



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique
Réf. :

Présenté et soutenu par :

BEN HALIMA Khaoula et TOUNSI Amani Latifa

Le : Juin 2022

Étude et Modélisation du système Photovoltaïque et du système Pile à combustible PEM

Jury :

Dr.	SAADI Aicha	MCA	Université de Biskra	Encadrer
Dr.	KRAA Okba	MCA	Université de Biskra	Examinateur
Dr.	BEKHOUCHA Nassima	MAA	Université de Biskra	Président

Année universitaire : 2021-2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Étude et Modélisation du système Photovoltaïque et du système Pile à combustible PEM

Présenté par :

**BEN HALIMA Khaoula
TOUNSI Amani Latifa**

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SAADI Aicha

Signature:

Avis favorable du Président du Jury

Dr. BEKHOUCHA Nassima

Signature:

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Thème :

Modélisation d'un système hybride (Photovoltaïque-Pile à combustible PEM)

Proposé par : Dr. SAADI Aicha

Dirigé par : BEN HALIMA Khaoula
TOUNSI Amani Latifa

Remerciement

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu le plus Puissant qui a bien Voulu nous donner la force, la volonté et le courage Pour effectuer Le présent travail.

Nous voudrions tout d'abord remercier notre encadreur et Directeur de thèse, Docteur SAADI Aicha, pour le temps qu'il a consacré à nos apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence nos grandement stimulé.et pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion

Nous remercions en particulier professeur BEN CHOUIA Toufik, pour son aide précieuse et ses conseils pratique pour notre mémoire de maitrise.

Un grand merci également à Monsieur DJELLOL Salah, il est collègue et travaille pour la société nationale de l'électricité et du gaz pour avoir eu la patience de répondre à nos innombrables questions.

Nous voudrions remercier Dr. BAKHOSHA Nassima, pour avoir acceptée d'en présider le jury et Mr. KRAA Okba pour leurs évaluations de notre mémoire de Master.

Enfin, nous tiens à témoigner toute ma gratitude à nos pères, mères, frères, sœurs et amis pour leur confiance et leur soutien inestimable.

Dédicace

Avec beaucoup d'amour et de respect, je dédie ce travail :

*A mon cher père RabeH, qui sacrifie pour moi et m'
a soutenu affectivement et moralement durant toute sa vie.*

*A ma chère mère fatima , le soleil qui éclaire mon chemin
et ma vie.*

A mes frères Yakoub et younes

A mes sœurs AICHA, Hadjer pour leurs encouragements bénéfiques.

A mes chers onclesqui m'ont aidé pendant les moments difficiles

A toutes ma famille

A mawjati El Younania

A toutes mes amies et mes collègues

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

♡ Khaoula ♡



Dédicace

*C'est avec honneur que je dédie ce travail à mes
très chers parents,*

À ma mère Samira

*Les mamans mordantes méritent d'être célébrées, tu mérites
toute une procession, merci beaucoup maman d'avoir travaillé
si dur pour m'élever comme ça, je sais que c'était vraiment
stressant, et j'apprécie vraiment ce que tu as toujours fait pour
moi.*

À mon père Samir

*Chaque ride et chaque ride du visage de mon père est une
histoire de bonheur que j'ai vécue. Merci. Que Dieu prolonge
ta vie. Tu es ma fierté et mon soutien dans la vie.*

*À ma deuxième maman qui était la raison de me motiver ma
tante Latifa*

À ma chère sœur mariem et wassila et ses enfants

À mes frères mahdi et ânes

Ma chérie saro

A tous mes amis

Et à toutes les personnes qui

ont contribué de près ou de loin À la réalisation de ce travail.

Tounsi amani Latifa



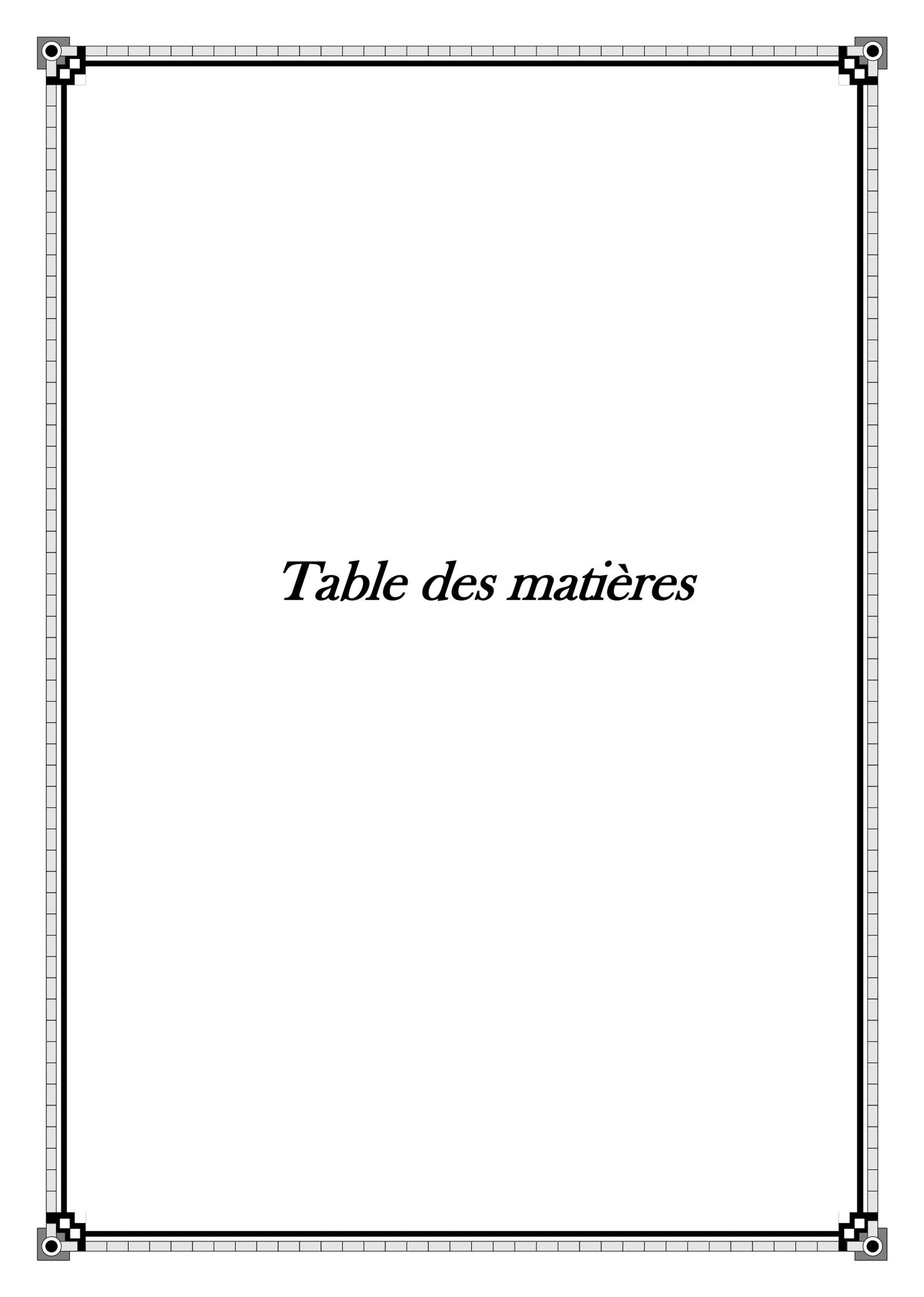
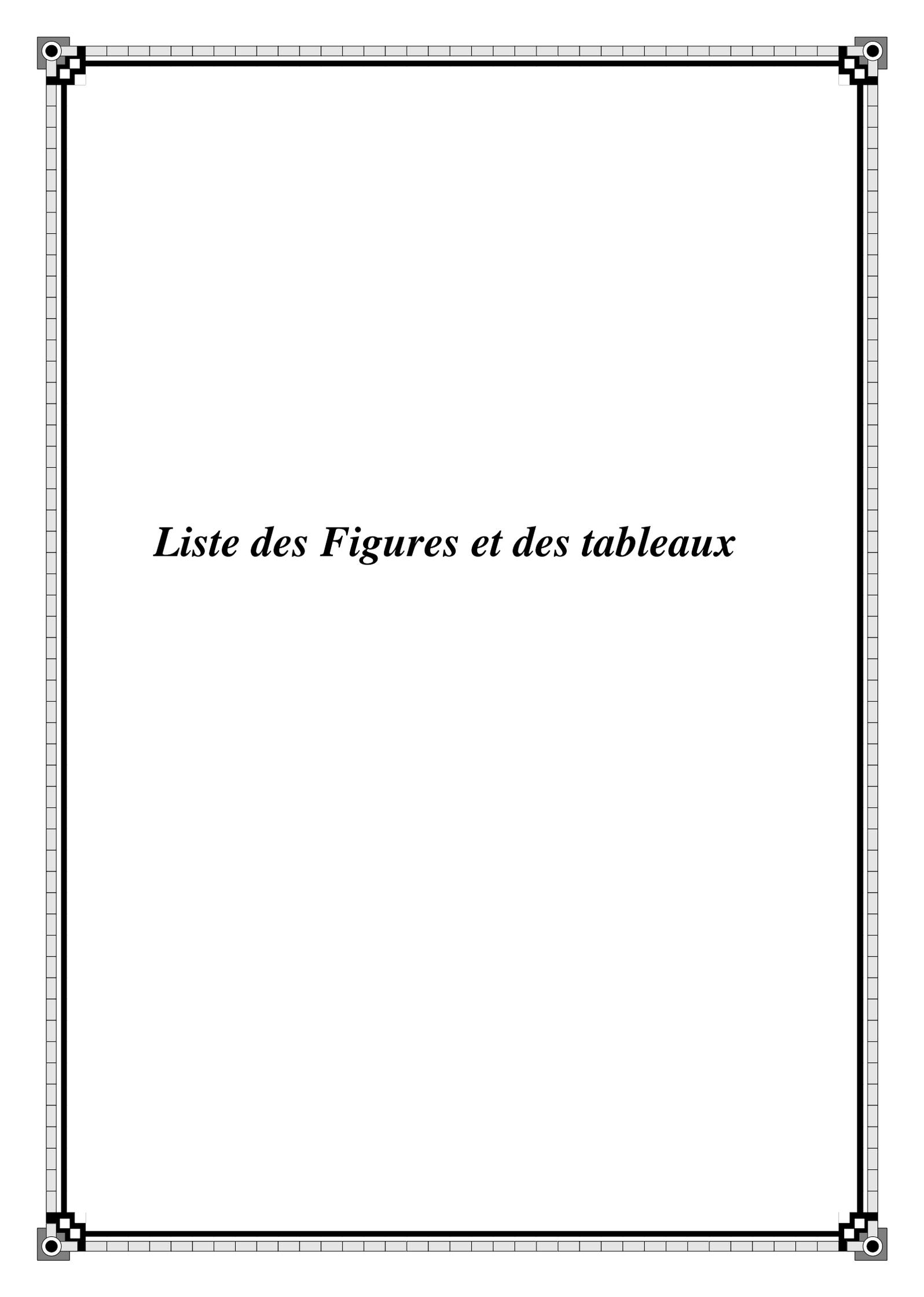


Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Table des matières	III
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	IX
Liste des Symboles et des notations.....	X
Introduction Générale	2
Chapitre I : Généralités sur photovoltaïque et la pile à combustible	
I.1 Introduction	5
I.2 L'énergie solaire photovoltaïque	5
I.2.1 Définition.....	5
I.2.2 Les principaux composants d'un système PV	6
I.2.2.1 La cellule photovoltaïque.....	6
I.2.2.1.1 Différents types des cellules photovoltaïques	7
I.2.2.2 Panneaux photovoltaïques	8
I.2.2.3 Générateur photovoltaïque	8
I.2.3 Principe de fonctionnement	8
I.2.4 Avantages et inconvénients d'un générateur photovoltaïque	9
I.3 La pile à combustible	10
I.3.1 Définition.....	10
I.3.2 Types de piles à combustible	10
I.3.2.1 La pile alcaline (AFC)	11
I.3.2.2 Les piles à méthanol direct (DMFC)	11
I.3.2.3 Les piles à carbonate fondu (MCFC)	11
I.3.2.4 Les piles à oxydes solides (SOFC)	12
I.3.2.5 Les piles à acide phosphorique (PAFC)	12
I.3.2.6 Les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC)	12
I.3.3 La pile à combustible de type PEM.....	13
I.3.4 Principe de fonctionnement	14
I.3.5 Avantages et inconvénients des piles à combustibles	17
I.5. l'objectif.....	18
I.6. Conclusion.....	18

Chapitre II : Modélisation du Système photovoltaïque et du système pile à combustible	
II.1. Introduction.....	20
II.2. Modalisation d'une cellule PV	20
II.3. Caractéristiques d'un panneau solaire	22
II.4. L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du panneau PV	23
II.5. Rendement de GPV	24
II.6. Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale	24
II .7. Méthode de Perturbation et Observation (P&O)	28
II .8. Convertisseurs DC/DC	28
II .9. Différents types des hacheurs	28
II.10. Convertisseur Boost :	29
II .11. Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie photovoltaïque	30
II .12. Système de pile à combustible	31
II .12.1. Pertes d'activation	31
II .12.2. Pertes ohmique	32
II .12.3. Pertes de concentration	32
II.13. Modes de fonctionnement	33
II.13.1. Fonctionnement en régime statique	33
II.13.2 Fonctionnement en régime dynamique	35
II .14 Modèle du convertisseur Boost de la pile à combustible	36
II .16. Convertisseur DC-AC (Onduleur triphasé)	37
II.17. Conclusion	38
Chapitre III : Simulations les deux systèmes	
III.1. Introduction	40
III.2. Générateur photovoltaïque	41
III.2.1. Allure de l'éclairement (G).....	41
III .2.2 Convertisseur élévateur (Boost) de GPV	45
III.3. La pile à combustible	49
III.3.1. Convertisseur élévateur (Boost) de PàC	51
III .4. Le principe de la gestion d'énergie	55

III.5. Les puissances coutées onduteur	56
III.6. Conclusion	57
Conclusion Générale.....	58
Références Bibliographies	
Résumé	



Liste des Figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur photovoltaïque et la pile à combustible

Figure I. 1. Cellule photovoltaïque.	6
Figure I. 2. Les principaux composants d'un système photovoltaïque.....	8
Figure I. 3 Effet photovoltaïque.....	9
Figure I. 4. Classification des Piles à combustibles.....	8
Figure I. 5. Applications des Piles à combustible.....	9
Figure I. 6. Principe de fonctionnement de la PEMFC.....	13
Figure I. 7. Schéma d'une cellule de PEMFC d'un (stick) ou empilement de cellule. ..	13

Chapitre II : Modélisation du Système photovoltaïque et pile à combustible

Figure II. 1. Circuit équivalent d'une cellule PV	21
Figure II. 2. (a) caractéristiques courant-tension du PV (b) caractéristiques puissance - tension du PV..	23
Figure II. 3. (a) influence de l'éclairement (b) influence de température	24
Figure II. 4. Variation des points de puissance maximale en fonction de L'enseillement (a) et de la charge (b).....	25
.....	
Figure II. 5. Principe de la commande MPPT.....	26
Figure II. 6. Algorithme de la commande P&Q.	27
Figure II. 7. la variation de la puissance le point de fonctionnement par influence de MPPT.....	27
Figure II. 8. Principe de base d'un hacheur.	28
Figure II. 9. Schéma de base d'un convertisseur Boost.....	29
Figure II. 10. Signal de commande de l'interrupteur K.....	30
Figure II. 11. Schéma Convertisseurs parallèle (Boost) de GPV..	30
Figure II. 12. Le schéma équivalent d'une PEMFC.	31
Figure II. 13. . Évolution de la tension de sortie, du rendement électrique et de la puissance en régime statique..	34

Figure II. 14. Schéma Convertisseurs parallèle (boost) de PàC.	36
Figure II. 15. Onduleur triphasé.....	38

Chapitre III : simulations les deux Systèmes

Figure III. 1. schéma d'un system hybride global.	40
Figure III. 2. Allure de l'éclairement.	41
Figure III. 3. Élévation solaire le 12 juin 2022 à Biskra [48].	42
Figure III. 4. Variation du courant de GPV.	43
Figure III. 5. Variation du tension de GPV.....	43
Figure III. 6. Variation de puissance de GPV.....	44
Figure III. 7. Convertisseur (Boost) de GPV.	45
Figure III. 8. Rapport cyclique.....	46
Figure III. 9. Variation de tension de GPV à la sortie du convertisseur (Boost).....	46
Figure III. 10. Les deux signaux de commande MLI.	47
Figure III. 11. courant composée I_a, I_b, I_c	47
Figure III. 12. zoom de I_a, I_b, I_c	48
Figure III. 13. Tension composée V_a, V_b, V_c	48
Figure III. 14. Zoom de V_a, V_b, V_c	49
Figure III. 15. Schéma équivalent de PàC	49
Figure III. 16. Courant de PàC.....	50
Figure III. 17. Tension de PàC.....	51
Figure III. 18. Puissance de PàC.....	51
Figure III. 19. Schéma du convertisseur (Boost) de PàC.....	52
Figure III. 20. Rapport cyclique la PàC.....	52
Figure III. 21. La tension de PàC à la sortie du convertisseur Boost.....	53
Figure III. 22. Courant composée I_a, I_b, I_c	53
Figure III. 23. Zoom de I_a, I_b, I_c	54
Figure III. 24. Tension composée V_a, V_b, V_c	54
Figure III. 25. Zoom V_a, V_b, V_c	55
Figure III. 26. Les puissances de system hybride global.	56

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur photovoltaïque et la pile à combustible

Tableau I. 1 .Type des cellules photovoltaïques.7

Chapitre III : simulations les deux Systèmes

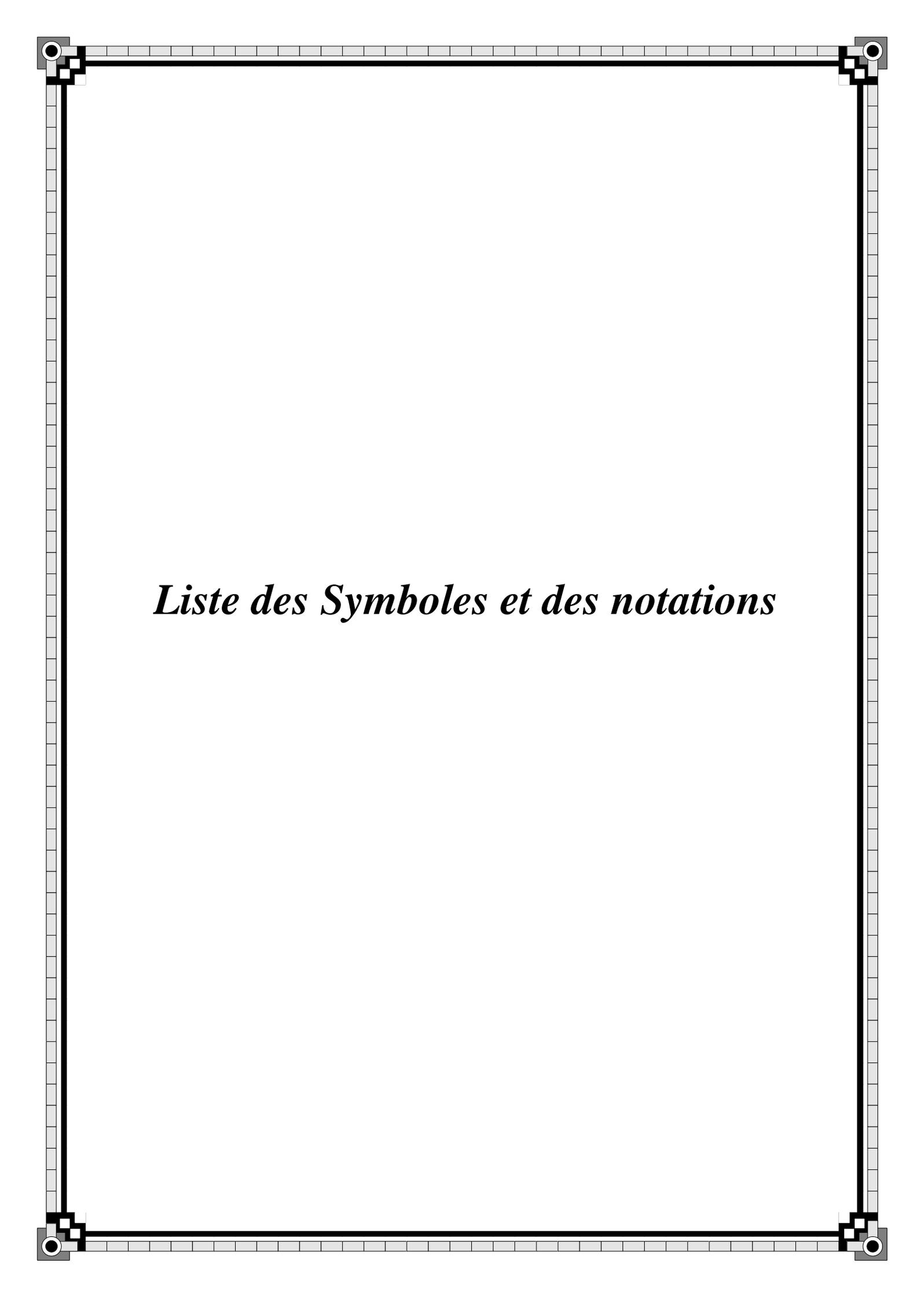
Tableau III. 1. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque. 41

Tableau III. 2. Temps de simulation par les heures (cas l'éclairement). 42

Tableau III. 3. Les valeurs de **IGPV, VGPV et PGPV** 44

Tableau III. 4. Identifications des paramètres de la PàC. 50

Tableau III. 5. Temps de simulation par les heures (cas les puissances). 56



Liste des Symboles et des notations

S : Constante d'énergie solaire.

