

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

DAHEUR Mohammed et TAINI Souheil A. Elmouiz

Thème:

**Etude et simulation du système hybride PV/
Pile à combustible/Batterie**

Soumis au jury composé de :

M ^r BENAOUADJ Mahdi	MCB	Président	UKM Ouargla
M ^r IDER Zahir	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r TAIBI Djamel	MAA	Co-Encadreur	UKM Ouargla
M ^r LOUAZENE Lakhdar	MCA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2019/2020

Résumé

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie et biomasse) se développent intensément partout dans le monde, portées par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Et l'un des inconvénients de cette énergie est que ses sources peuvent ne pas être disponibles dans certaines circonstances, il a donc été envisagé d'utiliser le système hybride comme la meilleure solution à ce problème.

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride constitué d'un générateur photovoltaïque (panneau solaire), d'une pile à combustible et d'une batterie. Ce système alimente une charge électrique. Nous avons utilisé le management de chaque composant du système afin d'utiliser chacun selon le besoin.

L'étude a été réalisée sous Matlab / Simulink avec l'utilisation des convertisseurs.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Pile à combustible, Système hybride, Batterie.

ملخص

تتطور الطاقات المتجددة (الهيدروليكية، والشمسية، وطاقه الرياح، والطاقه الحراريه الأرضية، والكتلة الحيوية) بشكل مكثف في جميع أنحاء العالم، مدفوعة بالحاجة إلى مكافحة الاحتباس الحراري من خلال تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ومن عيوب هذه الطاقة أن مصادرها قد لا تكون متاحة في ظل ظروف معينة، لذلك تم اعتبار استخدام النظام الهجين كأفضل حل لهذه المشكلة.

في هذا العمل، درسنا نظامًا هجينًا يتكون من مولد ضوئي (لوحة شمسية) وخلية وقود وبطارية. يوفر هذا النظام تغذية لحمولة كهربائية. استخدمنا إدارة كل مكون من مكونات النظام من أجل استخدام كل مكون حسب الحاجة.

أجريت الدراسة تحت MATLAB / Simulink وباستخدام محولات.

الكلمات المفتاحية: مولد كهربائي ضوئي، خلية وقود، نظام هجين، بطارية.

Abstract

Renewable energies (hydraulic, solar, wind, geothermal and biomass) are developing intensively all over the world, driven by the need to fight against global warming by reducing greenhouse gas emissions. And one of the downsides of this energy is that its sources may not be available under certain circumstances, so it was considered to use the hybrid system as the best solution to this problem.

In this work, we studied a hybrid system consisting of a photovoltaic generator (solar panel), a fuel cell and a battery. This system supplies an electrical load. We used the management of each system component in order to use each one as needed,

The study was carried out under MATLAB / Simulink with the use of converters.

Keywords: Photovoltaic generator, Fuel cell, Hybrid system, Battery.

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, nous tenons à remercier vivement **Mr. IDER Zahir** et **Mr. TAIBI Djamel** nos encadreurs qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements, nos vifs remerciements à **Mr. GOUGUI Abd elmoumen** pour son aide.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury, **Mr. BENAOUADJ Mahdi** et **Mr. LOUAZENE Lakhdar** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre 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.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

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

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

À ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au monde ;

Mes chers frères et ma sœur ;

À toute ma famille et tous mes proches.

À mon binôme Souheil. Pour m'avoir participé ce travail.

À tous mes amis, chacun en son nom.

Pour tous les enseignants du département de génie électrique.

À mes collègues du département électrotechnique.

À tous ceux que j'aime.

Mohammed

Dédicaces

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

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

À ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au monde ;

Mes chers frères : Faiçel, Aimen, Med. Taher et Zaid ;

À mes tantes et mes oncles.

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

À mon binôme Mohammed, 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.

Souheil Abd Elmouiz

Sommaire

REMERCIEMENT

DEDICACES

DEDICACES

SOMMAIRE

SYMBOLES ET NOTATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : Generalites Sur Les Systemes Hybrides..... 3

I.1. INTRODUCTION 4

I.2. ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE 4

I.2.1. DEFINITION 4

I.2.2. PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE 4

I.3. BATTERIES DE STOCKAGE 10

I.3.1. DEFINITION 10

I.3.2. DIFFERENTS TYPES DE BATTERIES 11

I.3.3. EXIGENCES SUR LES BATTERIES SOLAIRES 12

I.3.4.	MECANISME DE CHARGE / DECHARGE DANS LA BATTERIE LI-ION.....	13
I.4.	PILE A COMBUSTIBLE.....	14
I.4.1.	DEFINITION.....	14
I.4.2.	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE PILE A COMBUSTIBLE.....	15
I.4.3.	DIFFERENTS TYPES DE PILES A COMBUSTIBLE.....	16
I.4.4.	PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS (PEMFC).....	17
I.5.	SYSTEMES HYBRIDES.....	18
I.5.1.	DEFINITION D'UN SYSTEME HYBRIDE.....	18
I.5.2.	AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UN SYSTEME HYBRIDE.....	19
I.6.	LES CONVERTISSEURS STATIQUES.....	19
I.6.1.	CONVERTISSEUR DC/DC (HACHEUR).....	19
I.6.2.	CONVERTISSEUR DC/AC (ONDULEUR).....	19
I.6.3.	CONVERTISSEUR AC/DC (REDRESSEUR).....	20
I.7.	TOPOLOGIES DES SYSTEMES ELECTRIQUES HYBRIDES.....	20
I.7.1.	COUPLAGE DE BUS DC.....	20
I.7.2.	COUPLAGE DE BUS AC.....	20
I.8.	CONCLUSION.....	20

CHAPITRE II : Modelisation Des Differents Composants Du Système Hybride..21

II.1.	INTRODUCTION.....	22
II.2.	STRUCTURE D'UN SYSTEME ELECTRIQUE HYBRIDE.....	22
II.3.	SYSTEME DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUE.....	23
II.3.1.	STRUCTURE DE LA CHAINE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE.....	23
II.3.2.	MODELE D'UN PANNEAU SOLAIRE.....	23
II.3.3.	MODELE D'UN HACHEUR SURVOLTEUR (BOOST).....	29
II.3.4.	OPTIMISATION DE LA PUISSANCE DES MODULES PV.....	30
II.4.	SYSTEME DE PILE A COMBUSTIBLE.....	32
II.4.1.	MODELE DE PILE A COMBUSTIBLE PEM.....	32
II.4.2.	MODELE DU CONVERTISSEUR BOOST DE LA PILE A COMBUSTIBLE.....	33
II.5.	SYSTEME DE BATTERIE.....	34
II.5.1.	MODELISATION DE LA BATTERIE.....	34
II.5.2.	MODELISATION DU CONVERTISSEUR DC/DC (BACK –BOOST).....	36

II.6. CONCLUSION.....	37
-----------------------	----

CHAPITRE III : Simulation du système hybride..... 38

III.1. INTRODUCTION	39
---------------------------	----

III.2. SIMULATION DU GPV \ FC \BATTERIE.....	39
--	----

III.2.1. LES PARAMETRES DES SOURCES	39
---	----

III.2.2. CALCUL DE L ET C DES CONVERTISSEURS :.....	40
---	----

III.3. RESULTATS DE SIMULATION	40
--------------------------------------	----

III.3.1. GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV)	40
--	----

III.3.2. BATTERIE	43
-------------------------	----

III.3.3. PILE A COMBUSTIBLE	45
-----------------------------------	----

III.3.4. SYSTEME HYBRIDE.....	46
-------------------------------	----

III.4. CONCLUSION	49
-------------------------	----

CONCLUSION GENERALE..... 51

BIBLIOGRAPHIE

Symboles et notations

Panneaux

I_g : Le courant de sortie du générateur [A].

V_g : La tension de sortie du générateur [V].

I_L : le courant photonique [A].

I_0 : le courant de saturation inverse [A].

γ : le facteur de qualité.

R_S : la résistance série [Ω].

K : Constante de Boltzmann, $K = 1.3854 \cdot 10^{23}$ [J/K].

q : Constante de charge d'électron, $q = -1.602 \cdot 10^{-19}$ [C].

I : Le courant délivré par le module [A].

I_{ph} : Photo courant [A].

I_d : Courant de diode [A].

I_{sh} : Le courant shunt [A].

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

I : Le courant de cellule [A].

V : La tension de cellule [V].

R_s : La résistance série de la cellule [Ω].

E_G : L'ensoleillement (irradiation solaire) [W/m^2].

$E_{réf}$: Irradiation de référence 1000 [W/m^2].

T_j : La température de jonction de la cellule [$^{\circ}C$].

$T_{jréf}$: La température de jonction de référence [$^{\circ}C$].

T : La température ambiante [$^{\circ}C$].

I_s : Le courant de saturation [A]

n : Le facteur de qualité de la diode.

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

E_g : Énergie de gap

N_s : Nombre des panneaux en séries.

N_p : Nombre des panneaux en parallèle.

Batterie :

C_{bat} : La capacité nominale de la batterie [Ah].

Q_{bat} : La quantité de charge [C] manquante par rapport à C_{bat} .

E_0 : f.e.m de la batterie [V].

R_s : Résistance sériée de la batterie [Ω]

I_b : Courant de batterie [A].

$I_{bréf}$: Courant de référence [A].

V_{bat} : Tension de la batterie [V].

R_s : Résistance sériée de la batterie [Ω]

E_{bat} : Énergie de la batterie [Wh/jour].

N_j : Nombre de jours d'autonomie de la batterie.

η_{bat} : Rendement de la batterie.

D : Profondeur de la batterie.

E_0 : f.e.m de la batterie [V].

E_0' : f.e.m de group des batteries [V].

C_0' : Capacité nominale de group des batteries [Ah].

R_s' : Résistance série de groups des batteries [Ω].

V_{dc} : Tension de bus [V].

$V_{dc,ref}$: Tension de référence [V].

Pile à combustible :

E_{Nernst} : Tension de Nernst [V].

V_{act} : Polarisation d'activation [V].

V_{ohm} : Polarisation ohmique [V].

V_{conc} : Polarisation de concentration [V].

T : Température opératoire absolue de la pile [K].

P^*H_2 : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène [atm].

P^*O_2 : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène [atm].

I_0 : 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].

\dot{A} : 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.

I_{FC} : Densité du courant de fonctionnement permanent [A/cm^2].

I_{lim} : Densité du courant limite [A].

Liste des abréviations

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.
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.

Liste des figures

Figure I.1 : Panneau photovoltaïque.....	5
Figure I.2 : Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.....	5
Figure I.3: cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.4: Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	7
Figure I.5: Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	8
Figure I.6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	8
Figure I.7 : Caractéristique puissance-tension pour différentes irradiations.....	9
Figure I.8 : Mécanisme de charge et de décharge dans la batterie rechargeable Li-Ion (HSW 2012).....	14
Figure I.9 : Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie.....	15
Figure I.10: Principe de fonctionnement de piles à combustible à électrolyte acide (A) Ou alcalin (B) [9].....	16
Figure I.11 : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas).....	17
Figure II.1 : Structure générale d'un système électrique hybride	22
Figure II.2: Différents constituants de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	23
Figure II.3: Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque	24
Figure II.4: Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un module solaire	24
Figure II.5 : Modèle équivalent à une diode.....	25
Figure II.6 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode.....	26
Figure II.7 : Modèle équivalent à deux diodes.....	28
Figure II.8 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC.....	29
Figure II.9 : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha.T]$	29
Figure II.10: Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha.T, T]$	30
Figure II.11 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & Observation.....	32
Figure II.12: Schéma équivalent de la pile à combustible.....	32
Figure II.13: Schéma équivalent du Convertisseur Boost de la pile à combustible.....	34

Figure II.14 : Modèle R-C de la batterie.....	35
Figure II.15 : Montage Back/Boost du convertisseur DC-DC.....	36
Figure II.16 : Commande du convertisseur bidirectionnel.....	37
Figure III.1: Allure de l'éclairement dans un jour.....	41
Figure III.2 : Schéma de simulation de GPV.....	41
Figure III.3 : Résultats de simulation de GPV.....	42
Figure III.4 : Schéma de simulation de la batterie.....	43
Figure III.5 : Résultats de simulation de la batterie en cas de charge.....	43
Figure III.6 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge.....	44
Figure III.7 : Schéma de simulation de la pile à combustible.....	45
Figure III.8 : Résultats de simulation de la pile à combustible	45
Figure III.9 : Schéma de simulation de système hybride.....	46
Figure III.10 : Résultats de simulation de batterie du système hybride en cas de charge....	47
Figure III.11 : Résultats de simulation de GPV du système hybride en cas de charge.....	47
Figure III.12 : Résultats de simulation de la pile du Système hybride en cas de charge.....	48
Figure III.13 : Résultats de simulation de système hybride en cas de décharge.....	48

Liste des tableaux

Tableau I.1: Différents types des batteries [5].....	12
Tableau I.2 : Les différents types de PC.....	16
Tableau III.1 : : Paramètres du panneau photovoltaïque.....	39
Tableau III.2: Paramètres de la Batterie.....	39
Tableau III.3: Paramètres de la pile à combustible.....	40

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde, ceci est lié à la croissance de la population mondiale ainsi qu'à l'activité industrielle des pays en voie de développement qui a entraîné une explosion des besoins en énergie.

Cette énergie est assurée à l'origine par les fossiles (pétrole, gaz...). La consommation excessive de ces ressources énergétiques limitées conduit à l'épuisement progressif de ces réserves et intensifie les rejets de gaz à effet de serre d'où la pollution de l'atmosphère qui cause un changement climatique. Face à ces conséquences, il est nécessaire de prendre en considération le développement des énergies alternatives dites sources d'énergies renouvelables [1].

L'utilisation des énergies renouvelables comme alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire, s'avère une solution très attrayante du fait que celles-ci sont inépuisables, non polluantes, très adaptées à la production décentralisée et les technologies sont actuellement au point pour utiliser ces énergies au quotidien. Leur exploitation pour la production d'électricité est très rentable dans les sites isolés ; là où l'extension du réseau électrique serait un échec financier [2].

Comme pour toutes, les sources d'énergie renouvelables, elles ont aussi leurs inconvénients : On note en priorité le coût relativement élevé des installations nécessaires dont on peut espérer leur durée pendant des années. De plus, la plupart de ces énergies vertes sont soumises aux caprices de la Dame nature. En fait, les jours sans vent ou sans trop de lumière peuvent sérieusement entraver la production d'énergie éolienne et solaire et peuvent ne pas être disponibles toute heure de la journée [3].

Pour cela, il fallait réfléchir à une solution adaptée et idéale ; cela a abouti à l'idée d'un système hybride qui a montré des résultats très efficaces.

Dans ce travail, nous avons étudié un système hybride et avons fait une application sur une charge. Et par définition le système hybride est une combinaison de deux sources d'énergie, une classique et l'autre renouvelable. L'objectif principal de cette étude est d'incarner le système hybride sur la charge, et cela en utilisant à la fois des panneaux solaires, des piles à combustible et des batteries pour stocker et transférer de l'énergie si nécessaire. Pour cela, notre travail sera structuré comme suit :

Le premier chapitre présente une description des différents concepts de base liés au système hybride (les panneaux solaires, la pile à combustible et les batteries), en mentionnant leurs types, les avantages et les inconvénients ainsi que le principe de fonctionnement de chaque concept.

Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique des différentes parties constituant le système à étudier, pour faciliter la simulation dans le troisième chapitre.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous simulerons le système hybride en utilisant Matlab-Simulink, en extrayant puis en comparant les différentes courbes.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes hybrides

I.1. Introduction

L'énergie renouvelable est une énergie qui provient de sources illimitées et constamment renouvelables, contrairement à l'énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent, et son exploitation cause moins de dommages environnementaux et est également appelée énergie alternative, qui est l'énergie dérivée de sources renouvelables telles que le soleil, le vent, les rivières, les sources chaudes, les marées et les biocarburants.

