

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

RÉGULATION DE TENSION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME

Présenté par :

- AGHA-MIR Abir
- DERBAL Chellali Rafiq
- HAMMAD Fatima Zahra

Soutenu le : 22/06/2023 devant le Jury :

<i>Dr. MEDJAJI Nacira</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>Dr. KHASSAM Madjdoub</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Dr. MEZIANE Mohammed Amine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>Dr. AMARA Zeyneb</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciements

Nous remercions notre créateur Allah, Grand et Miséricordieux, le tout puissant pour le courage qu'il nous a donné pour mener ce travail à terme.

Nos vifs remerciements et profonds respects s'adressent tout d'abord à nos chers encadreur

- *Dr. Khassame Madjedob*
- *Dr. Meziane Mohammed Amine*

Pour nous aider par leurs idées, leurs conseils et leurs encouragements incessants durant la préparation de ce travail

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury

- *Dr. Madjadji Nacira*
- *Dr. Amara Zeyneb*

Pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de notre travail

Nous remercions Mr. Abid Amine, pour son aide dans ce travail. Nous tenions aussi à vous remercier pour les connaissances que vous nous avez prodigué durant nos études universitaires

Nous tenions également à remercier tous nos enseignants de département science et technologie.



Dédicace

*Avant tout, je tiens à remercier 'ALLAH', l'unique qui m'offre
le courage et la volonté nécessaire pour affronter les difficultés
de la vie.*

Je dédie ce modeste travail :

- *À ma chère mère.*
- *À mon cher père.*

*Qui n'a jamais cessé de prier pour moi, de me soutenir et de
m'aider à atteindre mes objectifs.*

- *À mes frères ;*

*Zakaria, Djawad, Ayoub, Mohamed, Abdelhamid, Oussama,
Ilyase, Abdelhakem, Riydh, Mejdoub....*

- *À ma chère sœur et son mari.*
- *A toute ma famille.*
- *À tous mes amis ;*

*Amine, Nadji, Yacine, Aymen, Aissa, kadiro, Abdelghani,
Ibrahim, Abdessalam...*

- *À tous les gens qui me connaissent et que je connais en
particulier.*

Rafiq





*A ALLAH tout puissant, qui m'a inspirée. Qui m'a à guidée dans
le bon chemin. Je vous dois ce que je suis.*

A Mes très chers parents

*Aucune expression ne saurait exprimer toute l'affection et tout
l'amour que je vous porte.*

*Que ce travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, de vos
prières et le fruit de vos innombrables sacrifices. Que dieu les
garde et protégé*

*A Mes très chers frères **Aymen, Moussa** et Ma magnifique sœur
Nor El Imane pour leur grand amour et soutien, qui m'ont tant
donné de courage pour accomplir cette étude.*

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

*A tous mes amis, tout particulièrement **Ghanawí Hanane,**
Bougnina Dallal, Mebarkí Mouna, Kédidír Nour El-houda .*

*A **Fatíma**, chère amie avant d'être binôme, et mon binôme*

Rafiq,

Abír

III





*Le voyage n'était pas court et ne devait pas l'être, la science n'était pas proche et la route n'était pas pleine de facilités, mais je l'ai fait. Je dédie ce mémoire à mon premier modèle, à celui qui m'a donné et me donne encore sans limites, À qui j'ai levé la tête haut dans la fierté de lui... **mon cher père.***

*A celle dont le coeur m'a vu devant ses yeux, Ses entrailles m'enlacèrent devant ses mains, À cette grande personne qui a toujours souhaité que ses yeux admettent m'avoir vu un jour comme celui-ci ... **ma mère***

*A ceux avec qui je n'ai pas eu de relation de lignage.. mais plutôt le parfum de l'amitié.. et les roses de l'amour (**mes copines Bochra ,Narimene,Abir..**)*

À tous ceux qui m'ont aidé et soutenu sur ce chemin, je vous suis reconnaissant à tous, je ne serais pas arrivé sans votre grâce après Dieu.

Fatima zahra

IV



ملخص

الدوائر الإلكترونية المناسبة لتحويل الطاقة الكهربائية والتحكم فيها وتكييفها في التطبيقات الشمسية ضرورية لضمان الاستخدام الفعال للنظام الشمسي. الغرض من هذا العمل هو دراسة النظام الكهروضوئي المستقل الذي يعمل بأقصى طاقة. تتعلق هذه الكلاسيكية **MPPT (P&O)** الدراسة بنظام الضخ. لتحسين كفاءة المولد ، تم تحسين طاقته من خلال تطبيق خوارزمية للعثور على أفضل DC-DC في محول التعزيز **MPPT** يتحكم **(P&O)** والشائعة. الخوارزمية الذكية القائمة على المنطق لنظام **(P&O)** بالسرعة. تم تصميم ومحاكاة التحكم في تنظيم الجهد باستخدام المنطق التكيفي **(MPP)** نقطة طاقة قصوى كهروضوئي قائم بذاته في بيئة **MatLab / Simulink**.

الكلمات المفتاحية

النظام الكهروضوئي ، خوارزمية **MPPT** ,محول **DC-DC**

Résumé

Des circuits électroniques adaptés à la conversion, au contrôle et au conditionnement de l'énergie électrique dans les applications solaires sont nécessaires pour assurer une utilisation efficace du système solaire. Le but de ce travail est d'étudier un système photovoltaïque **PV** autonome qui fonctionne à puissance maximale. Cette étude concerne un système de pompage. Pour améliorer le rendement du générateur, l'optimisation de son énergie a été accomplie par application d'un algorithme classique et populaire algorithme **MPPT (P&O)**. L'algorithme intelligent basé sur la logique **(P&O)**. **MPPT** contrôle le convertisseur élévateur **DC-DC** pour trouver le meilleur point de puissance maximale **(MPP)** avec rapidité. Le contrôle de régulation de tension avec logique **(P&O)** adaptative pour un système photovoltaïque autonome est conçu et simulé dans l'environnement **MatLab/Simulink**.