E : Eclairement absorbé par la cellule. 1000 (**W/m²**).

I_{sc} : Courant maximal courant de court-circuit (**A**).

V_{oc} : Tension à vide tension de circuit ouvert (**V**).

I_{PH} : Photo courant (ou I_o ou I_{pv}) (**A**).

I_S : Courant de saturation des diodes (ou I_o ou I_{sat}) (**A**).

R_s : Résistance de la série (**Ω**).

R_{SH} : Résistance de dérivation (ou R_p) (**Ω**).

D : Diode.

I_d : Courant circulant dans la diode (**A**).

q : Charge d'électronique (**C**).

K : Constante de Boltzmann.

T : Température de fonctionnement de la cellule (**K**).

A : Facteur idéal.

K_1 : Coefficient de température de courant de court-circuit de la cellule.

T_r : Température de référence de la cellule.

λ : Insolation solaire en kW/m².

I_{RS} : Courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire (**A**).

EG : L'énergie de bande-écart du semi-conducteur utilisé dans la cellule.

V_{oc} : Tension à vide en l'absence de courant (**V**).

I_{cc} : Courant débité en courant-circuit (**A**).

η : Rendement de GPV.

B : Surface effective de la cellule solaire,

A : Flux incident.

(I_m, V_m) : Les Coordonnées du point de fonctionnement maximale

α : Rapport cyclique du convertisseur DC/DC.

ΔV : Valeur d'incrément ou valeur de perturbation.

K : Signal rectangulaire de fréquence f dont la durée est à l'état haut.

T : Ondurée de conduction de l'interrupteur (**K**).

T_{off} : Correspond à la durée de blocage de l'interrupteur (**K**).

V_{ch} : Tension de charge (**V**).

I_{ch} : Courant de charge (**A**).

V_{pv} : Tension photovoltaïque (**V**).

I_{pv} : Courant photovoltaïque (**A**).

C_{dc} : Capacité de double couche.

C_{geom} : Capacité géométrique.

Pile à combustible

E_{nernst} : Tension de Nernst.

U_{pac} : Tension de pile a combustible.

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.

P_{H_2O} : Pressions partielles à l'interface de l'eau ATM.

V_{act} : Pertes d'activation (**V**).

I_{fc} : Courant délivré par la pile à combustible (**A/cm²**).

I_0 : Courant d'échange caractérisant 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**).

A : Pente de la droite de « trafel ».

V_{ohm} : Pertes ohmique (**V**).

R_M : Résistance totale de la pile à combustible (Ω).

V_{ohm} : Pertes de concentration (V).

B : Constant de transport ou de transfert de masse.

I_{lim} : Densité du courant limite (A).

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

BSF: Back Surface Field

DC: Courant Continue.

CA : Courant Alternatif.

DC/DC : Convertisseur Courant continu/ Courant continu.

DC/AC : Convertisseur Courant continu/ Courant Alternatif.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPP: Maximum Power Point.

MPPT: Maximum Power Point Cracking.

P&O : Perturbation et Observation.

FC : Fuel Celle.

PàC : Pile A Combustible :

AFC : Alcaline Fuel celles (piles alcalines).

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Celle (Piles à membrane échangeuse de protons).

PAFC : Phosphorique Acid Fuel Celles (piles à acide phosphorique).

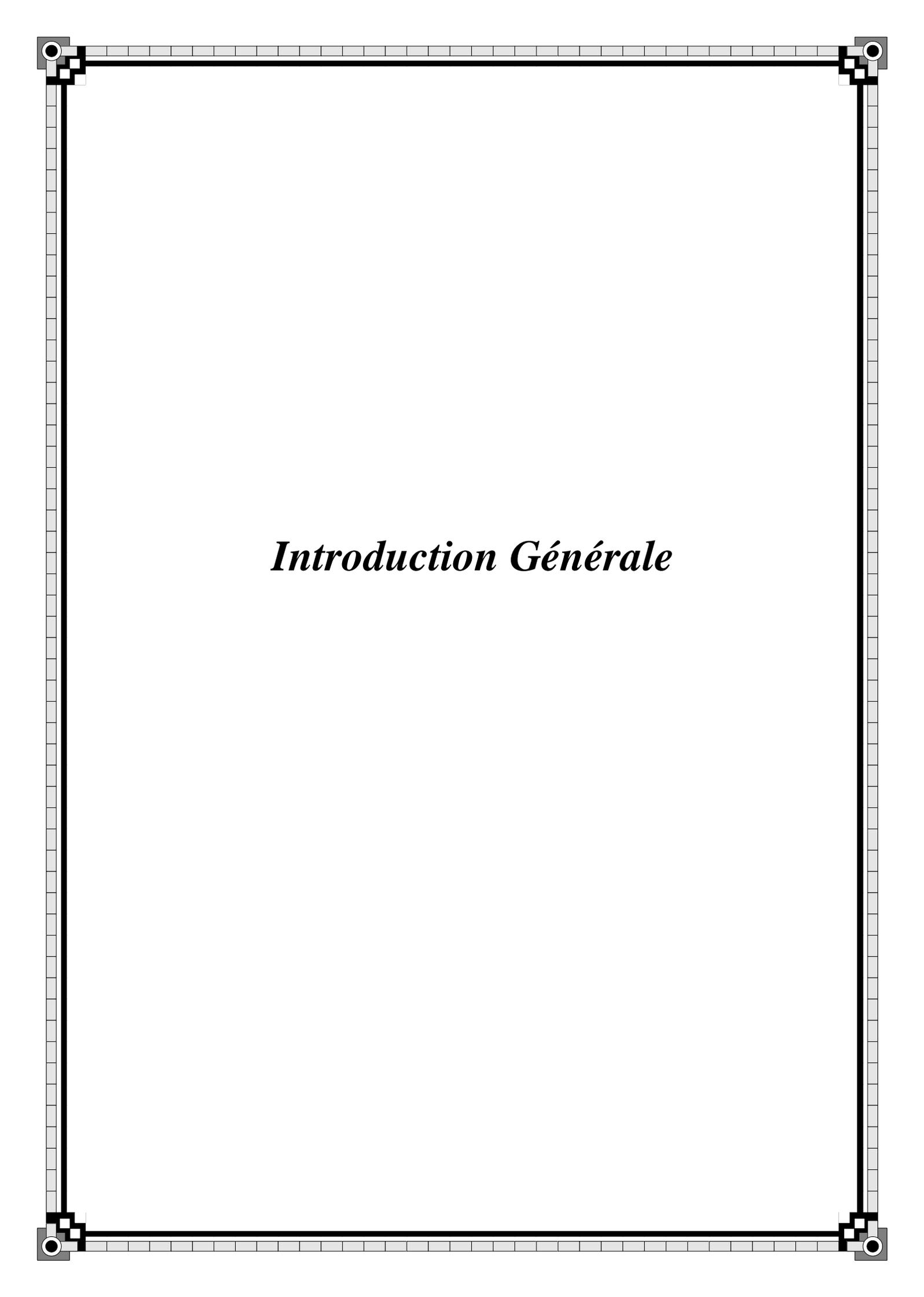
SOFC : Solid Oxyde Fuel celles (piles à électrolyte solide).

DMFC : Direct-Méthanol Fuel Celle (piles à méthanol direct).

PVG : Photovoltaïque Générateur.

PI : Proportionnel intégrale.

AME : Assemblage Membrane Electrodes.



Introduction Générale

L'énergie fait partie des besoins humains essentiels, au même titre que l'eau et la Nourriture, une ressource indispensable à la vie. La rendre accessible à tous sans dégrader notre environnement, tel est le défi à relever. La demande en énergie va encore considérablement augmenter dans les années à venir du fait de la croissance démographique et de l'élévation progressive du niveau de vie, en particulier dans les pays en voie de développement. Les besoins devraient ainsi doubler d'ici à 2050. Pour les satisfaire, les sources d'énergie seront plus complémentaires que concurrentes, chaque source énergétique a ses avantages et ses inconvénients, et qu'il n'existe pas d'énergie parfaite permettant de satisfaire à tous nos besoins. Toutes les options énergétiques doivent ainsi être maintenues ouvertes pour apporter les réponses les plus appropriées, aussi bien d'un point de vue environnemental que d'un point de vue économique.

La production mondiale d'électricité repose en grande partie sur l'utilisation Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), qui couvrent aujourd'hui plus de 80 % de La demande énergétique mondiale, qui représente 40 % des émissions annuelles de gaz à effet de serre. Effet de serre. Cependant, il n'y a pas de remplacement direct pour eux. Répondre à nos besoins. En conséquence, les émissions de dioxyde de carbone continuent d'augmenter. L'épuisement des combustibles fossiles et le réchauffement climatique devraient être Risques majeurs du XXIe siècle. Repenser complètement le modèle devient évident les systèmes énergétiques actuels et le démarrage conduiront à une transition vers des modèles énergétiques durables. La transition énergétique passe par la mise en œuvre d'un ensemble de solutions innovantes : Technologie basse énergie, énergie alternative, nouveau vecteur Énergie, système hybride. La transition énergétique pose une double exigence diminuer la consommation et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Face à ces obligations, la science et la technologie apportent des réponses diversifiées, aussi bien dans la production que dans les applications.

Ce travail a pour but de présenter l'étude et modélisation du system photovoltaïque/pile à combustible pour atteindre cet objectif :

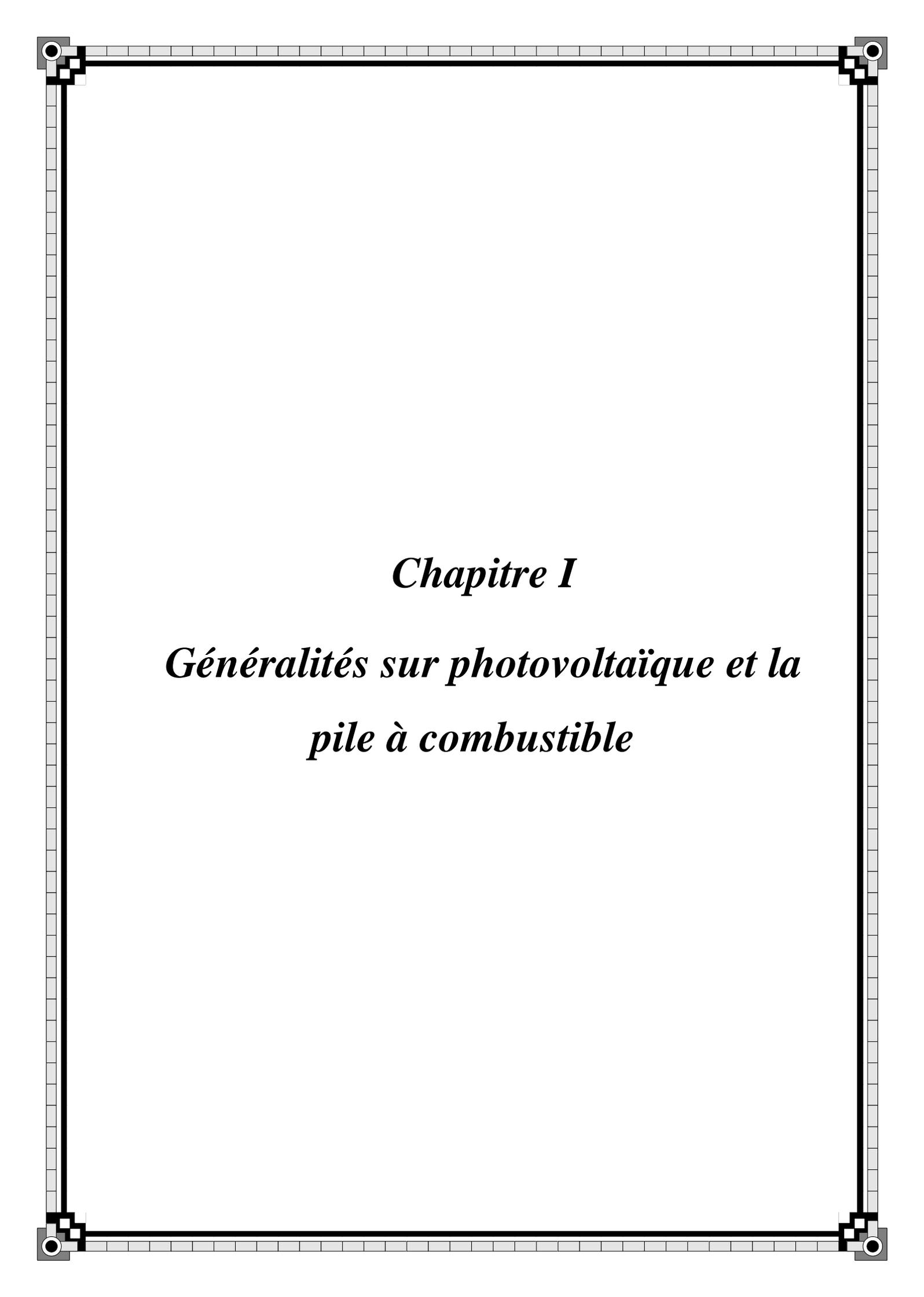
- ✓ Etude les deux sources photovoltaïque et la pile à combustible.
- ✓ Modélisation de toutes les parties du système (PV, PàC, convertisseur *DC* et *AC*).
- ✓ Simulation du system photovoltaïque /pile à combustible.

Dans le premier chapitre, nous nous concentrerons sur l'étude de deux sources ; l'énergie solaire photovoltaïque et la pile à combustible et en apprendrons davantage sur leurs différentes composantes, le principe de fonctionnement.

Le second chapitre, nous nous intéressons d'abord on procèdera à une modélisation mathématique de différentes parties constituant le système à étudier, des éléments des systèmes énergétiques hybrides (SEH) à savoir : le générateur photovoltaïque (GPV), les Piles à combustible précisément de type (PEMFC) (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell). Ces dernières sont étudiées, ensuite nous avons présentés la technique de commande principale proposée (MPPT) pour maximiser la puissance produite et un modèle de convertisseur élévateur (DC/DC) et un autre (DC/AC) onduleur triphasé.

Le troisième chapitre propose un schéma global du système photovoltaïque / pile à combustible modélisé, où les résultats de simulations sous différents scénarios sont donnés et discutés. Comme il présente l'ensemble des résultats de simulation obtenus au cours de cette étude sous Matlab/Simulink.

Enfin, nous présentons une conclusion générale, permettant de faire le bilan sur les travaux obtenus dans cette thèse, et les perspectives visant l'étude des systèmes énergétiques.



Chapitre I

Généralités sur photovoltaïque et la pile à combustible

I.1 Introduction :

La combinaison de différent type de sources d'énergie contribue à optimiser les systèmes de production d'électricité afin que nous choissions deux types à étudier (panneau solaire et la pile à combustible).

Dans ce premier chapitre nous allons présenter l'analyse et le principe de fonctionnement des deux types de sources électriques ainsi que leurs avantages et inconvénients.

I.2 L'énergie solaire photovoltaïque :

I.2.1 Définition

Le soleil libère une énorme quantité d'énergie dans l'univers. La quantité de cette énergie qui atteint la terre est définie comme "constante de l'énergie solaire". La constante d'énergie solaire (S) est définie comme la quantité de rayonnement solaire qui atteint la haute atmosphère de la terre, sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil.

Une partie de cette énergie solaire incidente est diffusée, cette énergie est absorbée par : les molécules d'air, couverture nuageuse, l'atmosphère, etc. Le reste du rayonnement qui n'est pas dispersée et absorbée qui atteint la surface de la terre est estimé à environ 1000W/m² à midi par ciel clair [1].

Et pour exploiter ce rayonnement et le convertir l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (*Volt*).

De nombreuses cellules photovoltaïques sont combinées, conduisant à l'émergence de générateurs photovoltaïques GPV qui a une caractéristique statique courant-tension I(V) non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [2].

I.2.2 Les principaux composants d'un système PV :

I.2.2.1 La cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium.

La figure (I.1) présente la structure générale d'une cellule solaire à substrat de type p et qui est composée des éléments suivants [3]:

- La base qui est un substrat de type p (en général, dopé au bore)
- L'émetteur n^+ (en général, sur-dopé au phosphore) formant la jonction n^+p avec la base.
- La couche de passivation (en général d'oxyde de silicium SiO_2)
- La couche antireflet (CAR) en face avant (en nitrure de silicium SiN_x), qui joue également un rôle supplémentaire de passivation.
- Le champ de surface arrière (BSF : Back Surface Field), sur-dopé p^+ (en général à l'aluminium).
- Les contacts en face avant (argent Ag) et en face arrière (aluminium Al) permettant la collecte des porteurs de charge et la mise en module.

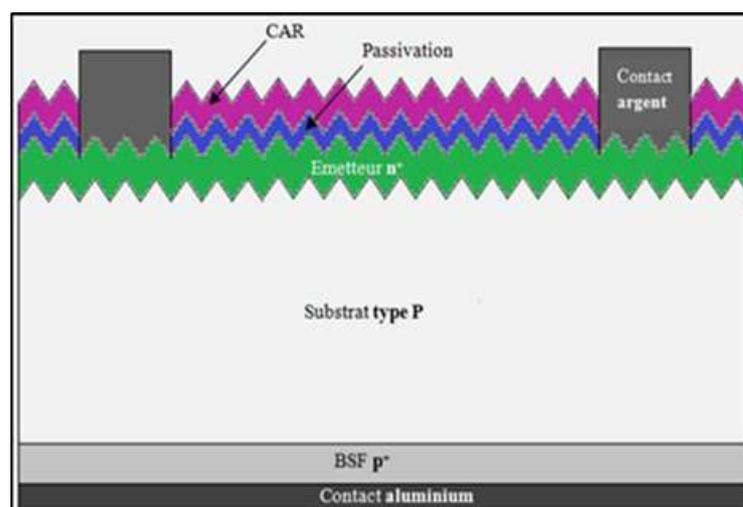


Figure I. 1. Cellule photovoltaïque.

I.2.2.1.1 Différents types des cellules photovoltaïques :

Les cellules solaires sont faites de divers matériaux et différentes structures afin de réduire le coût et d’obtenir une efficacité optimale, le tableau (I.1) résume les différents types des cellules photovoltaïque et leurs caractéristiques [2]

Tableau I. 1 .Type des cellules photovoltaïques.

Matériau	Rendement	Caractéristique	Longevity
Silicium monocristallin	12 à 18% (24.7% en laboratoire)	- Très performant. - Stabilité de production. - Méthode de production couteuse et laborieuse.	20 à 30ans
Silicium poly-cristallin	11 à 15 % (19.8 % en laboratoire)	-Adapté à la production à grande échelle. - Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.	20 à 30 and
Amorphe	5 à 8 % (13 % en laboratoire)	- peut fonctionner sous la lumière fluorescente. - Fonctionnement si faible luminosité. - Fonctionnement par temps couvert. - Fonctionnement si ombrage partiel. - La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	

I.2.2.2 Panneaux photovoltaïques :

Le panneau photovoltaïque (PV) est composé de plusieurs cellules. Pour produire plus de puissance, Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant. La mise en parallèle de cellules accroît le courant en conservant la tension. Le Panneau solaire est formé par l'interconnexion en série et/ou en parallèle de PV [4].

I.2.2.3 Générateur photovoltaïque :

Le GPV représente la partie de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Cette partie est essentiellement composée d'un ensemble de PV. Structurés en série ou en parallèle ou hybride (Mixte). Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie [5].

La figure (I.2) montré les composants d'un système photovoltaïque.

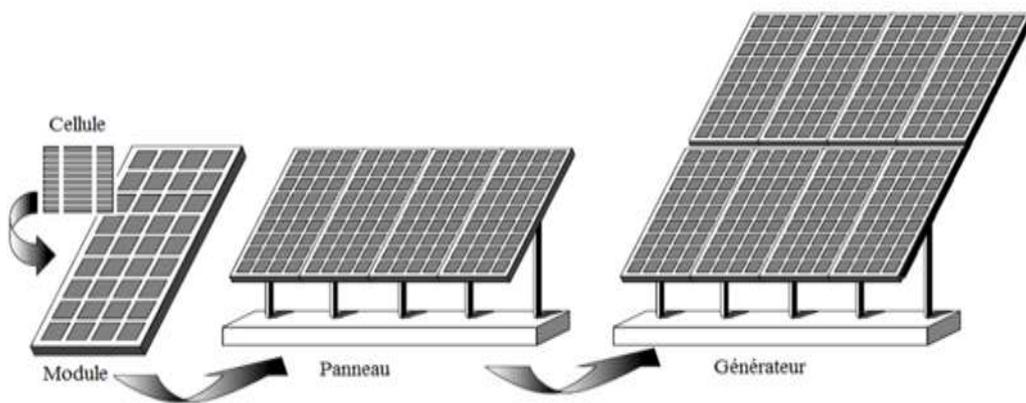


Figure I. 2. Les principaux composants d'un système photovoltaïque

I.2.3 Principe de fonctionnement :

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement,

la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. Voir La figure (I.3).

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, C'est l'effet photovoltaïque [6].