Le monde est sur la voie des énergies renouvelables pour développer des solutions globales et durables aux problèmes environnementaux et préserver les matières fossiles, et ce choix stratégique est stimulé par l'énorme potentiel du monde de l'énergie solaire.

Les nouvelles solutions technologiques proposées restent des générateurs hybrides, même s'il est très complexe en termes d'utilisation et de stockage, il reste la solution idéale pour préserver l'environnement et la santé humaine.

I.2. Énergie Photovoltaïque

I.2.1. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage [4].

I.2.2. Panneau photovoltaïque

Un panneau solaire est un dispositif convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques respectivement [4].



Figure I.1: Panneau photovoltaïque

1.2.2.1. Principe de fonctionnement

Un matériau comme le silicium possède la propriété de générer de l'électricité quand il reçoit la lumière du soleil, c'est l'effet photovoltaïque, découvert par Becquerel en 1839.

Le silicium est capable de créer de l'électricité lorsqu'il reçoit la lumière du soleil, c'est ce que l'on appelle l'effet photovoltaïque. Ce dernier est appliqué dans les cellules photovoltaïques.

L'énergie des photons de la lumière solaire est transmise aux électrons du matériau semi-conducteur. Puis, les électrons se mettent en mouvement et génèrent un courant électrique diffusé par une grille métallique très fine. Chaque cellule crée une petite quantité d'électricité. La lumière solaire et la durée d'exposition conditionnent ainsi la production d'un module photovoltaïque [5].

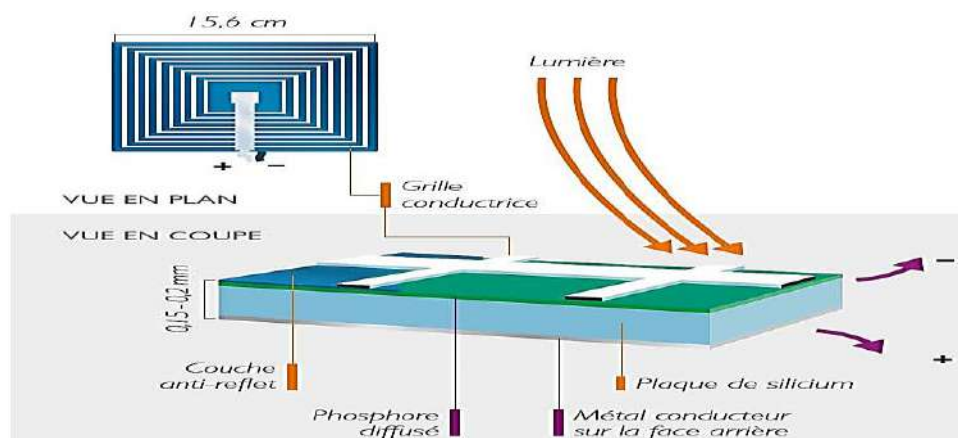


Figure I.2: Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

1.2.2.2. Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique) [4].



Figure I.3: cellule photovoltaïque

1.2.2.2.a. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment :

- pour la couche N, apport d'électrons périphériques.
- pour la couche P, déficit d'électrons.

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur [1].

A. Influence de la température

La figure (I.4) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement d'un module photovoltaïque.

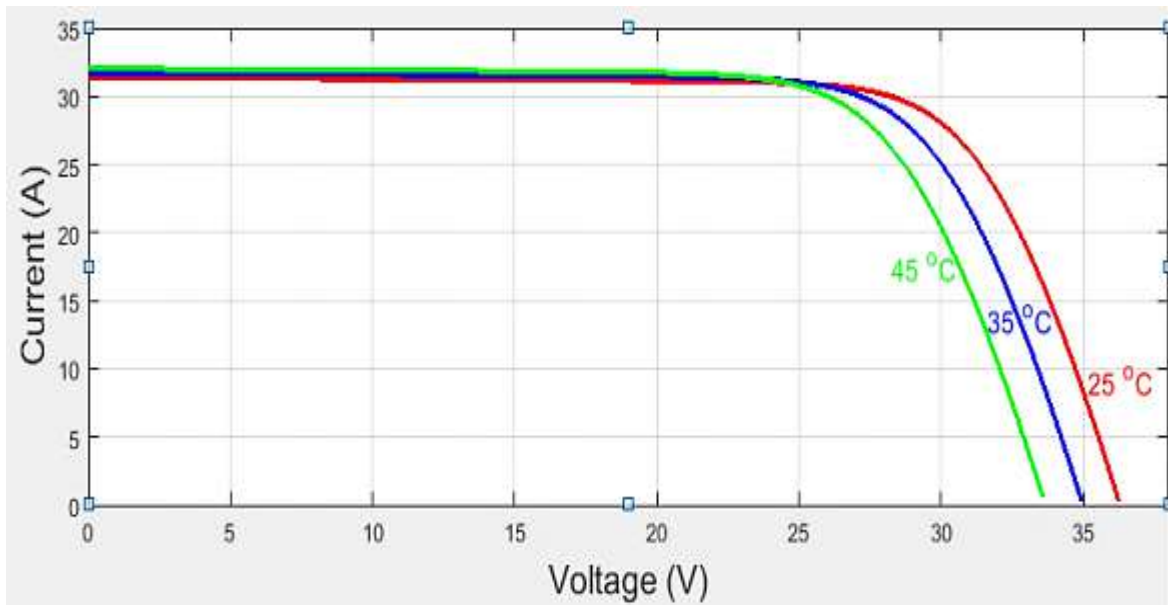


Figure I.4: Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$

On remarque que la température influe peu sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% pour chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25°C [1].

La figure (I.5) illustre la variation de la puissance délivrée par un module photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température.

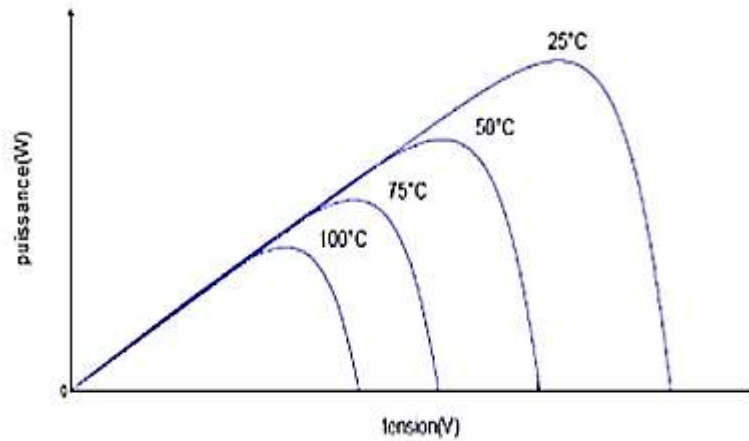


Figure I.5:Influence de la température sur la caractéristique $P= f(V)$

On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert a baissé assez fortement lorsque la température augmente. Par contre, le point de puissance maximale de chaque courbe diminue lorsque la température augmente.

B. Influence de l'éclairement

La figure (I.6) présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement.

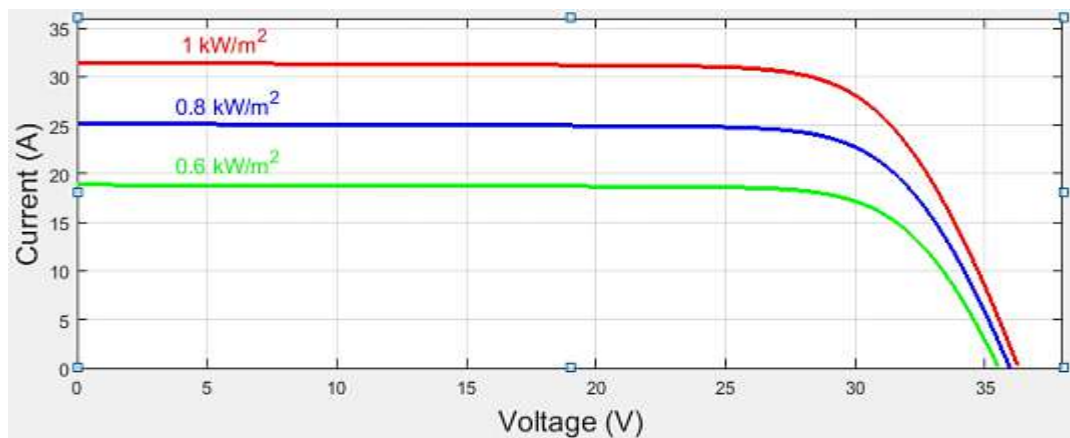


Figure I.6:Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I= f(V)$

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans la même proportion, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité de rayonnement de 1000W/m^2 à une température de 25°C [1].

La figure (I.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement.

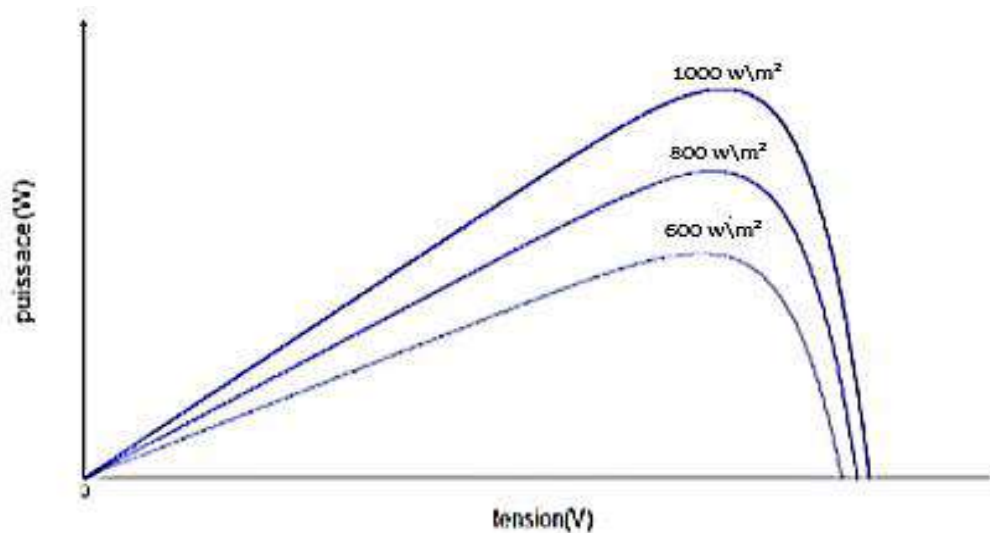


Figure I.7 : Caractéristique puissance-tension pour différentes irradiances

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{opt}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

I.3. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

➤ *Les avantages :*

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Une haute fiabilité, elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé [6].

➤ *Les inconvénients :*

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- La non-disponibilité de la source d'une façon permanente.
- L'occupation d'espace pour les installations de grandes dimensions [6].

I.3. Batteries de stockage

I.3.1. Définition

La batterie c'est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en désoxydation et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs électrons) 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 [6].

I.3.2. Différents types de batteries

I.3.2.1. Lithium-Ion (Li-ion)

Ces batteries ont une « densité énergétique » bien supérieure à celles des types NiCd et NiMH, ce qui permet une importante miniaturisation à autonomie égale. Leur taux d'autodécharge est très inférieur, de sorte qu'elles se déchargent peu en cas de stockage. Ce type de batterie peut être rechargé à tout moment, même après décharge partielle, sans incidence sur la capacité.

Les batteries Lithium-Ion sont aussi moins nocives pour l'environnement que les autres types. La technologie Lithium-Ion a donc de gros avantages. Elle est toutefois plus onéreuse par rapport aux types NiCd et NiMH. Les matériaux entrant dans la fabrication de ces batteries sont moins polluants que ceux des batteries NiCd, ce qui ne dispense pas d'une mise au rebut responsable, bien sûr [7].

I.3.2.2. Nickel métal-hydrure (NiMH)

Par rapport à la batterie NiCd, ce type de batterie a une « densité énergétique » supérieure qui lui assure une plus grande autonomie. Comme les batteries NiCd, les batteries NiMH ne doivent être rechargées qu'une fois complètement déchargées. Toutefois, en cas de rechargement prématuré, la perte de capacité (perte d'autonomie) est moindre. Les batteries NiMH ont le plus haut taux d'autodécharge, ce qui veut dire qu'elles perdent rapidement leur charge en cas de stockage. Ce type de batterie doit être chargé avant stockage. Les matériaux entrant dans la fabrication de ces batteries sont moins polluants que ceux des batteries NiCd, ce qui ne dispense pas d'une mise au rebut responsable, bien sûr [7].

I.3.2.3. Nickel Cadmium (NiCd)

Longue durée de vie, si l'entretien de la batterie est correct. Les batteries NiCd ne doivent être rechargées qu'une fois complètement déchargées, sous peine d'en réduire la capacité (réduction d'autonomie entre deux charges). C'est le type de batterie le plus robuste et fiable, tout particulièrement par temps chaud et froid. C'est aussi le type qui délivre le plus de puissance, chose bien utile par exemple au démarrage ou pour un travail intensif. Les batteries NiCd ont un taux élevé d'autodécharge, ce qui veut dire qu'elles perdent leur charge en cas de stockage. Ce type de

batterie doit être chargé avant stockage. Le cadmium étant un matériau polluant, la mise au rebut doit être faite de manière responsable [7].

- ❖ Le tableau suivant représenté les paramètres des différents types des batteries (E_B , Anode, Cathode, Électrolyte).

Type de batterie	$E_B(V)$	Anode	Cathode	Électrolyte
Acide-Plomb	2.1	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄
Nickel-Cadmium	1.2	N_i	C_d	KOH
Nickel-Fer	1.2	N_i	F_e	KOH
Nickel-Zinc	1.7	N_i	NnO_2	KOH
Nickel-MétalHydrure	1.23	N_i	Metal hydrure	KOH
Aluminium-Air	1.5	Al	O_2	KOH
Zinc-Air	1.65	Zn	O_2	KOH
Sodium-Soufre	2.1	S	N_a	BAL_2O_3
Sodium-Nickel	2.1- 2.2	N_iCL	N_a	BAL_2O_3
Lithium-Sulfate de Fer	1.75- 2.1	F_eS_2	L_iAL ou L_iS_i	L_iCL/Kcl
Lithium-Ion	3.6	Intercalation de carbon	$L_iC_oO_2$	Organique

Tableau I.1 : Différents types des batteries [5].

I.3.3. Exigences sur les Batteries Solaires

La nécessité de la maintenance des batteries peut être une limitation majeure pour les systèmes PV autonomes. Pour pouvoir être utilisées à long terme, les batteries doivent respecter les exigences suivantes :

- ✓ Un coût du kWh faible
- ✓ Une durée de vie longue
- ✓ Un rendement global élevé
- ✓ Une autodécharge très faible
- ✓ Un coût d'entretien faible
- ✓ Une facilité d'installation et de fonctionnement

La température ambiante perturbe le fonctionnement de la batterie, surtout quand il fait froid, car les réactions chimiques vont être ralenties. Une batterie a donc une capacité beaucoup plus faible à froid qu'à chaud. Les installations solaires en montagne doivent donc tenir compte de ce critère en prévoyant une capacité plus importante [8].

I.3.4. Mécanisme de charge / décharge dans la batterie Li-Ion

Comme avec la plupart des batteries, elles ont un boîtier extérieur en métal. Ce boîtier en métal contient une longue spirale composée de trois fines feuilles pressées ensemble :

- Une électrode positive (cathode)
- Une électrode négative (anode)
- Un séparateur

Le séparateur est une très fine feuille de plastique micro-perforé, qui sépare l'électrode positive et négative tout en laissant passer les ions.

L'électrode positive est en oxyde de lithium-cobalt ou LiCoO_2 . Le négatif l'électrode est en carbone. On peut voir sur la figure 5.2, que pendant la décharge,

Les ions lithium (Li^+) transportent le courant de l'électrode négative à l'électrode positive, à travers l'électrolyte et le diaphragme séparateur.