Mots clés : Système photovoltaïque, algorithme **MPPT**, convertisseur **DC-DC**

Abstract

Proper electronic circuits for the conversion, control and conditioning of electrical energy in solar applications are essential to ensure efficient use of the solar system. The purpose of this work is to study the autonomous **PV** photovoltaic system at maximum power. This study is related to the pumping system. To improve the efficiency of the generator, its power is optimized by applying the classic and popular **MPPT (P&O)** algorithm. Intelligent logic-based algorithm **(P&O)**. **MPPT** controls the **DC-DC** boost converter to find the best maximum power point **(MPP)** at speed. Voltage regulation control using adaptive logic **(P&O)** of a stand-alone photovoltaic system was designed and simulated in a **MatLab/Simulink** environment.

key words: Photovoltaic system, **MPPT** algorithm, **DC-DC** converter.

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	V
Table des matières	VI
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIV
Liste des abréviations	XIII
Nomenclatures	XVI
Introduction générale	1

Chapitre I

Aperçu sur l'énergie renouvelable et le système photovoltaïque

I.1 Introduction	3
I .2 Energies renouvelables	3
I .2.1 Définitions	3
I .2.2 Type de l'énergie renouvelable	4
I.3 Présentation de l'énergie solaire	6
I.4 rayonnement solaire	6
I. 4.1. Différentes composantes du rayonnement solaire.....	6
I.4.2 Spectre du rayonnement	7
I .5 Types du rayonnement solaires	7
I .6 Energie solaire photovoltaïque	9
I .6.1 Cellule photovoltaïque.....	9
I .6.2 Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	10
I .6.3 Classification des cellules PV.....	11
I .7 Module photovoltaïque	12
I .7.1 Mise en série/parallèle	12
I.7.1.1 Association en série	12
I.7.1.2 Association en parallèle	13
I.7.1.3 Association série et parallèle	15
I .7.2 Système photovoltaïque	15

I.7.3 Types de Système PV	16
I.7.3.1. Système PV autonome	16
a) Système PV autonome sans stockage électrochimique	16
b) Système PV autonome avec stockage électrochimique	17
I.7.3.2 Système PV connecté au réseau	18
I.7.3. 3 Système PV autonome hybride	18
I .8 Situation actuelle d'énergie photovoltaïque en Algérie	19
I.8.1 spécification de la région de Naâma	20
I .9 Avantage et inconvénient de L'énergie photovoltaïque	20
Avantage	20
Inconvénient	21
I .10 Conclusion	21

Chapitre II

Modélisation de l'ensemble GPV-BOOST-MPPT -BUCK-MOTEUR-POMPE

II.1 Introduction	22
II.2 Générateur photovoltaïque	22
II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque	23
II.4 Convertisseur statique	25
II.4.1 Définition	25
II.4.2 Rôle des convertisseurs DC-DC	25
II.4.3 Convertisseurs statique BOOST	26
II.4.4 Convertisseurs statique BUCK	27
II.5 Commande MPPT	29
II.5.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	29
II.5.2 Les techniques de recherche de MPPT	30
II.5.2.1 La technique perturbation et observation (P&O)	30
II.5.2.2 Technique incrémental conductance (INC)	32
II.5.3 Avantages et les inconvénients pour les deux techniques	34
II.6 Fonctionnement du régulateur MPPT	34
II.7 Régulation proportionnelle intégration dérivée (PID)	35
II.7.1 Rôle de la régulation dans les systèmes photovoltaïques	35
II.7.2 La composante proportionnelle	35

II.7.3 La composante intégrale	36
II.7.4 La composante dérivée	36
II.7.4.1. Effet du régulateur PID	37
II.8 Moteur à courant continu	37
II.8.1 Différents types de machines à courant continu	37
II.8.2 Avantages et inconvénients des machines à courant continu.....	38
II.8.2.1 Avantages	38
II.8.2.2 Inconvénients	38
II.8.3 Modélisation d'une MCC à excitation séparé.....	38
II.8.3.1 Mise en équation de la machine	38
II.9 Pompe photovoltaïque	39
II.9.1 Pompage du fil du soleil	39
II.9.2 Pompage avec batterie	40
II.9.3 Différentes types des pompes	41
II.10 Pompe centrifuge	41
II.10.1 Fonctionnement d'une pompe centrifuge	42
II.10.2 Avantages et Inconvénients des pompes centrifuges	43
II.10.2.1 Avantages	43
II.10.2.2 Inconvénients	43
II.11 Conclusion	44

Chapitre III

Simulation, résultats et discussions

III.1 Introduction	45
III.2 L'outil Matlab/Simulink	45
Matlab	45
SIMULINK	45
III.3 Simulation, résultats et discussions	46
III. 3.1 Simulation du générateur PV	46
III. 3.1.1 Caractéristique électrique du générateur	46
III.3.1.2 Influence de la température et l'ensoleillement sur le GPV	48
Influence de la température	48
Influence De L'ensoleillement	50
III. 3.2 Simulation d'un convertisseur DC/DC Boost	52

