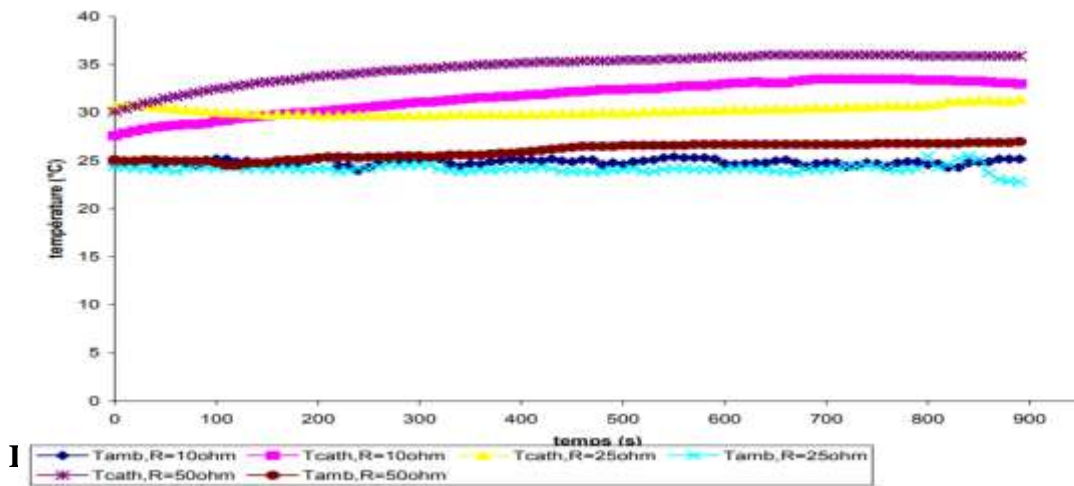


Figure 2.16 : Courbe de la température en fonction du temps $T = f(t)$ [26]

Certaines piles à combustible nécessitent une tension d'alimentation auxiliaire pour alimenter les composants électroniques internes, tels que les ventilateurs ou les pompes. Cette tension peut varier en fonction de la pile à combustible spécifique.

Il est important de noter que les caractéristiques électriques des piles à combustible peuvent varier en fonction du type de pile à combustible, comme les PEMFC, les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) ou les piles à combustible alcalines (AFC).

II.8. Stockage d'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène est un aspect essentiel de son utilisation comme source d'énergie. Il existe trois principaux types de stockage de l'hydrogène :

- a) **Stockage haute pression sous forme gazeuse** : L'hydrogène est comprimé à des pressions élevées et stocké dans des réservoirs spécialement conçus. Avec une pression de 700 bars c'est 700 fois la pression atmosphérique. Cela réduit le volume occupé par l'hydrogène, facilitant ainsi son transport et son utilisation ultérieure. Les réservoirs doivent être construits avec des matériaux solides et résistants capables de supporter les hautes pressions impliquées. Les réactions chimiques impliquées dans ce type de stockage sont principalement liées à la compression de l'hydrogène dans le réservoir.
- b) **Stockage à très basse température sous forme liquide** : L'hydrogène est refroidi à des températures. Extrêmement basses. proches de -253 °C , pour le liquéfier et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3 . À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres.. Cela réduit considérablement le volume occupé par l'hydrogène, permettant ainsi un stockage plus dense. Le stockage d'hydrogène liquide nécessite des réservoirs à double paroi et des systèmes d'isolation pour maintenir les températures très basses. Les réactions chimiques impliquées sont principalement liées au refroidissement et à la liquéfaction de l'hydrogène. Par exemple, les réservoirs de la fusée Ariane, conçus et fabriqués par Air Liquide, contiennent les 28 tonnes d'hydrogène liquide qui vont alimenter son moteur central.
- c) **Stockage à base d'hydrures sous forme solide** : L'hydrogène peut être stocké en le liant chimiquement à des matériaux tels que les hydrures métalliques. Ces matériaux sont capables d'absorber l'hydrogène, le stocker à l'intérieur de leur structure et le libérer lorsque nécessaire. Ce type de stockage offre une grande capacité de stockage et permet une libération contrôlée de l'hydrogène. Les réactions chimiques impliquées sont celles de l'absorption et de la désorption de l'hydrogène par les matériaux d'hydrure. Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Chacun de ces types de stockage présente des avantages et des inconvénients en termes de densité énergétique, de sécurité, de coûts et d'infrastructures requises. Le choix du type de stockage dépend des exigences spécifiques de l'application, des contraintes technologiques et des réactions chimiques impliquées dans chaque méthode de stockage.

II.9. Technologies d'électrolyseur

II.9.1. Définition d'électrolyseur

L'électrolyseur est un dispositif qui fonctionne de manière inverse à une pile à combustible. Il permet de séparer l'eau en hydrogène et en oxygène lorsque l'électricité lui est fournie.

- à l'anode : $2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
- à la cathode : $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

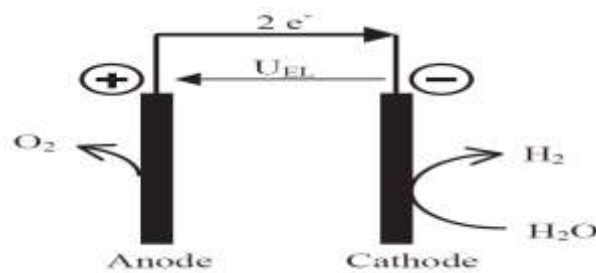


Figure 2.17 : Schéma de fonctionnement d'une cellule d'un électrolyseur [27].

II.9.2. Différents types d'électrolyseur

- Électrolyseur alcalin** : Efficace et à longue durée de vie, il fonctionne à des températures élevées et des pressions modérées, adapté aux applications de grande taille.
- Électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM)** : Démarrage rapide, efficacité à charge partielle et compacité, adapté aux applications de petite à moyenne taille.
- Électrolyseur à haute température (SOEC)** : Utilise des matériaux céramiques conducteurs d'oxygène, adapté aux applications nécessitant une grande quantité d'hydrogène et intégrable aux systèmes de cogénération.

Ces technologies diffèrent en termes de température de fonctionnement, de pression, d'efficacité et de coûts, ce qui influence leur adaptabilité à différents types d'applications et leurs performances globales.

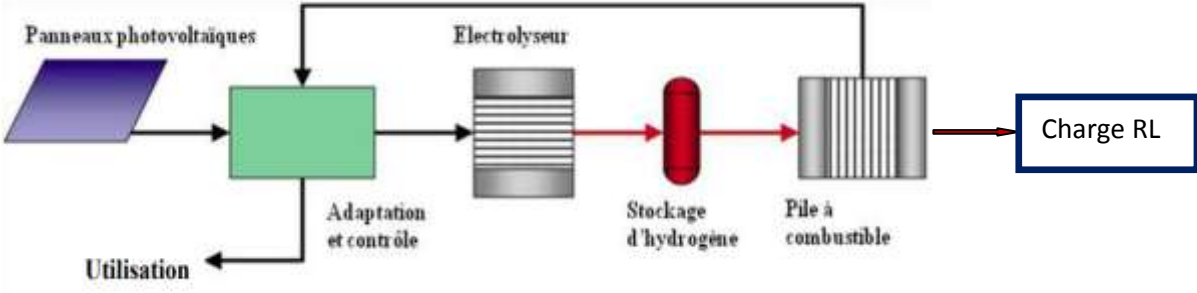


Figure 2.18 : Système de production d'électricité à base d'hydrogène vert[27].

Tableau 2.2 : comparatif des 3 technologies de l'Electrolyseur[33]

		Alcalin			PEM			SOEC		
Anode		$4HO^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$			$H_2O \rightarrow 2H^+ + 1/2O_2 + 2e^-$			$2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$		
Cathode		$4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4HO^-$			$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$			$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$		
Electrolyte		Electrolyte liquide (KOH ou NaOH)			Polymère solide			Oxydes céramiques solides		
Electrodes		Electrodes Ni/Fe			Métaux nobles (Pt, Ir...)			Céramique dopé Ni		
Pureté H₂	%	99,50%			99,95%			99,4		
Démarrage à froid		10- 20 minutes sauf si maintien à température			< 10 min					
Débit maximal d'H₂	Nm ³ /h	0,25 à 750			0,01 à 240			0,1 à 1		
Puissance électrique	kW	Environ 1,25 à 3 800			Environ 0,05 à 1 200			Environ 0,5 à 5		
Pression	bar	1 à 50			1 à 80			5 à 30		
Température	°C	60 à 90			55 à 80			600 à 800		
		Actuel	2020	2030	Actuel	2020	2030	Actuel	2020	2030
Rendement de conversion Electricité -> H2 (PCS)	%	70%	75%	79%	70%	78%	84%	-	-	100 %
Avantages		Technologie mature Prix			Rapidité de variation de charge et démarrage à froid Grande plage de fonctionnement compacité			Rendement élevé Réversibilité possible : fonctionnement en mode pile à combustible		
Inconvénients		Réponse dynamique moins rapide que le PEM mais amélioration en cours Utilisation de produit corrosif (KOH/NaOH)			Durée de vie limitée Technologie récente Prix élevé Recours à des métaux rares			Loin du stade commercial Durée de vie		

II.9.3. Caractéristiques électriques électrolyseur

La caractéristique électrique d'un électrolyseur est déterminée par sa technologie, le nombre de cellules en série (tension) et la surface active (courant). La Figure II-10 illustre les caractéristiques électriques d'une cellule d'électrolyseur à technologie alcaline améliorée. La tension à vide est d'environ 1,23 V, appelée tension d'équilibre. À mesure que l'intensité augmente, les pertes augmentent, ce qui entraîne une augmentation de la tension. La tension d'une cellule est généralement limitée à 2 V. Le rendement énergétique ou rendement potentiel des cellules de l'électrolyseur est le rapport entre l'énergie totale utilisée et l'énergie

consommée. Il peut être calculé en divisant le potentiel thermoneutre par la tension de la cellule (Équation 2.1).

$$\eta_{EL} = \frac{U_{th}}{U} \quad (2.1)$$

Avec :

U : tension de la cellule (V)

U_{th} : potentiel thermoneutre (V)

L'efficacité énergétique d'une cellule d'électrolyse diminue avec l'augmentation du courant. Lorsque la tension est limitée à 2 V (comme dans le cas des électrolyseurs alcalins améliorés), elle reste supérieure à 74%. De manière similaire aux piles à combustible, le débit de gaz produit par un électrolyseur est directement proportionnel au courant et à l'efficacité faradique (Équation 2.2).

$$F_{gaz} = \frac{nc.I}{n.F} \cdot \eta F \quad (2.2)$$

Avec :

- **F_{gaz}** : flux de gaz (mol.s⁻¹)
- **N_c** : nombre de cellules
- **I** : intensité de l'appareil (A)
- **ηF** : rendement faradique (%)
- **n** : nombre de moles d'électrons échangées par mole d'eau (n = 2 pour l'hydrogène, n = 4 pour l'oxygène)

On obtient le rendement global ou rendement de puissance des cellules de l'électrolyseur en multipliant le rendement énergétique et le rendement faradique.

L'augmentation de la température a un effet positif sur la conductivité de l'électrolyte, ce qui réduit les surtensions aux électrodes. Cela entraîne une diminution de la tension des cellules, ce qui améliore le rendement potentiel (**Figure 2.19**). Cependant, l'augmentation de la température a un impact négatif sur le rendement faradique d'un électrolyseur alcalin et sur la pureté des gaz produits [9]. Aucune information n'a été trouvée sur l'influence de la température sur la pureté des gaz.

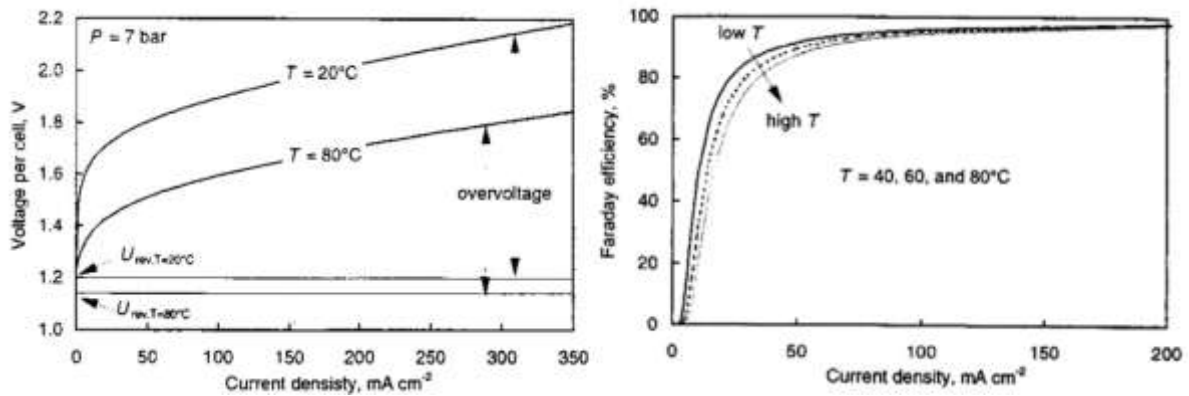


Figure 2.19 : Influence de la température et de l'intensité sur les rendements potentiel et faradique d'un électrolyseur alcalin [28].