Pendant la charge, une source d'alimentation électrique externe applique une surtension à celle produite par la batterie, forçant le courant à passer dans le sens inverse. Les ions lithium migrent ensuite de l'électrode positive vers l'électrode négative, où ils s'encastrent dans le matériau d'électrode poreuse dans un processus appelé intercalation [8].

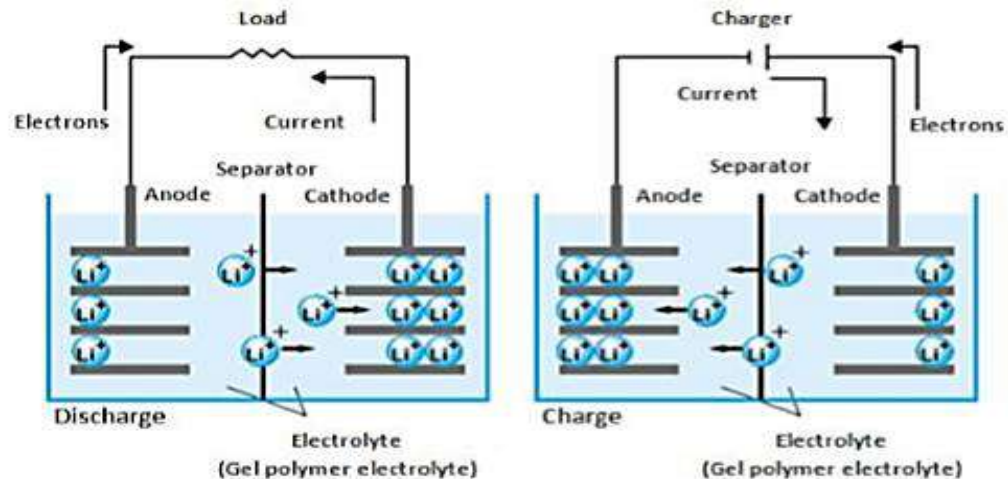


Figure I.8: Mécanisme de charge et de décharge dans la batterie rechargeable Li-Ion (HSW 2012)

I.4. Pile à combustible

I.4.1. Définition

Une pile à combustible est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air [4].

Les piles à combustible sont des moyens de production de l'énergie électrique, considérées comme des sources d'énergie de par leur grande densité d'énergie. Le diagramme de Ragone présenté par la figure (I.11) permettant de comparer les performances énergétiques de différents dispositifs. Ce dernier montre que les piles à combustible présentent les densités d'énergie les plus élevées par rapport aux autres dispositifs [9].

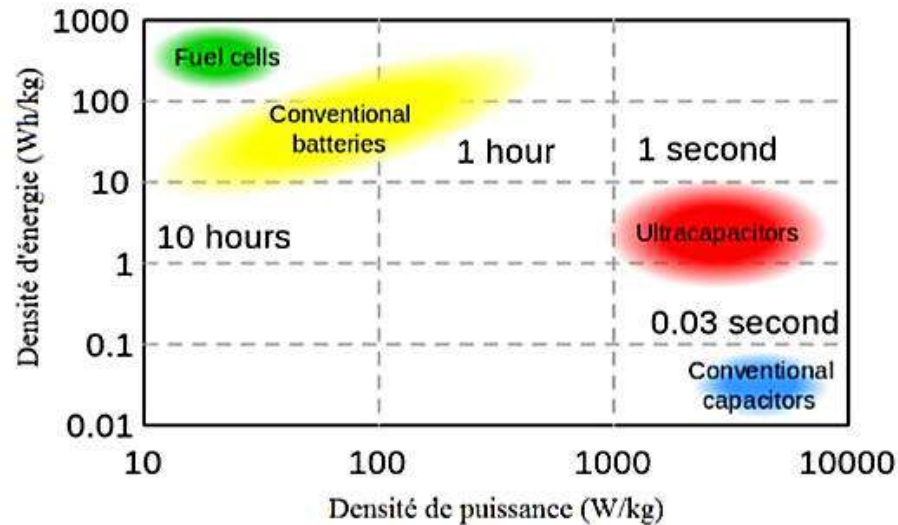


Figure I.9: Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie

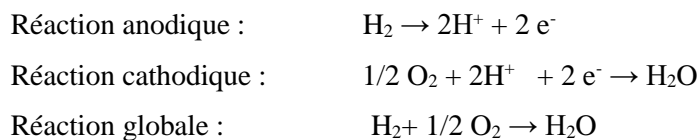
I.4.2. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique, sans aucun processus thermique ou mécanique externe

Il existe divers types de piles à combustible, mais toutes ces piles gardent en commun les caractéristiques suivantes :

- ❖ Elles sont essentiellement constituées de deux plaques (plaques bipolaires) permettant notamment l'amenée des gaz, la collecte du courant et assurant la tenue mécanique, et de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte.
- ❖ Sur l'anode, on déclenche une réaction d'oxydation électrochimique d'un composé hydrogéné (le combustible) [1].

Dans le type d'une pile à hydrogène du type PEMFC à membrane solide acide, deux réactions électrochimiques se produisent successivement :



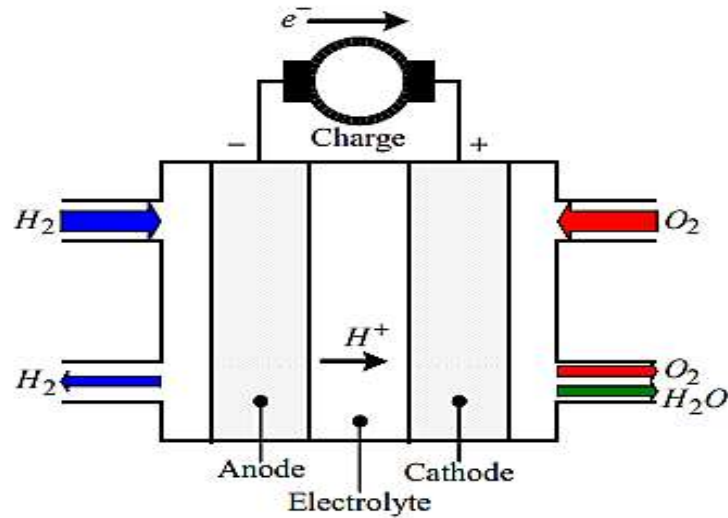


Figure I.10 : Principe de fonctionnement de piles à combustible à électrolyte acide (A) ou alcalin (B) [9]

I.4.3. Différents types de piles à combustible

Le tableau suivant représenté les différents types des piles à combustible :

Acronyme	Nom	Température de fonctionnement	Electrolyte
PEMFC	Electrolyte Membrane Fuel Cell	50-80°C	Polymère
HT-PEMFC	High Temperature PEMFC	120-180°C	Polymère
DMFC	Direct Methanol Fuel cell	25-50°C	Polymère
DCFC	Direct Ethanol Fuel Cell	25-50°C	Polymère
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	700-1000°C	Céramique
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	650°C	Liquide
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	150-200°C	Liquide
AFC	Alkaline Fuel Cell	60-120°C	Liquide

Tableau I.2: Les différents types de PAC

I.4.4. Pile à combustible de type à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

La pile à combustible de type PEM est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisée dans la majorité des prototypes construits. Dans cette thèse, nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible. La structure d'une cellule de pile à combustible de type PEM est représentée dans la figure (I.13). Se déplaçant dans la direction de x , les gaz viennent de canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). De la vapeur d'eau est ajoutée aux gaz pour humidifier la membrane. Les couches de diffusion (100-500 micromètres) assurent une bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 micromètres). Ces couches constituent les électrodes de la cellule où des particules de platine, qui jouent le rôle du catalyseur, ont été déposées dans un support carbone sur la membrane [9].

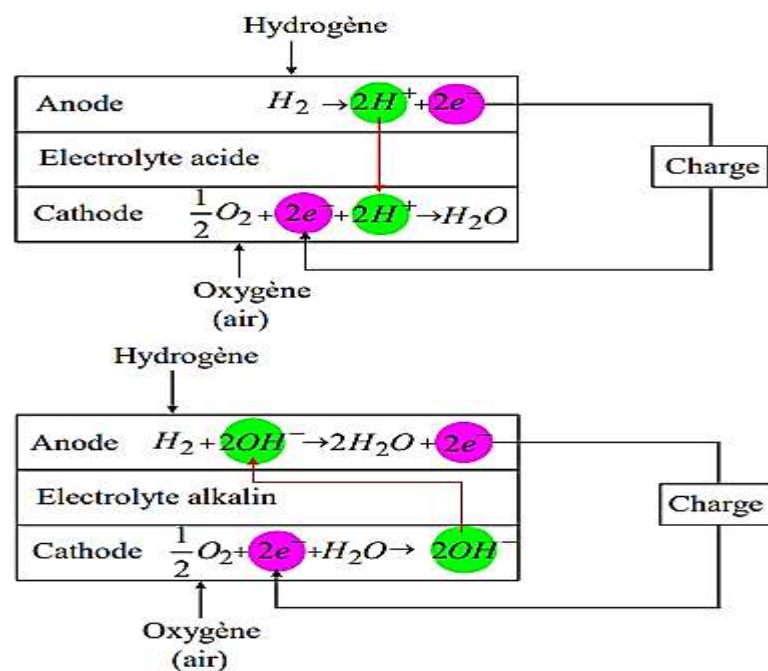


Figure I.11: Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas)

I.4.4.1. Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

La pile à combustible présente de nombreux avantages, mais également des points faibles

A) Les avantages :

Les avantages les plus importants sont les suivants :

- Très bon rendement énergétique (supérieur à 50%).
- Protection de l'environnement.
- Silencieuse.
- Fonctionnement à basse température [10].

B) Les inconvénients

Les principaux points faibles de la pile à combustible sont :

- Le coût élevé.
- La durée de vie.
- La disponibilité des combustibles de qualité adéquate [10].

I.5. Systèmes hybrides

I.5.1. Définition d'un système hybride

Un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. Par exemple, la combinaison éolien diesel est un système hybride d'énergie. De nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs au diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable.

Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes [11].

I.5.2. Avantages et inconvénients d'un système hybride

A) Les avantages :

- Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.

B) Les inconvénients :

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessitent du stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel [12].

I.6. Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [6].

I.6.1. Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée [6].

I.6.2. Convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Nous distinguons plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

- ✓ Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- ✓ Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI (pulse-width modulation).
- ✓ Onduleur à onde sinusoïdale [6].

I.6.3. Convertisseur AC/DC (Redresseur)

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu [6].

I.7. Topologies des systèmes électriques hybrides

Il existe différentes topologies de systèmes hybrides selon le couplage de générateurs d'énergie renouvelable, qui peut être continu ou alternatif.

I.7.1. Couplage de bus DC

Un système hybride couplé au bus continu est un système dans lequel les différentes sources sont raccordées avec la charge de consommation à l'aide des capacités [13].

I.7.2. Couplage de bus AC

Un système hybride couplé au bus AC, est un système dans lequel les différents générateurs d'alimentation sont directement reliés à un réseau de courant alternatif ou à des charges de consommation à courant alternatif. [13].

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté divers concepts de base liés au système hybride qui combine deux sources d'énergie, une classique et l'autre moderne (renouvelable), où nous avons présenté une brève description des différents composants de base du système hybride et les outils de stockage et de conversion l'énergie.

CHAPITRE II

Modélisation des différents
composants du système
hybride

II.1. Introduction

La modélisation est un moyen destiné à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, dans notre travail nous présenterons la modélisation des différentes parties d'un système hybride, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler par la suite son évolution.

II.2. Structure d'un système électrique hybride

L'hybridation des sources consiste à combiner deux ou plusieurs sources pour exploiter leurs différentes caractéristiques (Autonomie, Réversibilité, Dynamique). C'est le cas des véhicules hybrides qui associent deux ou plusieurs sources d'énergie de nature différentes caractéristiques pour la propulsion du véhicule.

Les systèmes électriques hybrides peuvent être représentés par la Figure (II.1). C'est une structure plus générale, sur laquelle on peut ajouter ou enlever les sources et les charges suivant la topologie du système [13].

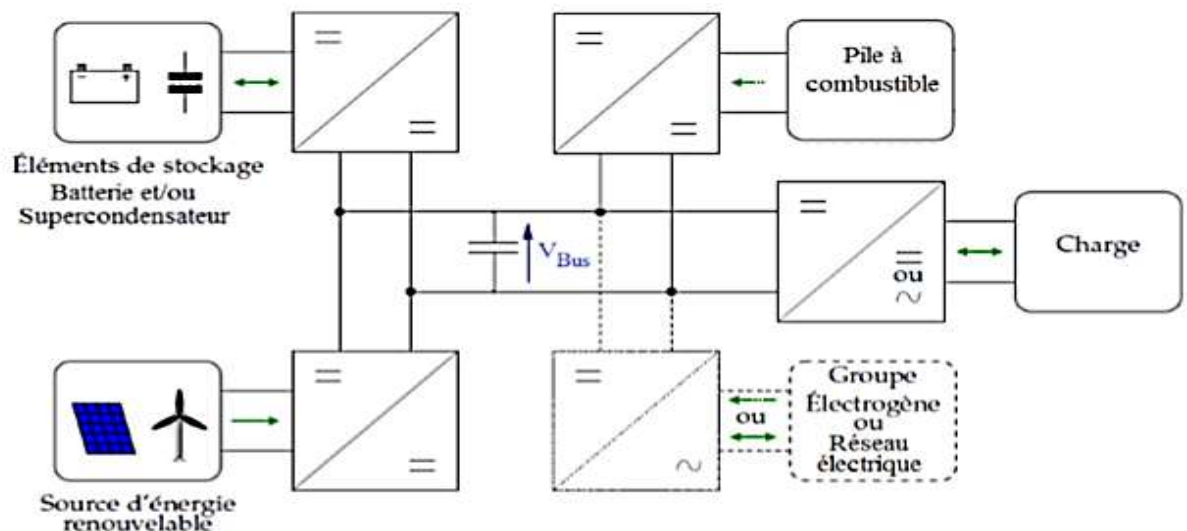


Figure II.1: Structure générale d'un exemple de système électrique hybride

Pour le niveau de la tension du bus continu, il est en fonction de ses applications :

- 42V une nouvelle tension standard pour les systèmes automobiles.
- 270V ou 350V pour la norme sur l'avion tout électrique.
- 48V, 120V pour les systèmes autonomes.

- 400–480V pour les systèmes raccordés aux réseaux électriques.
- 270–540V pour les véhicules électriques hybrides à pile à combustible.
- 350V (systèmes de bus de transport en commun) à 750V (les systèmes de tramway et de locomotive) [13].

II.3. Système de panneaux photovoltaïque

II.3.1. Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque

La chaîne de conversion photovoltaïque est composée d'un groupe des panneaux photovoltaïques branchés en parallèle, qui jouent le rôle d'un générateur PV, et un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (hacheur Boost), ce système alimente une charge (Batteries). La structure de notre chaîne de conversion photovoltaïque est représentée sur la figure (II.2) [1].

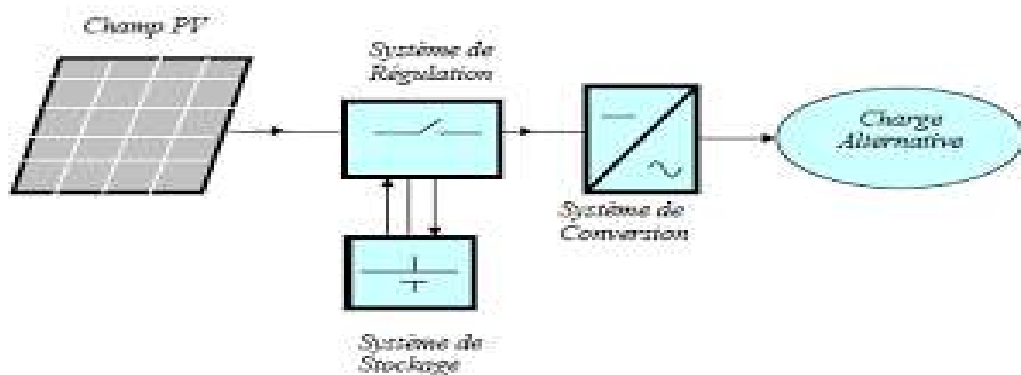


Figure II.2 : Différents constituants de la chaîne de conversion photovoltaïque.