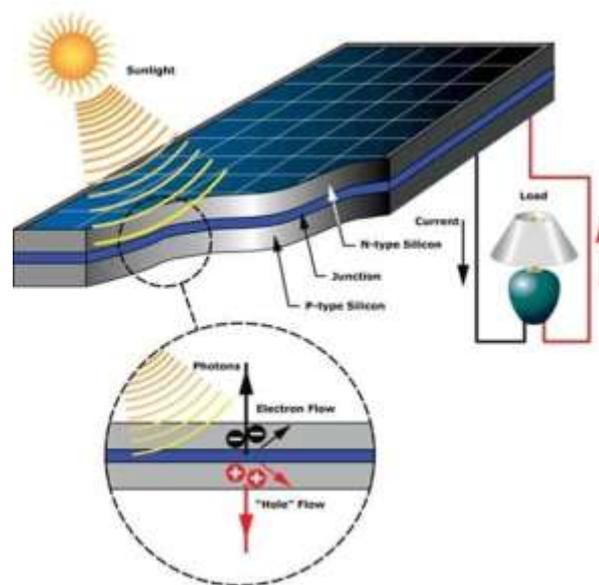


Figure I. 3. Effet photovoltaïque.

I.2.4 Avantages et inconvénients d'un générateur photovoltaïque :

a) Les Avantages :

- ✓ Un GPV est une source renouvelable qui prend sa matière primaire du soleil et ses rayonnements.
- ✓ Il a une grande fiabilité, avec un nombre limités des pièces auxiliaire mobiles.

- ✓ Un taux de pollution nulle, sachant que les panneaux solaire transforment l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution.
- ✓ Il ne nécessite pas un grand entretien, ce qui nous donne un coût relativement faible.
- ✓ Son caractère modulaire permet un montage simple et flexible.

b) Les inconvénients :

- ✓ Un GP est une source renouvelable qui dépend des conditions climatiques météorologiques.
- ✓ Un GP est souvent complété par un dispositif de stockage, donc une augmentation du coût.
- ✓ Pour une utilisation autonome, ces systèmes nécessite par fois un champ des panneaux énorme présente une grande taille d'installation [7].

I.3 La pile à combustible :

I.3.1 Définition :

Une pile à combustible (PàC) est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio) [8].

I.3.2 Types de piles à combustible :

La classification des PàC se fait généralement selon la nature de l'électrolyte car celui-ci détermine, d'une part, la température à laquelle Une PàC est un générateur d'énergie électrique. Elle la pile fonctionne et, d'autre part, le type d'ion assurant la conduction ionique. La classification repose essentiellement Sur [9]:

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

I.3.2.1 La pile alcaline (AFC) :

Les piles de ce type présentent des avantages comme leur simplicité, leur faible coût (par rapport aux autres piles), une cathode de bonne performance (électrode solide de poudre de Nickel qui donne une structure poreuse, fine et humide pour le côté liquide

Et plus de pores ouverts pour le côté gaz. Pourtant, le problème principal de cette pile pour les applications terrestres est celui du dioxyde de carbone qui réagit avec l'électrolyte alcalin. Les produits de cette réaction sont des cristaux de carbonates qui sont bloqués dans l'électrolyte. Par conséquent, les performances des AFC vont diminuer considérablement à long terme [9].

I.3.2.2 Les piles à méthanol direct (DMFC) :

Ce type de pile à combustible est alimenté directement en méthanol (CH_3OH). Le méthanol est en effet l'un des rares réactifs avec l'hydrogène (ainsi que le glycol, l'ammoniac ou l'hydrazine) qui ait des caractéristiques d'oxydation suffisamment intéressantes pour pouvoir être utilisé dans les piles à combustible fonctionnant à basse ou moyenne température. L'avantage est le fait qu'elles fonctionnent directement au méthanol, un carburant certes toxique, mais liquide à température normale, actuellement produit à partir de gaz [9].

I.3.2.3 Les piles à carbonate fondu (MCFC) :

Utilise comme électrolyte un mélange de carbonates et est capable d'oxyder le monoxyde de carbone. La température de fonctionnement est d'environ 650°C. Cette technologie de pile est encore au stade de développement à cause de son coût élevé [9].

I.3.2.4 Les piles à oxydes solides (SOFC) :

Ce sont celles qui travaillent à la plus haute température (de 800 °C à 1000 °C), cette chaleur dégagée peut être récupérée à un niveau de température suffisant pour envisager des utilisations industrielles et domestiques suffisantes.

Cette température est obligatoire pour permettre à l'électrolyte composé d'oxyde d'aujourd'hui, les efforts de développement se concentrent sur la baisse de température de fonctionnement en dopant l'électrolyte d'autres composés. Les catalyseurs utilisés sont à base de nickel et d'oxydes et les combustibles admis sont très variés avec possibilité ou non de reformage interne. Les plus gros efforts de recherche sont destinés à cette pile car il est envisageable d'avoir des densités de puissance élevées et des rendements proches de 60 % en génération d'électricité [9].

I.3.2.5 Les piles à acide phosphorique (PAFC) :

pour une température de fonctionnement proche de 200°C et une température de sortie avoisinant les 120°C, avec un rendement total de 80% (40% électrique, 40% thermique), cette pile est aussi destinée au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire. Notons que c'est la première pile à combustible à avoir été mise sur la marche. EDF en a installé une en démonstration à Chelles (modèle ONSI PC25C). L'inconvénient de ces piles réside dans le fait qu'elles ne savent pas oxyder autre chose que l'hydrogène et qu'elles sont très sensibles au monoxyde de carbone (CO) [9].

I.3.2.6 Les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC) :

Ce sont des piles à électrolyte polymère solide (pile à combustible à membrane d'échange de protons), parfois appelées SPFC (Solid Polymère Fuel Celle), fonctionnant dès la température ambiante, mais avec des conditions optimales autour de 90 °C pour des pressions de 1 à 4 atmosphères. Elles sont très sensibles à la présence de CO qui doit être limitée à quelques ppm. Leurs principaux avantages sont des temps de démarrage quasiment instantanés avec la température ambiante.

Et les La figure (I.4) et (I.5) représentent une classification et application des piles à combustible selon la puissance et le rendement électrique [9].

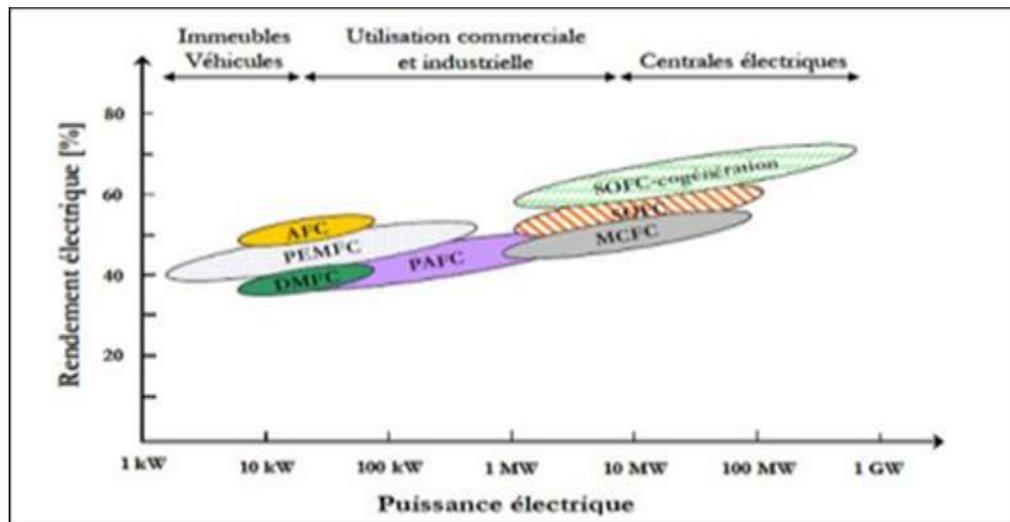


Figure I. 4. Classification des Piles à combustibles.

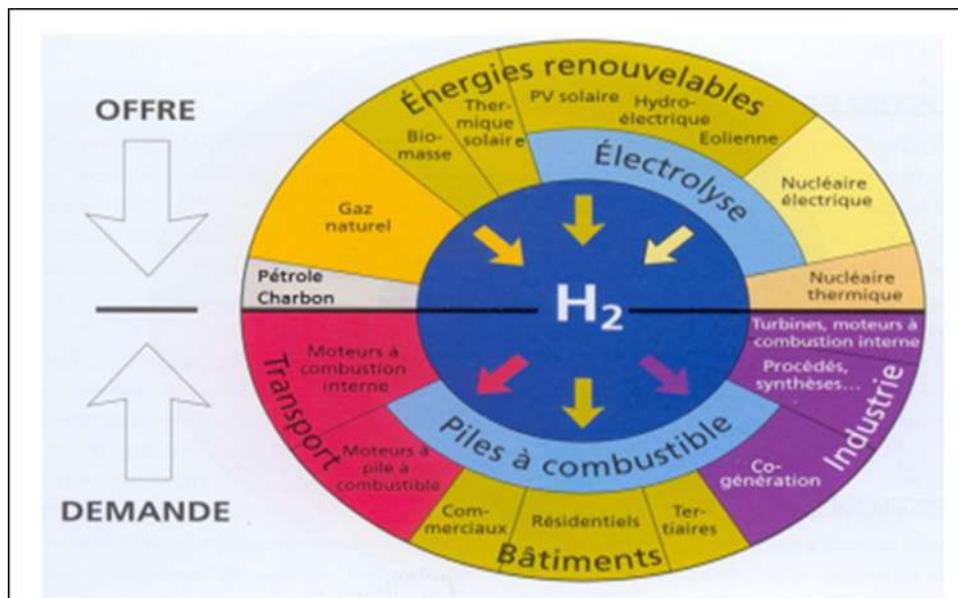


Figure I. 5. Applications des Piles à combustible.

I.3.3 La pile à combustible de type PEM:

Parmi toutes les familles existantes, la PàC de type PEM suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite, d'autant

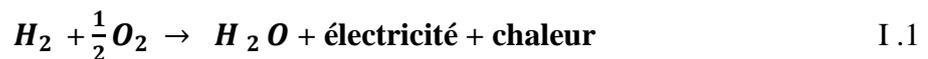
plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs des piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables.

Nous ne nous intéresserons qu'à la pile à combustible de type PEM, parce que cette technologie semble effectivement être la plus proche de la commercialisation dans le domaine du transport. En comparaison avec d'autres types des piles à combustibles, la pile de PEM a plusieurs caractéristiques attractives comme :

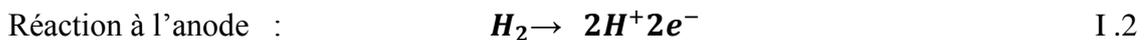
- Densité de puissance plus élevée.
- Fort rendement de transformation d'énergie chimique en énergie électrique.
- Basses températures, rapide et facile à démarrer.
- Polymère solide ce qui réduit les soucis liés à la construction, au transport et à la fiabilité.
- Plus compacte et légère : une meilleure densité de puissance volumique.
- Modulaire donc facile à installer [9].

I.3.4 Principe de fonctionnement :

Un générateur à PàC embarqué est un convertisseur d'énergie qui transforme l'énergie liée à la réaction chimique entre un combustible et un comburant (généralement de l'hydrogène et de l'air) en énergie électrique et en chaleur. La relation globale régissant le fonctionnement de la pile PEM est la suivante :



Cette équation peut être décomposée en deux sous-équations selon les réactions chimiques du pôle négatif (l'anode) et de l'électrode positive (la cathode), telle que :



Réaction à la cathode :



Le fonctionnement d'une PEMC s'effectue suivant le principe inverse à celui de l'électrolyse de l'eau [10].

Dans le cas de l'électrolyse, l'eau est dissociée en ses constituants élémentaires, l'hydrogène et l'oxygène. La pile, elle, effectue l'opération inverse et réunit ces deux molécules par un procédé électrochimique qui va produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur.

Une cellule de PàC de type PEM est constituée de deux électrodes (anode et cathode), Formées d'une zone réactionnelle et d'une couche de diffusion, séparées par un

Électrolyte, entourées d'éléments distribuant les réactifs. La cellule peut aussi intégrer un circuit caloporteur (eau ou air). Elle comporte également des joints qui assurent l'étanchéité entre compartiments anode / cathode / caloporteur et vis-à-vis de l'extérieur voir le La figure (I.6).

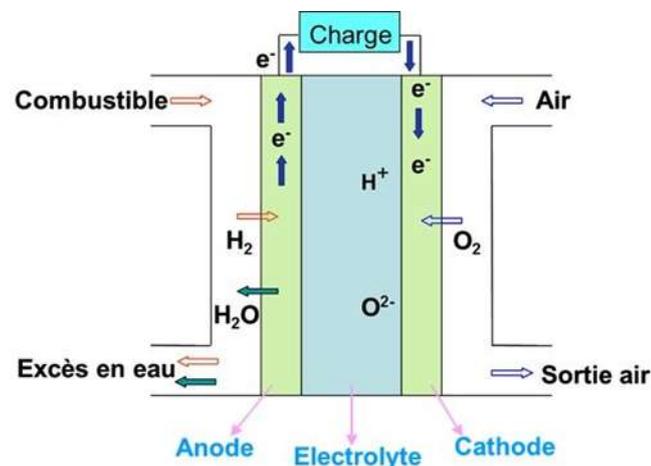


Figure I. 6. Principe de fonctionnement de la PEMFC.

Une PàC peut ainsi être considérée comme un type particulier de batterie avec des réactifs et des produits qui ne sont pas stockés dans l'élément électrochimique mais apportés et évacués en continu. La différence de potentiel disponible aux bornes d'une cellule de PàC étant faible (de l'ordre du Volt), pour atteindre des tensions utiles, des cellules sont placées en série électriquement et en parallèle vis-à-vis des fluides. L'empilement ainsi réalisé est couramment désigné par le terme anglais « stack ».

Comme présentée précédemment, une pile est composée de cellules, elles-mêmes composées de différents éléments. Une cellule de PEMFC est formée d'un électrolyte polymère, la membrane, qui sépare deux électrodes. Les électrodes sont le foyer de la réaction chimique. Du côté du pôle négatif de la pile, à l'anode, l'hydrogène se décompose en ions H^+ (protons) et en électrons e^- ; il s'agit d'une réaction d'oxydation. Les ions et les électrons ainsi créés vont emprunter deux chemins différents jusqu'à l'électrode positive : la cathode. La membrane joue en effet un rôle de barrière pour les électrons qui ne doivent pas passer à travers et sont forcés de circuler dans un circuit électrique extérieur. Ce déplacement d'électrons libres engendre le courant électrique créé par la PàC. Les ions traversent la membrane pour rejoindre directement la cathode où seront formées les molécules d'eau avec l'oxygène. L'ensemble électrodes + membrane est parfois appelé le cœur de pile ou AME (Assemblage Membrane Electrodes). Les électrodes sont alimentées en gaz par l'intermédiaire des couches de diffusion et des plaques de distributions des réactifs, généralement dotées de canaux La figure (I.7). Les gaz sont conditionnés en termes de pression, de température et d'hydrométrie afin d'assurer un bon fonctionnement de la pile [11].

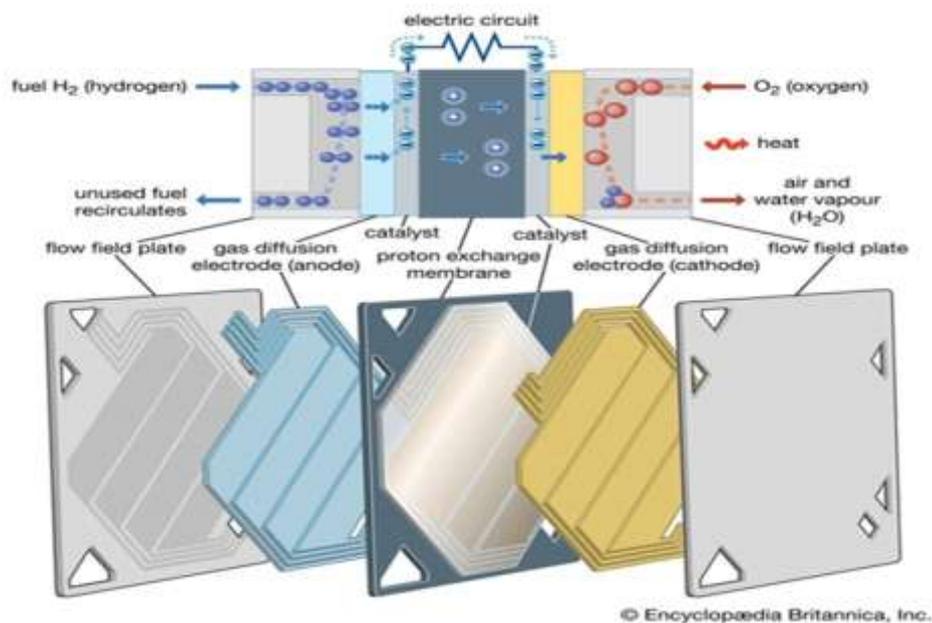


Figure I.7. Schéma d'une cellule de PEMFC d'un (stick) ou empilement de cellule.

I.3.5 Avantages et inconvénients des piles à combustibles :

a) Les Avantages :

Les PàC présentent divers avantages par rapport aux sources d'énergie classiques, telles que les moteurs à combustion interne ou les batteries. Bien que certaines caractéristiques des piles à combustible ne soient valables que pour certaines applications, la plupart des avantages présentés ci-dessous sont plus généraux [12] :

- ✓ Les piles à combustible peuvent réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre causées par la combustion des combustibles fossiles.
- ✓ Les piles à combustible ont un rendement plus élevé que les moteurs diesel ou à gaz Jusqu'à 60%.
- ✓ La plupart des piles à combustible fonctionnent silencieusement par rapport aux moteurs à combustion interne. Elles sont donc bien adaptées à une utilisation dans des bâtiments tels que les hôpitaux.
- ✓ Les piles à combustible à basse température ont une faible transmission de chaleur ce qui les rend idéales pour les applications militaires.
- ✓ Les piles à combustible à température élevée produisent une chaleur de haute qualité de sorte qu'elles sont bien adaptées aux applications de cogénération

b) Les inconvénients :

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement [12].

- ✓ Coût trop élevé de production et de maintenance: Le coût qui est très élevé cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.
- ✓ Le poids et le volume
- ✓ La durée de vie : La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application :
 - Automobile : quelques milliers d'heures
 - Stationnaire : au moins 40 000 heures

- ✓ Le manque d'infrastructures au niveau de l'approvisionnement en carburant (hydrogène, méthane). Ceci nécessite la mise en place de systèmes de production, de transport et de distribution. Cependant, la mise en place de tels systèmes ne peut se faire avant la Commercialisation de la PàC.

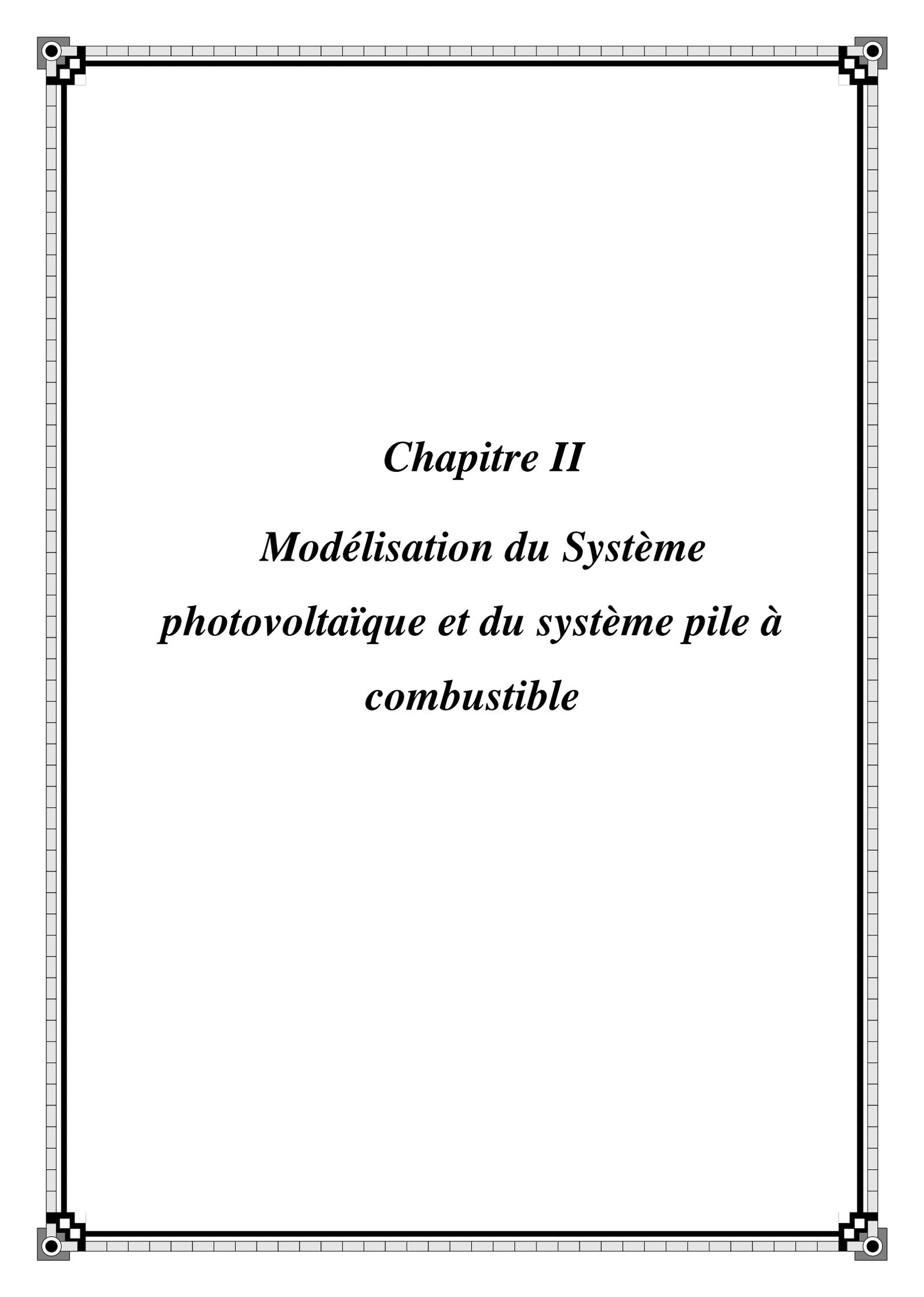
I.5. l'objectif :

L'objectif de cette mémoire et :

- ✓ Etude des caractéristiques électrique des deux sources renouvelable (photovoltaïque / pile à combustible).
- ✓ Modélisation les deux sources.et les convertisseurs (DC, AC).
- ✓ Simulation les deux systèmes (photovoltaïque/ pile à combustible).