III. 3.3 Simulation du système photovoltaïque	53
III. 3. 3.1 Résultats de GPV avec MPPT	54
III.3.3.2 Résultats de GPV-MPPT avec une variation de température et irradiation..	56
III. 3.4 Simulation d'un convertisseur DC/DC BUCK	60
III. 3.5 Simulation du système global	61
III. 3.5.1 Évaluation de la réponse du convertisseur Buck avec le contrôleur PID proposé...	62
III.3.6. Résultats de simulation de la Moto-pompe	63
III.4 Conclusion	65
Conclusion générale	66
Référence bibliographique	67
Annex.....	71

Liste des figures

Chapitre I		
N° de figure	Titres	Pages
Figure I.1	Sources d'énergie renouvelables	4
Figure I.2	Radiation solaire globale sur un plan incliné	6
Figure I.3	Spectre de rayonnement	7
Figure I.4	Constitution d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I.5	Schéma d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.6	Module photovoltaïque	12
Figure I.7	Schéma équivalent d'association série des panneaux PV	13
Figure I.8	Montage série des panneaux photovoltaïques	13
Figure I.9	Caractéristique résultante d'un groupement de Ns cellules en série	13
Figure I.10	Schéma équivalent d'association parallèle des panneaux PV	14
Figure I.11	Montage parallèle des panneaux photovoltaïques	14
Figure I.12	Caractéristique résultante d'un groupement de Np cellules en parallèle	14
Figure I.13	Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (Np+ Ns) cellules identiques	15
Figure I.14	Schéma d'un système photovoltaïque	16
Figure I.15	Système PV autonome sans stockage électrochimique	17
Figure I.16	Système photovoltaïque autonome	17
Figure I.17	Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau	18
Figure I.18	Schéma d'un système PV hybride	19

Chapitre II		
N° de figure	Titres	Pages
Figure II.1	Système photovoltaïque avec un algorithme MPPT et régulateur de tension (PI)	22
Figure II.2	Schéma simplifié d'un générateur photovoltaïque (GPV)	23
Figure II.3	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	23
Figure II.4	Symbole du Convertisseur DC/DC	25
Figure II.5	Convertisseur élévateur (Boost)	26
Figure II.6	Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et Ts pour un Boost	26
Figure II.7	Circuit électrique d'hacheur abaisseur.	27
Figure II.8	Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonction du rapport cyclique D et la période Ts	28
Figure II.9	Schéma de principe d'adaptation par une commande MPPT et représente une Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec MPPT	29
Figure II.10	Organigramme de la méthode MPPT « perturbation-observation »	31
Figure II.11	Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance	33
Figure II.12	Schéma de Fonctionnement du régulateur MPPT	35
Figure II.13	Schéma différents types de machines à courant continu	37
Figure II.14	Schéma électrique d'une MCC à excitation séparée	38
Figure II.15	Différentes types des pompes	41
Figure II.16	Schéma explicatif d'une pompe centrifuge	43

Chapitre III		
N° de figure	Titres	Pages
Figure III.1	Modèle de générateur PV réalisée dans MATLAB/Simulink (Subsystem)	46
Figure III.2	Modèle de générateur PV réalisée dans MATLAB /Simulink	47
Figure III.3	Caractéristique P =f (V) d'un panneau PV	47
Figure III.4	Caractéristique I=f (V) d'un panneau PV	48
Figure III.5	Modèle de générateur PV réalisée dans MATLAB /Simulink (Différence de températures)	48
Figure III.6	Caractéristique I=f(V) d'un GPV pour différents niveaux de Température	49
Figure III.7	Caractéristique P=f(V) d'un GPV pour différents niveaux de Température	49
Figure III.8	Modèle de générateur PV réalisée dans MATLAB / Simulink . (Variation de l'irradiation)	50
Figure III.9	Caractéristique I /V d'un GPV pour différents niveaux d'éclairement	51
Figure III.10	Caractéristique P/V d'un GPV pour différents niveaux d'éclairement	51
Figure III.11	Simulation de convertisseur DC/DC Booste dans MATLAB/ Simulink	52
Figure III.12	Caractéristiques de la tension de sortie et la tension d'entrée du convertisseur booste	53
Figure III.13	Model de simulation du système photovoltaïque	54
Figure III.14	Courbes des puissances d'entrée et de sortie de DC/DC Boost dans les conditions standards	54
Figure III.15	Courbes des tensions d'entrée et de sortie de DC/DC Boost dans les conditions standards.	55
Figure III.16	Variations du profile de température	56
Figure III.17	Courbes des puissances (Entrée/sortie) avec la variation de température.	56
Figure III.18	Courbes des tensions (Entrée/sortie) avec la variation de température.	57
Figure III.19	Variations du profile d'éclairement.	58
Figure III.20	Courbes des puissances (Entrée/sortie) avec la variation d'éclairement.	58

Figure III.21	Courbes des tensions (Entrée/sortie) avec la variation des d'éclairement	59
Figure III.22	Simulation de convertisseur DC/DC BUCK dans MATLAB/SUMILINK	60
Figure III.23	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur BUCK.	60
Figure III.24	Schéma bloc dans MATLAB/SUMILINK du système global.	61
Figure III.25	Courbes de courants de sortie du convertisseur Buck	62
Figure III.26	Réponse du convertisseur Buck.	62
Figure III.27	Schéma bloc d'une croupe Motopompe.	63
Figure III.28	Débit de la pompe $Q(t)$.	64
Figure III.29	La Vitesse	64
Figure III. 30	Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$.	65

Liste des tableaux

Chapitre I : Aperçu sur l'énergie renouvelable et le système photovoltaïque		
N° de page	Titres	Pages
I.1	Comparaison des sources d'énergie renouvelable existantes.	05
I.2	Les type de rayonnement	08
I.3	Comparatif des différentes technologies	11
I.4	Spécification site Naama	20