II.3.2. Modèle d'un panneau solaire

II.3.2.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

On rencontre dans la littérature technique plusieurs modèles du générateur photovoltaïque (à une, à deux ou à trois diodes). Ils diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

Le modèle à une seule diode est le plus cité dans la littérature. Il est caractérisé par son schéma électrique équivalent représenté sur la figure (II.3). Il se compose d'une source de courant symbolisant la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance shunt R_{sh} caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule due au non-

idéalités de la jonction PN et des impuretés près de la jonction. Une résistance série R_s représente les diverses résistances de contact et de connexions [14].

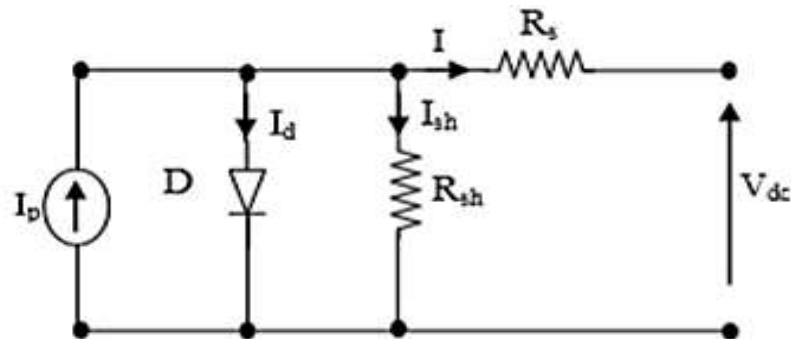


Figure II.3: Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

II.3.2.2. Caractéristiques des cellules photovoltaïques

La caractéristique courant-tension $I(V)$ simulé d'un module PV est représenté dans la figure (II.4). La caractéristique est obtenue à un niveau constant de l'éclairement énergétique et par le maintien d'une température constante des cellules.

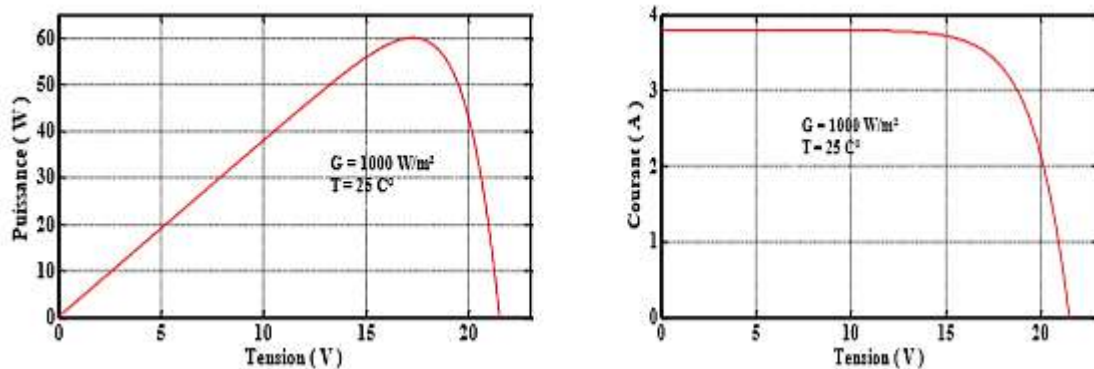


Figure II.4 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un module solaire.

Les deux points les plus importants sur cette caractéristique sont le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension du circuit ouvert (V_{co}). Le courant de court-circuit (I_{cc}) est le courant maximal produit lorsque la cellule est court-circuitée et la tension à ces bornes est zéro, correspondant à une charge nulle. La tension en circuit ouvert (V_{co}) est la tension aux bornes de la cellule dans des conditions de circuit ouvert, quand le courant est nul, ce qui correspond à une résistance proche de l'infini aux bornes de la cellule [13].

II.3.2.3. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source, de nombreux modèles mathématiques ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

On présentera trois modèles du GPV :

- Modèle à une diode.
- Modèle simplifié à une diode.
- Modèle à deux diodes [6].

II.3.2.4. Modèle à une diode :

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances (série et shunte) pour les pertes, le modèle d'une cellule est celui de la figure ci-dessous figure (II.5).

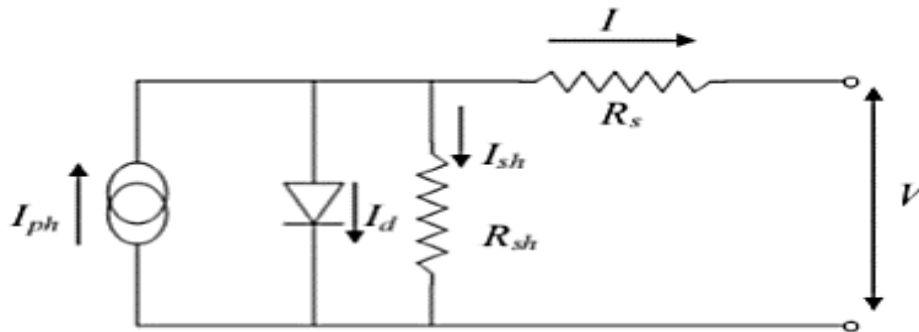


Figure II.5 : Modèle équivalent à une diode.

À partir de la figure (II.5) on a :

- Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_D - I_R \quad (\text{II.1})$$

- Le photo-courant I_{ph} est donnée par :

$$I_{ph} = P_1 E_G [1 + P_2 (E_G - E_{ref}) + P_3 (I_j - T_{jref})] \quad (\text{II.2})$$

- La température de jonction est donnée par :

$$T_j = T_a + E_G \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{II.3})$$

- Le courant dans la diode est donné par :

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{q}{A.n.k.T_j} * (V + R_s I) - 1 \right) \right] \quad (\text{II.4})$$

- Le courant de saturation dans la diode est donné par :

$$I_s = P_4 T_j^3 \exp \left(\frac{-E_g}{K T_j} \right) \quad (\text{II.5})$$

- Le courant dans la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

- On obtiendra alors [8] :

$$I = P_1 \cdot E_G \cdot [1 + P_2 (E_G - E_{réf}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jréf})] - \left[P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{K T_j} \right) \right] * \left[\exp \left(\frac{q(v + R_s I)}{A.n.k.T_j} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

II.3.2.5. Modèle simplifié à une diode

On peut simplifier le modèle précédent en un modèle de cinq paramètres (I_{gc} , I_{mpp} , V_{mpp} , V_{oc} , R_s) qu'on peut modéliser comme suite :

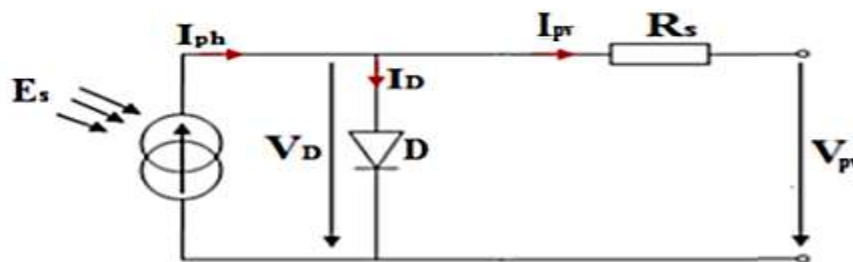


Figure II.6 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque modèle simplifié à une diode.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par :

$$I_{PV} = I_{sc} \cdot [1 - K_1 (e^{K_2 V_{pv}^m} - 1)] \quad (\text{II.8})$$

Ou les coefficients k_1, k_2 et m sont donnés par :

$$k_1 = 0.01175 \quad (\text{II.9})$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad (\text{II.10})$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc} \cdot (1 + K_1) - I_m}{K_1 \cdot I_{sc}} \right] \quad (\text{II.11})$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right] \quad (\text{II.12})$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{k_3}{k_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_m}{V_{oc}} \right]} \quad (\text{II.13})$$

II.3.2.6. Modèle à deux diodes

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.7). On considère le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèle. La source de courant I_{ph} modélise le courant photo-généré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}), et le courant de génération-recombinaison (I_{d2}). Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer [6].

- Une résistance série R_S , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations.
- Une résistance parallèle R_P , modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

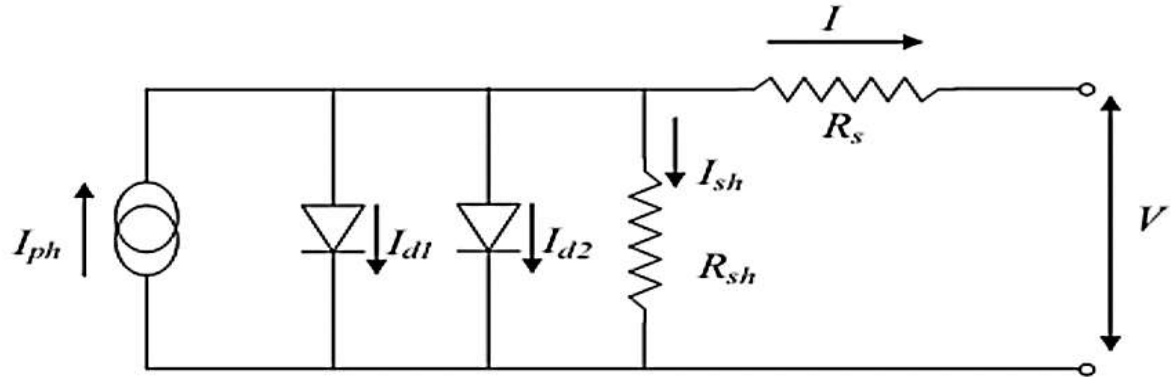


Figure II.7 : Modèle équivalent à deux diodes.

À partir de la figure (II.7), le courant généré par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2} - I_{sh}) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$I_{d1} = I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.15})$$

$$I_{d2} = I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{2A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.16})$$

$$I_{01} = P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right) \quad (\text{II.17})$$

$$I_{02} = P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2K \cdot T_j}\right) \quad (\text{II.18})$$

I_{ph} Et I_{sh} garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode. Le courant total s'écrit :

$$I = P_1 \cdot E_G \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_G - E_{r\acute{e}f}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jr\acute{e}f}) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - \left[P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q(v + R_c I)}{A \cdot n \cdot K \cdot T_j}\right) \right] - \left[P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2K T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q(v + R_c I)}{2 \cdot A \cdot n \cdot K \cdot T_j}\right) \right] \quad (\text{II.19})$$

II.3.3. Modèle d'un hacheur survolteur (Boost)

Augmenter la tension d'une source, revient à utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de fonctionnement est représenté à la figure (II.8). Ce convertisseur continu-continu de l'électronique de puissance permet d'adapter la tension aux bornes du panneau PV pour atteindre le point de fonctionnement maximal [1].

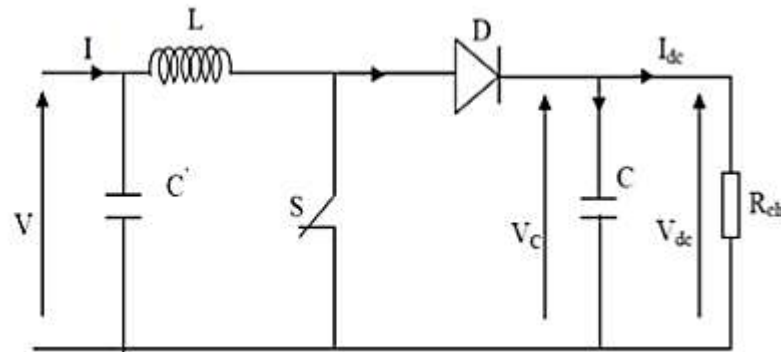


Figure II.8: Circuit électrique du convertisseur DC-DC.

Les figures (II.9), (II.10) montrent le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , qui comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant et la diode polarisée en inverse, donc bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha.T$ (α rapport cyclique, est compris entre 0 et 1).

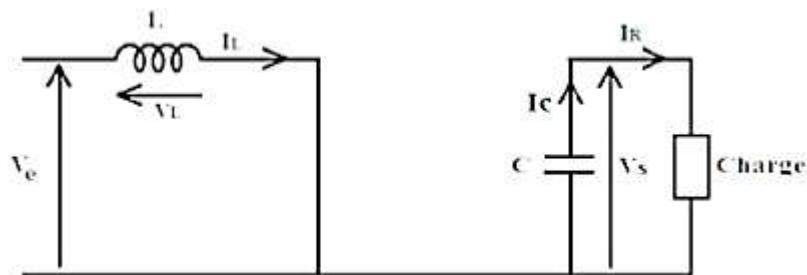


Figure II.9: Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha.T]$.

- Condensateur C supposé initialement chargé, fournit de l'énergie à la charge et un courant I_R circule dans cette dernière

$$V_l = V_e = L \frac{dI_l}{dt} \quad (\text{II.20})$$

$$V_S = R * I_R \quad (\text{II.21})$$

Lors de la seconde période, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de $\alpha.T$ à T . avec : $I_C = I_R$.

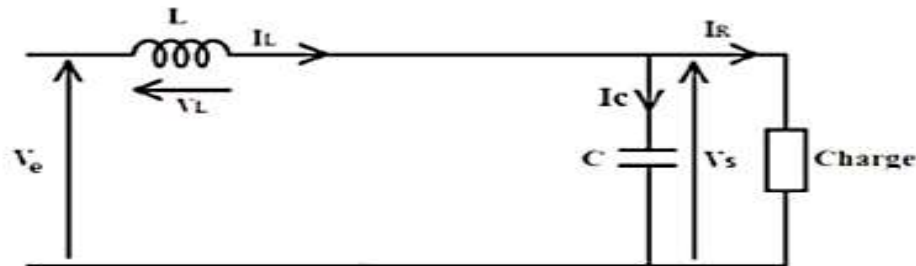


Figure II.10: Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha.T, T]$.

$$V_l = V_e - V_S \quad (\text{II.22})$$

$$I_C = I_l - I_R \quad (\text{II.23})$$

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes [12] :

$$V_S = \frac{1}{1-\alpha} * V_e \quad (\text{II.24})$$

$$I_R = (1 - \alpha)I_l \quad (\text{II.25})$$

II.3.4. Optimisation de la puissance des modules PV

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quel que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande place ainsi le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt}, I_{opt}).

Le premier système de puissance MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum [1].

À savoir plusieurs méthodes d'optimisation :

- Méthode de contrôleur MPPT basée sur le mode glissant.
- Méthode de contrôleur MPPT basée sur la logique floue.
- Méthode de perturbation et d'observation (P&O).
- Méthode de conductance incrémentielle.

Dans notre travail, nous avons choisi d'appliquer la méthode de perturbation et d'observation car c'est la méthode la plus utilisée et la plus efficace :

- **Méthode de perturbation et d'observation (P&O)**

La méthode perturbation et observation 'P&O', c'est la plus couramment utilisée, car son algorithme est facile à implémenter, ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée.