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous nous sommes concentrés sur deux sources d'énergie, l'énergie solaire photovoltaïque et la pile à combustible principe de fonctionnement des deux types de sources électriques ainsi que leurs avantages et inconvénients. Sur lequel nous terminerons notre travail.



Chapitre II

Modélisation du Système

photovoltaïque et du système pile à

combustible

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'apporter la modélisation de chaque système (panneaux solaires, pile à combustible) et de fournir des fonctionnalités et des tarifs mathématiques importantes pour comprendre le mécanisme d'action de ces modèles. Cette modélisation consiste à convertir le comportement des systèmes physiques en équations afin de pouvoir comprendre son fonctionnement et faciliter son redimensionnement.

II.2. Modélisation d'une cellule PV :

Cette section donne une brève description de la théorie du modèle PV à l'étude; la nomenclature suivante est utilisée dans tout le document pour assurer l'uniformité.

Le modèle mono-diode est historiquement le premier modèle PV, développé initialement pour les cellules PV monocristallines en silicium, mais il reste à ce jour le plus couramment utilisé en raison de sa simplicité. D'autres modèles plus sophistiqués impliquent deux ou trois diodes pour une précision accrue à faible irradiance, et des sources de courant dépendant parfois de la tension supplémentaires pour tenir compte de l'opération de panne ou du phénomène de recombinaison dans certaines technologies à film mince.

Le présent document se limite au modèle à diode unique, car il s'agit du modèle PV sur lequel reposent la majorité des méthodes d'extraction de paramètres non itératives, et évalue son efficacité sur toutes les technologies PV commerciales, le silicium monocristallin/multi-cristallin et le film mince.

Ce modèle se compose d'un circuit équivalent illustré à la figure (II.1) et d'un ensemble de cinq paramètres :

$[I_{ph}, I_s, R_s, R_{sh}]$ [13].

- le courant photo I_{ph} (ou I_o ou I_{pv})
- le courant de saturation des diodes est I_s (ou I_o ou I_{sat})
- la résistance de la série R_s
- la résistance de dérivation R_{sh} (ou R_p).

Son modèle de circuit équivalent est principalement utilisé pour surveiller et évaluer la performance PV et explorer différentes techniques MPPT.

Le circuit équivalent du modèle général est composé d'une source de photo courant, d'une diode, d'une résistance parallèle exprimant le courant de fuite et d'une résistance de série décrivant la résistance interne au courant.

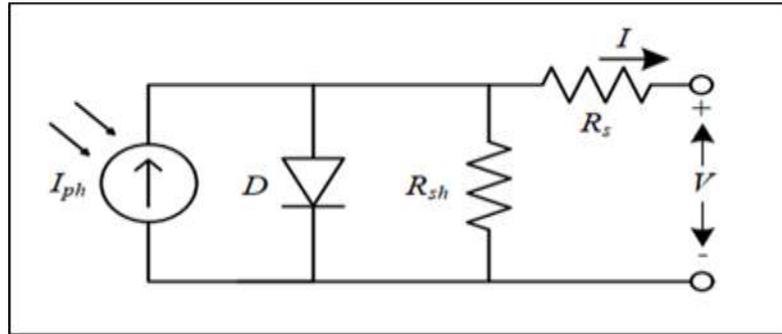


Figure II. 1. Circuit équivalent d'une cellule PV.

L'équation caractéristique d'une cellule PV est donnée comme suit :

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left[\frac{q(V+IR_S)}{KTA} \right] - 1 \right) - \frac{(V+IR_S)}{R_{SH}} \quad \text{II. 1}$$

Où I_{PH} est un courant ou une photo courant généré par la lumière, I_S est la saturation cellulaire du courant sombre, q ($= 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) est la charge électronique, k ($= 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) est la constante de Boltzmann, T est la température de fonctionnement de la cellule, A est le facteur idéal R_{SH} est la résistance de shunt, et R_S est la résistance de série. La photo courant dépend principalement de l'insolation solaire et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est donnée comme :

$$I_{PH} = \lambda (I_{sc} + K_1(T - T_r)) \quad \text{II.2}$$

Où I_{sc} est le courant de court-circuit de la cellule à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et 1 kW/m^2 K_1 est le coefficient de température de courant de court-circuit de la cellule, T_r est la température de référence de la cellule, et λ est l'insolation solaire en kW/m^2 . D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température de la cellule, qui est décrite comme :

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[qE_G \frac{\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)}{KA} \right] \quad \text{II. 3}$$

Où I_{RS} est le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire, E_G est l'énergie de bande-écart du semi-conducteur utilisé dans la cellule. Le facteur A idéal dépend de la technologie PV Le courant de saturation inverse à la température de référence peut être obtenu approximativement comme suit : [14]

$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{\exp \left[\frac{qV_{oc}}{N_s kAT} \right] - 1} \quad \text{II. 4}$$

II.3. Caractéristiques d'un panneau solaire :

- Puissance crête P_c : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (température 25° C et un éclairement de 1000 W/m²).
- Caractéristique de $I(V)$: courbe représentant le courant débité en fonction de la tension au borne du module.
- Tension à vide (V_{co}) : tension à vide en l'absence de courant.
- Courant de court-circuit (I_{cc}) : courant débité en court-circuit.
- Caractéristique de $P(V)$: courbe représentant la puissance débité en fonction de la tension au borne du module On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale située sur le coude de la caractéristique (voir le figure II.2) [15].

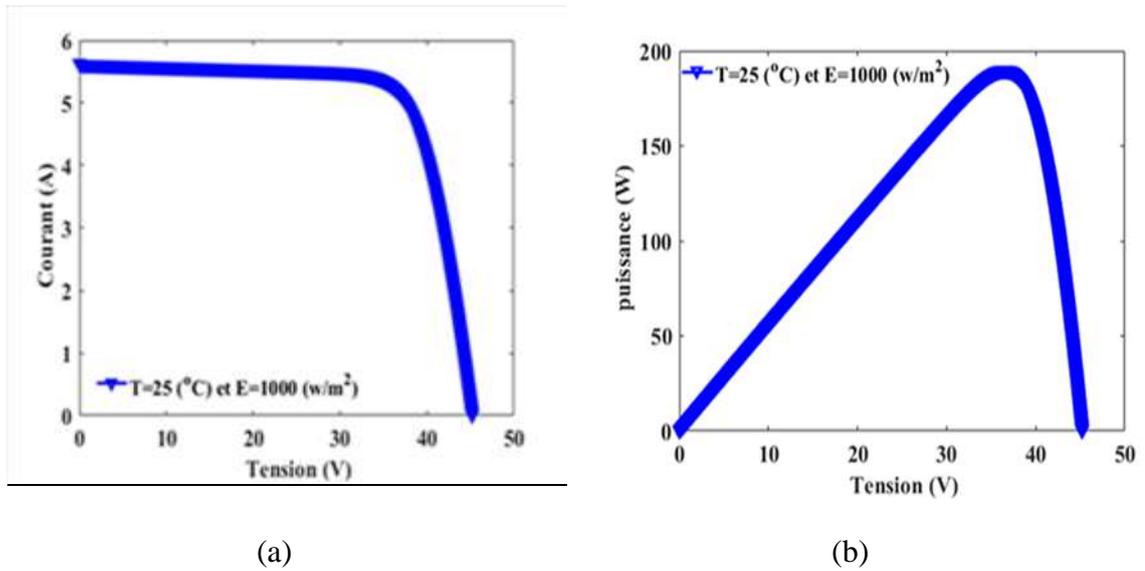
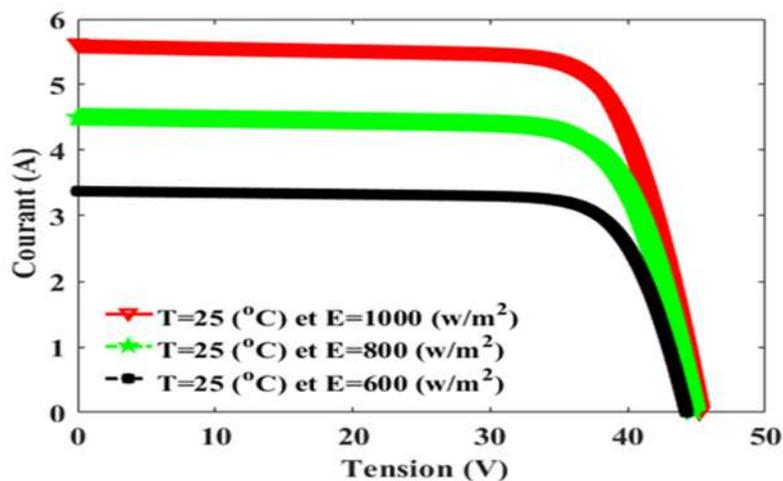


Figure II. 2. (a) caractéristiques courant-tension du PV (b) caractéristiques puissance - tension du PV.

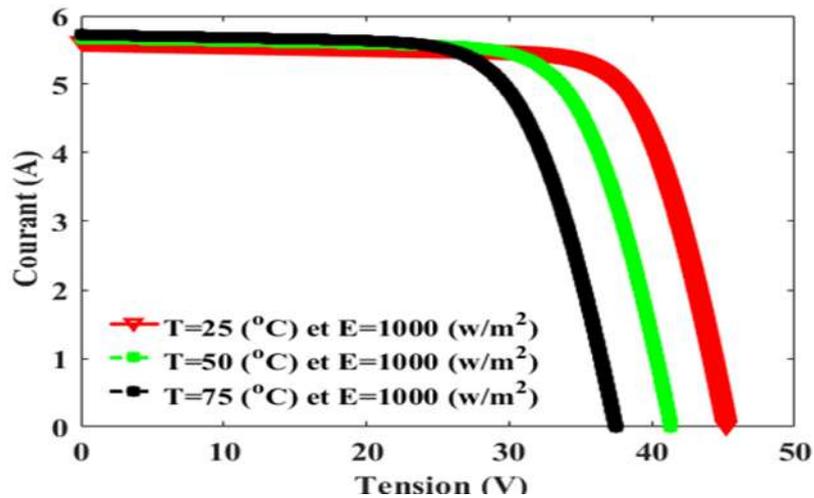
II.4. L'influence de l'éclairement sur le fonctionnement du panneau PV : ⁱ

Les figures (II.3) montrent respectivement les résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) du panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de L'éclairement et de la température.

Les paramètres caractérisant le panneau photovoltaïque sont donnés dans chapitre III.



(a)



(b)

Figure II. 3. (a) influence de l'éclairement (b) influence de température.

Nous observons que l'éclairement affecte beaucoup plus le courant I_{pv} du générateur que la tension V_{pv} . La température quant à elle, influe beaucoup plus sur la tension que sur le courant. L'éclairement augmente la puissance fournie par le module, alors que la température l'abaisse.

II.5. Rendement de GPV :

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement incident:

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{B \cdot A} \quad \text{II.5}$$

Pour le silicium monocristallin, ce rendement varie typiquement de 8% à 13%, et de 7% à 11% pour les cellules en silicium poly cristallin et 4% à 9% pour les cellules en silicium amorphe [16].

II.6. Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale :

Une commande MPPT est une commande qui permet de suivre le point de puissance maximale d'un module photovoltaïque en faisant fonctionner le module PV dans son point de fonctionnement optimal, quelles que soient les conditions atmosphériques (température et ensoleillement global) et la valeur de la charge [17].

La Figure (II.4) illustre l'évolution du point de puissance maximale de la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ suite à des variations au niveau de la charge ou au niveau de la puissance d'irradiation solaire. Cela éloigne le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque du point de puissance maximale (PPM). Le rôle de la commande MPPT est donc, d'agir sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC afin de rejoindre le nouveau PPM. Les commandes MPPT sont basées sur un algorithme de contrôle adaptatif permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale (PPM). Le principe de la commande Figure (II.5) consiste, photovoltaïque I_{pv} et sa tension V_{pv} à un instant t_i pour en déduire la puissance, la stocker en mémoire puis la comparer à une puissance calculée à t_{i-1} . Cette comparaison permet d'évaluer

La variation de la puissance par rapport à α ($\frac{\Delta P}{\Delta \alpha} = \frac{P_i - P_{i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}}$) le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, et ainsi en déduire l'action nécessaire sur α pour obtenir une variation positive de la puissance sur l'itération suivante.

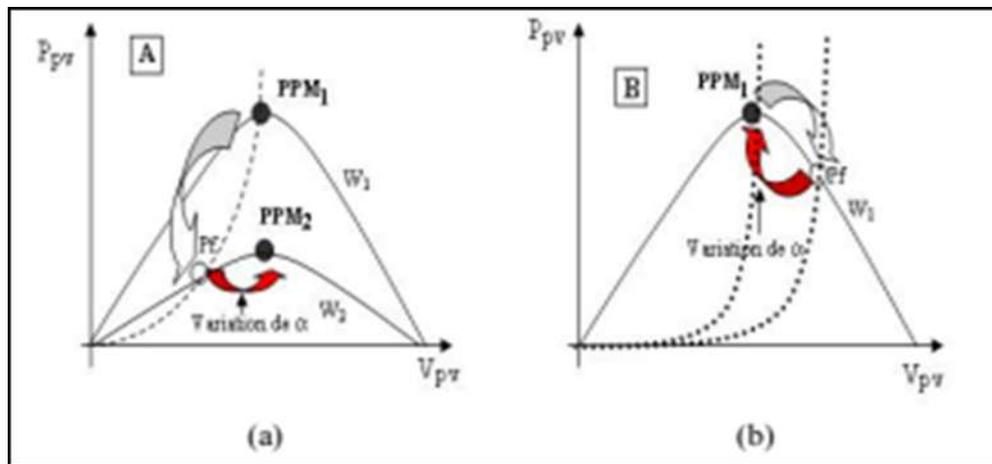


Figure II. 4. Variation des points de puissance maximale en fonction de l'ensoleillement (a) et de la charge (b).

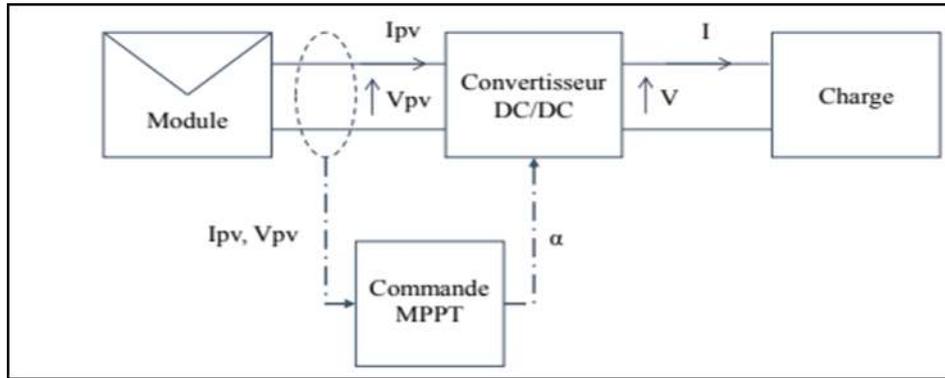


Figure II. 5. Principe de la commande MPPT.

II.7. Méthode de Perturbation et Observation (P&O) :

Comme le met en évidence l'algorithme présenté dans la Figure (II.6) la commande perturbation et observation (P&O) consiste à introduire une perturbation en faisant varier la

V_{pv} par une valeur constante ΔV appelée valeur d'incrément ou valeur de perturbation [18].

Et à observer le comportement de la variation de la puissance P_{pv} qui en découle. A partir de l'évaluation de la variation de la puissance le point de fonctionnement peut être situé par rapport au point de puissance maximale Figure (II.7).

La commande P&O est l'une des commandes les plus traitées dans les travaux de recherche [18], [17], [19] et l'une des plus répandues dans l'industrie. En effet, elle est facile à implémenter expérimentalement et elle n'est pas coûteuse en mémoire et en

Néanmoins, elle est aussi l'une des commandes les moins précises car elle génère de fortes oscillations autour du point de puissance maximale en raison de la méthode mise en œuvre pour poursuivre en permanence le PPM. En effet, la rapidité et la précision de cette commande dépendent du choix de la valeur de perturbation ΔV .

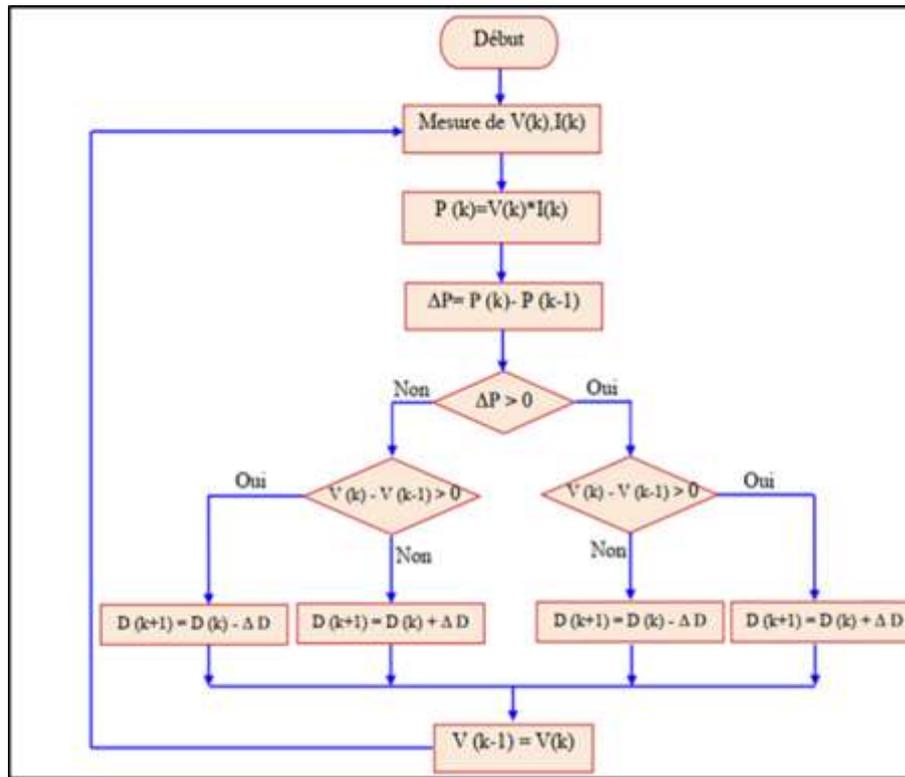


Figure II. 6. Algorithme de la commande P&Q.

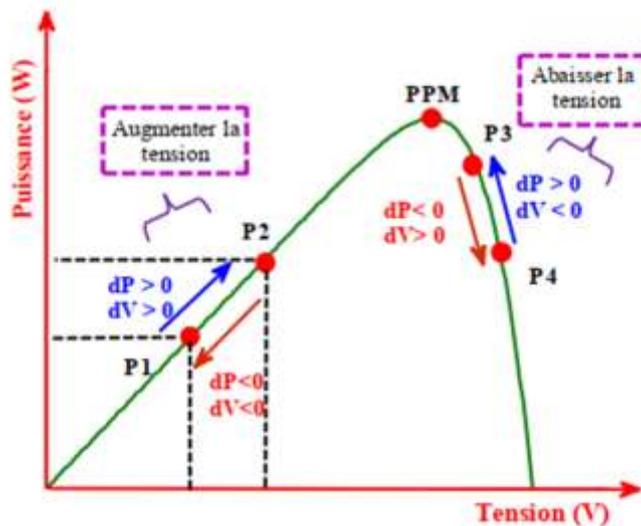


Figure II. 7. La variation de la puissance le point de fonctionnement par influence de MPPT.

II .8. Convertisseurs DC/DC :

Le hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Le hacheur continue - continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) voir le figure (II.8). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, où pour alimenter une charge continue Il se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ont un bon rendement, ils ne consomment aucune puissance active [20].

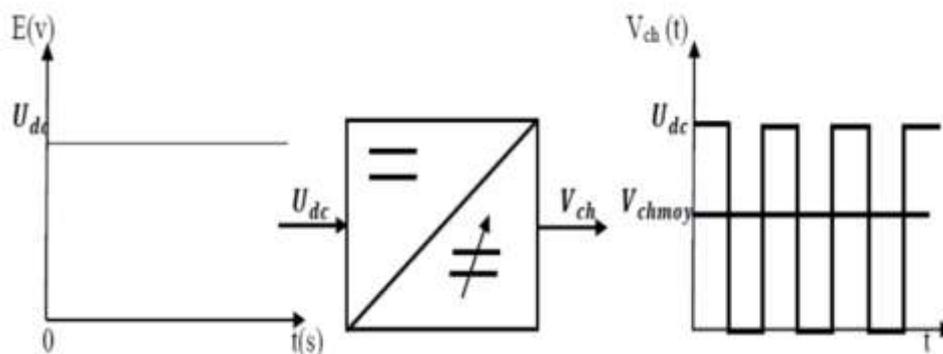


Figure II. 8. Principe de base d'un hacheur.