Les graphiques présentés dans la Figure 2.20 illustrent l'impact de la pression et de la densité de courant sur le rendement potentiel et la pureté du gaz produit. Ces expériences ont été réalisées sur un prototype alcalin de 120 bars développés au centre de recherche de Jülich (Forschungszentrum Jülich ou FZJ). La figure 2.20 représente respectivement l'influence de la pression sur le rendement potentiel et la densité de courant. [29].

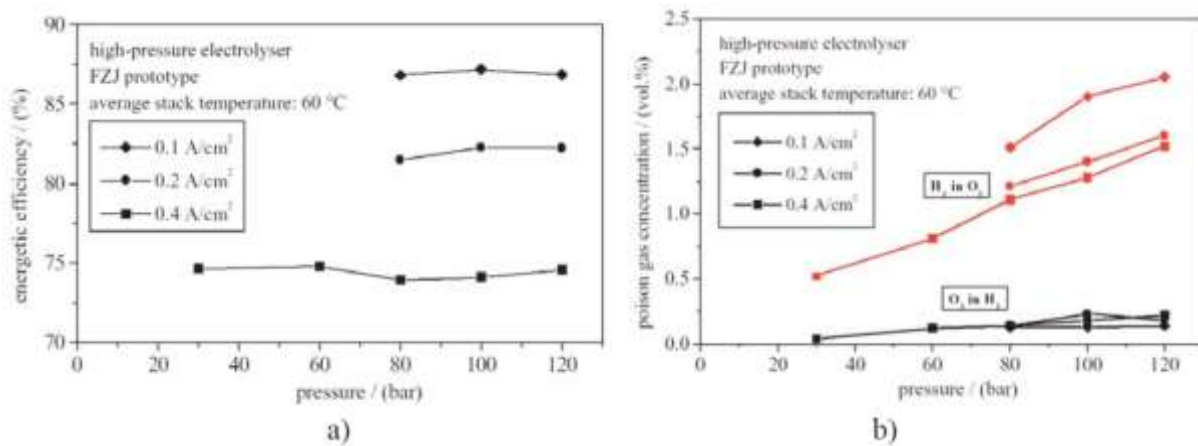


Figure 2.20 : Influence de la pression et de l'intensité sur un électrolyseur alcalin

II.10. Modélisation de système hybride

Le but de cette section est de décrire les modèles mathématiques des composants du système de conversion photovoltaïque. Un schéma fonctionnel d'un circuit de conversion

photovoltaïque est présenté à la **figure 2.21**. Il s'agit d'un convertisseur DC/DC connecté à un générateur PV et à un contrôleur MPPT pour maximiser l'énergie solaire.

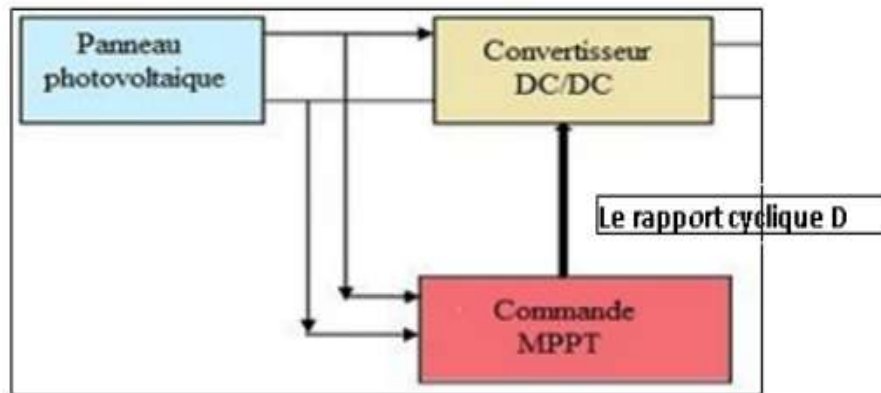


Figure 2.21 : Schéma d'une chaîne de conversion photovoltaïque avec MPPT [29].

II.10.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

Un générateur solaire convertit l'énergie solaire en électricité. Il est réalisé en connectant des modules en série et en parallèle (séries d'éléments de base). La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des autres modules formant.

La modélisation du générateur photovoltaïque est très importante pour obtenir le point optimal correspondant au point de puissance maximale. Parmi ces modèles nous avons trouvé :

- Le modèle idéalisé : c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est donc supposée nulle.
- Le modèle à diode unique : pour tenir compte des chutes de tension dans les régions P et N, il faut ajouter une résistance série R_s dans le modèle idéalisé et une résistance parallèle R_{sh} pour le courant de fuite. ^
- Le modèle à deux diodes : une diode supplémentaire placée en parallèle de la diode du modèle précédent permet de reproduire les effets chimiques de la recombinaison d'électrons.

Parmi ces modèles, nous avons choisi le modèle mono-diode et cinq paramètres les plus classiques et les plus utilisés. Ce modèle est supporté par une source de courant produisant un courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement, une diode pour le phénomène de polarisation de la

cellule traversée par le courant I_d , une résistance série R_s , et une autre R_{sh} parallèle pour les pertes[28].

Nous pouvons tirer d'après la loi de Kirchhoff, le courant transmis par la cellule PV est donné sous l'équation(2.3) :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.3)$$

Aussi nous avons L'intensité du photo-courant qui dépend du rayonnement solaire "S", de la température ambiante "T".

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_i(T - T_{ref})) S / S_{ref} \quad (2.4)$$

Tel que :

S : Ensoleillement dans le plan des panneaux [W/ m²].

S_{ref} : Ensoleillement de référence 1000 [W/ m²].

T_{ref} : Température de référence 25°C.

T : Température ambiante [°C].

I_{ph} : L'intensité du photo-courant.

I_{cc} : courant de court-circuit.

K_i : la constante de Boltzmann.

Nous remarquons que le courant I_{sh} traversant R_{sh} sera très faible si R_{sh} est trop grand, indépendamment de la tension :

$$I_{sh} = V_d / R_{sh} = V + R_s I_d / R_{sh} \quad (2.5)$$

Avec :

$$V_d = R_{sh} I_{sh} = V + R_s I_d \quad (2.6)$$

Tel que :

R_s : Résistance en série.

R_{sh} : Résistance en parallèle.

I_d : courant de diode.

A : facteur d'idéalité de la cellule.

q : la charge électrique de l'électron. Le courant de diode I_d a le même ordre de grandeur que **I_{rp}** pour les basses tensions et devient très grand autour du **V_{co}**, écrit sous l'équation (2.7) :

$$I_d = I_0 (e^{(q \cdot V_d / A \cdot K \cdot T)} - 1) \quad (2.7)$$

Nous remplaçons les équations (2.5), (2.7), dans l'équation (2.3) et nous obtenons l'équation caractéristique comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 (e^{(q \cdot V_d / A \cdot K \cdot T)} - 1) - (V + R_s \cdot I) / R_{sh} \quad (2.8)$$

II.10.2. Modélisation de la pile à combustible

Une pile à combustible PEM consomme de l'oxygène et de l'hydrogène pour produire de l'électricité et de la chaleur. Il existe de nombreux modèles de piles à combustible, chaque modèle correspond à un phénomène spécifique étudié. Ensuite, nous introduisons le modèle mathématique sélectionné pour déterminer les paramètres des composants de PAC [8,9].

Débits d'hydrogène, d'oxygène et de l'eau d'entrée (\dot{m}).

À l'entrée on trouve les trois débits suivants (H₂, O₂, H₂O) présentés par l'équation (2.9) :

$$\dot{m} (j, \text{in}) = \frac{N_0 \cdot I}{2F \cdot U} \quad (2.9)$$

Où N_0 est le nombre de cellules en série, I le courant électrique [A], F la constante de Faraday [964872 C] et U le taux d'utilisation.

II.10.2.1 Résistance interne

L'équation de la résistance interne R_{int} est donnée par :

$$R_{\text{int}} = 0.01605 - 3.5 \times 10^{-5} \times T + 8 \times 10^{-5} \times I \quad (2.10)$$

II.10.2.2 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance des plaques bipolaires et les électrodes qui s'opposent à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons [29] :

$$\eta_{\text{ohm}} = I \cdot R_{\text{int}} \quad (2.11)$$

II.10.2.3 Surtension d'activation

Au démarrage des réactions chimiques au sein des électrodes, une partie d'énergie est responsable à briser et reformer les liaisons chimiques [30]. Cette perte est décrite comme suit :

$$\eta_{\text{act}} = B \cdot \ln(C \cdot I) \quad (2.12)$$

avec B est la constante d'activation de tension, C facteur d'échelle [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] et I le courant électrique [A].

II.10.2.4 Résistance d'activation

L'équation de la résistance d'activation est donnée par :

$$R_a = - \frac{\eta_{\text{act}}}{I} \quad (2.13)$$

II.10.2.5 Pression d'hydrogène

Si les débits d'entrée et de sortie sont connus, il est possible de trouver la pression de l'anode.

Selon la loi des gaz parfaits on a :

$$P V = nRT \quad (2.14)$$

A l'anode on a :

$$\frac{V_a}{RT} (dP_{H_2})/dt = \dot{m}(H_{2in}) - \dot{m}(H_{2out}) - 2K_r \cdot I \quad (2.15)$$

Où K_r est une constante de modélisation utilisée pour simplifier les calculs [31] :

$$K_r = \frac{N_0}{4F} \quad (2.16)$$

Il s'en suit :

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (\dot{m}(H_{2in}) - \dot{m}(H_{2out}) - 2K_r \cdot I) \quad (2.17)$$

Et on a la relation suivante :

$$\dot{m}(H_{2out}) = K(H_2) \cdot P(H_2) \quad (2.18)$$

Des équations (2.13) et (2.14) on obtient :

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (\dot{m}(H_{2in}) - 2K_r \cdot I) - \frac{RT}{V_a} K(H_2) \cdot P(H_2) \quad (2.19)$$

$$P(H_2) = \frac{1}{K(H_2)} (\dot{m}(H_{2in}) - 2K_r \cdot I) - \frac{dP_{H_2}}{dt} \frac{V_a}{RTK(H_2)} \quad (2.20)$$

On suppose que

$$\tau(H_2) = \frac{V_a}{RTK(H_2)} \quad (2.21)$$

On trouve que

$$\tau(H_2) \frac{dP_{H_2}}{dt} + P(H_2) = \frac{1}{K(H_2)} (\dot{m}(H_{2in}) - 2K_r \cdot I) \quad (2.22)$$

L'application de la transformée de Laplace donne :

$$P(H_2) \frac{1}{\tau(H_2)s + 1} = \frac{1}{K(H_2)} (\dot{m}(H_{2in}) - 2K_r \cdot I) \quad (2.23)$$

où P est la pression [atm], V un volume [m^3], n le nombre de mole [mole], $R = 8.314$ $J \cdot mol^{-1} K^{-1}$ la constante des gaz parfaits et T la température en Kelvin.

II.10.2.6. Pression de l'oxygène

De la même façon que pour l'anode, on trouve à la cathode que :

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c} (\dot{m}(O_{2in}) - \dot{m}(O_{2out}) - K_r \cdot I) \quad (2.24)$$

Une manipulation simple permet de trouver

$$P(O_2) = \frac{1}{K(O_2)} (\dot{m}(O_{2in}) - 2K_r \cdot I) \quad (2.25)$$

II.10.2.7 Pression de l'eau

Pour l'eau, la pression est donnée par :

$$\frac{dP_{H_2O}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (\dot{m}(H_2O_{in}) - \dot{m} (H_2O_{out}) + Kr \cdot I) \quad (2.26)$$

Une manipulation simple permet de trouver

$$P(H_2O) = \frac{1}{\tau(H_2O)_s + 1} (\dot{m}(H_2O_{in}) + 2Kr \cdot I) \quad (2.27)$$

II.10.2.8 Potentiel thermodynamique

D'après la loi de Nernst écrite dans l'équation ($E_{th} = -\Delta G/nF$), le potentiel thermodynamique est calculé en négligeant la pression l'eau. Si maintenant, on tient compte de la pression de l'eau on trouve :

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P(H_2)P^{1/2}(O_2)}{P(H_2O)} \quad (2.28)$$

II.10.2.9 Tension d'une cellule unitaire de la PEM

Il existe plusieurs facteurs de tension disponibles. On cite parmi eux la résistance ohmique, le transport de masse et l'effet thermodynamique [13]. La relation reliant ces facteurs s'écrit comme :

$$V(\text{cellule}) = E - \eta(\text{act}) - \eta(\text{ohm}) \quad (2.29)$$

où $V(\text{cellule})$ est la tension d'une cellule, $\eta(\text{act})$ la polarisation d'activation de l'anode et de cathode [V] et $\eta(\text{ohm})$ la polarisation ohmique de la cathode et de l'anode [V].