La figure (II.8) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O' tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure, la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la range. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

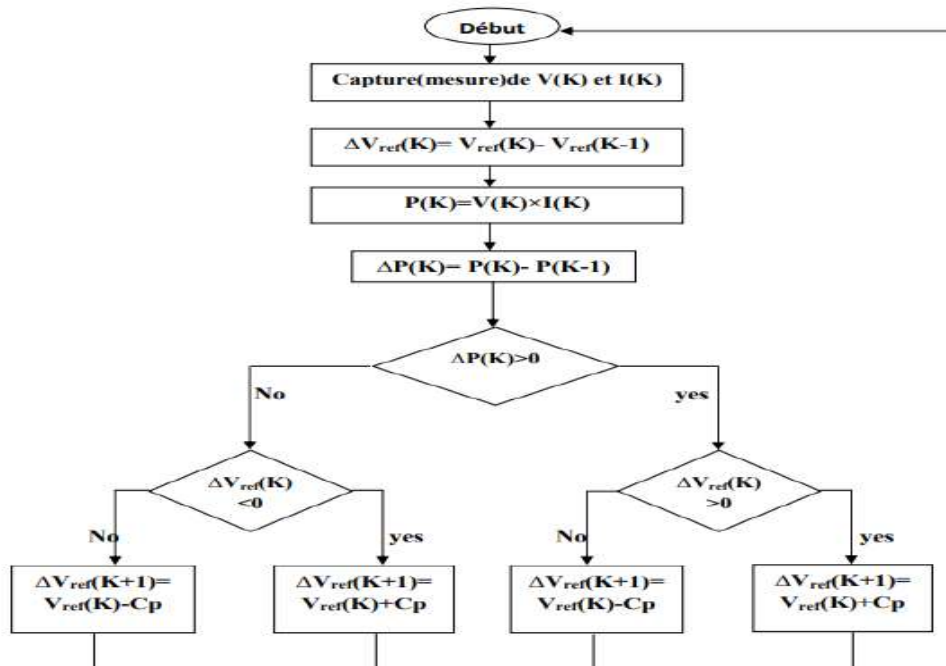


Figure II.11 : Organigramme de l'algorithme MPPT par méthode Perturbation & Observation

II.4. Système de pile à combustible

II.4.1. Modèle de pile à combustible PEM

Le but principal de créer un modèle de pile à combustible est d'obtenir la tension de sortie, la puissance et l'efficacité en fonction du courant de charge réel [13].

La Figure ci-dessous (II.12) présente Schéma équivalent de pile à combustible PEM

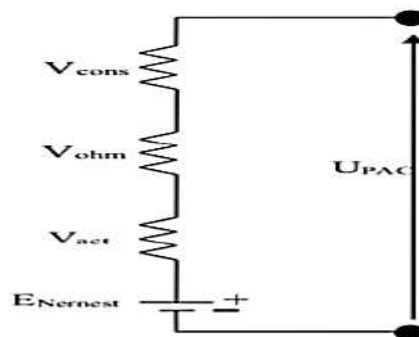


Figure II.12: Schéma équivalent de la pile à combustible.

On a:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.26)$$

• I_{fc} délivré par la pile par l'équation suivante :

$$V_{act} = A * \text{Log} \left(\frac{I_{fc} - I_n}{I_0} \right) \quad (II.27)$$

V_{ohm} : Chute de tension ohmique résultant des résistances de conduction de protons à travers l'électrolyte solide et les électrons à travers son chemin d'accès. On peut l'exprimer par la formule suivante :

$$V_{ohm} = R_m(I_{fc} - I_n) \quad (II.28)$$

V_{conc} : Chute de tension résultant de la réduction de la concentration des réactifs de gaz ou, en variante, par le transport de masse de l'oxygène et un atome d'hydrogène. Elle est régie par l'équation suivante :

$$V_{conc} = B * \text{Log} \left(1 - \frac{I_{fc} - I_n}{I_{lim}} \right) \quad (II.29)$$

Le potentiel thermodynamique (E_{Nernst}) représente la tension en circuit ouvert de la pile à combustible, les autres trois tensions, la chute de tension d'activation (V_{Act}), la chute de tension ohmique (V_{Ohim}), et la chute de tension de concentration (V_{con}) représentent des réductions de cette tension pour fournir la tension utile pour les électrodes de la cellule, VFC, comme fonction de l'exploitation de courant [13].

II.4.2. Modèle du convertisseur Boost de la pile à combustible

La tension de la pile à combustible est inférieure à la tension de bus continue. Ainsi, nous utilisons un convertisseur Boost pour réguler la tension de sortie de la pile à combustible. La Figure (II.13) montre l'adaptateur DC-DC composé d'une inductance L, d'une capacité C, d'une diode D et d'un commutateur Mosfet. La sortie est chargée avec les propriétés de résistance de l'adaptateur de lot DC-DC, comme montre la figure présentée ci-dessous [8].

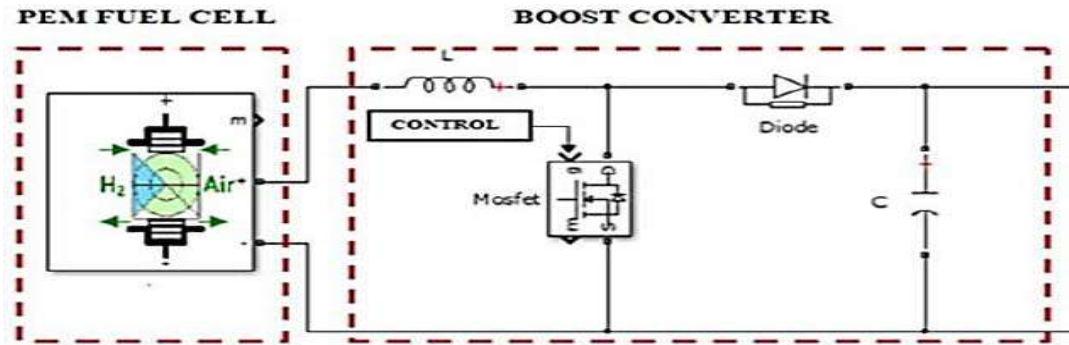


Figure II.13: Schéma équivalent du Convertisseur Boost de la pile à combustible.

Les équations électriques du hacheur Boost sont :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha)V_{dc} \quad (\text{II.30})$$

$$C_s \frac{dv_{dc}}{dt} = (1 - \alpha)I_l + Idc \quad (\text{II.31})$$

II.4.2.1.a. Calcul de L et C du convertisseur

Pour calculer des paramètres L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$L = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L} \quad (\text{II.32})$$

$$C_s = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}} \quad (\text{II.33})$$

II.5. Système de Batterie

II.5.1. Modélisation de la batterie

Il existe différents types de modèles de batteries dans la littérature. Le modèle de la batterie choisi dans cette présente étude utilise une source idéale de tension mise en série avec une résistance et une capacité comme la montre la figure (II.14) [1] :

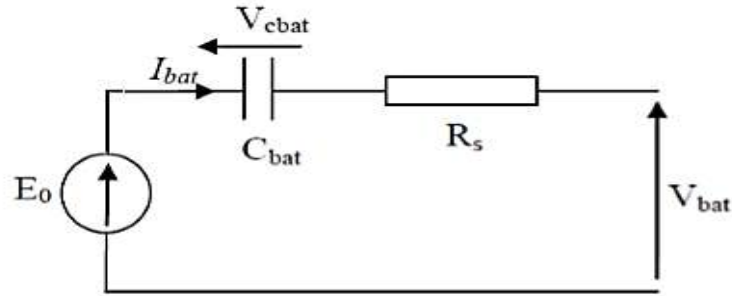


Figure II.14 : Modèle R-C de la batterie.

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s * I_{bat} - V_{cbat} \quad (\text{II.34})$$

On définit également l'état de charge (Soc) de la batterie, est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité totale. L'état de charge est un paramètre très important pour gérer correctement la batterie

$$SOC = \left(1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}}\right) * 100 \quad (\text{II.35})$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} * t_{bat} \quad (\text{II.36})$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{V_{bat}} \quad (\text{II.37})$$

On peut écrire les équations suivantes [15] :

$$E'_0 = N_s * E_0 \quad (\text{II.38})$$

$$C'_0 = \frac{N_p}{N_s} * C_{bat} \quad (\text{II.39})$$

$$R'_s = \frac{N_p}{N_s} * R_s \quad (\text{II.40})$$

Pour déterminer la capacité (C_{bat}) de batterie :

$$C_{bat} = \frac{E_{bat} * N_j}{V_{bat} * \eta_{bat} * D} \quad (\text{II.41})$$

II.5.2. Modélisation du convertisseur DC/DC (Back –Boost)

II.5.2.1. Fonctionnement d'un convertisseur DC/DC (Back –Boost)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur, mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande [3].

La Figure (II.15) représente Montage de Back/Boost du convertisseur DC-DC

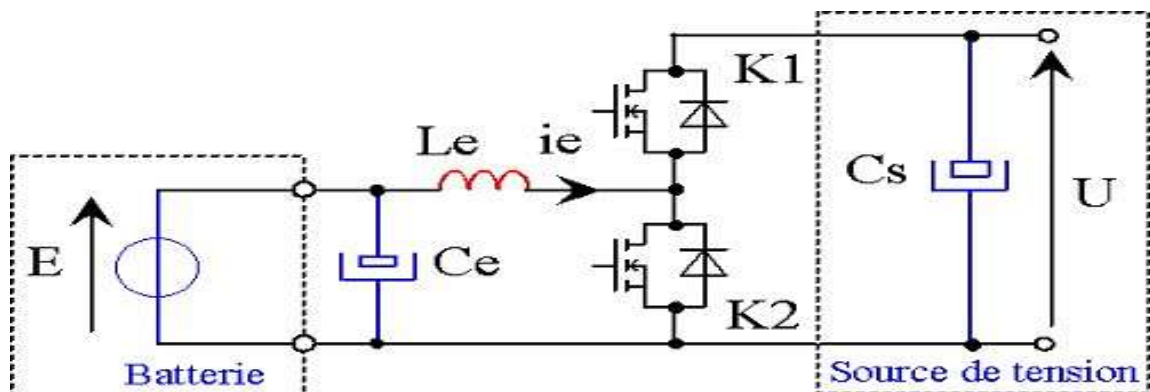


Figure II.15 : Montage de Back/Boost du convertisseur DC-DC.

Les équations électriques du hacheur Boost sont :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha)V_{dc} \quad (\text{II.42})$$

$$C_s \frac{dv_{dc}}{dt} = (1 - \alpha)I_l + Idc \quad (\text{II.43})$$

Les équations électriques du hacheur Buck sont :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{bat} - \alpha * V_{dc} \quad (\text{II.44})$$

$$C_s \frac{dv_{dc}}{dt} = \alpha * I_l - Idc \quad (\text{II.45})$$

La Figure (II.16) présente la méthode de contrôle du convertisseur bidirectionnel. Le schéma de contrôle comprend toujours deux boucles-contrôle de tension externe et contrôle de courant interne. Lorsque la tension sur la liaison CC est inférieure à la tension de

référence, le commutateur S2 est activé ; lorsque la tension sur le lien continu est supérieure à la référence de tension, le commutateur S1 est activé [15].

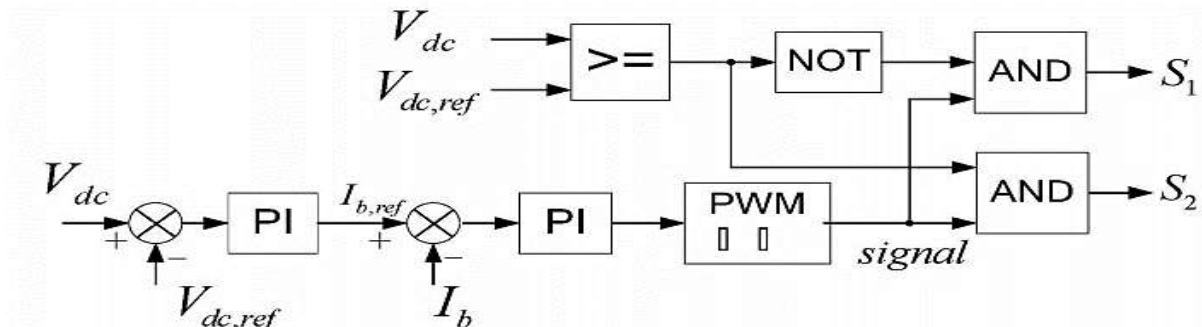


Figure II.16 : Commande du convertisseur bidirectionnel.

II.5.2.2. Calcul des paramètres de L et C du convertisseur

Pour calculer des paramètres L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$L = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L} \quad (II.46)$$

$$C_S = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_{dc}} \quad (II.47)$$

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système électrique hybride ou nous avons abordé chaque partie du système hybride (panneau solaire, batterie, pile à combustible et les convertisseurs). Cette modélisation nous permettra de simuler les performances des différentes parties d'un système hybride alimentant une charge.

CHAPITRE III

Simulation du système hybride

III.1.Introduction

Après la modélisation des différentes parties d'un système hybride dans le chapitre précédent, dans ce chapitre nous allons simuler chaque partie de système globale (GPV, pile à combustible et la batterie). Nous allons faire la simulation du système étudié sous Matlab-Simulink pour obtenir les différentes courbes du système et la présentation des résultats.

III.2.Simulation du GPV \ FC \Batterie

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 (2,4,7 et 9) 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 réel et choisissons aussi une charge constante de 18 Ω .

III.2.1.Les paramètres des sources

A) Paramètres du panneau photovoltaïque

Panneau photovoltaïque	N_S	N_P	N_{cel}	$V_{pm}(v)$	$I_{pm}(A)$	$V_S(v)$	$I_{CC}(A)$	P(w)
	1	4	72	42.8	5.84	80	6.2	249.952

Tableau III.1 : Paramètres du panneau photovoltaïque

B) Paramètres de la Batterie

Batterie	Type de la batterie	La tension nominale (V)	Capacité (Ah)	Résistance interne (Ω)	Courant nominal de décharge (A)
	Lithium-ion	48	50	0.0096	21.7391

Tableau III.2 : Paramètres de la Batterie

C) 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_{pm})	La puissance nominale (kW)
	PEMFC	45	133.3	300	6

Tableau III.3 : Paramètres de la pile à combustible

III.2.2. Calcul de L et C des convertisseurs :

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

A) Convertisseur Boost (PV) :

$$L_{pv} = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L} = \mathbf{2 \text{ mH}}$$

$$C_{pv} = \frac{I_{pv}}{f * \Delta V_{pv}} = \mathbf{100 \mu F}$$

B) Convertisseur Back-Boost (Batterie) :

$$L_{batt} = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L} = \mathbf{0.576 \text{ mH}}$$

$$C_{batt} = \frac{I_{pv}}{f * \Delta V_{pv}} = \mathbf{1000 \mu F}$$

C) Convertisseur Boost (pile) :

$$L_{pile} = \frac{V_{dc}}{4 * f * \Delta I_L} = \mathbf{0.5 \text{ mH}}$$

$$C_{pile} = \frac{I_{pv}}{f * \Delta V_{pv}} = \mathbf{7500 \mu F}$$

III.3. Résultats de simulation

III.3.1. Générateur photovoltaïque (GPV)

III.3.1.1. Allure de l'éclairement (G)

Nous savons que l'intensité de la lumière du soleil variée en fonction des heures du jour, pour cette raison nous supposons ces changements au niveau d'une journée ensoleillée et d'un ciel dégagé pour que la valeur maximale que l'on puisse obtenir soit de **1000 (w / m²)**.

La figure (III.1) montre la courbe des changements de température durant la journée et est mesurée le jour où la température normale est de 25 ° C pour la simulation Matlab.