II .9. Différents types des hacheurs :

On distingue plusieurs types des hacheurs [21] :

- Hacheur abaisseur « Buck converter »
- Hacheur élévateur « Boost converter »
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost converter »

Dans notre étude, nous nous occuperons d'un type Hacheur élévateur « Boost converter »

II.10. Convertisseur Boost :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Il est composé essentiellement d'un interrupteur **K** (exemple : transistor) et d'une diode **D**. L'interrupteur **K** est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de Période de découpage fixe **T_d** Et de rapport cyclique variable **α**. Durant chaque période, **K** est fermé de l'instant 0 à **αT_d** et ouvert de **αT_d** à **T_d**. Selon la présence et l'absence du courant dans l'inductance on peut répartir deux modes de Fonctionnement, conduction discontinue ou conduction continue. On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure (II.9) présente le schéma de principe de ce convertisseur, et la figure (II.10) donne les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des Courants (à gauche) et tensions (à droite) [22].

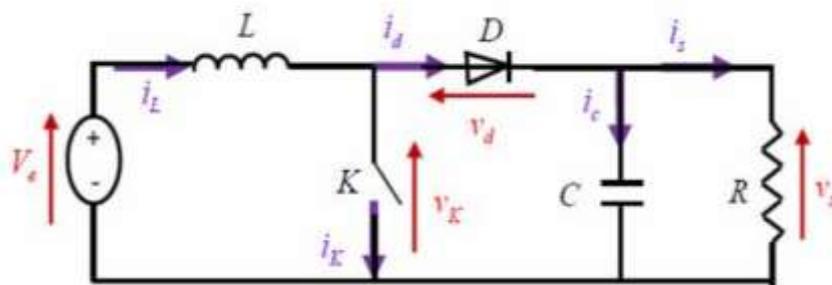


Figure II. 9. Schéma de base d'un convertisseur Boost.

La figure (II.11) présente l'allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur. **K** C'est un signal rectangulaire de fréquence f dont la durée est à l'état haut (durée de conduction de l'interrupteur **K**, notée **T_{on}**) est ajustée par le paramètre **α**. Ce paramètre, appelé rapport cyclique, est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur **K** et la période de découpage **T** de celui-ci : [21]

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T}, \text{ On } \alpha : T = T_{on} + T_{off} \quad \text{II. 6}$$

Ou T_{off} correspond à la durée de blocage de l'interrupteur **K**

La durée de conduction T_{on} est comprise entre 0 et T donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur en fonction de α et T :

Durée de conduction : $T_{on} = \alpha.T$

Durée de blocage : $T_{off} = (1 - \alpha)T$

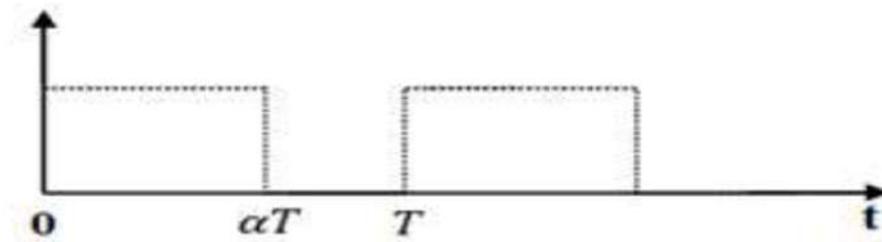


Figure II. 10. Signal de commande de l'interrupteur K.

II .11. Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie photovoltaïque :

Dans ce cas, la tension d'entrée du hacheur Boost représente la tension de GPV

Voir la figure (II.11)

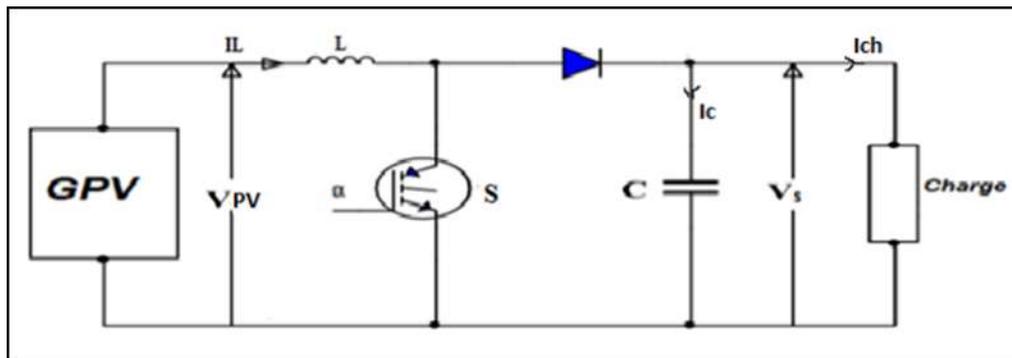


Figure II.11. Schéma Convertisseurs parallèle (Boost) de GPV.

On a : les équations électriques du hacheur Boost sont :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{pv} - (1 - S)V_{ch} \tag{II. 7}$$

$$C \frac{dv_{ch}}{dt} = (1 - s)I_l + I_{ch} \quad \text{II. 8}$$

II .12. Système de pile à combustible :

La figure (II.12) montré le modèle électrique de pile à combustible PEM

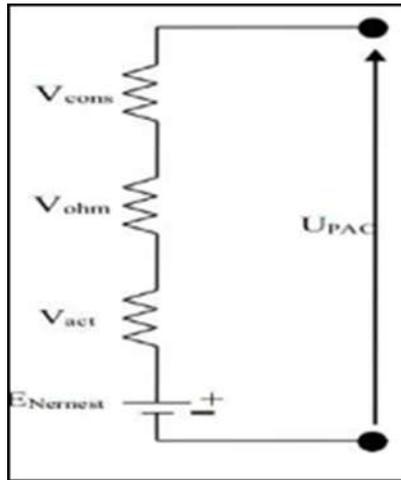


Figure II. 12. Le schéma équivalent d’une PEMFC.

$$U_{pac} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad \text{II. 9}$$

$$E_{nerst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times [\ln(P_{H2}^*) - \frac{1}{2} \ln(P_{O2}^*)] \quad \text{II.10}$$

II .12.1. Pertes d’activation :

Les pertes sont dues au démarrage des réactions chimiques à l’anode et à la cathode. Une partie de l’énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d’oxydation de l’oxygène et l’hydrogène à l’anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l’oxygène à la cathode. Il s’ensuit que les pertes d’activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La réaction entre les pertes d’activation et la densité de courant est donnée par l’équation de Tafel :

$$V_{act} = A * \log\left(\frac{I_{fc} - I_n}{I_0}\right) \quad \text{II. 11}$$

On :

I_{fc} : est le courant délivré par la pile à combustible,

I_0 : Le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte.

I_n : Le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte

A: La pente de la droite de tafel

II .12.2. Pertes ohmique :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_M(I_{fc} - I_n) \quad \text{II.12}$$

Où

R_M : est la résistance totale de la pile à combustible.

II .12.3. Pertes de concentration :

La consommation des gaz .appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivrée et des caractéristiques des circuits de gaz.

Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite I_{LIM} , pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéros, et d'une constante **B** appelée constante de transport ou de transfert de masse :

$$V_{ohm} = B * \log\left(1 - \frac{I_{FC} - I_N}{I_{LIM}}\right) \quad \text{II .13}$$

II.13. Modes de fonctionnement :

Les performances de la PàC sont fortement liées aux paramètres de fonctionnement comme la température, la pression, l'humidité, la composition des gaz et la densité de courant. Ainsi, la tension de sortie de la cellule dépend fortement des conditions d'utilisation et du mode de fonctionnement. Il convient ici de distinguer deux modes de fonctionnement de la PàC : le fonctionnement en régime statique et celui en régime dynamique.

II.13.1. Fonctionnement en régime statique :

Le régime statique correspond à une demande de puissance constante aux bornes de la pile avec des paramètres de fonctionnement fixes (température, humidité et pression). En d'autres termes, lorsque la pile alimente une charge constante ou dont la dynamique de variation est lente et lorsque les paramètres de fonctionnement sont maintenus constants, on parle de points de fonctionnement. Dans ce cas, nous avons à chaque point de fonctionnement un potentiel électrochimique, un courant et des pertes électrochimiques constants. En effet, en vertu de l'équation (II.9), il est clair que E est constant pour T , P_{H_2} , P_{O_2} et P_{H_2O} constantes. En ce qui concerne le courant i , il demeure aussi constant car, la demande de puissance représentée par la charge électrique est constante pour chaque point de fonctionnement. A son tour, la tension de sortie V_s est égale au potentiel E moins la somme des pertes électrochimiques. Son évolution en fonction du courant est décrite par la courbe de polarisation qui représente le fonctionnement en régime statique de la pile. La figure (II.13) représente les allures de la courbe de polarisation, du rendement électrique et de la puissance en fonction de la densité de courant.

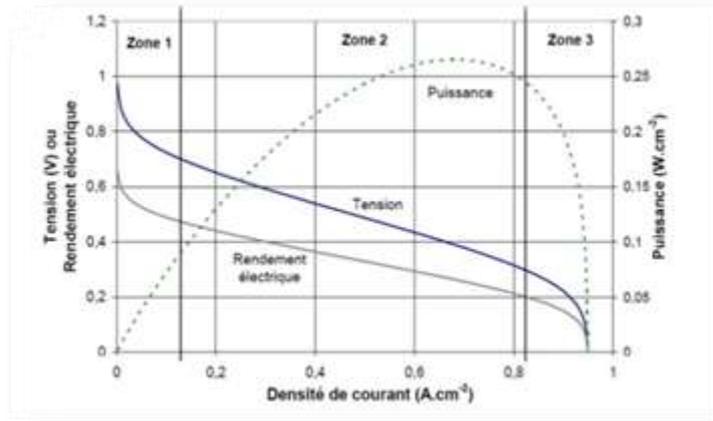


Figure II.13. Évolution de la tension de sortie, du rendement électrique et de la puissance en régime statique.

- La première région représente la surtension d'activation anodique et cathodique, le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant.
- La deuxième région caractérise le comportement ohmique de la cellule, et c'est la région la plus couramment utilisée en fonctionnement car elle est linéaire et efficace sur une large plage de variations de densité de courant.
- Le troisième domaine est lié à la diffusion et aux limitations des nuages, à de faibles densités de courant, la polarisation d'activation domine. Perte ohmique, directe est proportionnelle à la densité de courant et devient alors dominante sur une large gamme de densités de courant. Enfin, aux fortes densités de courant, les pertes dues au transport du gaz deviennent dominantes.

Ainsi, la tension efficace de sortie aux bornes de la cellule sera :

$$V_s = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad \text{II.14}$$

Il convient ici de mentionner que la puissance maximale est obtenue pour le courant maximal que la pile peut fournir avant l'apparition des pertes de concentrations (Voir figure II.13).

II.13.2 Fonctionnement en régime dynamique :

Le fonctionnement en régime dynamique de la pile correspond soit à une variation de la demande de puissance à ses bornes soit à une variation de l'un des paramètres de fonctionnement (température, pressions, humidité). Dans ce cas, on voit l'apparition d'autres phénomènes comme la capacité de double couche et la capacité géométrique. Le phénomène de double couche s'explique par le fait que pour tout point de fonctionnement de la pile, nous avons des électrons qui s'accumulent du côté des électrodes et des protons qui s'accumulent du côté de l'électrolyte. Ces charges électriques ne sont pas séparées par un isolant ; il s'agit simplement d'une interface entre ces charges qui sont de natures différentes. Il existe donc à cette interface une double couche électrochimique appelée aussi double couche de Helmholtz, qui se comporte en première approximation comme un condensateur. Ce phénomène est renforcé par le caractère poreux de l'électrode qui accroît la surface de cette interface. Le courant créé par ce phénomène est proportionnel à la variation de la tension V_e entre l'électrode et l'électrolyte :

$$i = C_{dc} \frac{dv_e}{dt} \quad \text{II.15}$$

C_{dc} : est la capacité de double couche

Le deuxième phénomène qui apparaît en régime dynamique est l'effet capacitif qui se crée entre l'anode et la cathode. Il est représenté par une capacité géométrique notée C_{geom} . En effet, il est bien connu que deux électrodes séparées par un isolant électrique produisent entre eux un effet capacitif. Dans le cas de la PàC, l'anode et la cathode constituent deux électrodes (conducteurs électriques) séparées par l'électrolyte qui est un isolant électrique : il empêche le transfert des électrons et permet le passage des protons. L'effet de la capacité géométrique apparaît lors du changement de la tension de sortie. Dans ce cas nous avons :

$$i = C_{geom} \frac{dv_s}{dt} \quad \text{II.16}$$

En ce qui concerne les pertes électrochimiques, il convient de noter que, contrairement au cas du régime statique, les résistances d'activation, ohmique et de concentration ne sont

plus constantes dans le cas du fonctionnement en régime dynamique. Dans ce cas, la résistance de la membrane R_m varie en fonction de sa température T et de son taux d'humidification λ . Compte tenu que pour les piles du type PEM le matériau utilisé comme membrane est le Nafion (un polymère échangeur d'ions entièrement fluorée et contenant des groupements d'acide sulfonique). L'expression de la résistance électrique du Nafion est donnée par la relation suivante:

Le Nafion[®] est une résine échangeuse d'ions entièrement fluorée, formée d'une colonne vertébrale ne contenant que des groupes CFn sur laquelle sont branchés des groupements d'acide sulfonique :

$$R_m = \frac{L_m}{A(a\lambda - b)\exp [c(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})]} \tag{II.17}$$

Où L_m est l'épaisseur de la membrane, A sa surface et a, b, c des constants (a = 5139 $\times 10^{-6}$, b = 326 $\times 10^{-5}$ et c = 1268) [12].

II .14 Modèle du convertisseur Boost de la pile à combustible :

Les convertisseurs DC/DC éleveurs non isolés pour les systèmes PàC ont souvent une architecture à base de la topologie du convertisseur éleveur conventionnel appelé hacheur

Conventionnel ou traditionnel (BC : Boost Convertir en anglais). Sa structure de base est présentée sur le schéma électrique de la Figure (II.14) ci-dessous :

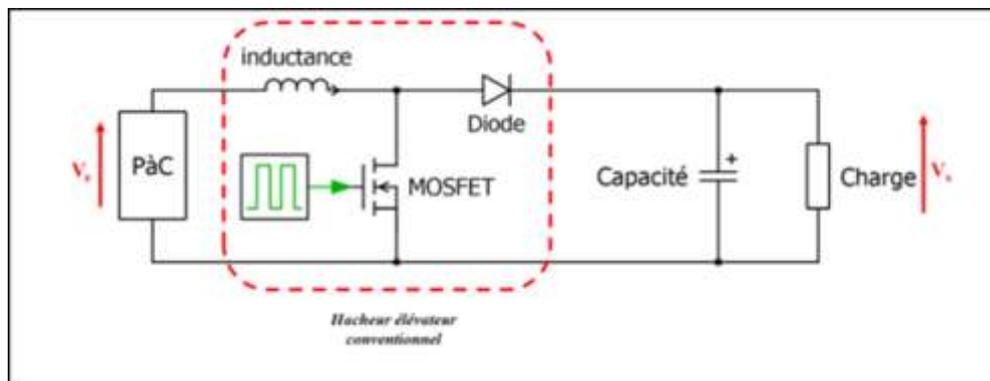


Figure II. 14. Schéma Convertisseurs parallèle (Boost) de PàC.

Il s'agit d'un convertisseur simple, à faible coût (qui ne demande qu'un seul interrupteur de puissance, une diode et une inductance) et il est caractérisé par un contrôle non complexe pour piloter l'amorçage et le blocage de son interrupteur de puissance (par exemple MOSFET) [23].

Les équations électriques du hacheur Boost sont :

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{pile} - (1 - S)V_s \quad \text{II .18}$$

$$C \frac{dv_s}{dt} = (1 - s)I_l + I_s \quad \text{II .19}$$

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

$$L = \frac{V_s}{4 * f * \Delta I_l} \quad \text{II .20}$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 * f * \Delta V_s} \quad \text{II .21}$$

II .15. Convertisseur DC-AC (Onduleur triphasé) :

Le convertisseur DC-AC transforme la tension continue issue de la source en une tension alternative triphasée voir le figure (II.15)

La forte évolution de l'onduleur de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandés, robustes et rapides, et, d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de "Modulation de Largeur d'Impulsions" (MLI). Ces dernières s'appuient sur les performances en termes de fréquence de découpage des semi-conducteurs [24].

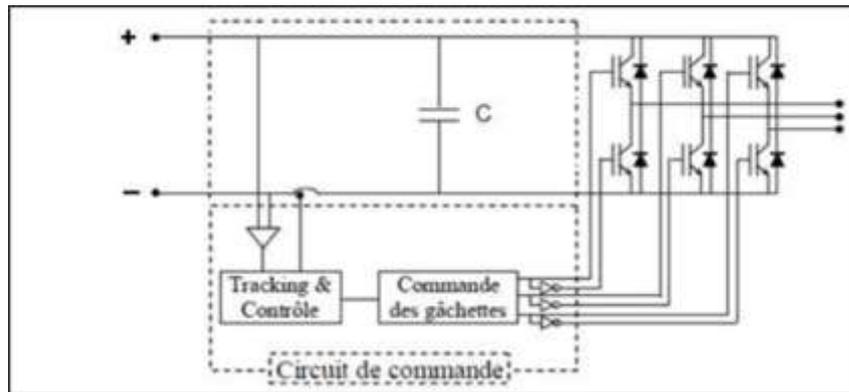


Figure II. 15. Onduleur triphasé.

II.16. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté du modèle de chaque partie du deux systèmes (panneaux solaires et piles à combustible) et le modèle de convertisseur Panneaux solaires avec un maximum de points de suivi et d'algorithme Ainsi, le modèle de hacheur boost de pile à combustible augmenté et le modèle d'onduleur sont triphasé. Sera consacré au système global (les deux systèmes et une charge) et discuter des résultats obtenus. et utilisée pour stimuler la croissance. Cela nous a permis d'inspirer quelques idées utiles pour contrôler l'énergie Modélisation des composantes du système globale qui sera Sujet du chapitre suivant.

Chapitre III

Simulations les deux systèmes

III.1. Introduction :

Après avoir modélisé tous les éléments du système étudié au chapitre I et II. Dans ce chapitre, nous allons simuler avec le programme MATLAB le system globale.

La figure (III.1) montré le système global (photovoltaïque /pile à combustible). Le système proposé est composé d'un générateur photovoltaïque (GPV) de 20kW et une pile à combustible presque 22 kW. Un convertisseur continu-continu est utilisé pour contrôler chacune des deux sources. Les convertisseurs DC-DC individuels sont à leur tour connectés à un seul onduleur de source de tension MLI, qui maintient la sortie de la tension.

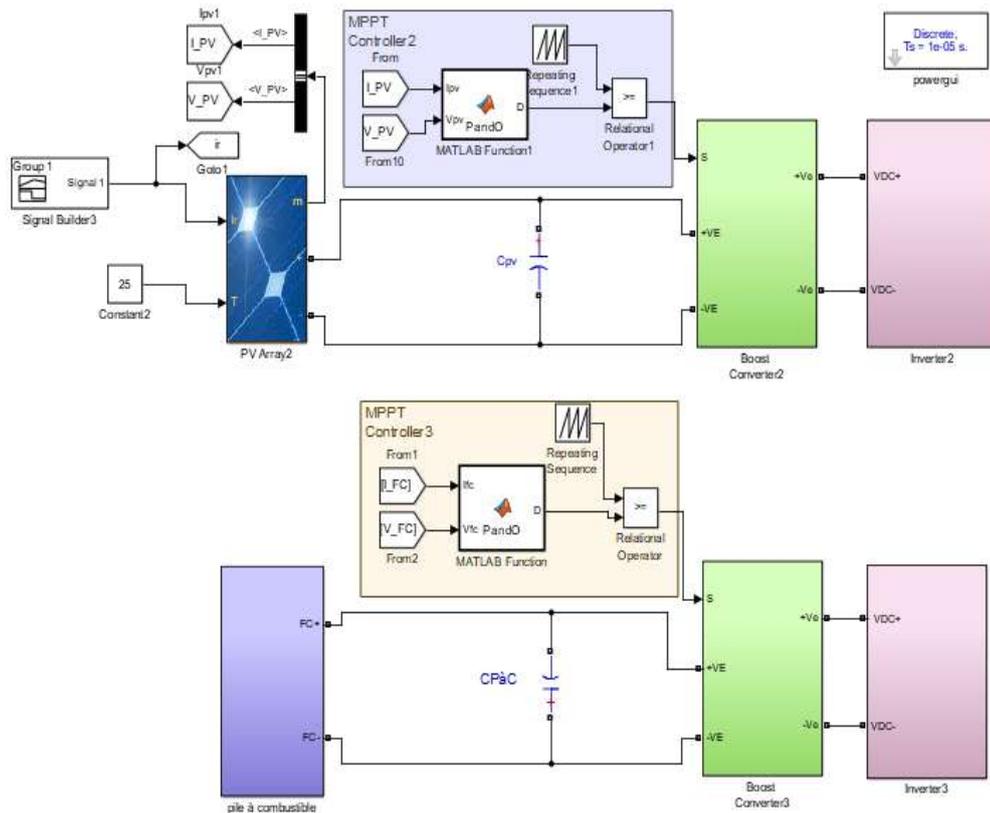


Figure III. 1. Schéma d'un system global.

III.2. Générateur photovoltaïque:

Notre générateur est constitué de 105 modules PV, divisés comme suit : 15 modules connectés en parallèle et 7 modules connectés en série, chaque module est caractérisé par une tension, un courant et une puissance maximale, résumé dans le tableau (III.1).