II.10.2.10 Tension d'un empilement (stack) :

La tension d'un empilement est donnée par

$$V(\text{stack}) = N_0 \times V(\text{cellule}) \quad (2.30)$$

Où N_0 est le nombre de cellules dans l'empilement.

II.10.2.11 Puissance d'une pile à combustible PEM :

La puissance d'une pile à combustible de type PEM est donnée par la relation :

$$P = V(\text{stack}) \times I \quad (2.31)$$

II.10.2.12 Rendement d'une pile à combustible PEM

La pile à combustible étudiée est connue pour son rendement relativement élevé ; un avantage précieux pour la commercialisation. On définit la puissance d'une pile par le rapport entre la puissance produite et la puissance fournie telle que [11] :

$$P(\text{out}) = V(\text{stack}) \times I(\text{stack}) \quad (2.32)$$

$$P(\text{in}) = P_{CI} \times V_0(\text{H}_2) \quad (2.33)$$

Le rendement est donné par :

$$\eta = P(\text{out}) / P(\text{in}) = \frac{V(\text{stack}) \times I(\text{stack})}{P_{CI} \times V_0(\text{H}_2)} \quad (2.34)$$

Où $P_{CI} = 10.8 \text{ MJ/m}^3$ est le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène et V_0 l'efficacité. Le rendement de la pile à combustible de type PEM peut atteindre 43% [25].

II.10.3 Modélisation du système de stockage (hydrogène et batterie)

II.10.3.1. Batteries

Il existe de nombreux modèles de batterie. Mais, dans le système PV-FC, les batteries ne sont pas utilisées en temps que stockage. Les batteries de sécurité ne sont pas modélisées dans l'outil développé.

Les batteries doivent avoir une capacité (Ah) suffisante pour alimenter l'onduleur à sa puissance nominale ou plus encore quand elles doivent faire face aux courants de démarrage. La capacité du parc de batterie doit correspondre au minimum à 5 fois la puissance nominale de l'onduleur divisée par la tension nominale de la batterie.

$$C(\text{Ah}) = 5 \times P_{\text{nom}} / U_{\text{nom}} \quad (2.35)$$

P_{nom} : puissance nominale de l'onduleur en watts

U_{nom} : tension nominale de la batterie.

La capacité des batteries (C_{batt}) est calculer en fonction de la durée moyenne délestage en jours x Consommation électrique en Wh/jours / tension du parc de batteries x profondeur de décharge max des batteries [32].

II.10.3.2 Stockage gaz

Deux modèles permettent de modéliser le stockage des gaz :

a) Modèle des gaz parfaits

$$P = z \cdot \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad (2.36)$$

avec $z = f(P, T)$

Dans notre cas, le facteur de compressibilité z est équivalent à 1, pour les deux gaz.

b) Modèle des gaz réels : Van der Waals

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V - n \cdot b} - a \frac{n^2}{V^2} \quad (2.37)$$

Avec :

$$a = \frac{27.R^2.T_{cr}^2}{64.P_{cr}} \text{ et } b = \frac{R.T_{cr}}{8.P_{cr}}$$

Où

P : pression (Pa)

Z : facteur de compressibilité

N : nombre de mole (mol)

R : constantes des gaz parfaits (8,314 J.K-1mol-1)

T : température (K)

V : volume du stockage (m³)

T_{cr} : température critique (K)

P_{cr} : pression critique (Pa)

Pour l'hydrogène : T_{cr} = 33 K et p_{cr} = 13 bar d'où a = 0,024 et b = 2,6.10⁻⁵.

Pour l'oxygène : T_{cr} = 155 K et p_{cr} = 51 bar d'où a = 0,137 et b = 3,1.10⁻⁵.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la pile à combustible et les composants de système hybride et l'importance de leurs dimensionnements.

Il convient de noter que les technologies photovoltaïques & les piles à combustible continuent de se développer et de trouver de nouvelles applications qu'il existe de nombreuses autres utilisations potentielles pour ces technologies dans divers secteurs.

Chapitre III

Simulation du système hybride

III.1 Introduction

Le système hybride comprend : un générateur photovoltaïque, une pile à combustible et une batterie. Ce système combine différentes technologies pour maximiser l'efficacité énergétique et assurer un approvisionnement continu en électricité.

La batterie, quant à elle, joue un rôle de stockage d'énergie dans ce système hybride. Elle est utilisée pour stocker l'électricité produite par le générateur photovoltaïque et la pile à combustible lorsque la demande d'électricité est faible. La batterie peut être utilisée plus tard lorsque la demande est plus élevée ou lorsque la production d'électricité du générateur photovoltaïque est insuffisante.

L'avantage du système hybride permet une utilisation efficace des différentes sources d'énergie. Lorsque le soleil brille intensément, le générateur photovoltaïque produit une quantité importante d'électricité. Si la demande est faible à ce moment-là, l'électricité excédentaire est utilisée pour recharger la batterie ou pour produire de l'hydrogène à l'aide d'un électrolyseur. Lorsque le soleil ne brille pas suffisamment ou lorsque la demande est élevée, la batterie et la pile à combustible fournissent de l'électricité supplémentaire pour répondre à la demande.

La simulation de ce système hybride permet d'analyser son fonctionnement dans différentes conditions, telles que des variations de la lumière solaire, de la demande d'électricité et de la disponibilité de l'hydrogène. Elle permet également d'optimiser les paramètres du système, tels que la taille de la batterie, la capacité de la pile à combustible et l'ajustement des cycles de charge et de décharge.

En utilisant cette simulation, nous pouvons mieux comprendre le comportement de ce système hybride et évaluer son efficacité énergétique, sa fiabilité et sa durabilité.

À partir des modèles et des lois issues des chapitres précédents, nous discuterons les résultats de simulation pour les différentes sources d'énergie qui représentent cette étude, pour faire ça nous avons conçu un algorithme implémenté sous **Matlab-Simulink**.

L'objectif de ce chapitre est de confirmer la validité de cette étude par la simulation. Les schémas dans les Figures (PV/B, PAC) représentent la simulation de chaque source et de système global par **logiciel Matlab**.

Pour faire la simulation, nous choisissons deux Blocs Matlab-Simulink pour la température et l'éclairement du générateur solaire, ainsi qu'une batterie rechargeable et une pile à combustible avec un stock contenant 99% d'oxygène et 99% d'hydrogène. Pour observer et

analyser les courbes facilement, nous définissons le temps comme 2,4 secondes que signifie 24 heures (un jour) en réal et choisissons aussi une charge constante de 18 Ω .

III.2 Paramètre des sources

III.2.1 Paramètres du panneau photovoltaïque

Tableau 3.1 : paramètres du panneau photovoltaïque

Panneau photovoltaïque	<i>NS</i>	<i>NP</i>	<i>Ncel</i>	<i>Vpm</i> (v)	<i>Ipm</i> (A)	<i>VS</i> (v)	<i>ICC</i> (A)	P(w)
	1	1	60	29	7.35	36.3	7.84	213.15

III.2.2 Paramètres de la Batterie

Tableau 3.3 : Paramètres de la Batterie

Batterie	Type de la batterie	La tension nominale(V)	Capacité (Ah)	Résistance interne(Ω)	Courant nominal de décharge (A)
	plomb-acide	12	100	0.0012	20

III.2.3 Paramètres de la pile à combustible

Tableau 4.3 : Paramètres de la pile à combustible

Pile à combustible	Type de la pile	La tension nominale(V)	Le courant nominal (A)	Débit d'air nominal(<i>Ipm</i>)	La puissance nominale (KW)
	PEMFC	45	133.3	300	6

III.3 Calcul de L et C des convertisseurs

Pour calcul des paramètres L et C se font grâce aux expressions suivantes :

A) Convertisseur Boost (PV) :

$$LPV = Vdc / 4 * f * \Delta IL = 2 \text{ mH}$$

$$Cpv = Ipv / f * \Delta Vpv = 100 \text{ } \mu\text{F}$$

B) Convertisseur Back-Boost (Batterie) :

$$Lbatt = Vdc / 4 * f * \Delta IL = 0.5 \text{ mH}$$

$$Cbatt = Ipv / f * \Delta Vpv = 1000 \text{ } \mu\text{F}$$

C) Convertisseur Boost (pile) :

$$Lpile = Vdc / 4 * f * \Delta IL = 0.5 \text{ mH}$$

$$Cpile = Ipv / f * \Delta Vpv = 7500 \text{ } \mu\text{F}$$

III.4 Caractéristiques techniques

Le système a une puissance nominale de 4 kW en fonctionnement continu. Pour les transitions entre états, il est équipé d'un dispositif de stockage d'énergie électrique composé d'un bloc de batteries de 12V (15 batteries). Ces batteries peuvent fournir une puissance de 10 kW pendant 15 minutes et jusqu'à 30 kW pendant quelques dizaines de secondes. Les principales caractéristiques de l'unité sont répertoriées dans le **tableau 3.2**

Tableau 3.4 : Caractéristiques du module RCU-4500

Dimensions	1,42 m (hauteur), 1,60 m (longueur), 1,14 m (largeur)
Masse estimée	1365 kg
Combustible	Gaz naturel
Puissance électrique nette	4 kW (10 kW sur 15 minutes)
Tension électrique de sortie	220 V
Puissance thermique nette	5 à 5,6 kW (à puissance électrique nominale)
Température d'eau chaude	60°C
Rendement électrique	18%
Rendement global	40%

III.5 Résultat de simulation

III.5.1 Générateur photovoltaïque (GPV)

III.5.1.1 Allure de l'éclairement (G)

Nous savons que l'intensité de la lumière du soleil varie en fonction de l'heure de la journée, nous supposons donc ces changements au niveau d'une journée ensoleillée et d'un ciel clair, donc la valeur maximale réalisable est de 1000 (w/m²).