Chapitre II : MPPT avec un régulateur de tension		
N° de page	Titres	Pages
II.1	Avantages et les inconvénients pour les méthodes de (P&O) et (INC)	34
II.2	Caractéristiques du régulateur PID	37

Chapitre III : Simulation, résultats et discussions		
N° de page	Titres	Pages
III.1	Evaluation du régulateur PID	63

Liste d'abréviation

EnR : énergies renouvelables

PV : photovoltaïque

GPV : Générateur photovoltaïque

Si : silicium

EVA : éthylène-acétate de vinyle

MPPT : Maximum Power Point Tracking

MOSFET : transistors à effet de champ d'oxyde de métal

IGBT : transistors bipolaires à gâchette isolée

D : rapport cyclique de commutation

d : diode

L : l'inductance

S : l'interrupteur

N_p : Nombre de modules connectés en parallèle

N_s : Nombre de cellules connectées en série par module

P&O : perturbation et d'observation

INC : incrémental conductance

PPM : point de puissance maximum

PID : Régulation Proportionnelle Intégral Dérivé

MCC : machines à courant continu

HMT : hauteur manométrique totale

B_p : bande proportionnelle

Les constants

q = $1,602 \cdot 10^{-19}$ charge de électron

k = $1,38e^{-23}$ j/k Consante de Boltzmann

Symbole	Nom	Unité
T	Température	[°C]
G	Eclairement	[W/m ²]
U	Tension	[V]
I	Courant	[A]
P	Puissance	[W]
F	Fréquence	[H]
λ	Longueur d'onde	[μm]
Rs	Résistance Série	[Ω]
Rsh	Résistance Shunt	[Ω]
Iph	Photo courant	[A]
Id	Courant de diode	[A]
Ish	Le courant de résistance Shunt	[A]
Irs	Courant de saturation de le diode	[A]
Vd	Tension aux bornes la diode	[v]
Vt	Potentiel thermique	[v]
N	Facteur d idéalité de la diode (facteur d'achèvement)	/
I₀	Courant de saturation de inverse de la diode	[A]
V_{pv}	Tension du panneau photovoltaïque	[v]
I_{pv}	Courant du panneau photovoltaïque	[A]
V_{op}	Tension de la valeur optimale	[v]
V_{oc}	Tension à vide	[v]
I_{cc}	Courant de court-circuit	[A]
V_s	Tension de sortie	[v]

Introduction
général

INTRODUCTION

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, l'augmentation de la consommation d'énergie électrique avec des combustibles fossiles (pétrole, charbon, naturel gaz, etc...) a toujours fourni des coûts adéquats, et en conséquence de nombreux problèmes tels que la crise de l'énergie et plus récemment le changement climatique. Par conséquent, la production d'énergie fossile est responsable de 40% des émissions mondiales de CO₂ des serres et de la durabilité de notre civilisation est gravement menacée par la demande mondiale d'énergie. En effet la recherche d'autres sources d'énergie alternatives est nécessaire pour réduire les émissions de dioxyde de carbone et assurer une énergie sûre, propre et abordable.

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus utilisées. Elle est totalement gratuite, ne produit aucune pollution, largement disponible, aucune émission d'empreinte carbone, ce qui la rend une source attrayante pour produire de l'électricité destinée aux applications industrielles et domestiques.

La moitié de la population des pays en voie de développement n'ont pas d'accès sûr à l'eau potable. Cette dernière est à l'origine de 80 % des maladies et de la pauvreté dans ces pays. Les efforts pour surmonter ce problème ont donné à des programmes tels que le pompage de l'eau une priorité importante. Dans beaucoup de régions, ce but peut être réalisé seulement par l'utilisation des nappes souterraines. Dans les régions éloignées des réseaux électriques, il y a des diverses possibilités pour se servir de ces nappes : pompes à main, pompes diesel, pompes solaires, etc.

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage solaire ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie solaire et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique [1].

Dans cette optique, l'objectif assigné à ce travail est l'étude d'une régulation optimisée d'une tension d'un système **PV** autonome à partir d'un contrôleur **PID** et une commande **MPPT** avec une charge (moteur à courant continu et pompe).

Pour atteindre ce but, le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les notions de base concernant l'énergie renouvelable et nous décrivons sur les systèmes photovoltaïque.

INTRODUCTION

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des systèmes photovoltaïque en partant du modèle de la cellule solaire. On étudiera quelques types des convertisseurs **DC-DC** utilisés dans les systèmes **PV** telle que Boost et Buck, puis on présentera l'algorithme de l'approche "Perturb & Observe" qui permet de rechercher le point de puissance maximale des panneaux solaires. A la fin nous présenterons la charge (moteur à courant continu et pompe).

Le dernier chapitre, il fera l'objet de l'étude de simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque (panneau solaire, hacheur, **MPPT**), l'obtention des caractéristiques courant – tension et puissance – tension et l'étude de l'influence des paramètres (température, ensoleillement) sur ces caractéristiques. Ensuite, l'étude de l'ensemble moto –pompe où on exposera les résultats de simulation validant la chaîne complète.

Enfin, on terminera ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

*Aperçu sur l'énergie
renouvelable et le système
photovoltaïque*

I.1 Introduction

L'énergie solaire est extrêmement populaire en tant qu'énergie renouvelable. Elle repose à la conversion directe du rayonnement électromagnétique solaire en électricité. Cette conversion représente une transformation écologique et silencieuse de l'énergie solaire, réalisée grâce à un dispositif appelé "panneau solaire" qui se base sur l'effet photovoltaïque [2].