Tableau III. 1. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Nombre de cellules	72 cellules monocristallines
$V_{oc}(V)$	45.2 V
$I_{oc}(A)$	5.62 A
$V_{mp}(V)$	36.5 V
$I_{mp}(A)$	5.2 A
P(W)	190 W

III.2.1. Allure de l'éclairement (G) :

Dans notre travail, nous allons supposer que la température constante à 25 °C et l'éclairement varie à long de la journée, La Figure (III.2) montre la courbe de variation de l'éclairement durant une journée.

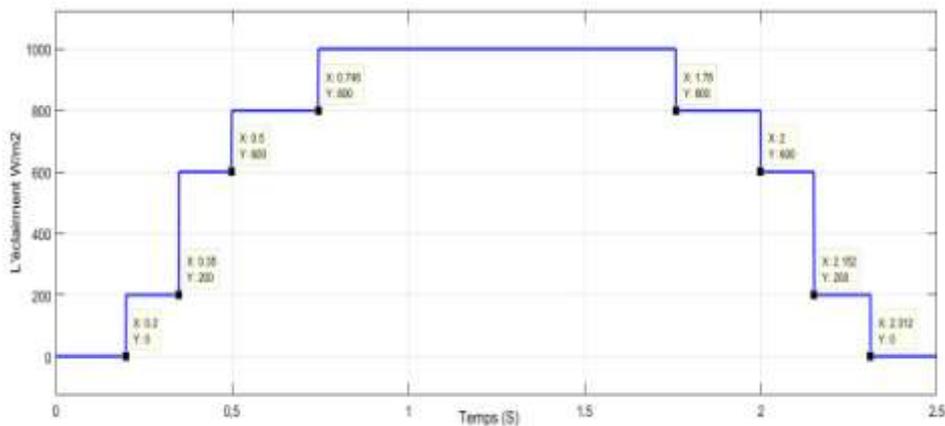


Figure III. 2. Allure de l'éclairement.

On a programmé une courbe d'éclairement dans Matlab/Simulink reponds ou réalité, et donne le changement instantané et aléatoire de conditions climatique comme présenté dans la figure (III.3).

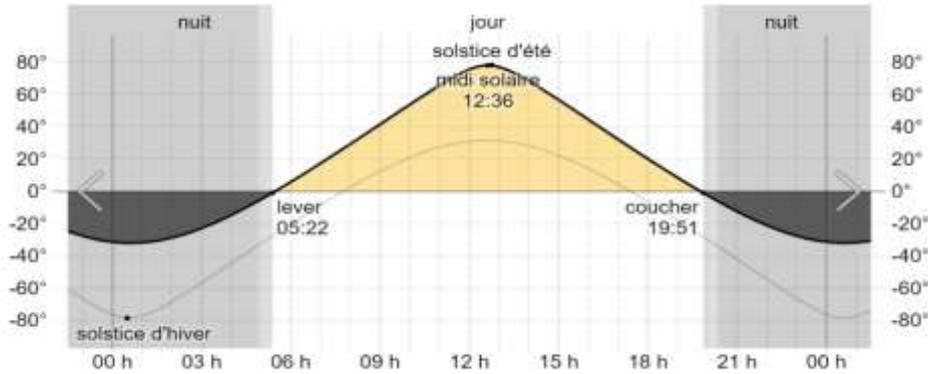


Figure III. 3. Élévation solaire le 12 juin 2022 à Biskra [25].

Les figures (III.2) et (III.3) représentent l'uniformité entre les heures de la journée et le temps de simulations en le tableau (III.2).

Tableau III. 2. Temps de simulation par les heures (cas l'éclairement).

Temps de Simulation	Les heures de la journée
[0s-0.2s]	[00h – 5.22h]
[0.2s- 0.5s]	[5.22h – 9h]
[0.5s- 0.746s]	[9h – 12.36]
[0.746s- 1.76s]	[12.36h – 15h]
[1.76s-2s]	[15h – 16h]
[2s- 2.152s]	[16h- 18h]
[2.152s-2.5s]	[18h – 19.51]

Les figures (III.4, III.5, III.6) montrés les variations de courant I_{GPV} , la tension V_{GPV} , et la puissance P_{GPV} .

Les courbes suivent les changements de l'éclairement et convergent bien, et la puissance de GPV atteint sa valeur maximale sous les conditions idéales à un temps de réponse égal [0.746s.-1.76s].

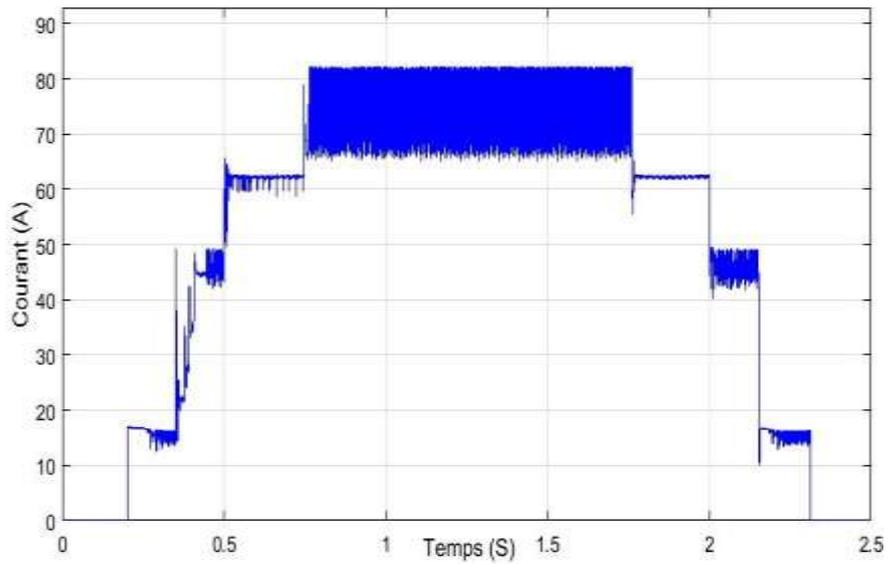


Figure III. 4. Variation du le courant de GPV.

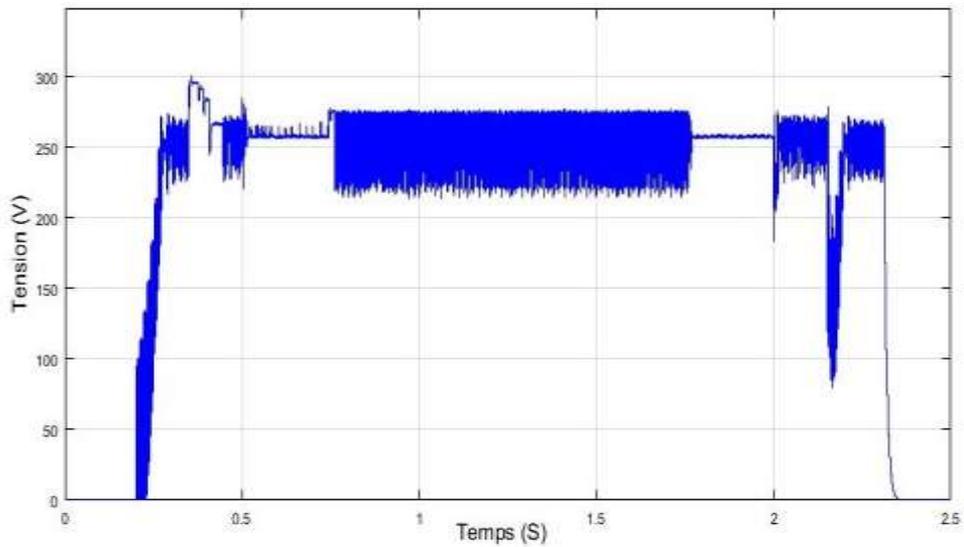


Figure III. 5. Variation de la tension de GPV.

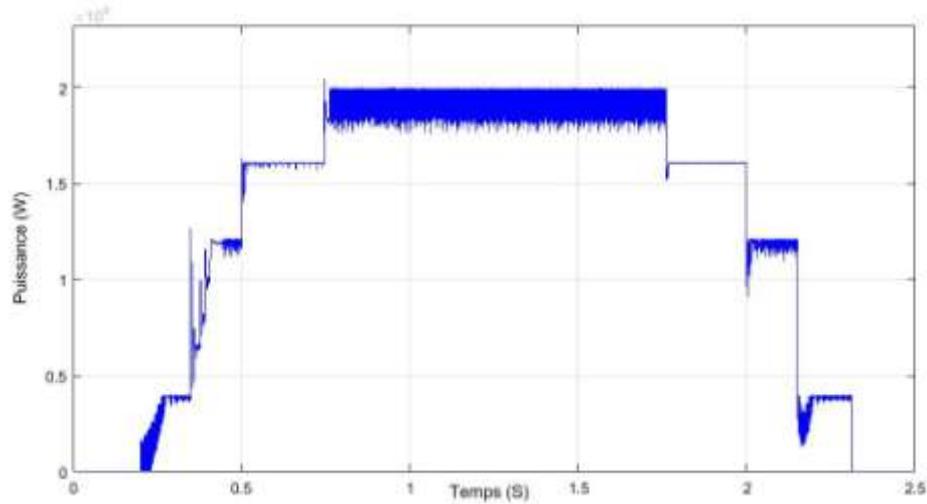


Figure III. 6. Variation de la puissance de GPV.

Le tableau (III.3) représente les valeurs de I_{GPV} , V_{GPV} et P_{GPV} à chaque point où l'éclairement change les valeurs de trois colonnes continuent d'augmenter de 0 à pic et après diminuent progressivement à 0.

Tableau III. 3. Les valeurs de I_{GPV} , V_{GPV} et P_{GPV} .

Temps de simulation	l'éclairement	$I_{GPV}(A)$	$V_{GPV}(V)$	$P_{GPV}(KW)$
[0 – 0.2]	0 W/m^2	0	0	0
[0.2 – 0.35]	200 W/m^2	16	250	3.9
[0.35 – 0.5]	600 W/m^2	48	[260-300]	12
[0.5 – 0.746]	800 W/m^2	62	258	16
[0.746 – 1.76]	1000 W/m^2	82	250	20
[1.76 – 2]	800 W/m^2	62	258	16
[2 – 2.152]	600 W/m^2	49	260	12
[2.152 – 2.312]	400 W/m^2	16	250	3.9
[2.312 – 2.5]	0 W/m^2	0	0	0

III .2.2 Convertisseur élévateur (Boost) de GPV :

La figure (III.7) représenté le schéma électrique de Convertisseur élévateur (Boost) de GPV.

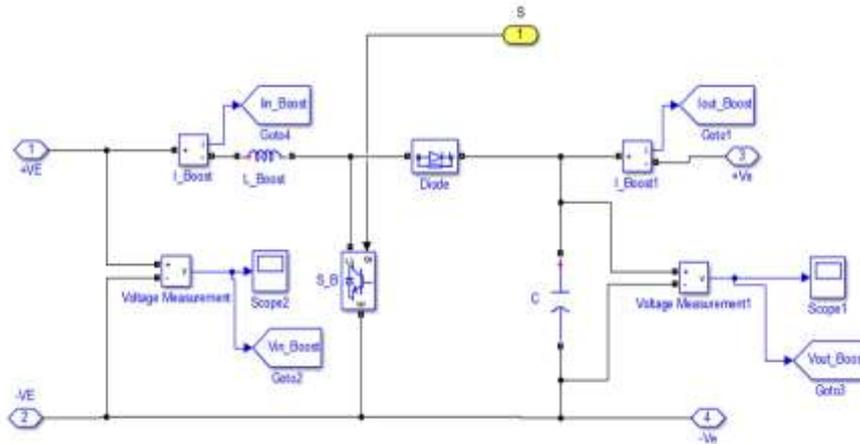


Figure III. 7. Convertisseur (Boost) de GPV.

La sortie de MPPT donne le rapport cyclique à présenter dans la figure (III.8). On peut conclure T_{on} et T est donnée par la relation bien montrée.

Gain de tensions correctement et le convertisseur Boost, et elle amplifie la tension plus que double 2.5 fois et diminue le courant.

Les valeurs de programme vérifiées comme suit :

Rapport cyclique :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T} = \frac{0.0001 - 0.00002}{0.00012} = 0.6$$

Gain en tension :

$$K = \frac{1}{1-\alpha} = \frac{1}{1-0.6} = 2.5$$

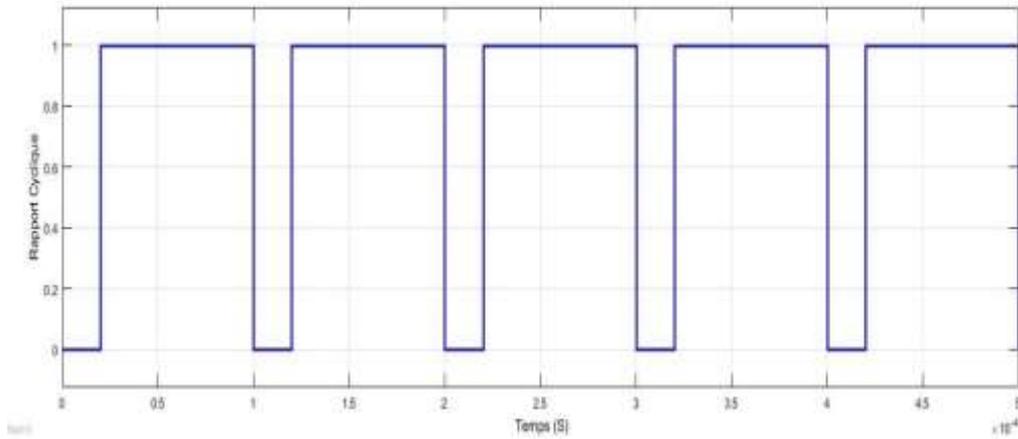


Figure III. 8. Rapport cyclique.

Grace à ce rapport cyclique les 2 allures de tension entrée ($V_{in Boost}$) et la tension de sortie ($V_{out Boost}$) de convertisseur Boost sont présentés sur la figure (III.9).

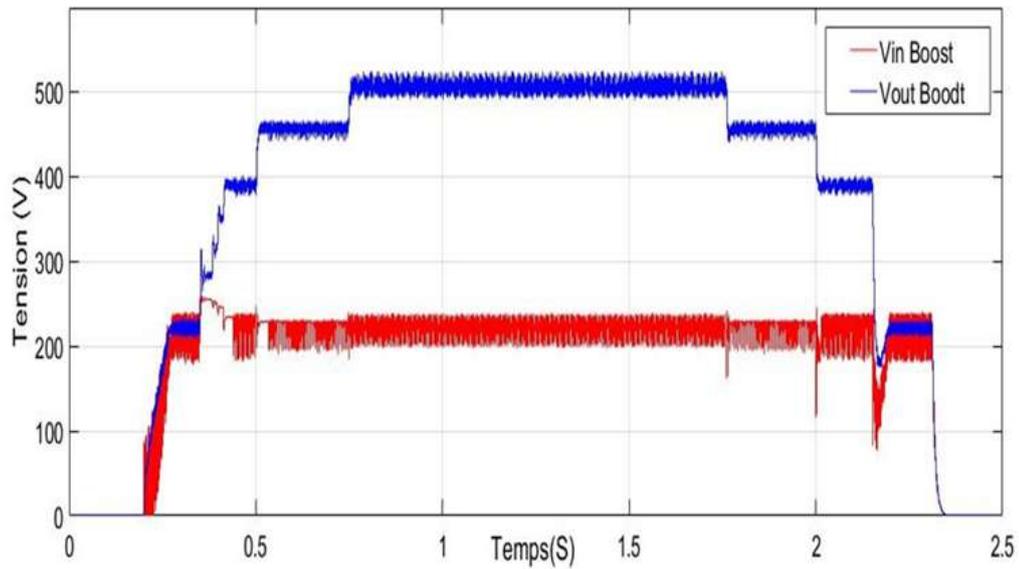


Figure III. 9. Variation de tension de GPV à la sortie du convertisseur (Boost).

La figure (III.10) présenté les deux signaux de commande MLI, signal sinusoïdale compare avec un autre triangulaire.

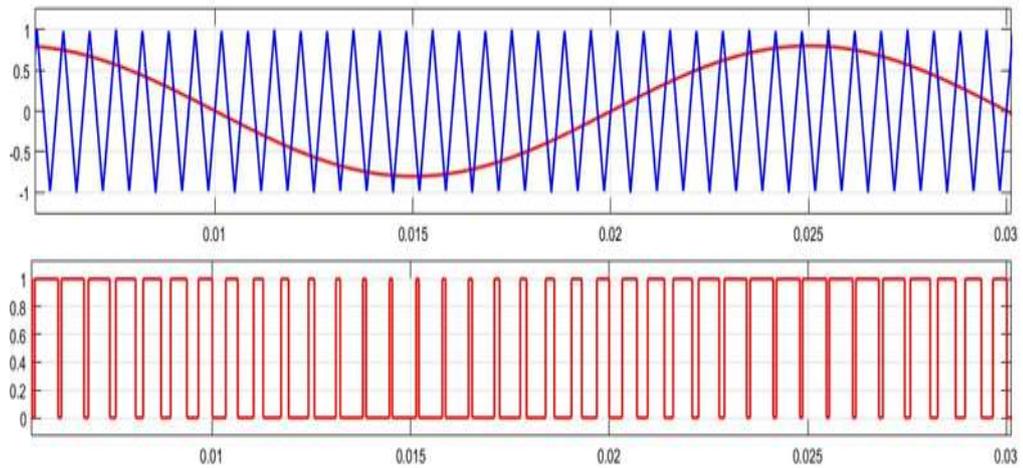


Figure III. 10. Les deux signaux de commande MLI.

Les figures (III .11 et III .13) souvant montrés les courbes de courant composée (I_{abc}) et la tension composée (V_{abc}) à la sortie d'onduleur, avec le zoom de I_{abc} et V_{abc} dans les figures (III.12 et III.14).

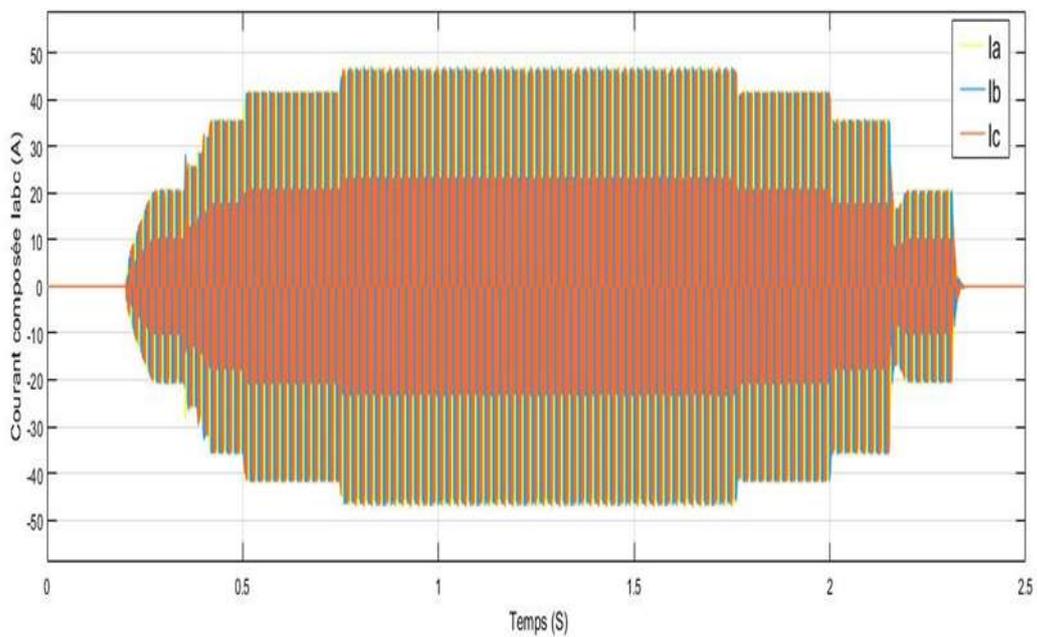


Figure III. 11. courant composée $I_a ,I_b I_c$.

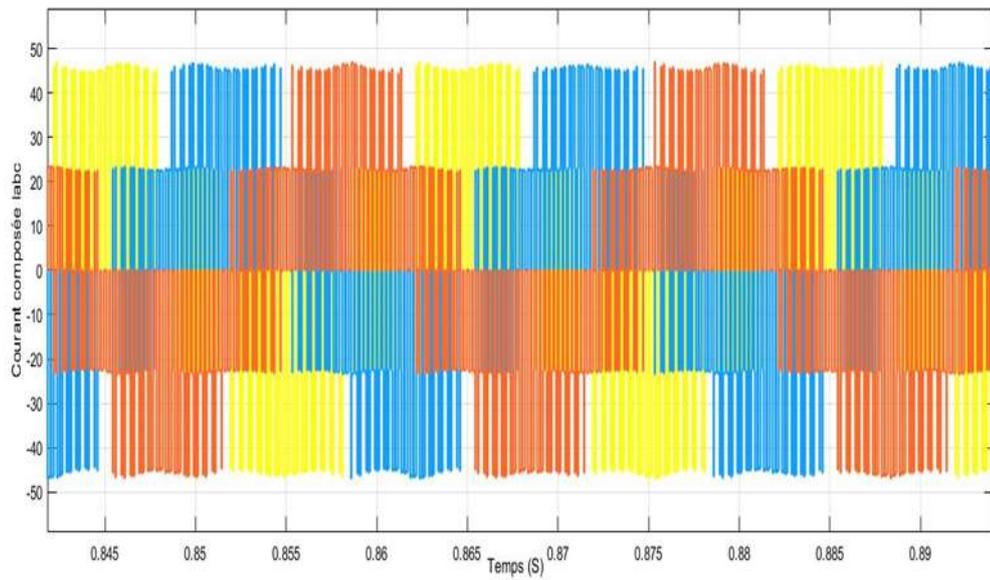


Figure III. 12. zoom de I_a, I_b, I_c .