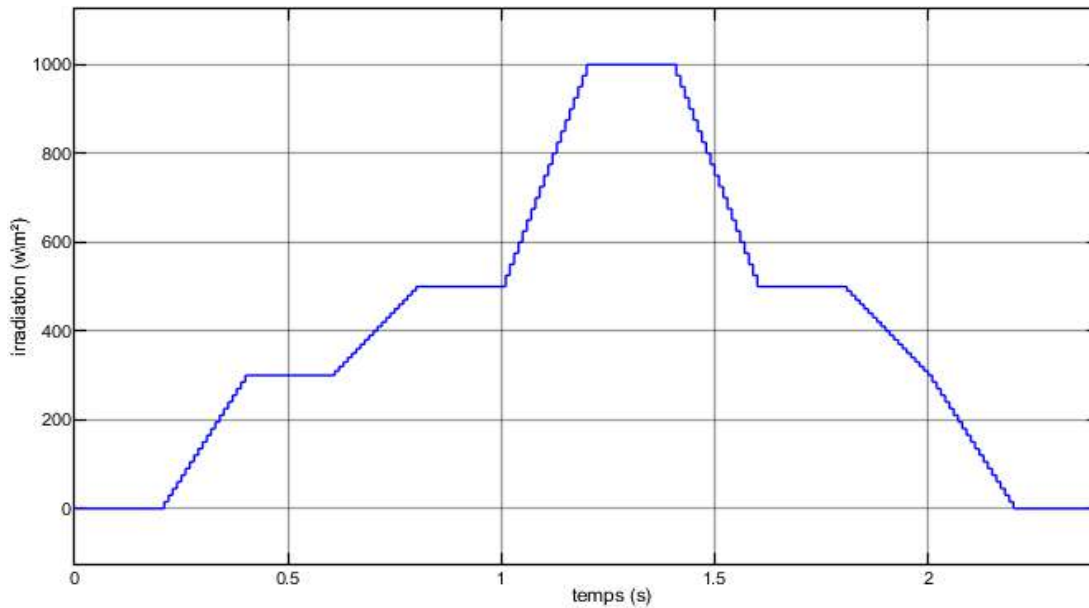


Figure III.1 :Allure de l'éclairage dans un jour

III.3.1.2. Schéma et Résultats de simulation

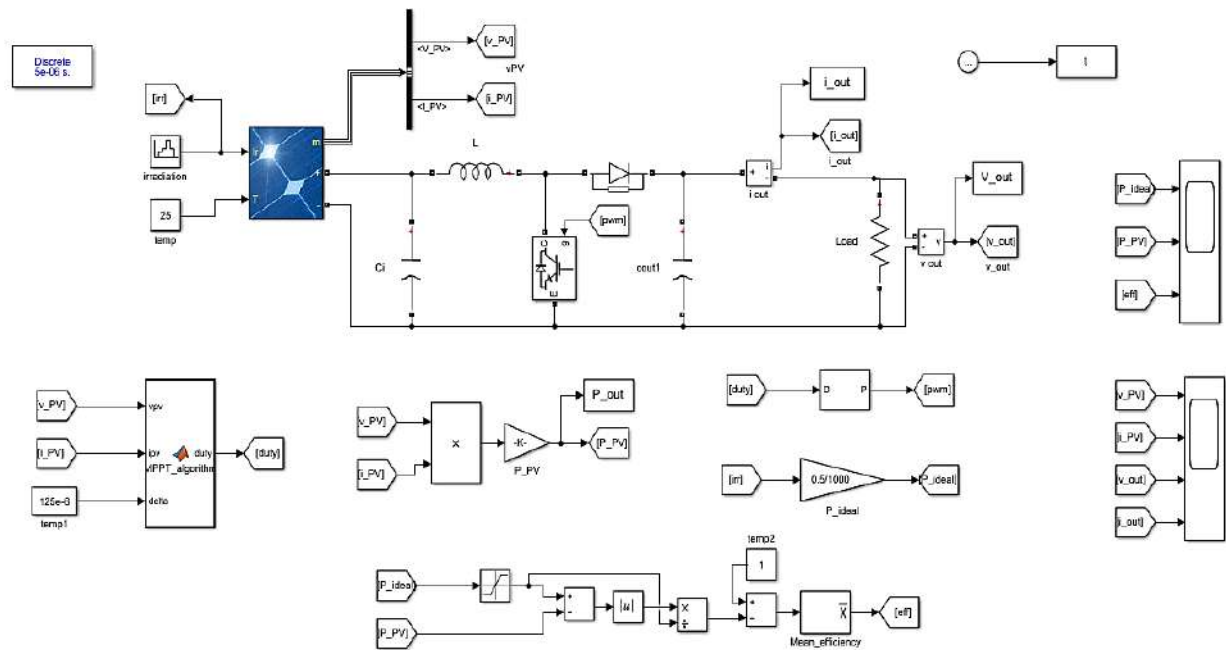


Figure III.2 :schéma de simulation de GPV

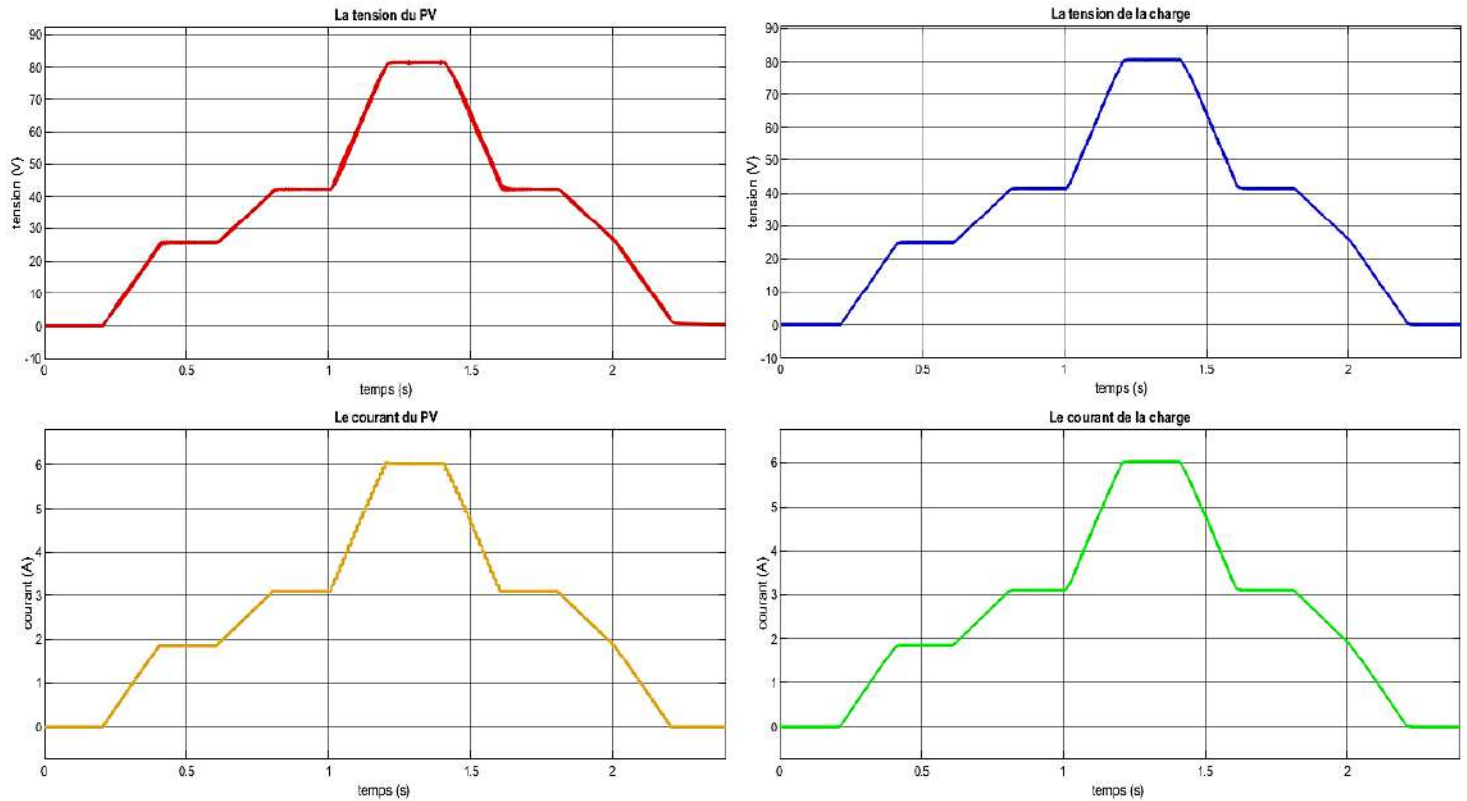


Figure III.3 : Résultats de simulation de GPV

Commentaires :

- [0s :0.4s] et [2s :2.4s] : le GPV ne fonctionne pas à cause de l'absence d'éclairement.
- [0.4s : 2s] fonctionnement du GPV à cause de la présence d'éclairement et son travail est proportionnel avec l'éclairement.
- [1.2s : 1.4s] L'intervalle de fonctionnement maximal de GPV (l'éclairement maximal).

III.3.2. Batterie

III.3.2.1. Schéma et Résultats de simulation

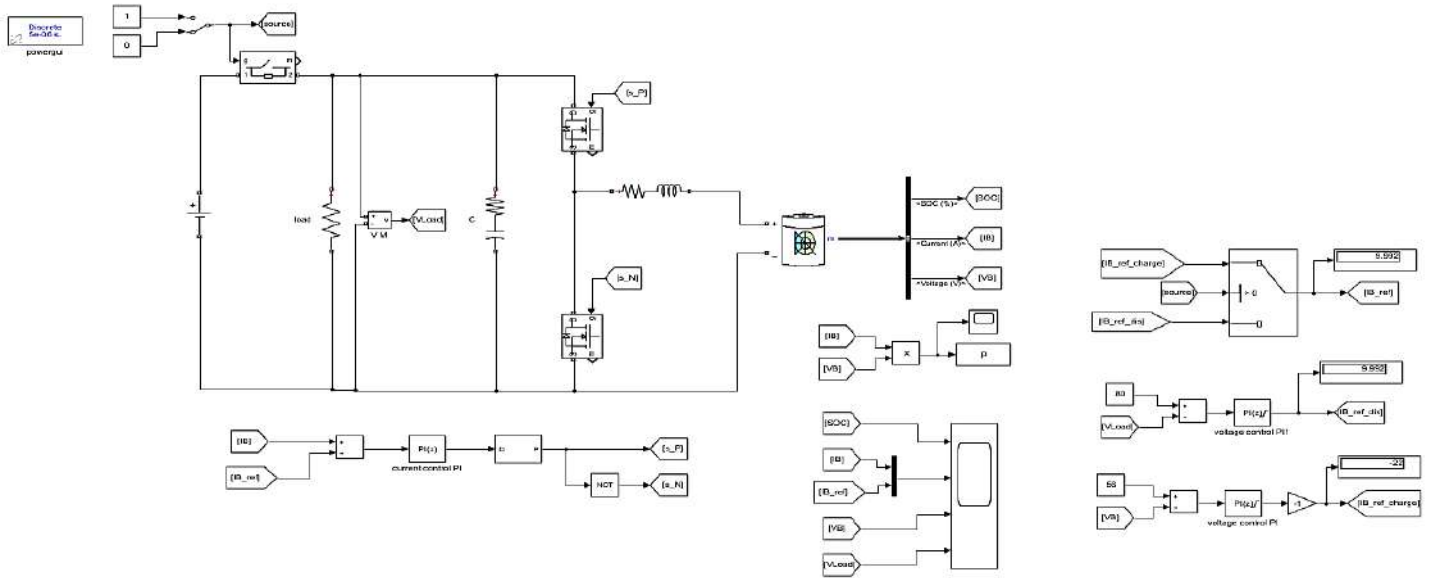


Figure III.4 :Schéma de simulation de la batterie

➤ Cas de charge :

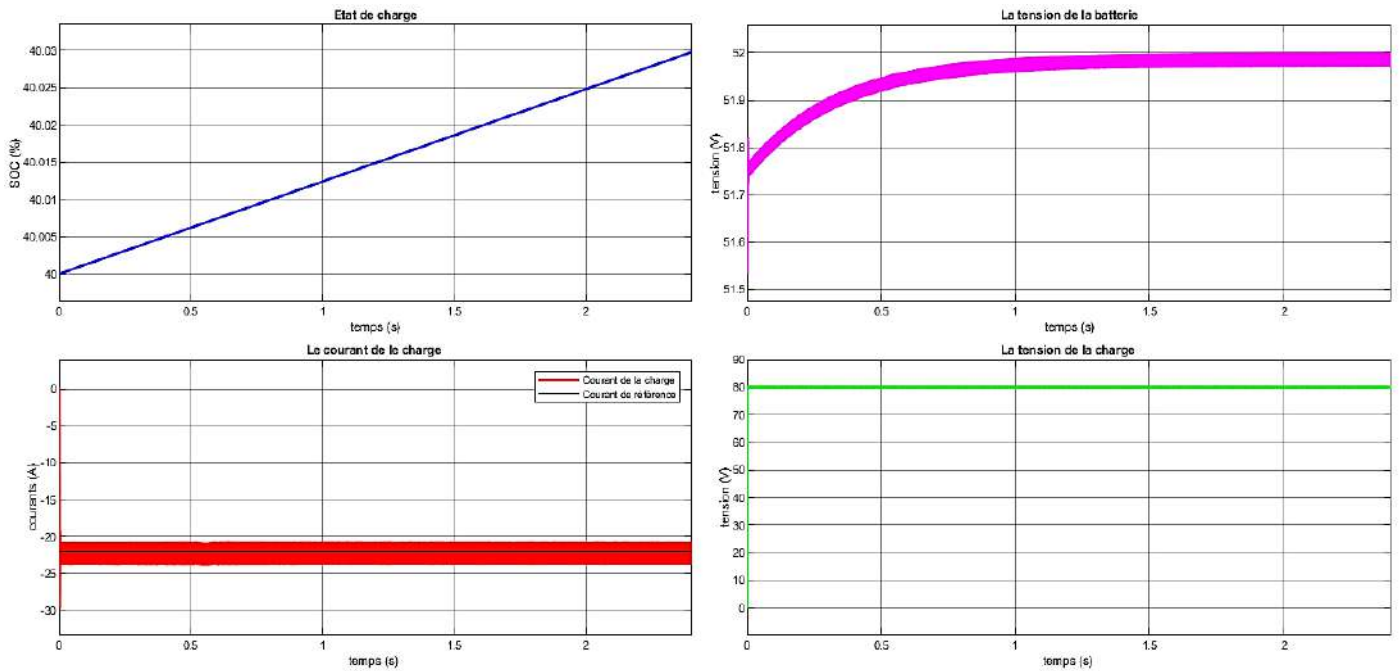


Figure III.5 : Résultats de simulation de la batterie en cas de charge

➤ Cas de décharge

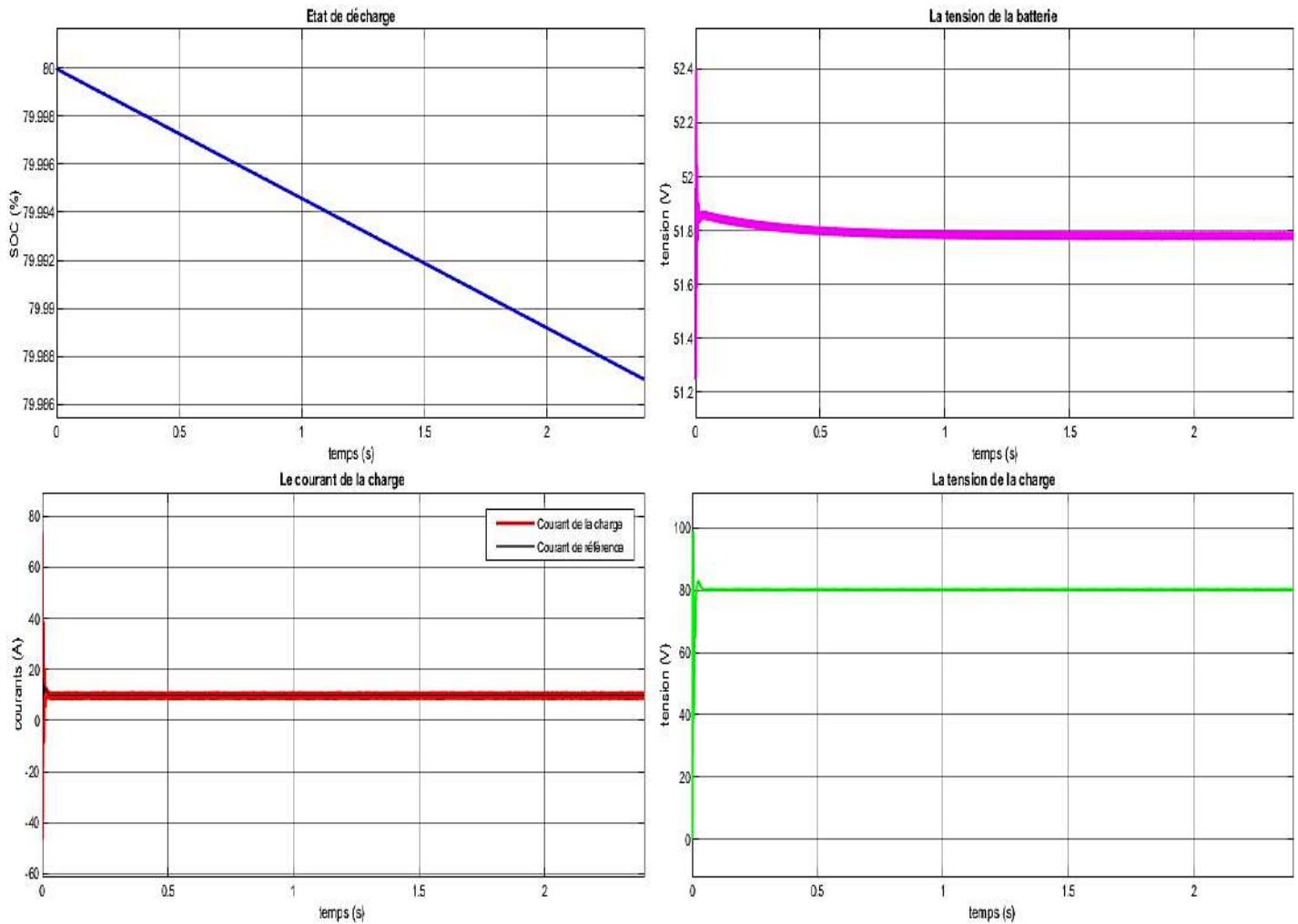


Figure III.6 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge

Commentaires :