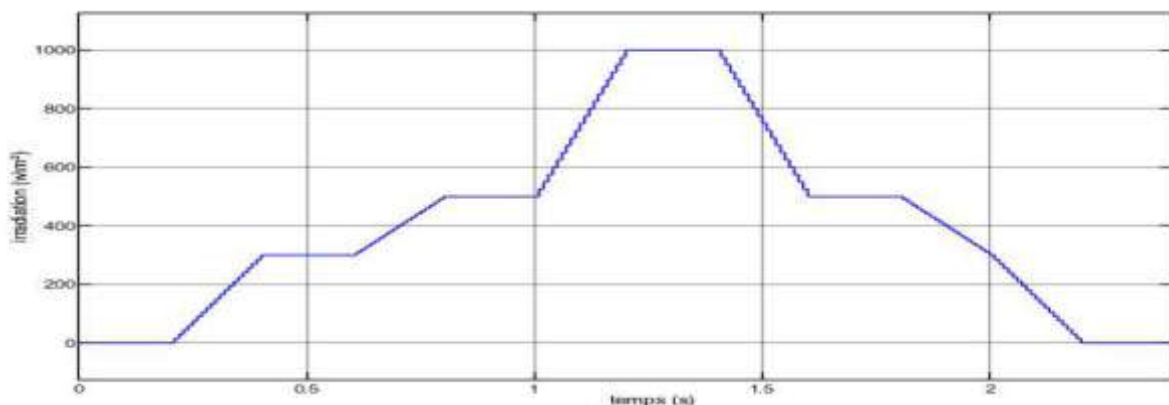


Figure 3.1: Allure de l'éclairement dans un jour

III.5.1.2 Schéma et résultat de simulation PV

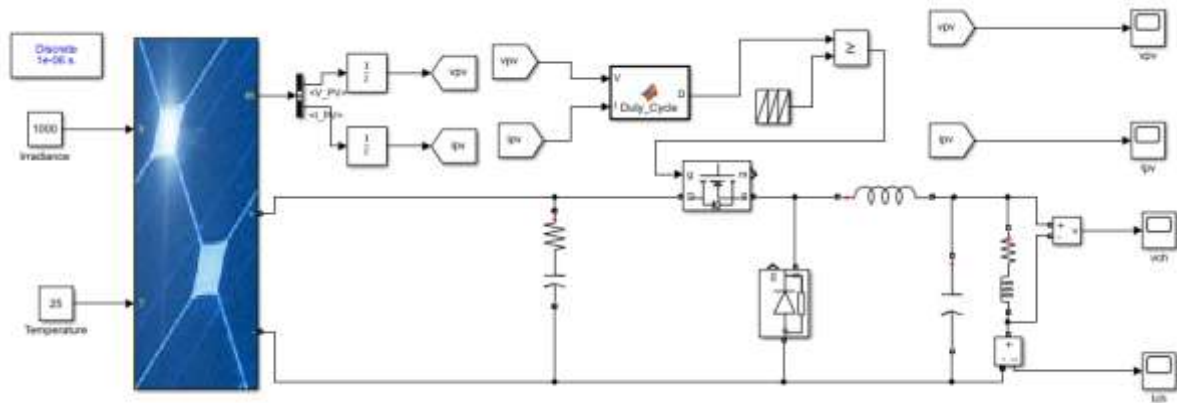


Figure 3.2 : Schéma de simulation de GPV

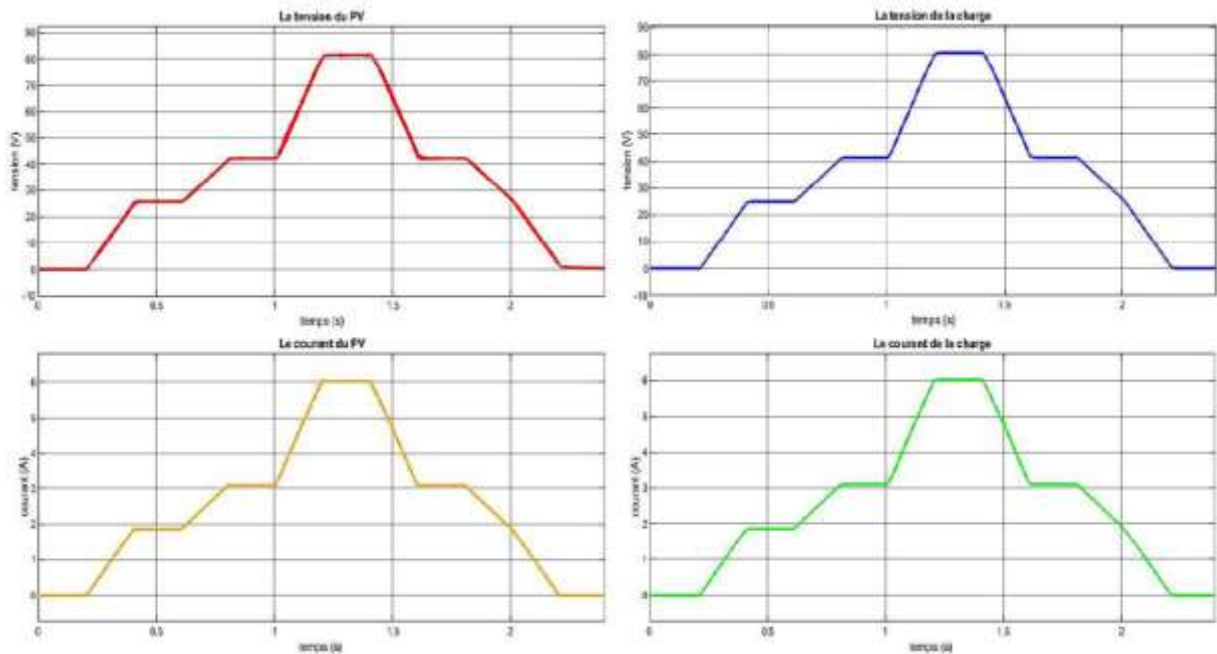


Figure 3.3 : Résultats de simulation de GPV

Commentaires

- [0s : 0.4s] et [2s : 2.4s] : Le générateur photovoltaïque (GPV) ne fonctionne pas en raison de l'absence d'éclairement.
- [0.4s : 2s] : Le GPV fonctionne en raison de la présence d'éclairement, et son fonctionnement est proportionnel à l'intensité de l'éclairement.
- [1.2s : 1.4s] : C'est la plage de fonctionnement maximale du GPV, correspondant à l'éclairement maximal.

III.6 Schéma et les résultats de simulation PV+Batt

III.6.1 Simulation de photovoltaïque et batterie en charge

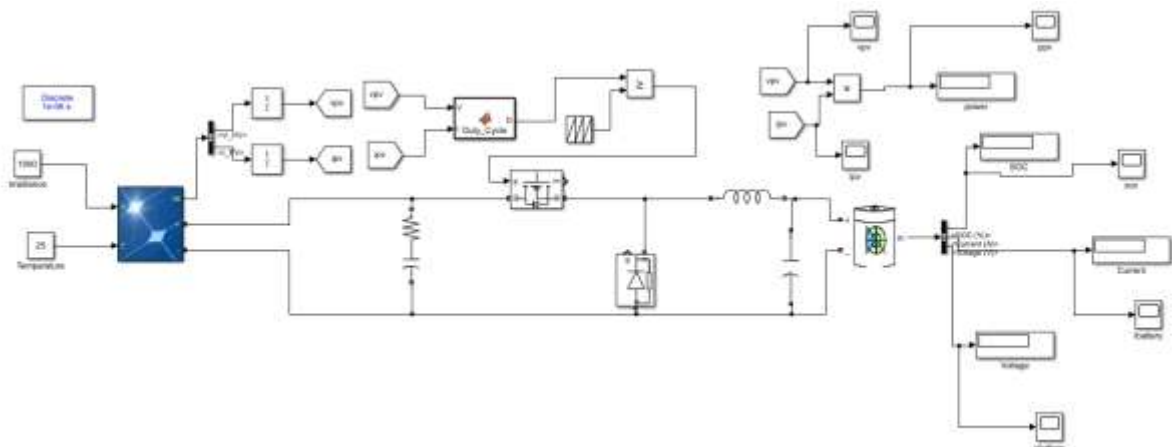


Figure 3.4 : Schéma de simulation de la batterie

III.6.2 Résultat du simulation Photovoltaïque irradiation 1000w/m²

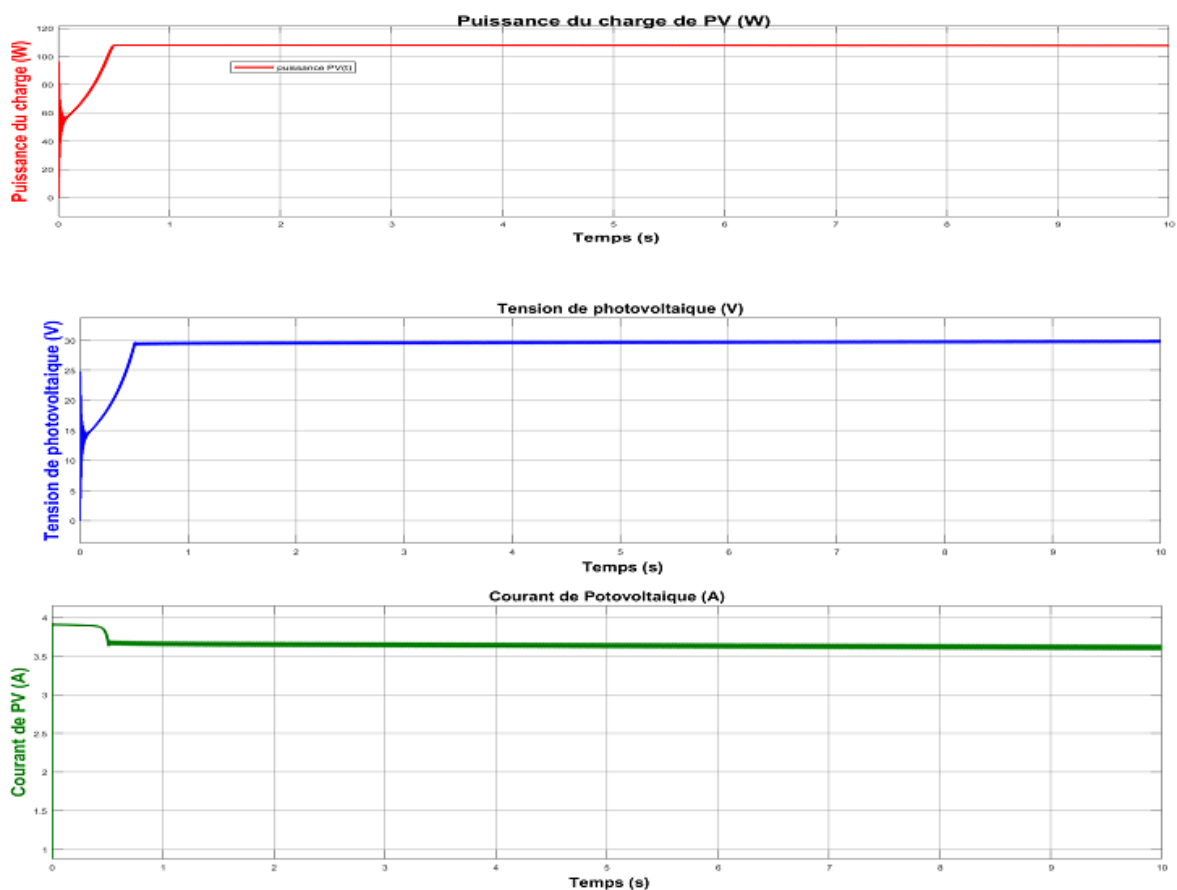


Figure 3.5 : Résultat de simulation de la GPV et la batterie en cas de charge dans 1000w /m²

Commentaires :

- La constante de l'irradiation à 1000 w/m², la valeur de puissance de GPV est fixe de 112 w tandis que le courant 3,6 A et la tension égale 30 V.

III.6.3 Résultat du simulation Batterie

- Cas de charge :

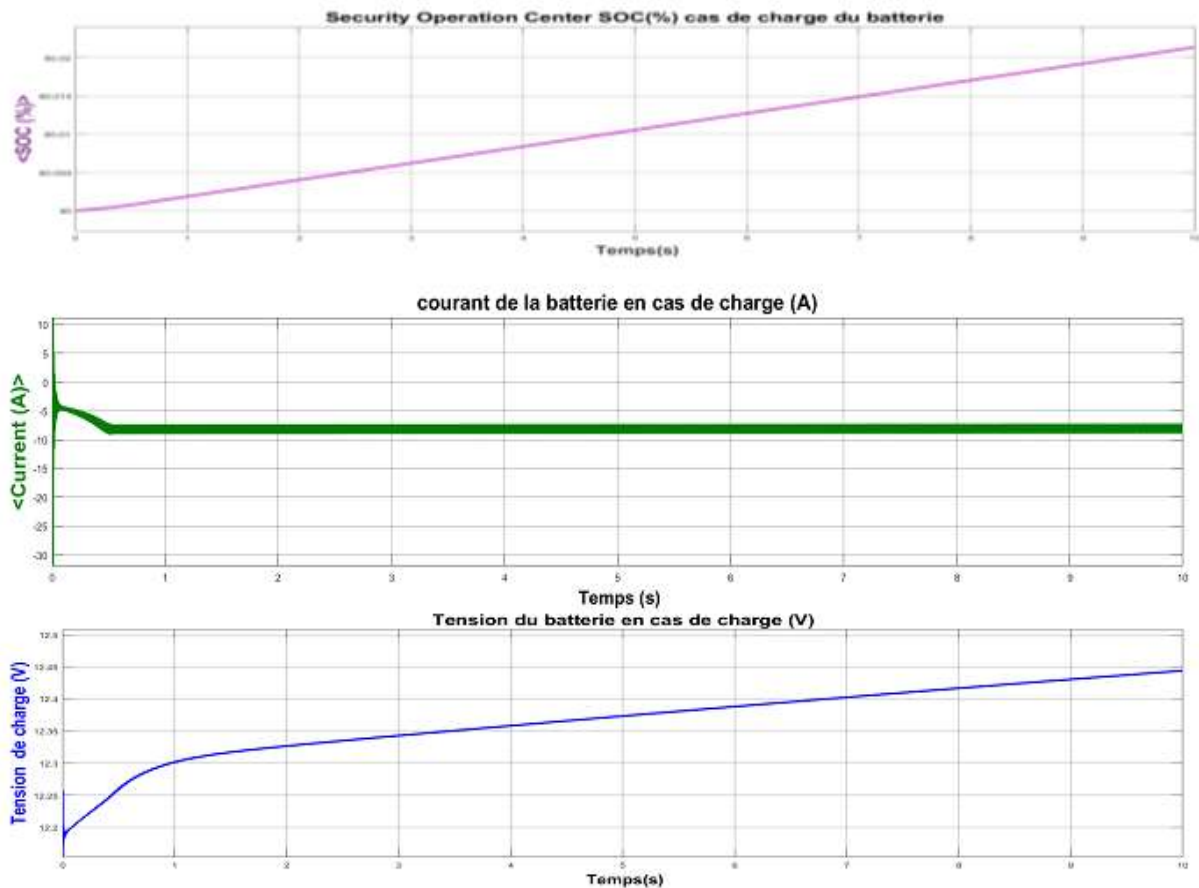


Figure 3.6 : Résultats de simulation de la batterie en cas de charge.

Commentaire

Le niveau de stockage de la batterie varie en fonction d'état de charge :
Lors de l'état de charge, le niveau de stockage de la batterie (SOC) augmente.