Dans le présent chapitre, nous allons aborder de manière générale l'énergie photovoltaïque et les notions fondamentales concernant le rayonnement solaire. Cette approche permettra de mieux appréhender les résultats obtenus dans le cadre de cette étude. En conclusion, nous présenterons le système photovoltaïque en soulignant ses avantages et inconvénients.

I.2 Energies renouvelables

I.2.1 Définitions :

Il s'agit des énergies dérivées de processus naturels en perpétuel renouvellement. Il existe plusieurs formes d'énergies renouvelables (**EnR**), notamment l'énergie générée par le soleil (photovoltaïque (**PV**) ou thermique), le vent (éolienne), l'eau des rivières et des océans (hydraulique, marémotrice...), la biomasse, qu'elle soit solide (bois et déchets d'origine biologique), liquide (biocarburants) ou gazeuse (biogaz ainsi que la chaleur de la terre (géothermie). **EnR** purement électriques comprennent l'hydraulique, l'éolien, l'énergie marémotrice, le solaire **PV**.

Les énergies renouvelables thermiques comprennent le bois de chauffage (ramasse ou commercialisé), les résidus de bois et de récoltes incinérés, les déchets urbains et industriels d'origine biologique incinérés, le biogaz, les biocarburants, le solaire thermique, la géothermie valorisée sous forme de chaleur ou d'électricité, le froid direct et les pompes à chaleur [3].

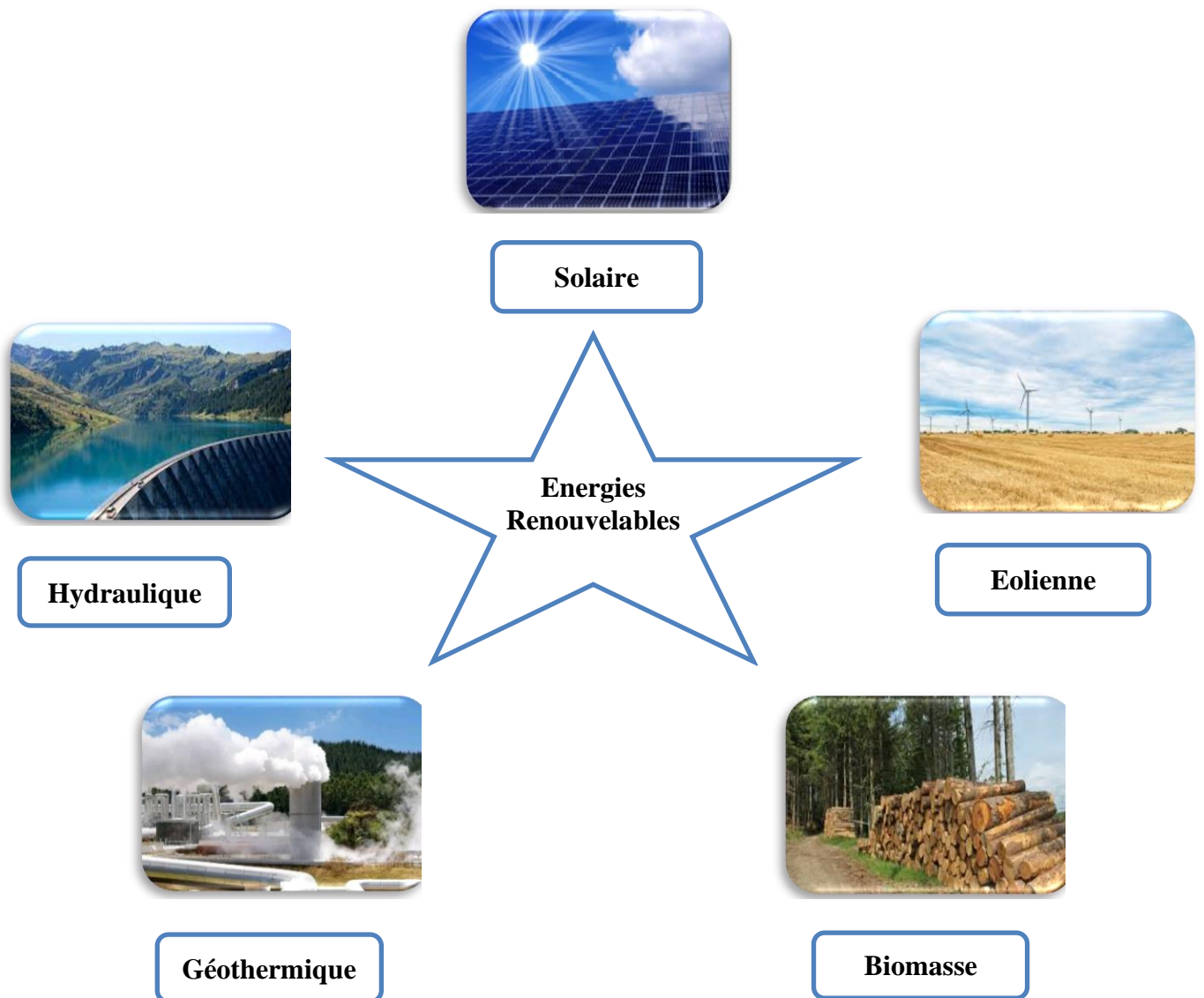


Figure I.1 : Sources d'énergie renouvelables [3]

I .2.2 Type de l'énergie renouvelable

Une synthèse des différentes sources d'énergie renouvelable actuellement disponibles est proposée dans **tableau 01**.