- le niveau de stockage de la batterie change en fonction de chaque état :
 - dans l'état de décharge, le niveau de stockage de la batterie(SOC) diminue.
 - dans l'état de charge, le niveau de stockage de la batterie(SOC) augmente.
- La valeur de la tension de la batterie dans le cas de la charge est de 51.98 (V) tandis que le courant est de -22 (A) (la puissance négative – 1.14 kW).
- Contrairement à l'état décharge, la valeur de la tension est 51.8 (V) et le courant est 10 (A) (la puissance positive 0.518 kW).

III.3.3. Pile à combustible

III.3.3.1. Schéma et Résultats de simulation

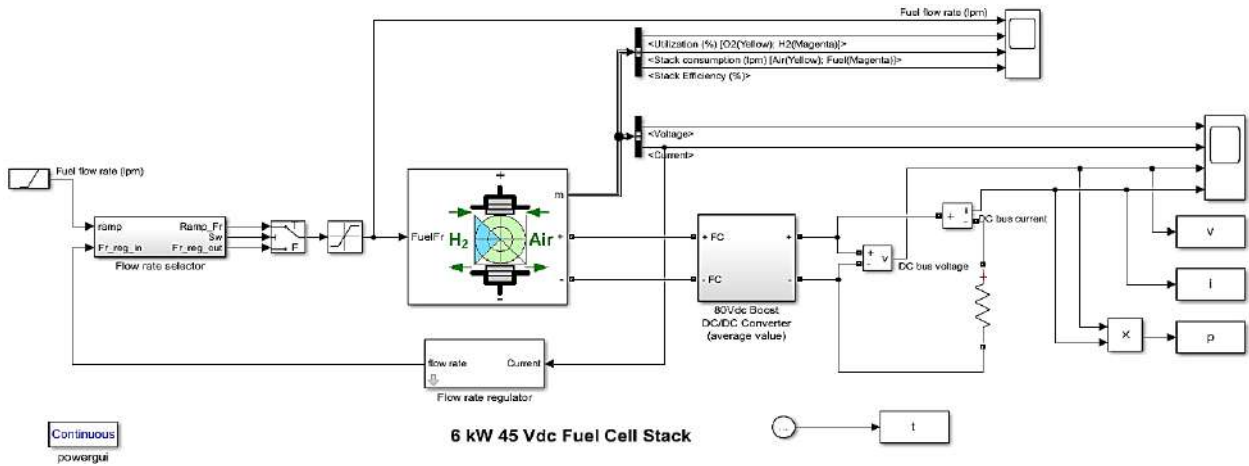


Figure III.7 :Schéma de simulation de la pile à combustible

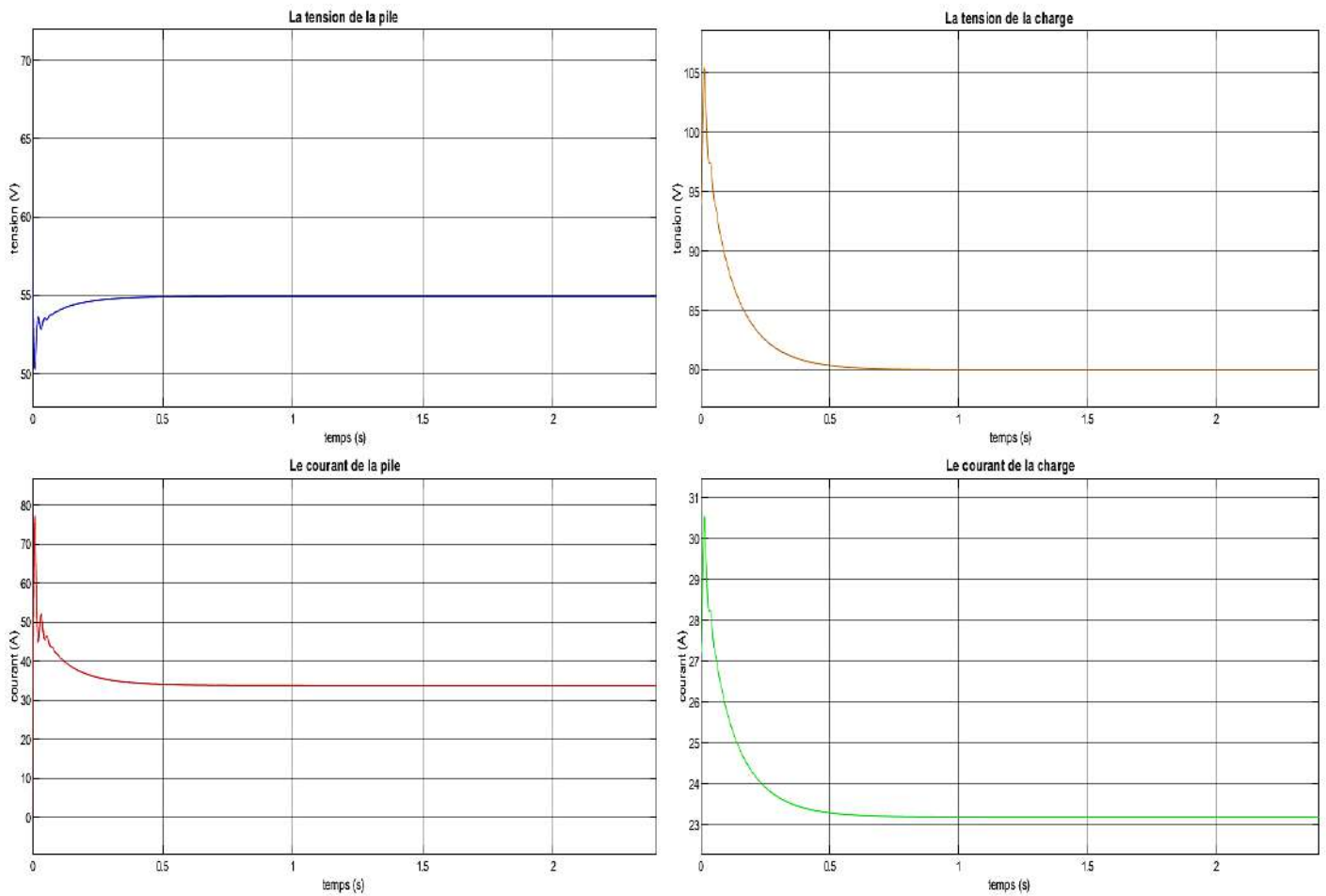
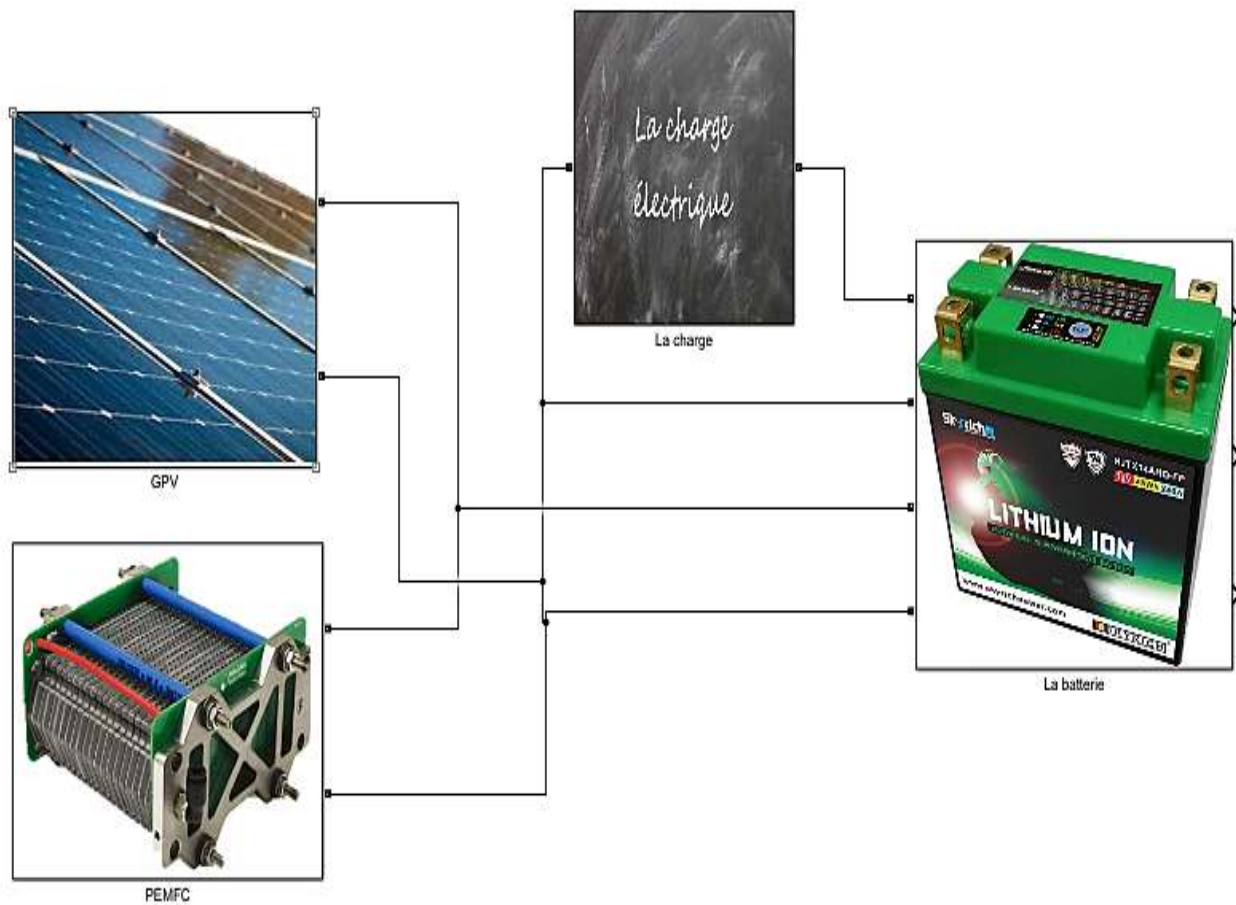


Figure III.8 :Résultats de simulation de la pile à combustible

Commentaires :

- La pile à combustible fournit une puissance de 1.853 kW (la tension de sortie est 55 (V) et le courant est 33 (A)).

III.3.4.Système hybride**III.3.4.1. Schéma et Résultats de simulation****Figure III.9 :** Schéma de simulation de système hybride

➤ Cas de charge

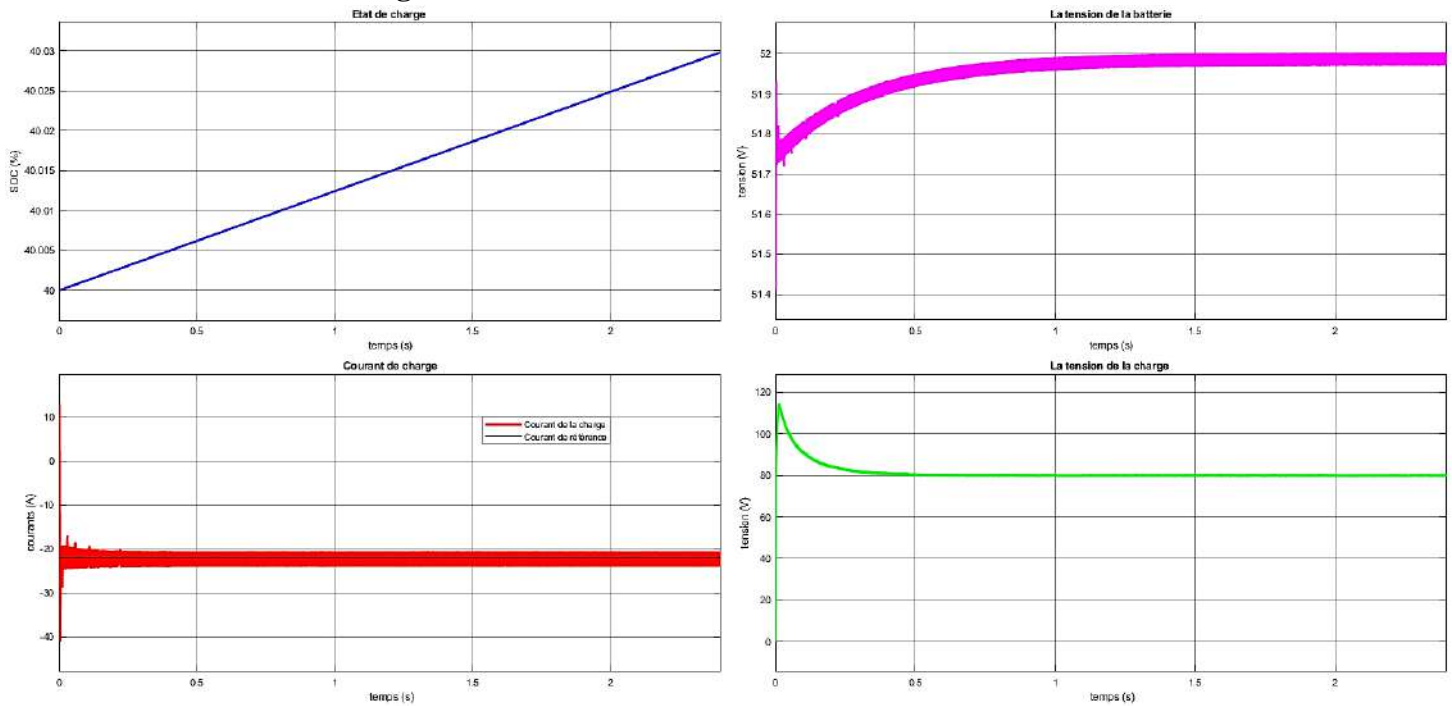


Figure III.10 : Résultats de simulation de batterie du système hybride en cas de charge