- Dans le cas de la charge, la tension de la batterie est de 12.45 V avec un courant de -8 A (une puissance négative de 100 W).

III.6.4 Simulation de photovoltaïque et batterie avec la charge « R »

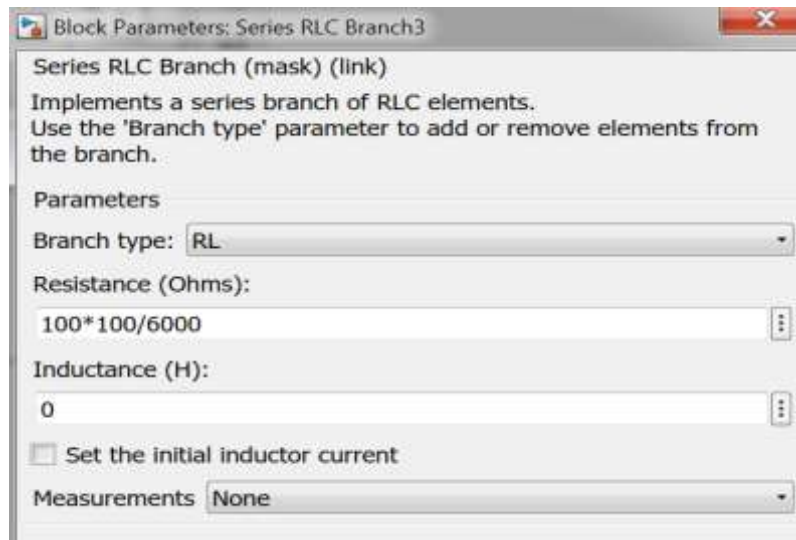


Figure 2.7 : Les données de la charge utiliser($R=1.67\Omega$ et $L=0H$)

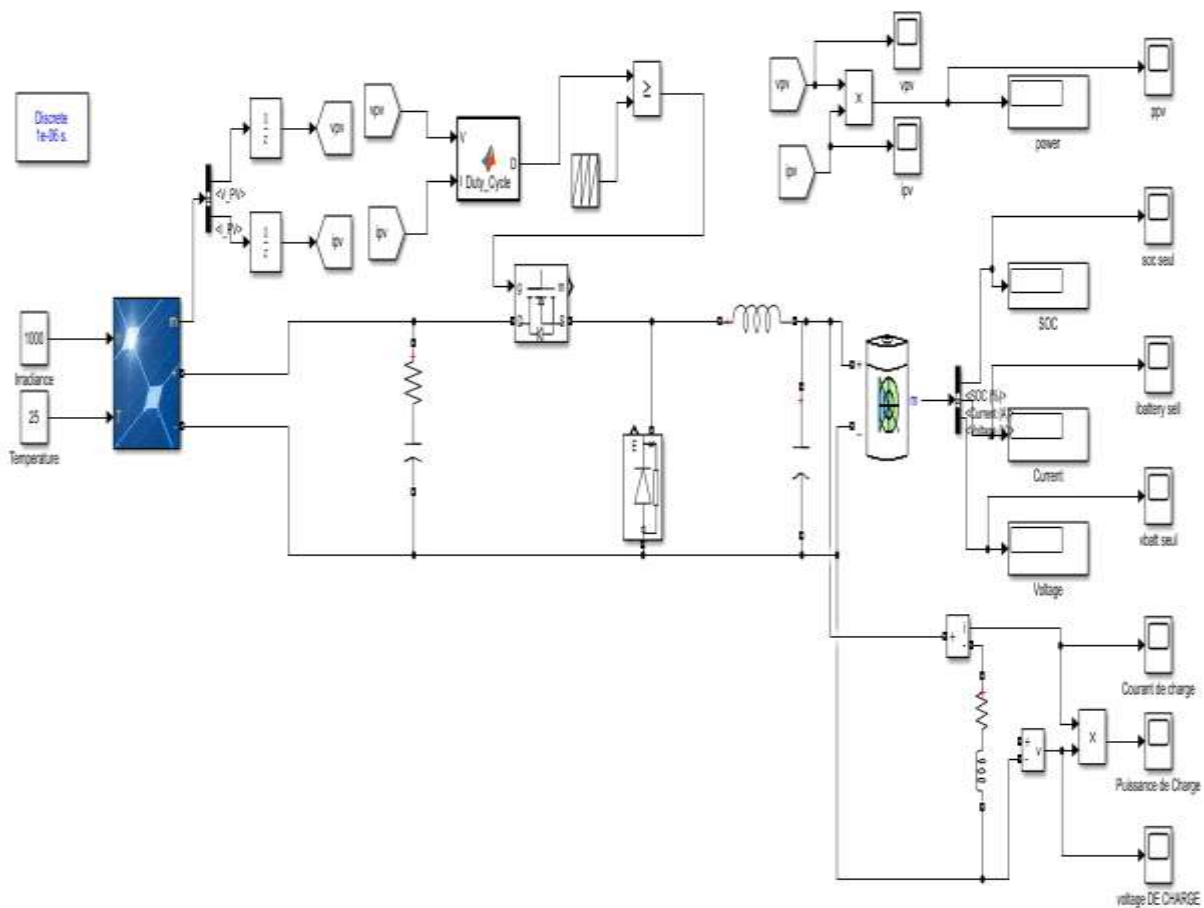


Figure 3.8 : Schéma du simulation de la batterie en cas de décharge

III.6.5 Résultat de la simulation photovoltaïque « R » utiliser

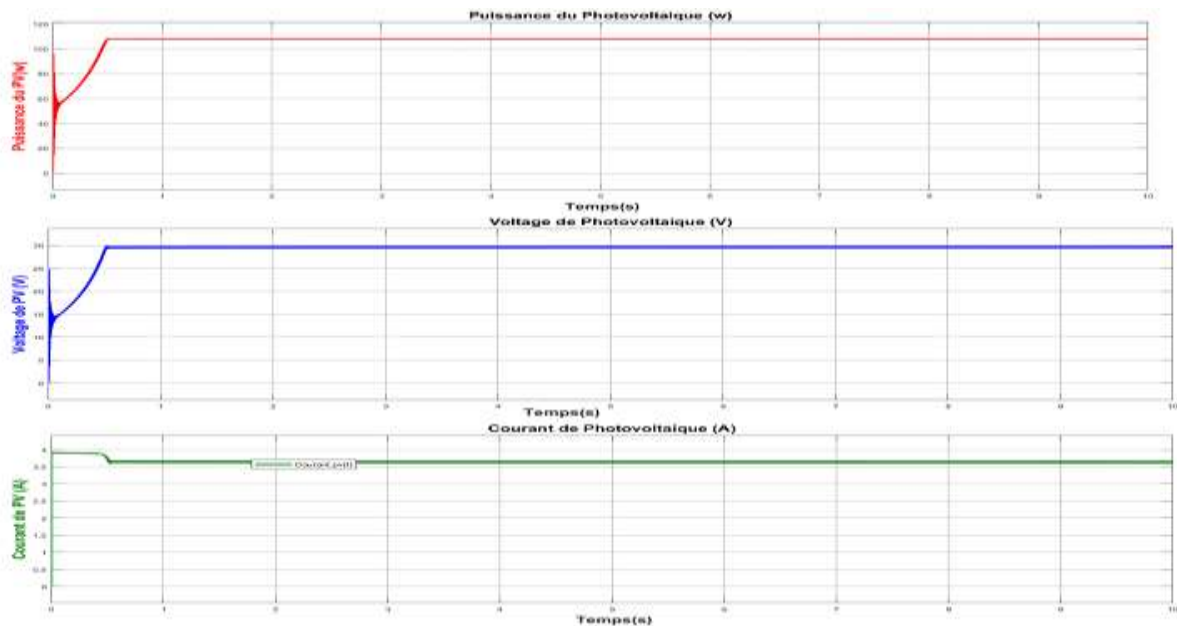


Figure 3.9 : Résultats de simulation de GPV et la batterie en cas de décharge.

Commentaire

Les mêmes résultats pour le GPV dans le cas de la batterie est en de charge (La constante de l'irradiation à 1000 w/m², la valeur de puissance de GPV est fixe de 112 w tandis que le courant 3,6 A et la tension égale 30 V).

III.6.6 Résultat de la simulation batterie avec la charge « R »

- Cas de décharge de la batterie :

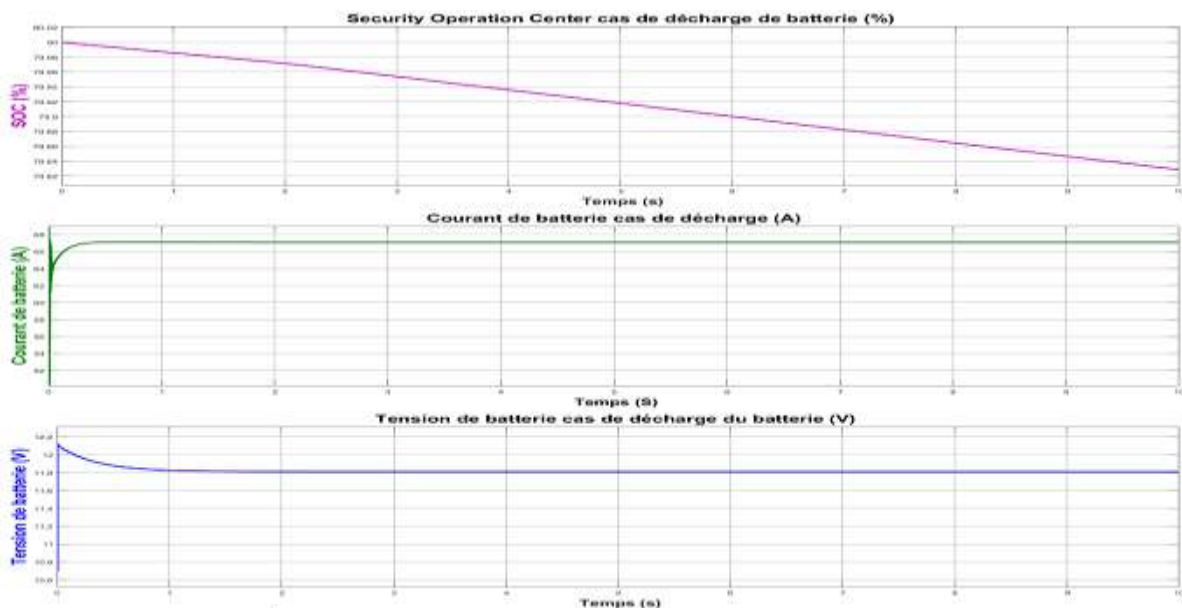


Figure 3.10 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge.

Commentaire

Le niveau de stockage de la batterie varie en fonction de chaque état :

Lors de l'état de décharge, le niveau de stockage de la batterie (SOC) diminue.

En revanche, lors de l'état de recharge, la tension est de 12 V avec un courant de 10 A (une puissance positive de 0.518 kW).

III.6.7 Résultat de la simulation du charge «R» avec photovoltaïque et la batterie

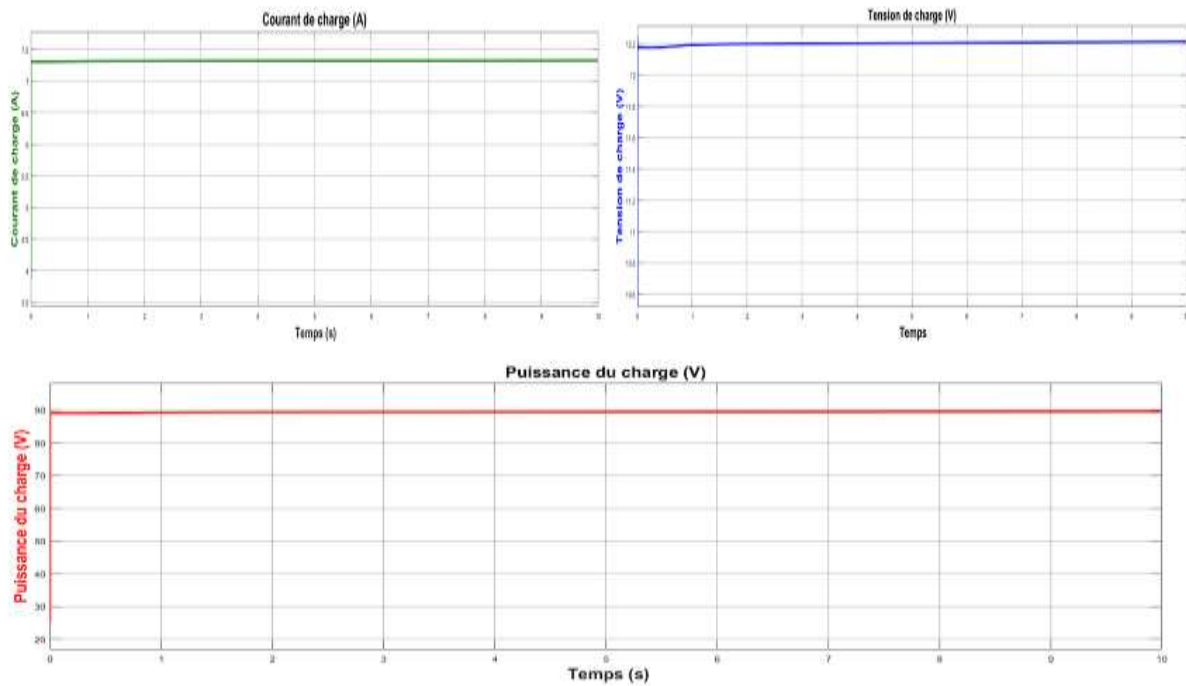


Figure 3.11 : Résultats de simulation de la charge si le système en cas de décharge.