Tableau 01 : Comparaison des sources d'énergie renouvelable existantes.

Source	Définition	Avantages	Inconvénients
Énergie Solaire	Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires : [4].[5] . L'énergie passive . L'énergie solaire thermique	-Niveau de maturation -Coûts faibles -Peu de restrictions géographiques [6].	-Intermittence jour-nuit -Variabilité due à la nébulosité -Prévisibilité faible [6].
Énergie Eolienne	L'énergie éolienne est produite sous forme d'électricité par une éolienne. Des éoliennes formées d'un mat surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées [7].	-Niveau de maturité. -Coûts faibles (éolien terrestre) [6].	-Variabilité ressource. -Infrastructures pour installations en mer coûteuses et complexes [6].
Énergie Hydraulique	Energie cinétique et potentielle contenue dans les cours d'eau, convertie en électricité par une centrale hydroélectrique (barrage) [6].	-Puissance élevée. -Stockage par barrages. [6]	- Infrastructures complexes et parfois coûteuses, souvent dans des zones montagneuses. -Impact environnemental [6].
Biomasse	Energie qui peut être produite à partir de matériaux organiques et transformé en électricité dans une centrale électrique spécifique par le processus de combustion ou de méthanisation [6].	-Disponibilité (aucune intermittence). -Impact environnemental. [6]	-Contrôle des polluants émis [6].
Géothermique	Energie qui peut être extraite de la chaleur du sol et convertie en électricité par une pompe a chaleur ou une installation hydrothermique [6].	-Disponibilité (aucune intermittence). [6]	-Coûts. [6]

I.3 Présentation de l'énergie solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1 390 000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'Hydrogène, 19% d'Hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermo nucléaire Hydrogène –Hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'Hydrogène en 560 millions tonnes d'Hélium. La réaction de fusion se fait dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius [8].

I.4 rayonnement solaire

I. 4.1 Différentes composantes du rayonnement solaire

L'atmosphère déforme considérablement le rayonnement électromagnétique solaire, également connu sous le nom de rayonnement électromagnétique solaire, qui est produit par le soleil. Cela ne permet que la réception à la surface des deux composantes principales et les plus actives du rayonnement solaire total, à savoir le rayonnement direct et diffus. L'albédo est la portion du rayonnement solaire global qui est réfléchi par le sol, comme illustré dans la figure I.2 suivant [9].

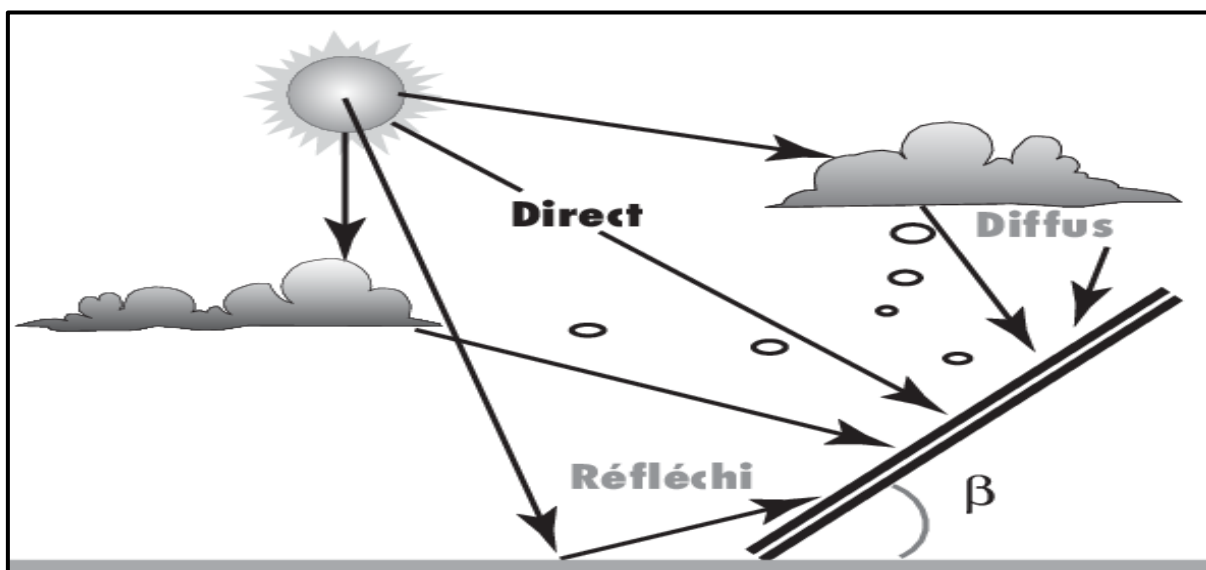


Figure I.2 : Radiation solaire globale sur un plan incliné [9]

I.4.2 Spectre du rayonnement

Il existe des «grains» de lumières appelées photons qui constituent le rayonnement électromagnétique. L'Énergie et la longueur d'onde de chaque photon sont directement liées λ

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à **5800° K**. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [10] :

Ultraviolet UV	0.20 < λ < 0.38 μm	6.4%
Visible	0.38 < λ < 0.78 μm	48.0%
Infrarouge IR	0.78 < λ < 10 μm	45.6%