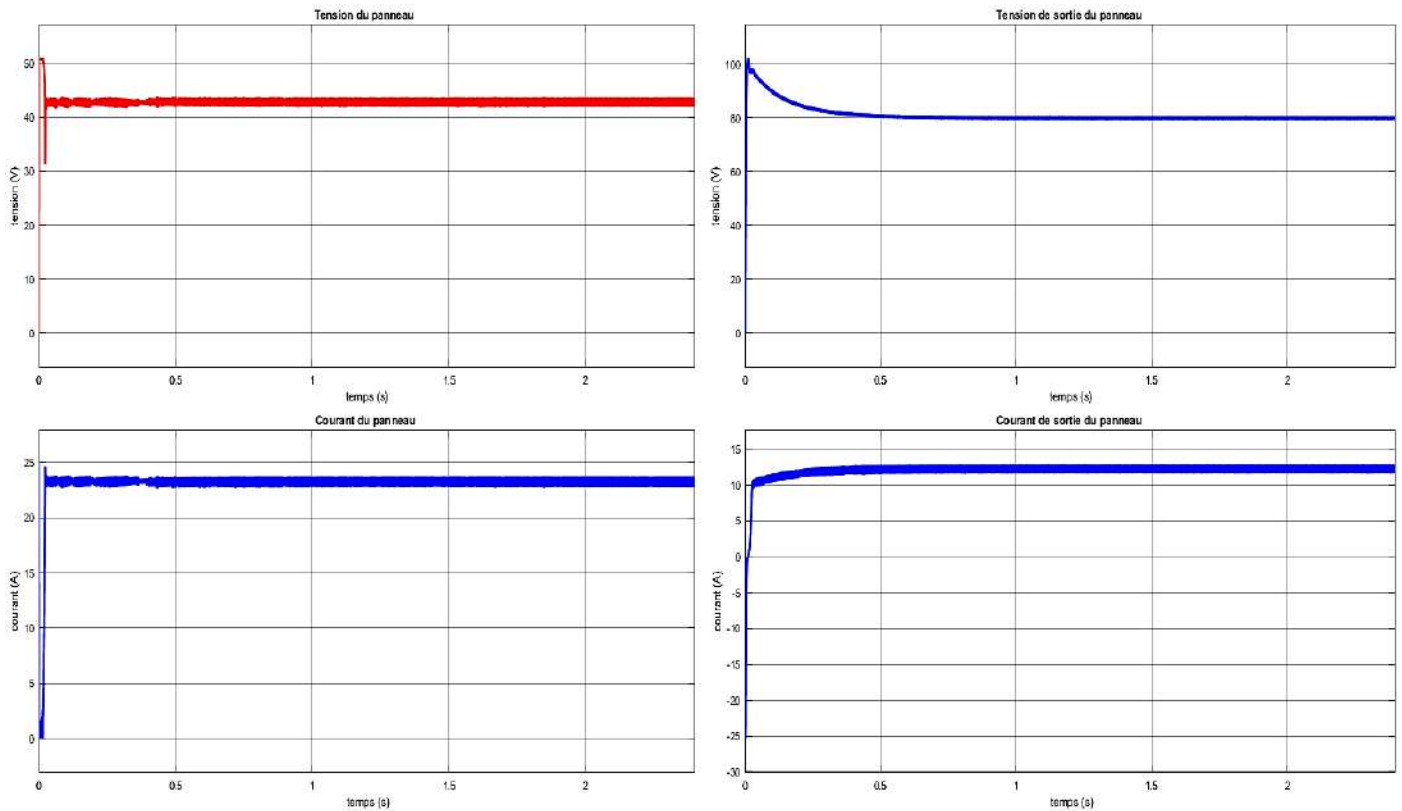


Figure III.11 : Résultats de simulation de GPV du système hybride en cas de charge

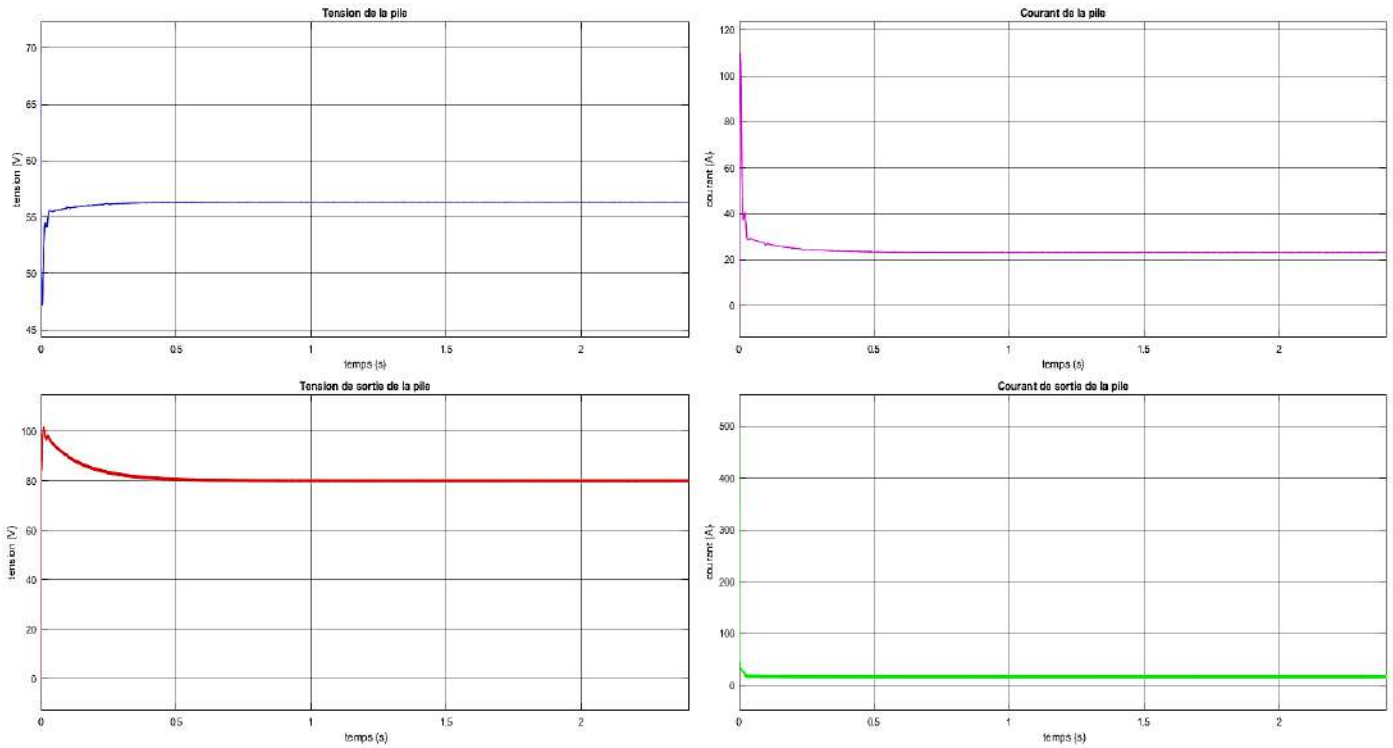


Figure III.12 : Résultats de simulation de la pile du système hybride en cas de charge

➤ Cas de décharge

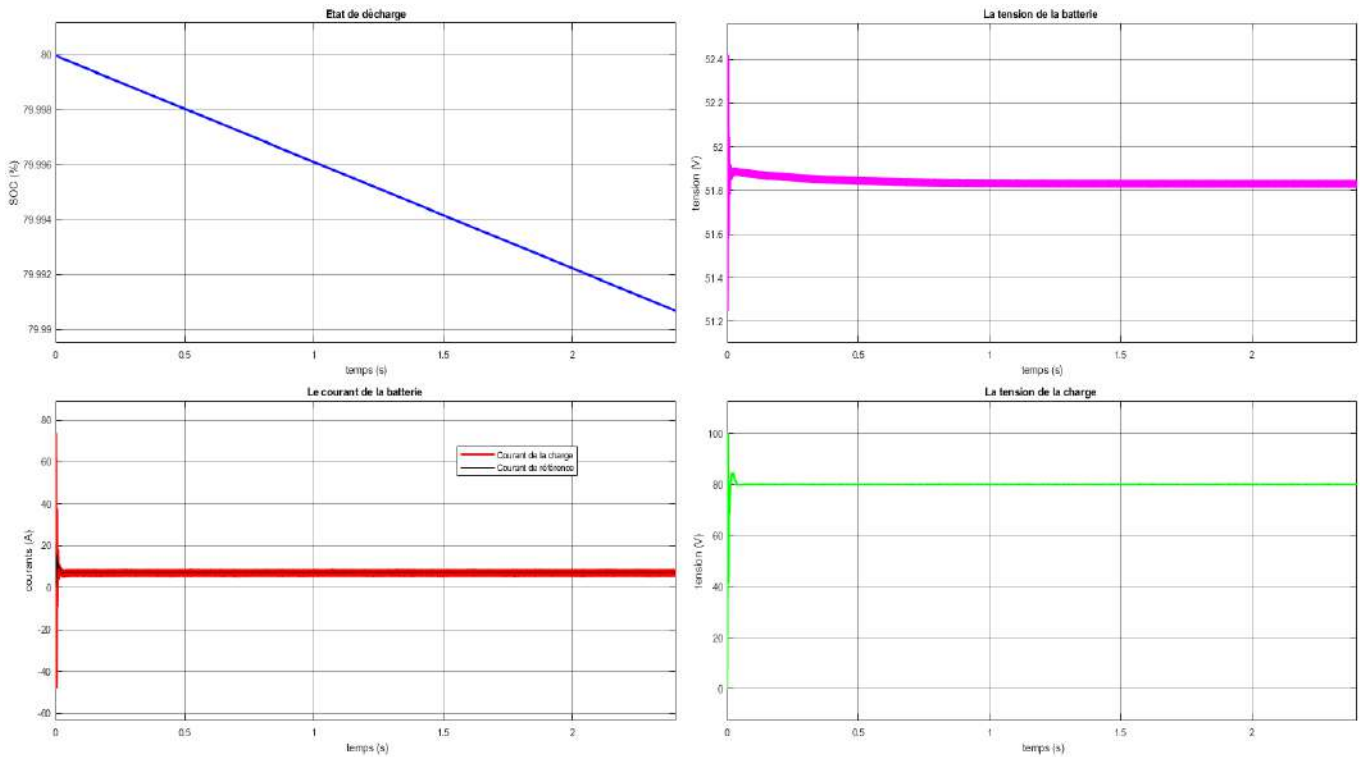


Figure III.13 : Résultats de simulation de système hybride en cas de décharge

Commentaires :

➤ 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 – 22 (A)
 - Tension de la charge 80 (V)
 - Tension de la batterie 52 (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 10 (A)
 - Tension de la charge 80 (V)
 - Tension de la batterie 52 (V) .
- La batterie dans notre simulation représente une batterie réelle; qui besoin des 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.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles Simulink de chaque élément des chaînes de conversion photovoltaïque avec batteries et la pile à combustible . Nous avons conclu de la simulation qu'il est possible d'utiliser le système hybride on utilisant une commande pour gérer le système où chaque composant du système est utilisé selon les besoins.

Les résultats de simulations ont montré le bon fonctionnement du système étudié, ces résultats ont été présents et commentés

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les systèmes d'énergie hybrides sont les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables. En Afrique où le potentiel énergétique solaire est élevé, il est important de favoriser la substitution systématique des sources d'énergie conventionnelles qui deviennent de plus en plus contraignantes au regard du coût d'exploitation et d'opération [4].

La ressource globale en énergie photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

Les travaux présentés concernent la production d'électricité à partir du système hybride.

L'objectif était de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal du système hybride pour une charge et une probabilité de perte d'énergie donnée sous le critère d'un prix minimum du système.

La production d'électricité par ce système hybride avec un système de stockage répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel. En Algérie, la nature du terrain et la durée de l'ensoleillement lui a permis d'être un des pays modèles dans la production des énergies renouvelables.

L'étude du système hybride et l'analyse des résultats montrent qu'il a un bon fonctionnement, qui suffit pour assurer l'énergie nécessaire à la charge. Cette énergie est disponible à toute heure de la journée, car les trois sources fonctionnent alternativement : une source peut compenser l'autre en cas d'absence. On peut utiliser le système hybride pour alimenter les sites isolés, et il peut également être utilisé dans les véhicules électriques.

Le premier chapitre de ce travail porte sur une étude générale sur les différentes composantes du système hybride composé de panneaux photovoltaïques, d'une pile à combustible et de batteries de stockage.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation sous Matlab Simulink du système hybride, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, d'une pile à combustible, de

régulateurs de la tension, d'une batterie de stockage. Ainsi que l'état de charge et décharge de la batterie. Cette modélisation aide à faciliter la simulation dans le dernier chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons fait la simulation de notre système hybride, d'abord le système de panneaux photovoltaïques, ensuite le système de stockage (batterie) et le système de pile à combustible, finalement nous avons simulé le système global étudié.

- Enfin, ce que nous avons conclu à partir de cette étude, il apparaît que le système hybride n'est pas sans inconvénients. Comme suggestion, on doit ajouter la gestion pour améliorer ses performances et réduire ses inconvénients.

Bibliographie

- [1] MEZZAI Sonia, TADJINE Katia « *Étude D'un Système Hybride (Eolien – Photovoltaïque)* » Mémoire de fin Cycle, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
- [2] S. khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf « *Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques* », article (reçu le 10 juin 2017 - accepté le 30 juin 2017).
- [3] SEVAN Geitmann « *Énergies renouvelables & carburants alternatifs* », article, hydro-geitverlage, août 2017.
- [4] RAUGEI Marco, « *Le retour énergétique sur l'investissement énergétique (EROI) du photovoltaïque : méthodologie et comparaisons avec les cycles de vie des combustibles fossiles* », Brookhaven National Laboratory, 2012.
- [5] THOUVEREZ Pierre, « *Des avancées majeures pour le photovoltaïque organique* », sur techniques-ingenieur.fr, 6 février 2017.
- [6] SADAOUI Elias, MEDDOURI Mustapha, « *Gestion D'énergie Dans Un Système Hybride (Photovoltaïque - Éolien)*, » mémoire de Master, université Abderrahmane Mira–Bejaia, 2012.
- [7] LAYADI Toufik Madani, CHAMPENOIS Gérard, « *Étude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi sources* », hal.archives-ouvertes.fr, 18 Sep 2014.
- [8] NATSHEH Emad Maher « *Hybrid Power Système Energy Management Based on Artificial Intelligence* », doctorat, School of Engineering, Université Manchester Metropolitan, juillet 2013.
- [9] MOHAMMEDI Messaoud « *Gestion D'énergie Pour Une Chaine Multi Sources* », thèse doctorat, université Mohamed Khider Biskra, 10 juillet 2016.
- [10] PACLISAN Dana-Maria « *Optimisation Par La Modélisation De L'expérimentation Vibratoire Des Systèmes Pile A Combustible Pour Le Transport Terrestre* », Thèse de Doctorat Université de Technologie de Belfort-Montbéliard École Doctorale Sciences pour L'ingénieur et Microtechniques, 9 septembre 2013.
- [11] TRAORE AbdoulKarime « *Gestion D'un Système Autonome Hybride Photovoltaïque Eolien Pour Applications Agricoles* », mémoire présente à l'Université du Québec à Trois-Rivières, juillet 2016.

- [12] TIAR Mourad, « *Gestion Optimale D'énergie D'une Chaine De Production Electrique Renouvelable* » Thèse Doctorat, université Mohamed Khider Biskra, 13/04/2017.
- [13] BORNI Abd elhalime, « *Étude Et Optimisation D'un Multi Système Hybride De Conversion D'énergie Electrique* », thèse doctorat, université Constantine 1,12/03/2015.
- [14] ROUAS Rabah « *Étude d'un système hybride éolien photovoltaïque* », thèse doctorat de l'université Mouloud Mammeri, Tizi ouazou , 2018.
- [15] P.Thoun thong, « *Conception D'une Source Hybride Utilisant Une Pile A Combustible Et Des Super-Condensateurs* », Thèse Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.