Commentaire

La charge consomme une puissance de 90 w, avec une tension d'entrée de 12.2 V et un courant de 7.3 A.

III.7 Simulation de Pile à Combustible

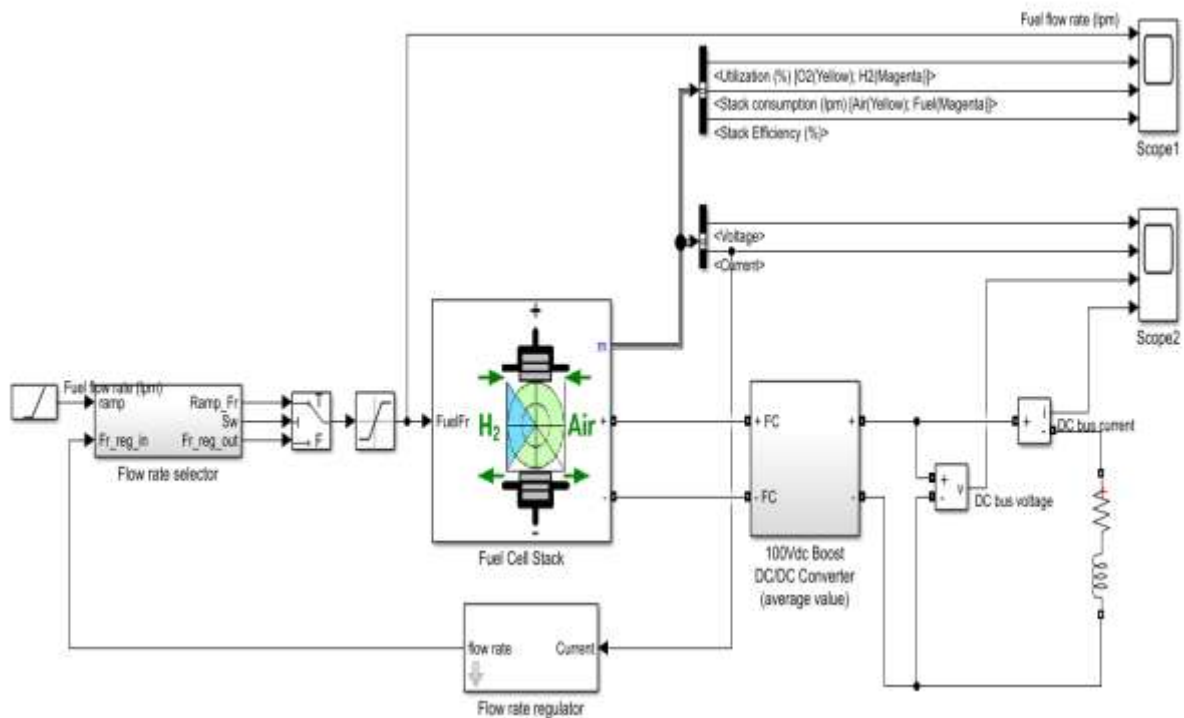


Figure 3.12 : schéma de la simulation de la pile combustible

III.7.1 Résultat de simulation de la pile à combustible

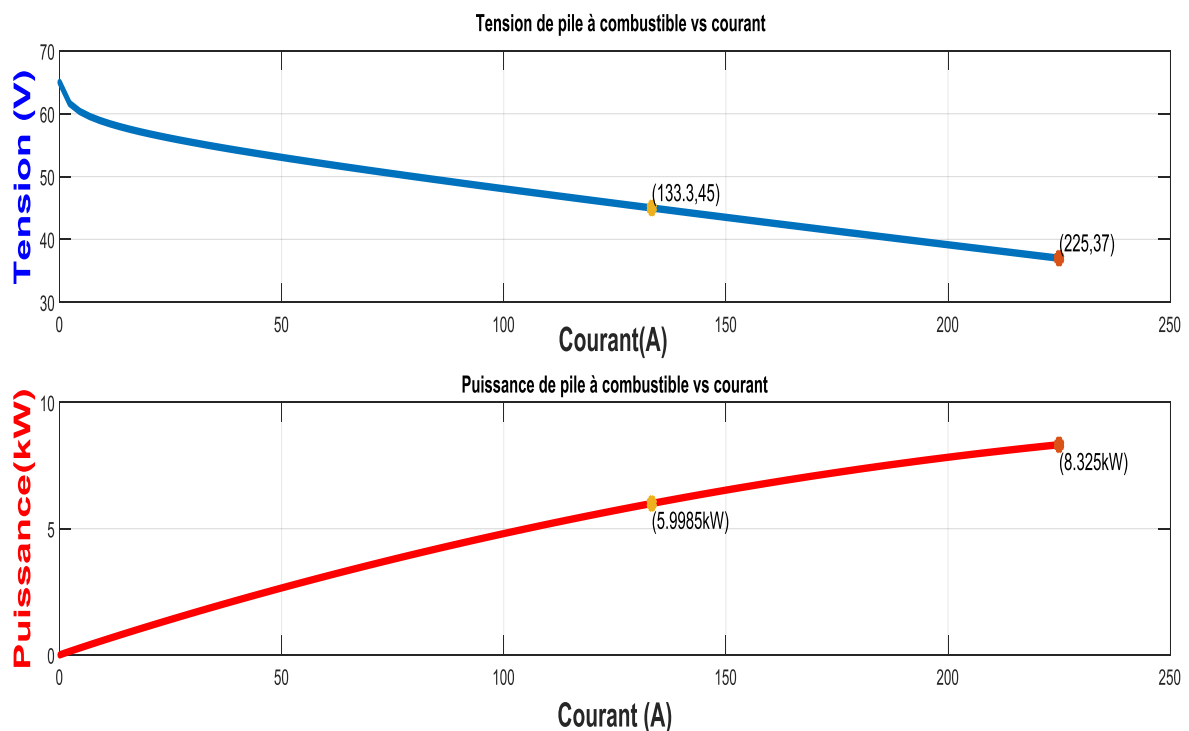


Figure 3.13 : Les courbes du pile à combustible (tension vs courant et puissance vs courant

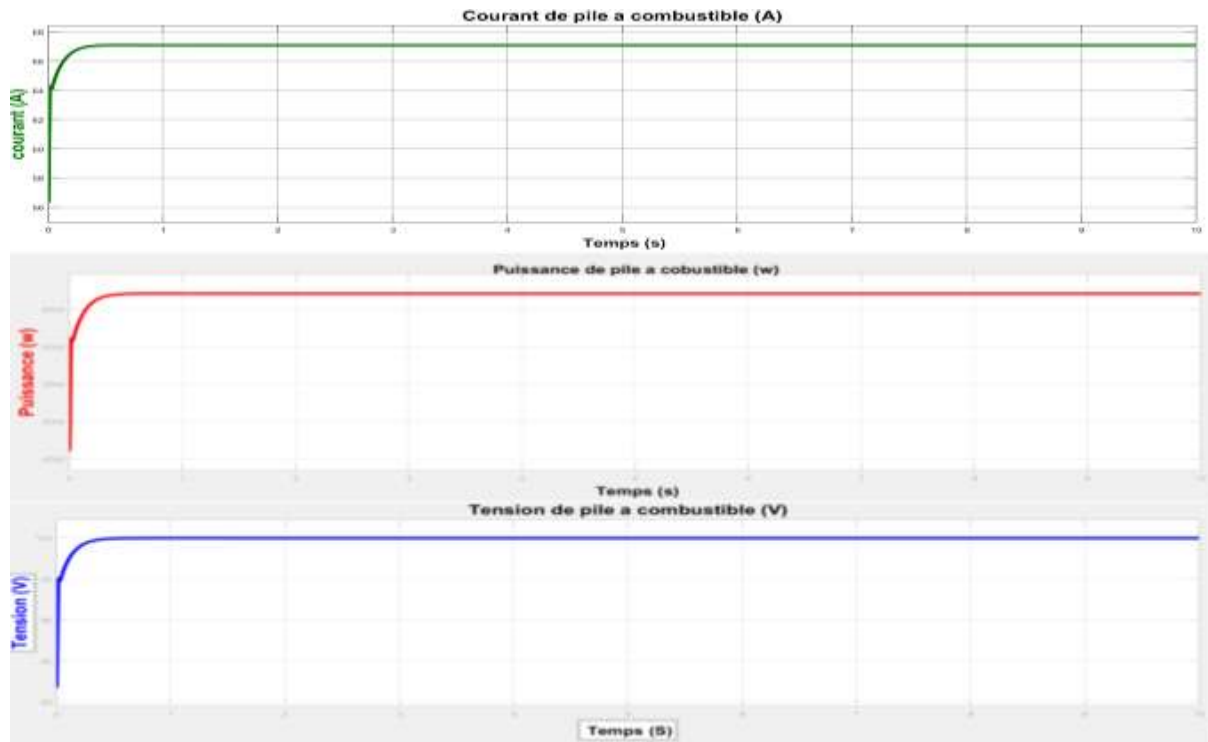


Figure 3.14 : Résultats de la simulation de la pile à combustible.

Commentaires

- La pile à combustible génère une puissance de 6.7 kW, avec une tension de sortie de 100 V et un courant de 67 A (dans l’annexe les paramètre du pile à combustible) .

III.8 Système hybride

III.8.1 Schéma et résultat de simulation

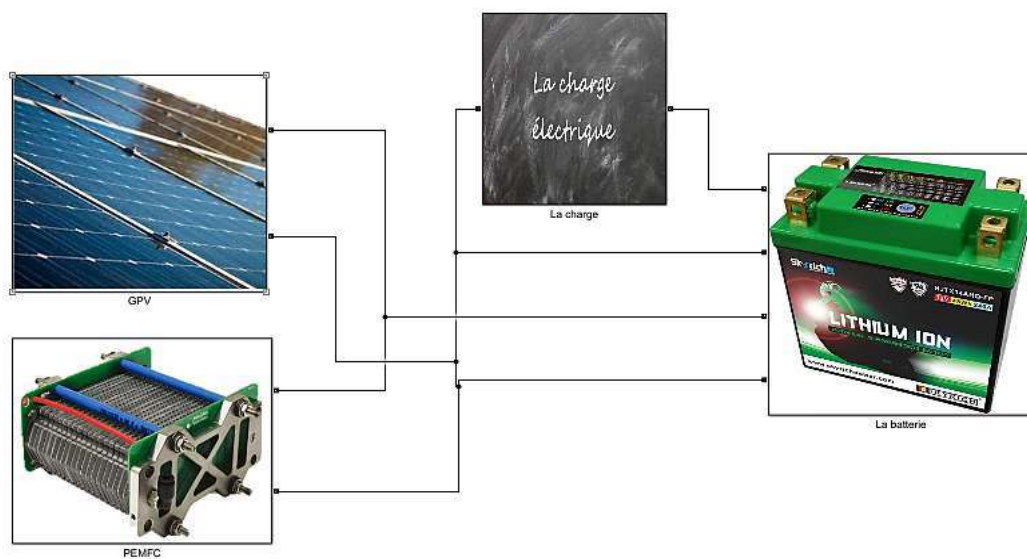


Figure 3.15 : Schéma synoptique de système hybride.