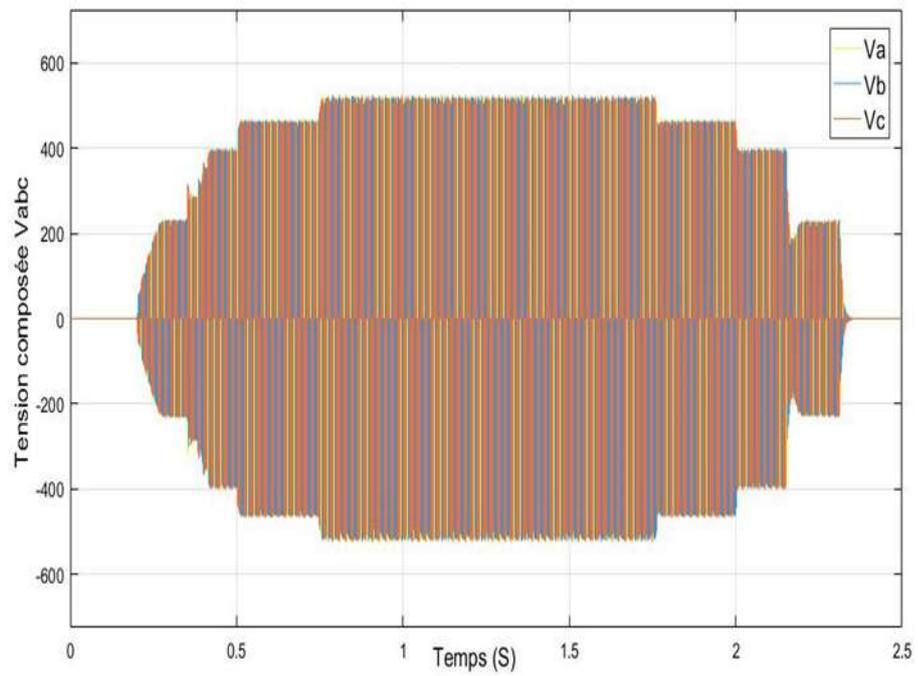


Figure III. 13. Tension composée V_a, V_b, V_c .

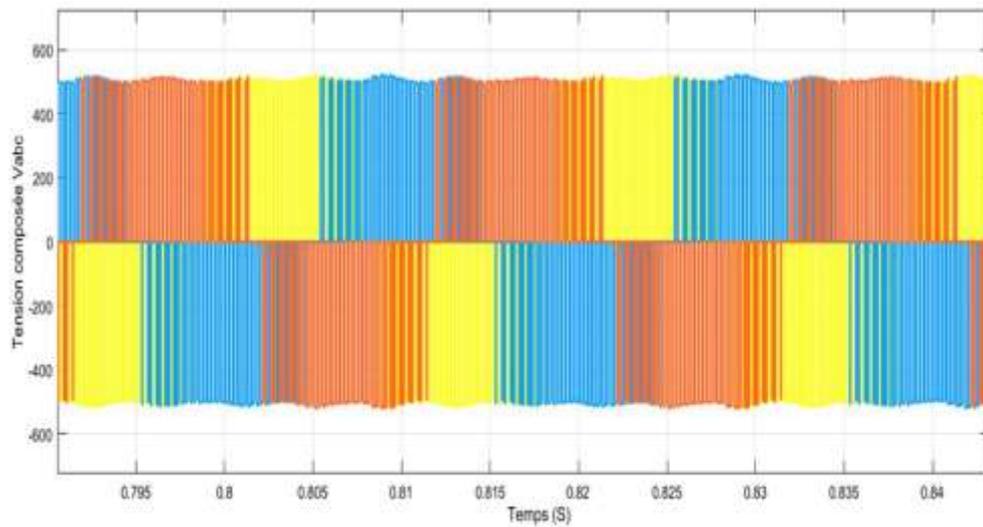


Figure III. 14. Zoom de V_a, V_b, V_c .

III.3. La pile à combustible :

Pour la simulation de PàC on peut recourir à un schéma électrique simplifié dans la figure (III.15) dont les valeurs des composants sont résumés dans le tableau (III.4).

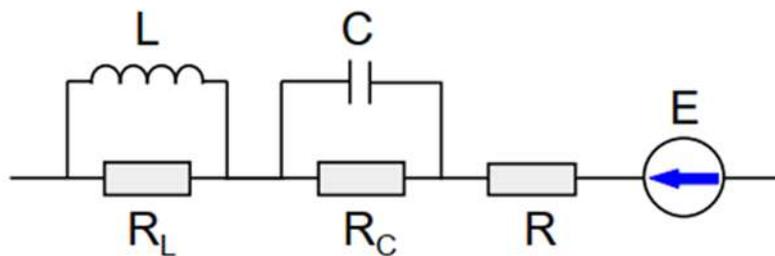


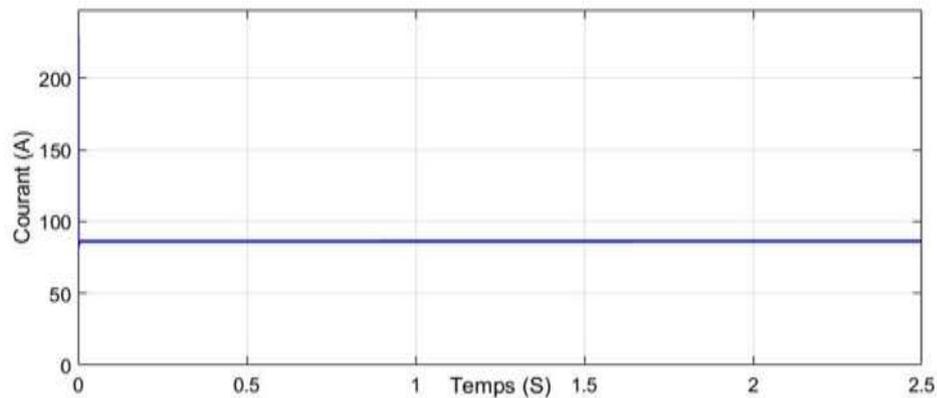
Figure III. 15. Schéma équivalent de PàC

Tableau III. 4. Identifications des paramètres de la PàC.

Les paramètres	R	R_c	R_L	L	C	E
Les valeurs	0.130	0.03	0.025	6×10^{-7}	0.066	255

Les figures suivantes (III.16, III.17 et III.18) montrent les différentes réponses (courant, tension et puissance) de la PàC.

On a remarqué que la Valeur de courant constante à $I_{\text{pile}} = 86.25 \text{ A}$ et la tension, puissance aussi constante dans les valeurs suivent $V_{\text{pile}} = 241.2 \text{ V}$, $P_{\text{pile}} = 20.00 \text{ Kw}$.

**Figure III. 16.** Courant de PàC.

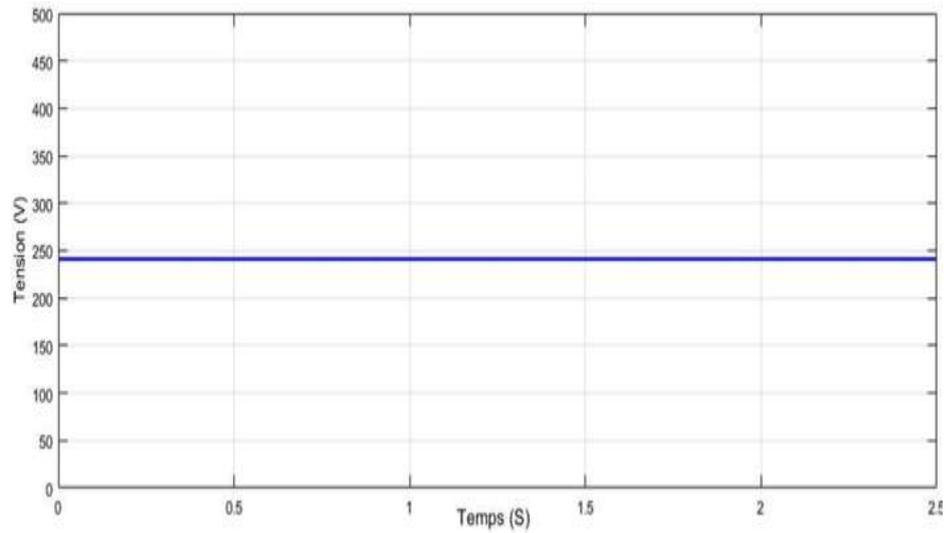


Figure III. 17. Tension de PàC.

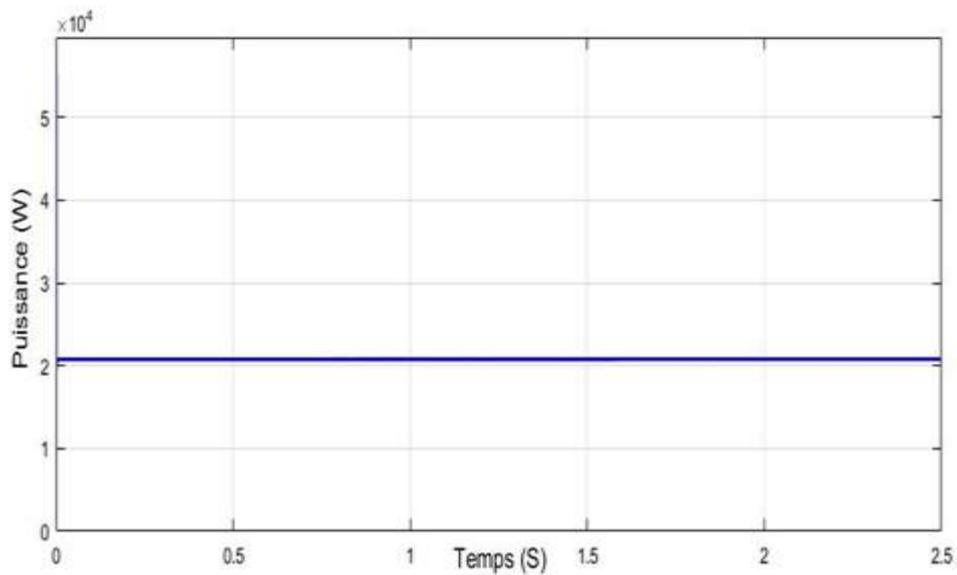


Figure III. 18. Puissance de PàC.

III.3.1. Convertisseur élévateur (Boost) de PàC :

La figure (III.19) représenté le schéma électrique de 1Convertisseur *élévateur (Boost)* de PàC

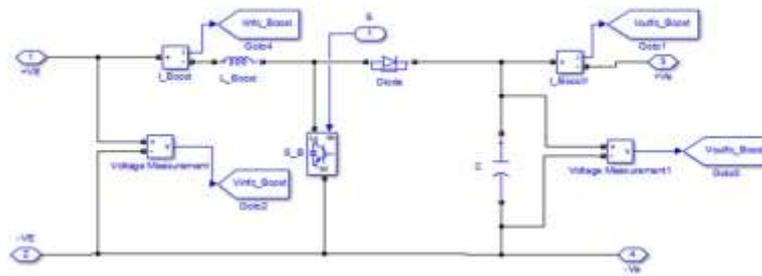


Figure III. 19. Schéma du convertisseur (Boost) de PàC

Puisqu'on utilisé le même algorithme de MPPT, cela signifie que nous allons obtenir le même rapport cyclique $\alpha = 0.6$ et gain de tension $K=2.5$.

La figure (III.20) montré le Rapport cyclique de la PàC.

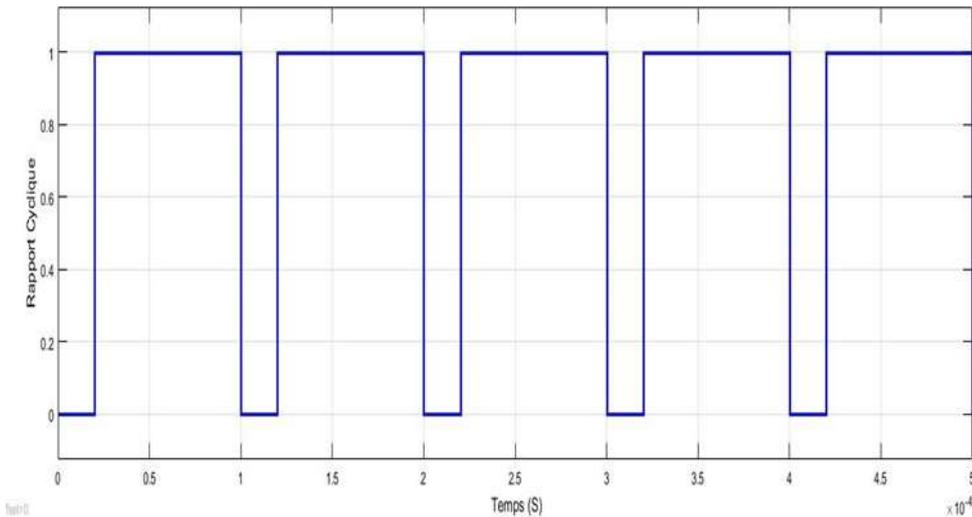


Figure III. 20. Rapport cyclique la PàC.

La figure (III.21) représente les courbes de tension de sortie et l'entrée du hacheur Boost. ($V_{inBoost} \approx 250V$) Représente la tension d'entrée inférieure de celle de sortie qui est de valeur ($V_{outBoost} \approx 500V$).

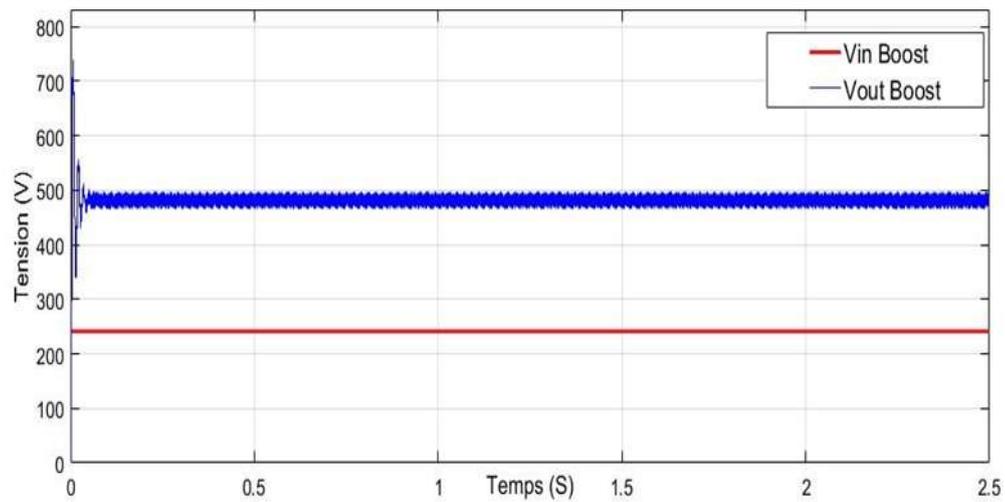


Figure III. 21. La tension de PàC à la sortie du convertisseur Boost.

A la sortie de l'onduleur nous obtenons les courbes (III.22, III.24) de courant I_{abc} et tension V_{abc} composées suivant et les figures (III.23 et III.25) représentent le zoom de I_{abc} et V_{abc} .

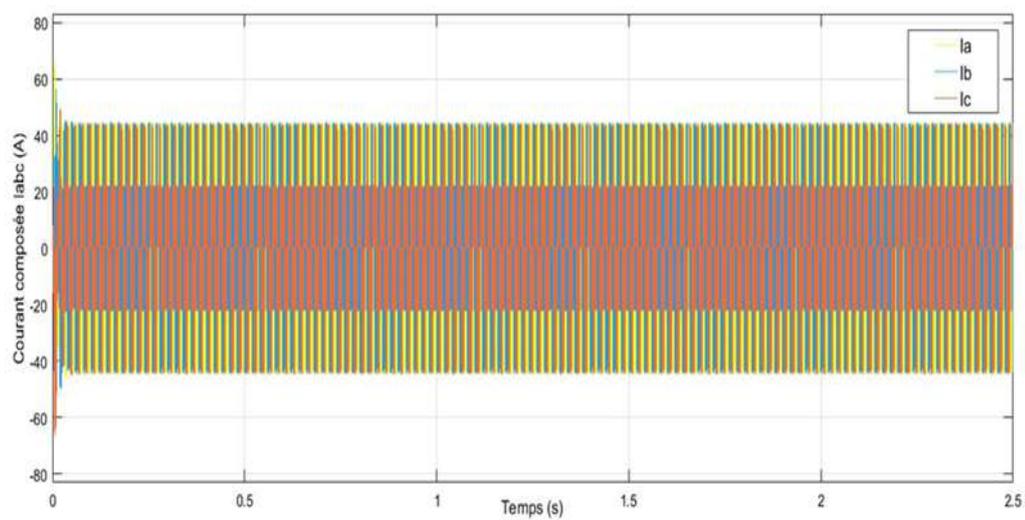


Figure III. 22. Courant composée I_a, I_b, I_c .

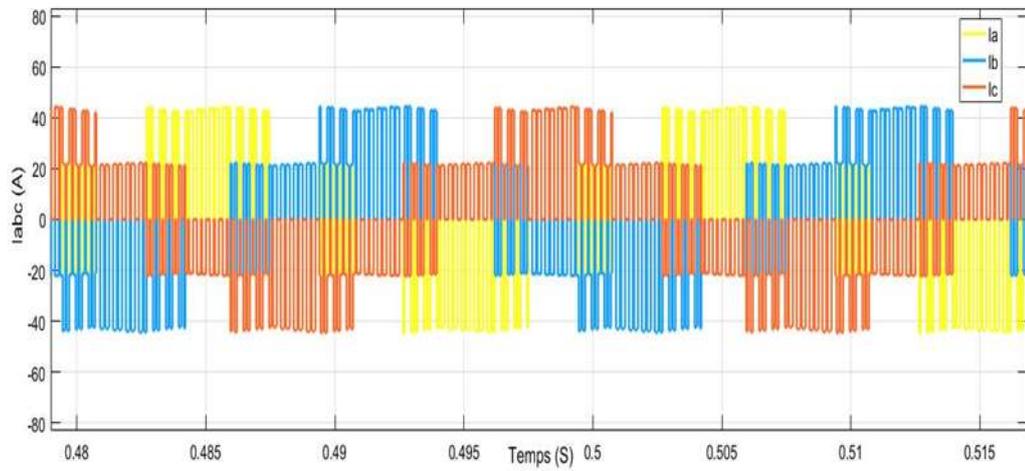


Figure III. 23. Zoom de I_a , I_b , I_c .

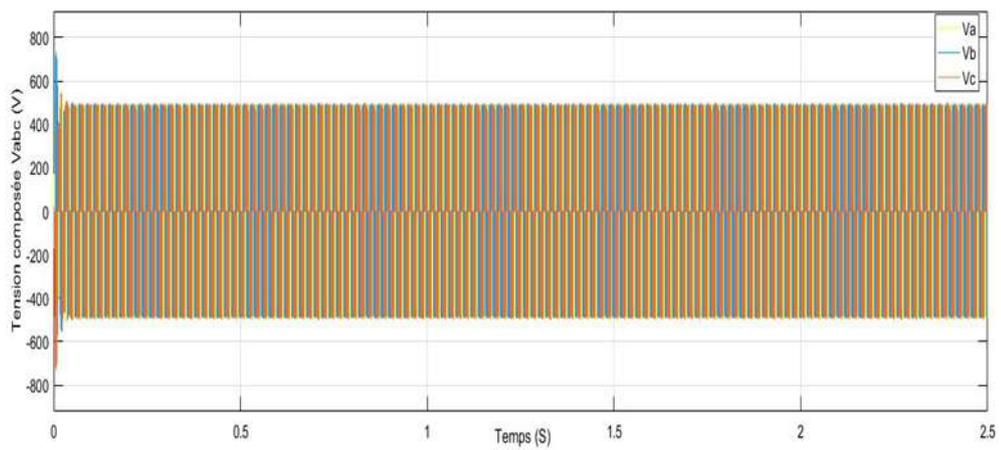


Figure III. 24. Tension composée V_a , V_b , V_c .

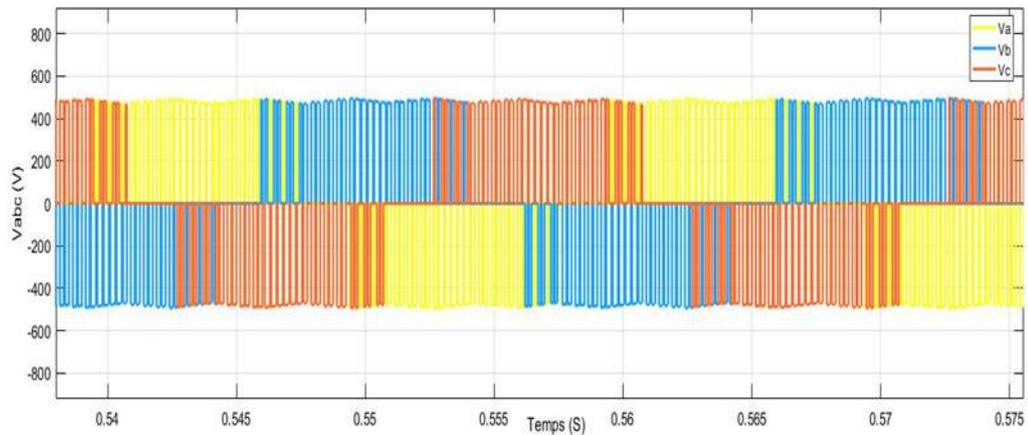


Figure III. 25. Zoom de V_a, V_b, V_c .