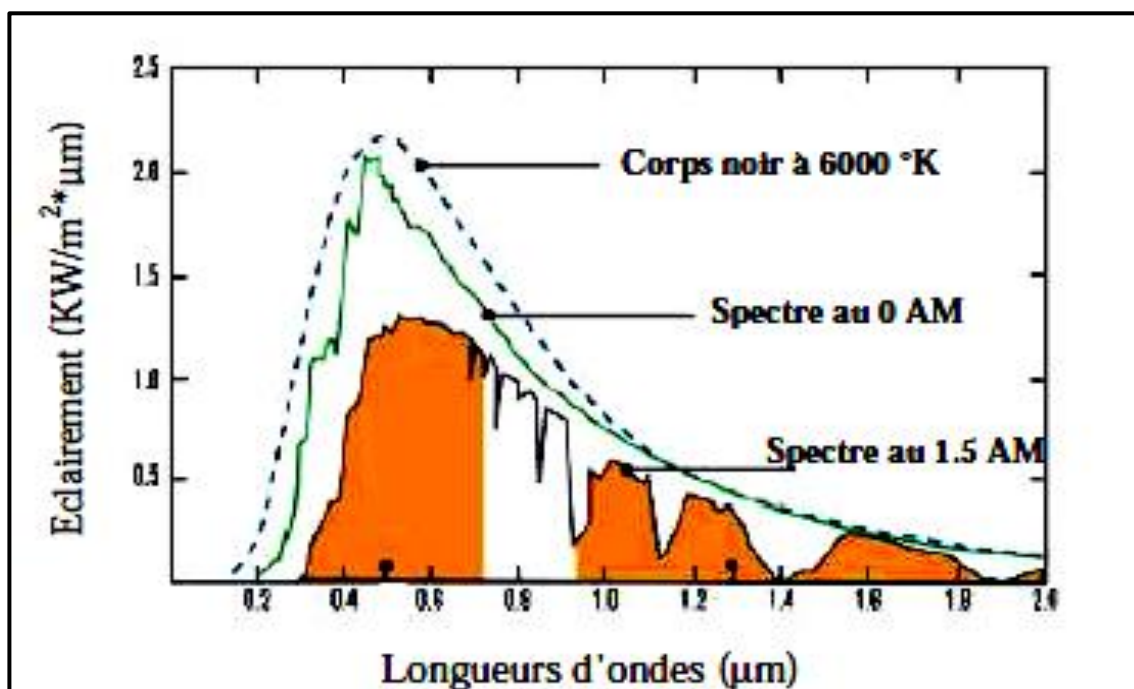
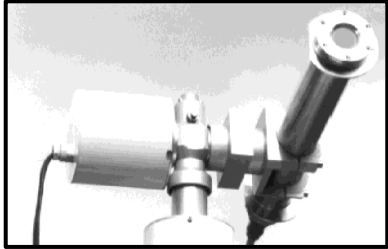





Figure I.3 : spectre de rayonnement [10]

I.5 Types du rayonnement solaires

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue un nombre composant le **tableau 02** suivant :

Tableau 02 : les types de rayonnement

Type de rayonnement	Définition	Appareil de mesure
Direct	Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil [11].	 <p>Le pyranomètre [12]</p>
Diffus	Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité). Il est le rayonnement qui arrive au niveau au sol après avoir subi des collisions avec les constituants atmosphériques [13].	 <p>Le pyranomètre [14]</p>
Albedo (Réfléchi)	C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol des objets qui se trouvent à sa surface. Il est important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [13].	 <p>L'Albédo mètre [14]</p>
Global	Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface [15].	 <p>Le pyranomètre [12]</p>

I.6 Energie solaire photovoltaïque

I.6.1 Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (**PV**) exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques .

Une cellule **PV** est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau .

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium (**Si**)). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que **Si**). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau **p**. voici la **figureI.4** :

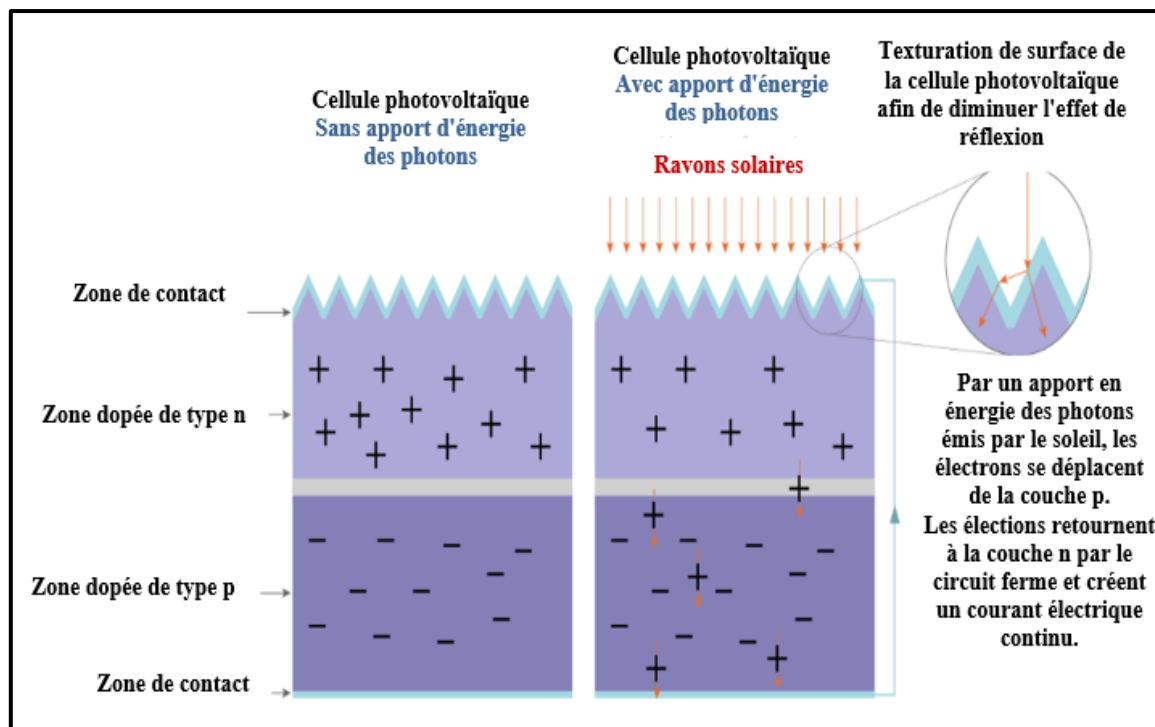


Figure I.4 : Constitution d'une cellule photovoltaïque [16]

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches **n** et **p**. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche **p**, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche **n**. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité [16].