III.8.2 Simulation de système hybride sans raccordement avec GPV

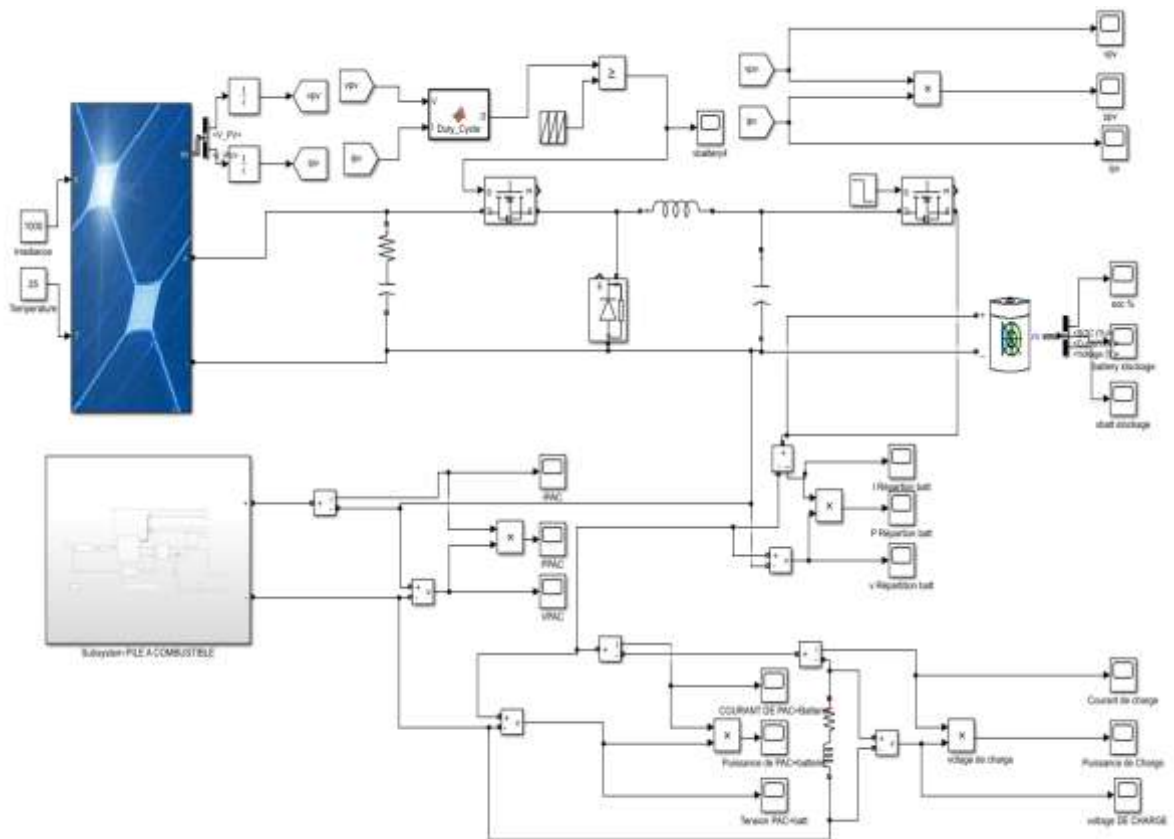


Figure 3.16 : L'alimentation de charge « R » avec PV, batterie et pile à combustible.

III.8.2.1 Résultat de simulation

a) Photovoltaïque

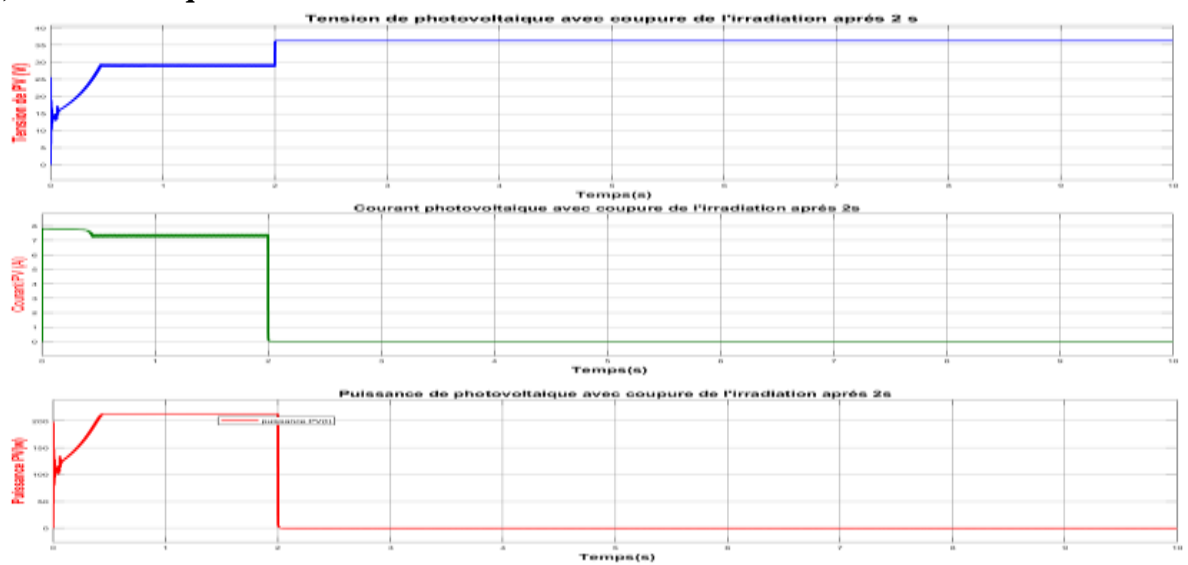


Figure 3.17 : Résultats de simulation de GPV avec coupure Ir après 2 s

Commentaires

- [0 s ; 2 s] C'est l'intervalle de fonctionnement maximal du GPV à cause de l'éclairement maximal.
- [2 s ; 10 s] le GPV ne fonctionne pas à cause de l'absence d'éclairement.

b) Stockage de batterie avec coupure de l'irradiation après 2 s

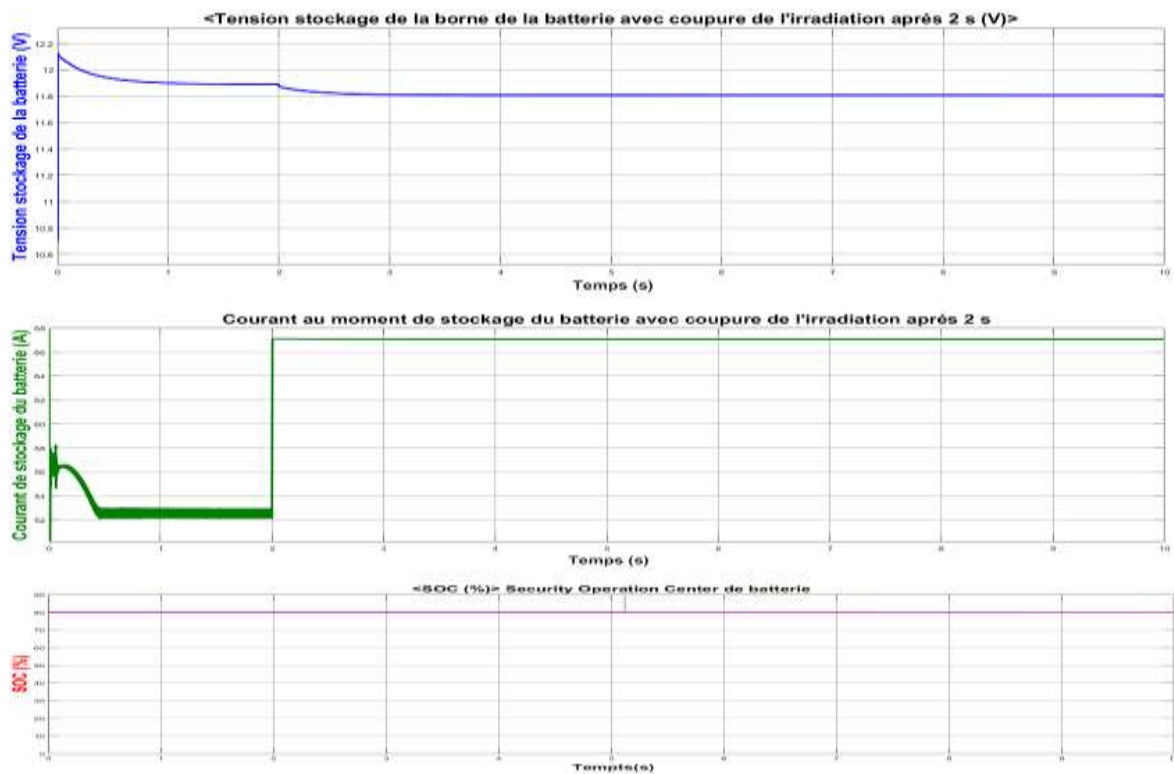


Figure 3.18 : Résultats de simulation de Batterie avec un coupure Ir après 2 s.

Commentaire

- [0 s ; 2 s] : c'est l'intervalle de stockage maximal a cause de présence de l'alimentation de GPV
- [2 s ; 10 s] : c'est l'intervalle de stockage diminuée par rapport au premier intervalle a cause de l'absence de l'éclairement

c) Répartition de la batterie



Figure 3.19 : Résultats de simulation de répartition de Batterie avec **une** coupure Ir après 2 s.

Commentaire

On dans tout $[0 ; 10]$ des valeurs constants pour la tension $=12$ V, le courant $I= 65$ A et la puissance $P= 800$ W. On conclure que la batterie bien déposée et donne la continuité de service pour certaine moment.

d) Pile à combustible avec une coupure de l'irradiation après 2 s

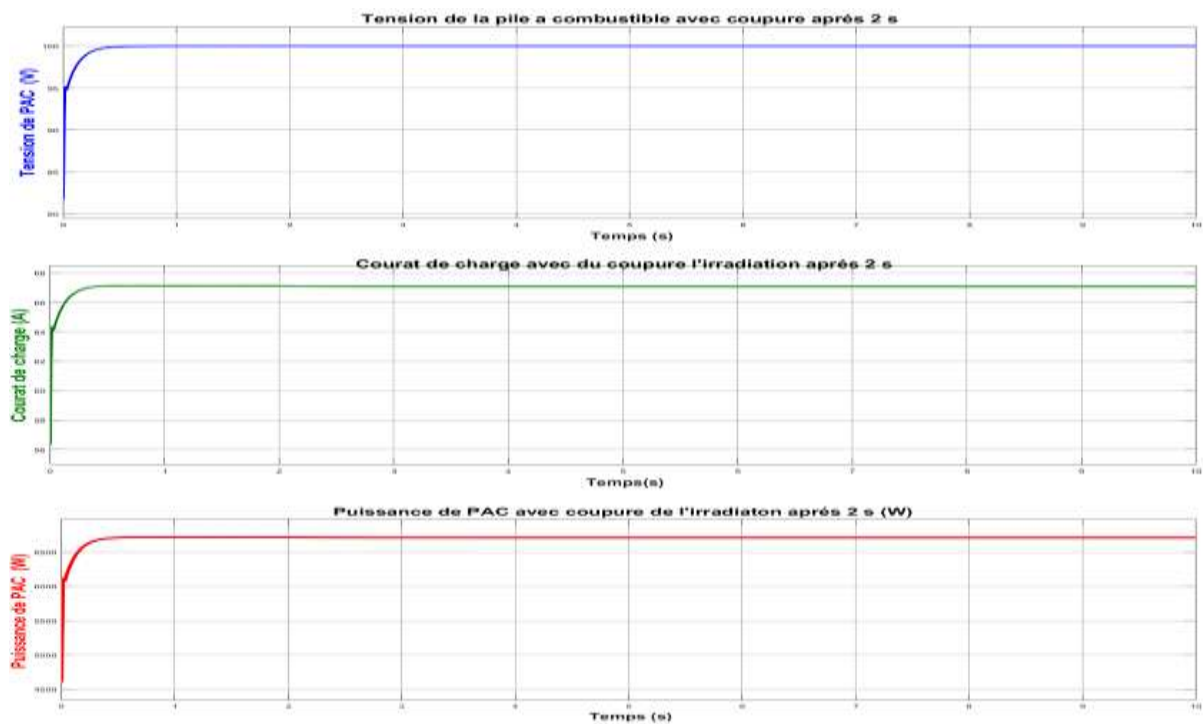


Figure 3.20 : Résultats de simulation de pile a combustible avec coupure Ir après 2s

Commentaire

La continuité de l'alimentation de pile à combustible malgré la coupure de l'irradiation donc nous garantissons l'alimentation des charges a cause de ses stocks d'hydrogène (H2).