III .4. Le principe de la gestion d'énergie :

La gestion d'énergie est aujourd'hui essentielle car elle permet de faire de réelles économies qu'il ne faut pas négliger. Cela passe par deux actions :

- Diminuer la consommation énergétique en consommant mieux.
- Substituer une énergie chère par une énergie moins coûteuse.

La gestion d'énergie avec panneaux photovoltaïques permet de :

- suivre en temps réel ses consommations, sa production et ses indicateurs de performance.
- piloter à distances ses appareils électriques.
- optimiser sa consommation pour la couvrir avec sa production d'énergie. Pour certaines solutions de gestion d'énergie, cela se fait de manière automatique. Par exemple, au lieu de fonctionner la nuit, le lancement de votre chauffe-eau est décalé en journée, au moment où les panneaux solaires produisent de l'énergie.

Il est ainsi possible de réaliser jusqu'à 70% d'économies grâce à un système de gestion de l'énergie. N'hésitez pas à comparer les différents systèmes de gestion de l'énergie en recevant gratuitement des devis comparatifs. (Gestion d'énergie intelligente et optimisation de l'autoconsommation solaire)[26].

III.5. Les puissances coutées onduleur:

Pour mieux comparer entre les puissances produites par les deux systèmes avec la charge sont tracées dans la même Figure. (III.26). nous avons peint les trois courbes dans une seule la figure

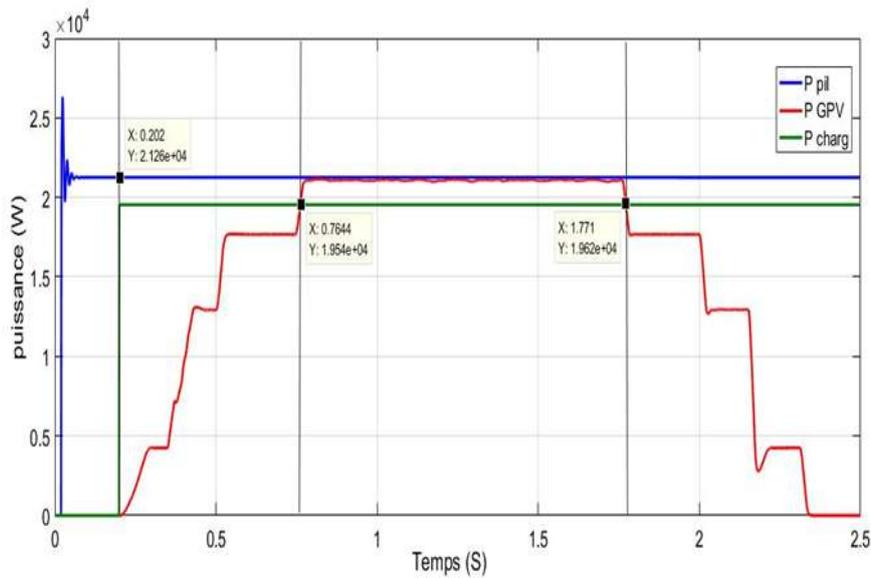


Figure III. 26. Les puissances de system hybride global.

Nous pouvons deviser l’axe de temps en plusieurs modes d’opération selon le tableau (III.5)

Tableau III. 5. Temps de simulation par les heures (cas les puissances).

Modes d’opération	Temps (s)	Heures de journée
1	[0s - 0.202s]	00h-5 :30h
2	[0.202s - 0.7644s]	5 :30h-9 :15h
3	[0.7644s – 1.771s]	9 :15h-16 :15h
4	[1.771s - 2.5s]	16 :15h-19 :51

Tout d’abord, la charge utile est une usine. Nous supposons que cette usine ne fonctionne pas à partir de 00 h du soir jusqu’à 5 :30 h du matin.

- Mode d’opération 1: $P_{charge} = 0, P_{GPV} 0 Kw , P_{pile} = 0Kw$

L'usine il n'a pas encore commencé à travailler.

- Mode d'opération 2 : $P_{charge} = 19Kw$, $P_{GPV} < 19Kw$, $P_{pile} = 20Kw$

La pile à combustible est celle qui fonctionne.

- Mode d'opération 3 $P_{charge} = 19 Kw$, $P_{GPV} > 19Kw$, $P_{pile} > 19Kw$

Le générateur photovoltaïque est celui qui fonctionne pour garder la pile à combustible en repos pour un maximum de temps et augmenter sa durée vie.

- Mode d'opération 4 $P_{charge} = 19Kw$, $P_{GPV} < 19Kw$, $P_{pile} = 20Kw$

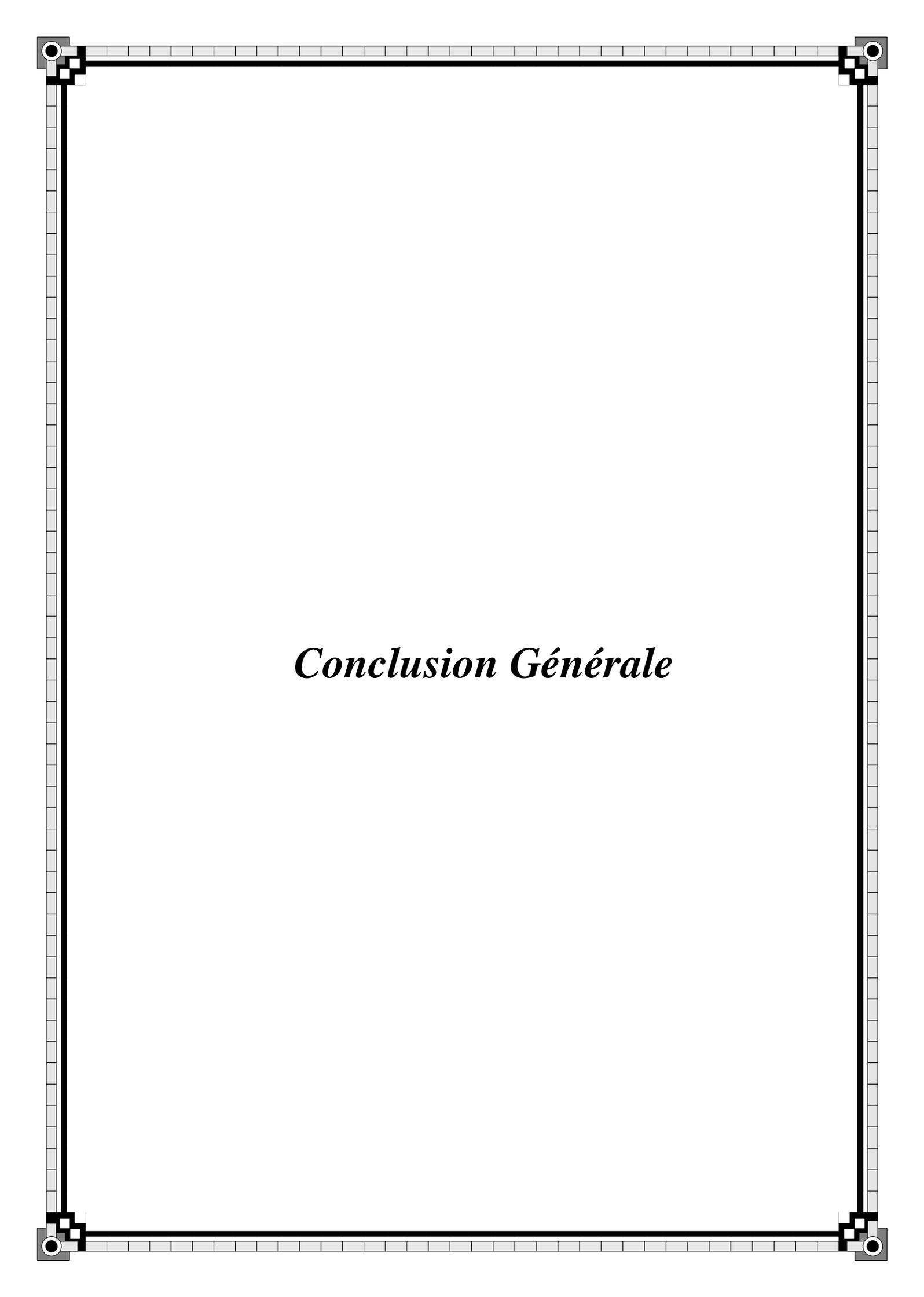
La pile à combustible est celle qui fonctionne.

- Noter que le générateur photovoltaïque fonctionne à partir de [0.7644s - 1.771s]
C'est-à-dire qu'il fonctionne de 9h du matin à 16h du soir.
- Dans les modes d'opération 2 et 4 le générateur photoélectrique peut être exploité dans d'autres applications qui ne nécessitent pas beaucoup de énergie.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé tous les composant qui représentant le système globale photovoltaïque /pile à combustible, tels que, le GPV et PàC le hacheur élévateur, l'onduleur.

Grâce aux résultats obtenus, nous avons donné toutes les suggestions possibles pour maintenir l'ordre et optimiser l'utilisation de l'énergie des sources.



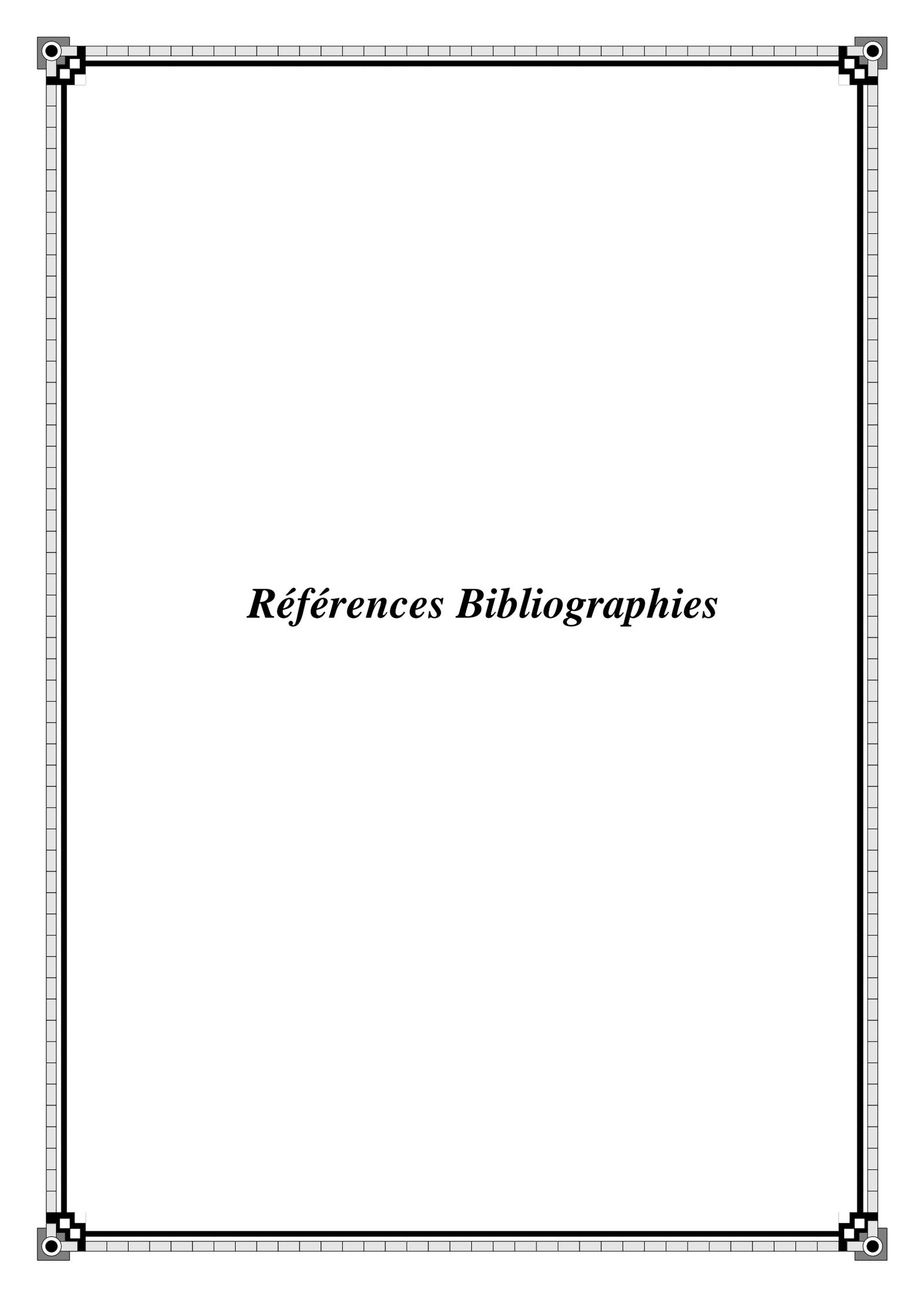
Conclusion Générale

Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif de faire. Construire un système énergétique alimentant une charge

Les résultats que nous avons obtenus sont un générateur photovoltaïque qui produit environ 20 KW avec une pile à combustible qui produit environ 22 kW. Le rayonnement solaire affecte grandement le courant, la tension et la puissance. Avec un fort rayonnement solaire, nous avons obtenons des résultats satisfaisants , mais en son absence, nous sommes confrontés un problème inévitable, donc utilisé le générateur photovoltaïque avec une autre source qui n'est pas affectée par les facteurs naturels et qui est produite dans toutes les condition et à tous les moments , qui est la pile à combustible, qui grâce à des simulations, nous avons vu qu'elle peut produire de l'électricité du tout fois sans interruption, et donc il doit être nécessaire de l'intégrer pour obtenir une source électrique permanente avec une production efficace pour couvrir les besoins en énergie.

En fin, on propose quelques perspectives pour l'avenir :

- ✓ Pour une conception pratique et efficace d'un système hybride photovoltaïque / pile à combustible, il est recommandé de rechercher un site exposé au rayonnement solaire avec une data base étoffée et de long terme.
- ✓ Utilisation les techniques de l'intelligence artificielle Pour la gestion de l'énergie.
- ✓ Augmenter la valeur de puissance de cette system et l'intégré avec un réseau électrique.



Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. BORNI Abdelhalim. *Etude Et Optimisation d'un Multi Système Hybride de Conversion D'énergie Electrique*. Thèse de Doctorat, Université Constantine 1 ,2015.
- [2]. MOKHTARI Narimane. et OURRAD Amira Ikram. *Dimensionnement d'un Système Hybride Photovoltaïque-Biomasse Connecté Au Réseau Pour Alimenter La Ferme Agricole D'élevage de L'université de Mostaganem*. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2020.
- [3]. MEKEMEICHE Abdelkader. *Modélisation à Deux Dimensions des Propriétés Physiques de Cellules Solaires au Silicium A Base De Substrat de Type n. Étude de Quelques Cas Particuliers de Cellules Innovantes*. Thèse de Doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
- [4]. TRAORÉ Abdoul Karim. *gestion d'un Système Autonome Hybride Photovoltaïque Eolien Pour Applications Agricoles*. Mémoire de Master, Université du Québec, 2016.
- [5]. RAHALI Imane. *Optimisation De Fonctionnement d'un Electrolyseur A Travers un Convertisseur*. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
- [6]. KHENFER Raid. *Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques*. Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif 1,2015.
- [7]. TEGANI Lyes, *Optimisation et Contrôle d'un Micro Smart Grid Utilisant une Pile A Combustible, des Super Condensateurs, des Batteries, une Eolienne et une Source Photovoltaïque*.Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khieder – Biskra, 2016.

- [8]. ZHANG Zhiming. *Modélisation Mécanique des Interfaces Multi-Contacts Dans Une Pile A Combustible*. Thèse de Doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2010.
- [9]. THABET Kawther. *Pile A Combustible A Céramique Conductrice Protonique : Elaboration et Caractérisations Physico-Chimiques et Electrochimiques des Matériaux Et Optimisation de La Mise en Forme Par Le Procède de Densification A Basse Température CSP*. Thèse Doctorat, Université de Nantes-Institut des matériaux de Nantes Jean Rouxel, 2021.
- [10]. Site internet du FCH-JU - Fuel celle and Hydrogène Joint Undertaking. Dernière Consultation: <http://www.fch-ju.eu/>. Le 17/04/2015.
- [11]. U. S. D. O. ENERGY, "Multi-Year Research, Développement, and Démonstration Plan," E. E. a. R. Énergie, Ed., ed. USA, 2016, pp. 3.4 - 17.
- [12]. HADDAD Ahmad. *Modélisation Dynamique Non Linéaire De La Pile A Combustible du Type PEM : Application à la Régulation de l'humidité dans la Membrane Electrolytique*. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliar 2009.
- [13]. BATZELIS, Efstratios. Non-iterative methods for the extraction of the single-diode model parameters of photovoltaic modules: A review and comparative assessment. *Energies*, 2019, vol. 12, no 3, p. 358.
- [14] SAID, Samer, MASSOUD, Ahmed, BENAMMAR, Mohieddine, *et al.* A Matlab/Simulink-based photovoltaic array model employing SimPowerSystems toolbox. *Journal of energy and power engineering*, 2012, vol. 6, no 12, p. 1965.

Références Bibliographiques

- [15]. BENKHEROUF Yasmina et MOUFFOK Imane. *Etude d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque-Pile A Combustible*, Mémoire de Master Université Saad Dahleb Blida.2017.
- [16]. ABOUB Hania. *Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV*. Mémoire de Magister. Université Hadj Lakhdar – Batna. 2014.
- [17]. AGLZIM El-hassane. *Caractérisation Par Spectroscopie d'impédance de l'impédance Complexe d'une Pile A Combustible En Charge – Evaluation de l'influence de l'humidité*.Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1, 2009.
- [18]. KASSMI, K., HAMDAROU, M., et OLIVIER, F. *Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique*. *Revue des Energies Renouvelables*, 2007, vol. 10, no 4, p. 451-462.
- [19]. CABAL, Cedric. *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*. 2008. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [20]. CHEKKAF Ikram. et BOUZIANE Mohammed Amine, *Etude et Modélisation des Hacheurs Boost Multi-Niveaux Dédiés Aux Systèmes Photovoltaïques*, Mémoire de Master, Ecole Supérieure En Sciences Appliquées -T L E M C E N -,2019.
- [21]. FERDJANI Souleyman et .MAATALLAH Omar, *Etude et Réalisation d'un Hacheur Boost Commandé par le μ C ARDUINO en vue d'Implémenter des Commandes MPPT*, Université Ahmed Draia Adrar, 2019.
- [22]. BEN YAHOUBOUB Yazid et AOURAR Oussama, *Modélisation Et Simulation d'un Hacheur Entrelacée par Multi-Modelé Flous*, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019/2020.

Références Bibliographiques

[23]. LACHICHI Amel Modélisation et Stabilité d'un Régulateur Hybride de Courant – Application aux Convertisseurs Pour Pile A Combustible, Thèse de Doctorat Université de Franche-Comté, 2005.

[24]. HOUNNOU Amédédjihundé Hypolite Jordão, Etude et Simulation du Comportement dynamique d'une Alimentation Rurale Isolée Hybride : Energie Photovoltaïque et Microcentrale Hydroélectrique, Diplôme d'études Approfondies Sciences Pour L'ingénieur, Université d'abomey-Calavi, 2014.

[25]. Site Internet <https://fr.weatherspark.com/d/51506/6/12/M%C3%A9t%C3%A9-moyenne-le-12-juin-%C3%A0-Biskra-Alg%C3%A9rie#Figures-Daylight>.

[26] Site Internet <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/gestion-de-lenergie/>

Résumé :

Ce mémoire présente la modélisation d'un système photovoltaïque / pile à combustible type PEM intégré proposée pour répondre à une demande d'énergie électrique d'un charge isolé et d'une unité de puissance de capacité de 19kw. Le contrôle de système est à base de la commande d' MPPT (Maximum Power Point Tracking) appliqué au niveau d'un convertisseur Boost et la technique d'MLI (Modulation de l'arguer d'impulsion) au niveau d'onduleur, les résultats obtenus sont acceptable.

Mots-clés : Générateur Photovoltaïque (GPV), Convertisseur Boost, Onduleur triphasé, MPPT, pile à combustible PEMFC.

ملخص :

هذه المذكرة تبين نمذجة نظام كهروضوئي/ خلية وقود من نوع PEM مدمجة، مقترح من أجل إستجابة لطلب الطاقة الكهربائية لحمولة منعزلة بوحدة إستطاعة ذات سعة 19 كيلواط. التحكم في هذا النظام معتمد علي MPPT (تتبع نقاط الإستطاعة القصوى) مطبقة على مستوى مقلب رافع وكذلك تقنية تشكيل عرض النبضة MLI على مستوى المموج ثلاثي الطور، النتائج المتحصل عليها مقبولة.

الكلمات المفتاحية : مولد كهروضوئي /مقلب رافع مموج ثلاثي الطور، MPPT، خلية الوقود PEMFC.

Abstract:

This dissertation presents the modelling of an integrated PEM-type photovoltaic/fuel cell system proposed to meet the electrical energy demand of an isolated lode and a 19kw capacity power unit. The system control is based on the MPPT (Maximum Power Point Tracking) command applied at a Boost converter and the PWM (Pulse Width Modulation) at the inverter level, the results obtained are acceptable

Keywords: Photovoltaic Generator (GPV), Boost Converter, thee phase inverter, MPPT, PEMFC fuel cell.