e) Pile à combustible et batterie

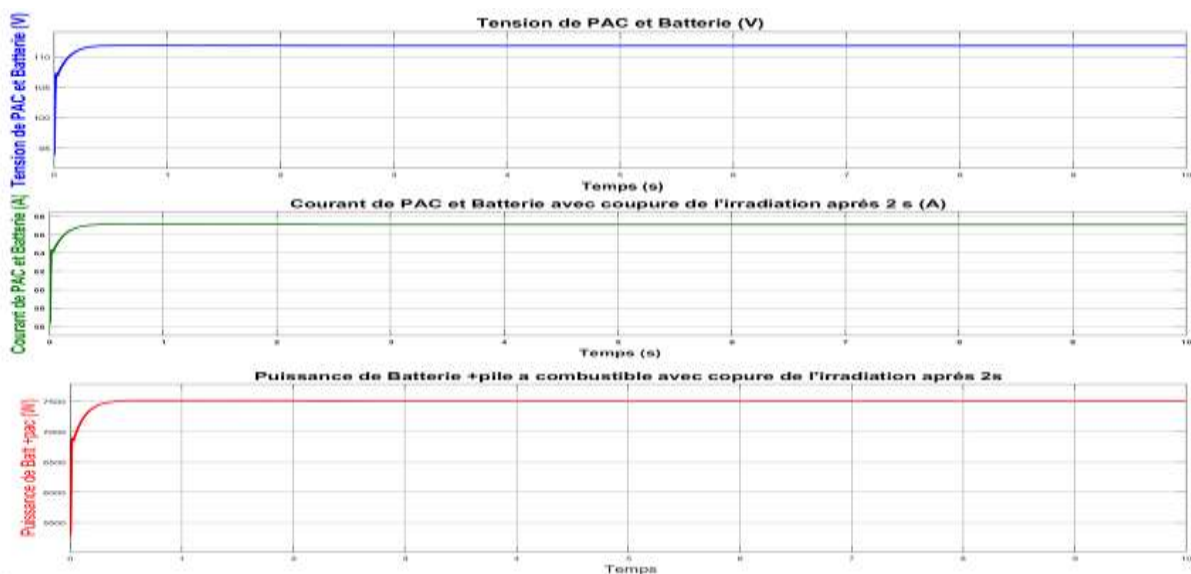


Figure 3.21 : Résultats de simulation de pile à combustible et batterie après 2s

Commentaires

La continuité de l'alimentation de pile à combustible malgré la coupure de l'irradiation donc nous garantissons l'alimentation des charges

f) Résultat de charge « R » du système hybride proposer

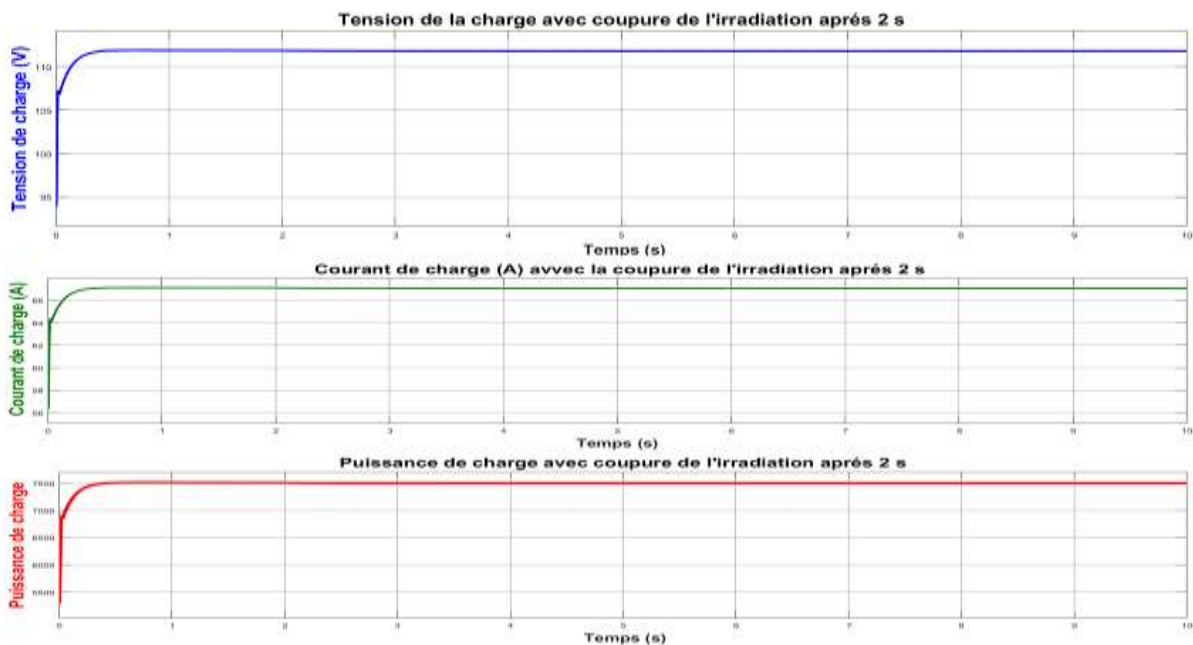


Figure 3.22 : Résultat du simulation de la charge « R » du système hybride Proposer.

Commentaire

D'après les résultats des simulations :

En conclure

➤ Cas de charge

• En la présence de GPV, le panneau fournit une puissance suffisante pour charger simultanément la batterie et alimenter la charge. On a obtenir les résultats suivantes :

- Courant de charge 52 (A).
- Tension de la charge 112 (V).
- Tension de la batterie 12.1 (V).

➤ Cas de décharge

En l'absence de GPV, la batterie est déchargée pour alimenter la charge à l'aide du PEMFC qui fournit une puissance suffisante pour compenser le déficit et maintenir les performances de la charge. On a obtenir les résultats suivantes :

- Courant de charge 67 (A).
- Tension de la charge 112 (V).
- Tension de la batterie 12 (V).

La batterie dans notre simulation représente une batterie réelle, qui a besoin de quelques heures pour la charge ou la décharge, c'est pour ça nous notons donc un léger changement de l'état de SOC ne peut pas être observé pendant le temps de simulation dans les deux cas.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé les modèles Simulink de chaque composant des systèmes de conversion photovoltaïque avec batteries et pile à combustible. À partir des simulations, nous avons conclu qu'il est possible d'utiliser un système hybride avec une commande pour gérer l'utilisation de chaque composant en fonction des besoins. Les résultats des simulations ont démontré le bon fonctionnement du système étudié, et ces résultats ont été présentés et commentés. Ces informations peuvent être précieuses pour la conception et l'optimisation de systèmes hybrides similaires dans le monde réel.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les systèmes hybrides d'énergie renouvelable sont considérés comme la solution la plus prometteuse. En Afrique, où le potentiel solaire est élevé, il est essentiel de remplacer progressivement les sources d'énergie conventionnelles, qui deviennent de plus en plus contraignantes en termes de coûts d'exploitation et de fonctionnement. L'énergie photovoltaïque offre une ressource globale considérable et peut contribuer de manière significative à l'approvisionnement mondial en électricité.

La simulation du système hybride l'objet de notre étude démontre son bon fonctionnement, assurant une alimentation de l'énergétique suffisante pour la charge résistive. Les trois sources d'énergie fonctionnent d'une manière alternative, permettant une compensation en cas d'absence d'une source. Ce système hybride peut être utilisé pour alimenter des pompes entraînées par les moteurs électriques.

À partir de cette simulation, nous avons conclu qu'il est possible d'utiliser un système hybride avec une commande pour gérer l'utilisation de chaque composant en fonction des besoins.

En résumé, on peut dire qu'avec une installation hybride et une bonne stratégie de contrôle on peut atteindre des objectifs principaux qui sont :

- Assurer la demande en énergie électrique des charges isolés et les régions éloignent.
- Alimenter les charges électriques sans interruption.
- Maximiser l'utilisation des énergies renouvelables.
- Minimiser la consommation en combustible fossile.

En conclusion, cette étude souligne que le système hybride présente certains inconvénients. Pour améliorer ses performances et réduire ses limitations, il est recommandé de faire des études approfondis pour augmenter la puissance des systèmes hybrides pour l'utilisation dans l'industrie pétrolière.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] : https://www.researchgate.net/figure/Schema-dune-chaine-de-conversion-denergie-solaire-PV_fig1_356977691.
- [2] : https://www.researchgate.net/publication/315896255_ESTIMATION_DE_L'IRRADIATION_SOLAIRE_GLOBALE_DANS_LA_VILLE_DE_M'SILA_ALGERIE
- [3] https://assets.lls.fr/pages/83585/ES_T5_INF04_V4_COURS.svg.
- [4] :Souleyman FERDJANI, Omar MAATALLAH, Salim MAKHLOUFI, et al. Etude et Réalisation d'un Hacheur Boost Commandé par le μ C ARDUINO en vue d'Implémenter des Commandes MPPT. PhD thesis, Université Ahmed Draia-ADRAR, 2019.
- [5] :(Thuillier.2001).
- [6] :(Lincot .2001, 2003).
- [7] :(Oleskey .2005).
- [8] :(Wenham .Green 1995).
- [9] :(Wang.2014).
- [10] :(Willoughby.2014, Wang.2014, Gourdin.2007).
- [11] :(Polman.2016).
- [12] :(Geerligs 2005 ; Beaudhuin2009).
- [13] :(Fourier.2014).
- [14] :(Dondon 2000).
- [15] : https://www.dekloo.net/wpcontent/uploads/tension_courant_puissance_photovoltaique_mpp.jpg.
- [16] : http://thesis.essatlemcen.dz/bitstream/handle/STDB_UNAM/169/etdue%20des%20techniques%20d%27hybridqtion%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [17] : <https://sulfate.ch/Energie/A%20PARTIR%20DU%20SOLEIL.htm>.
- [18] :Y Bakelli. Étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque mémoire de magister. Université de Boumerdes, 2005. **7**.
- [19] :BORNI Abd elhalime, « Étude Et Optimisation D'un Multi Système Hybride De Conversion D'énergie Electrique », thèse doctorat, université Constantine 1,12/03/2015.

Références Bibliographiques

- [20] :<https://amstein-walthert.ch/fr/newsroom/aw-geneve-realise-un-projet-100-autonome-en-energie/>
- [21] :<https://www.lelivrescolaire.fr/page/5413763>
- [22] :https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-fonctionnement-Du-cote-de-lanode-les-molecules-de-lhydrogene-injecte_fig1_281583601
- [23] :<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/dra-71-benchmark-sur-les-electrolyseurs-et-stockage-hydrogene-vf-1469010848.pdf>
- [24] :<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752782/document>
- [25] :A.HADDAD : Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique, thèse de doctorat, Université De Technologie De Belfort-Montbéliard, (2019)
- [26] :RS. GEMMEN :.Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating conditions. ASME International Mechanical Engineering Congress and Expositions, New York, (2011)
- [27] :M.UZUNOGLU, M. S . ALAM : Dynamic modeling, design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications, Journal of Energy conversion and Management, (2017)
- [28] :Souleyman FERDJANI, Omar MAATALLAH, Salim MAKHLOUFI, et al. Etude et Réalisation d'un Hacheur Boost Commandé par le μ C ARDUINO en vue d'Implémenter des Commandes MPPT. PhD thesis, Université Ahmed Draia-ADRAR, 2019.
- [29] :M.T. Iqbal : Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system, Renewable Energ, (2003).
- [30] : L. ARAB et Z.CHEBBI : Étude et simulation d'une pile à combustible de type PEM, mémoire de master, université de A.M OULHADJ-Bouira, 2016.
- [31] :Amphlett JC, Baumert RM, Mann RF, PeppleyBA, Roberge PR, Harries TJ : Performance modeling of the Ballard mark-IV solid polymer electrolyte fuel cell. Journal of the Electrochemical Society, (1995).
- [32] :<https://www.batterie-solaire.com/dimensionnement-batteries-delestage-electrique.htm>.
- [33] :https://www.cder.dz/vlib/cder_ft/cder_ft_00010_txt.pdf.

Annexe

Annexe

Paramètres de la pile à combustible

Modele pile à combustible : PEMFC – 6 KW – 45 Vdc

Symboles	Description	Valeurs	Unités
Nc	Number de cellules	65	
Hn	Nominal hydrogène utilisé	99.56	%
T	Operating temperature	65	°C
p	Fuel pressure	1.5	bar
Ch	Composition d'hydrogène	99.95	%
Inom	Nominal operating courant	133.3	A
Vnom	Nominal operating tension	3.45	V
Imax	Maximal operating courant	225	A
Vmax	Maximal operating tension	37	V

Convertisseur utiliser pour la pile à combustible : 100Vdc Boost DC/DC Converter (average value)

Annexe

Fuel cell nominal parameters:

Stack Power:

-Nominal = 5998.5 W

-Maximal = 8325 W

Fuel Cell Resistance = 0.07833 ohms

Nerst voltage of one cell [En] = 1.1288 V

Nominal Utilization:

-Hydrogen (H₂)= 99.56 %

-Oxidant (O₂)= 59.3 %

Nominal Consumption:

-Fuel = 60.38 slpm

-Air = 143.7 slpm

Exchange current [i₀] = 0.29197 A

Exchange coefficient [alpha] = 0.60645

Fuel cell signal variation parameters:

Fuel composition [x_H₂] = 99.95 %

Oxidant composition [y_O₂] = 21 %

Fuel flow rate [FuelFr] at nominal Hydrogen utilization:

-Nominal = 50.06 lpm

-Maximum = 84.5 lpm

Air flow rate [AirFr] at nominal Oxidant utilization:

-Nominal = 300 lpm

-Maximum = 506.4 lpm

System Temperature [T] = 338 Kelvin

Fuel supply pressure [P_{fuel}] = 1.5 bar

Air supply pressure [P_{Air}] = 1 bar