I.6.2 Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse solaire en électricité grâce à la synthèse d'un matériau semi-conducteur (cellule **PV**) [17]. À condition cette transformation ne peut se faire sans capteur qui, absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Dans une cellule **PV**, lorsqu'un photon (particule de lumière) est absorbé par le semi-conducteur, il donne naissance à un électron et à un "trou". En effet, ce photon va transmettre son énergie à un électron (particule négative) qui va alors se libérer de l'attraction de son noyau et donc laisser un "trou" (chargé positivement) derrière lui. Pour obtenir un courant électrique, les charges positives ("trous") et négatives (électrons) doivent être séparées puis attirées vers l'extérieur. C'est à ce moment qu'intervient le champ électrique interne créé par la jonction **P.N** : c'est lui qui va repousser les électrons dans la zone **N** et donc séparer les charges. Les porteurs de charges sont ensuite, collectés par l'intermédiaire d'une grille, qui fait office d'anode, à l'avant et un contact, qui fait office de cathode, à l'arrière. On obtient alors une tension continue d'environ **0,5 V** entre ces électrodes [18].

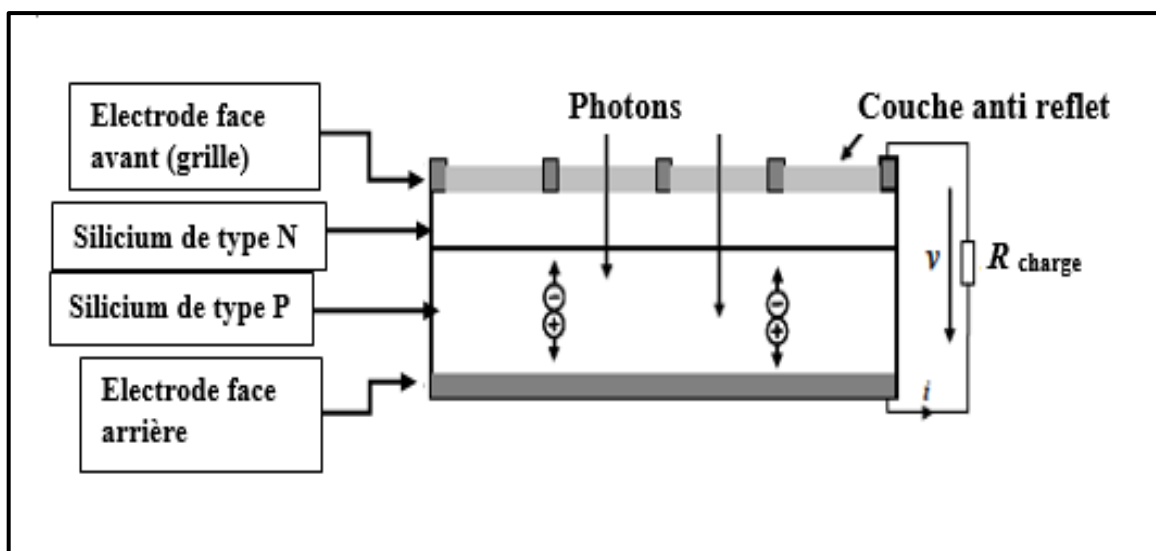


Figure I.5 : Schéma d'une cellule photovoltaïque [19]

I.6.3 Classification des cellules PV

Tableau 03 : Comparatif des différentes technologies [20]

Les cellule	Définition	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisation
Silicium monocristallines	Le panneau solaire monocristallin est composé d'un seul cristal de silicium. Le panneau solaire monocristallin a un aspect plus sombre que le panneau polycristallin. De manière général elle plus performant, mais également plus coûteux [21].	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30ans	-Très performant -Stabilité de production -Méthode de production couteuse et laborieuse.	-Aérospatiale -Modules pour toits, façades...
Silicium polycristallines	Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [21].	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30ans	-Adapté à la production à grande échelle. -Stabilité de production, plus de 50% du marché mondial.	-Modules pour Toits, façades, générateurs
Silicium amorphe	Elle a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, un rendement qui ne dépasse pas les 8% [22]. Il peut fonctionner à la présence d'un faible éclairnement et son coût de production est le plus bas [22].	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 quelque mois.	-Appareils électroniques (montres, calculatrices...), Intégration dans le bâtiment

I.7 Module photovoltaïque

Les modules solaires photovoltaïques sont des combinaisons en série ou en parallèle de cellules solaires individuelles. La cellule **PV** primaire est un générateur de très faible puissance par rapport aux besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Pour générer plus d'électricité, plusieurs cellules doivent être assemblées pour créer des modules ou des panneaux photovoltaïques. Les cellules sont protégées de l'humidité en étant encapsulées dans un polymère **EVA** (éthylène-acétate de vinyle) et protégées sur la face avant par un verre trempé à haute transmittance et bonne résistance mécanique [23].

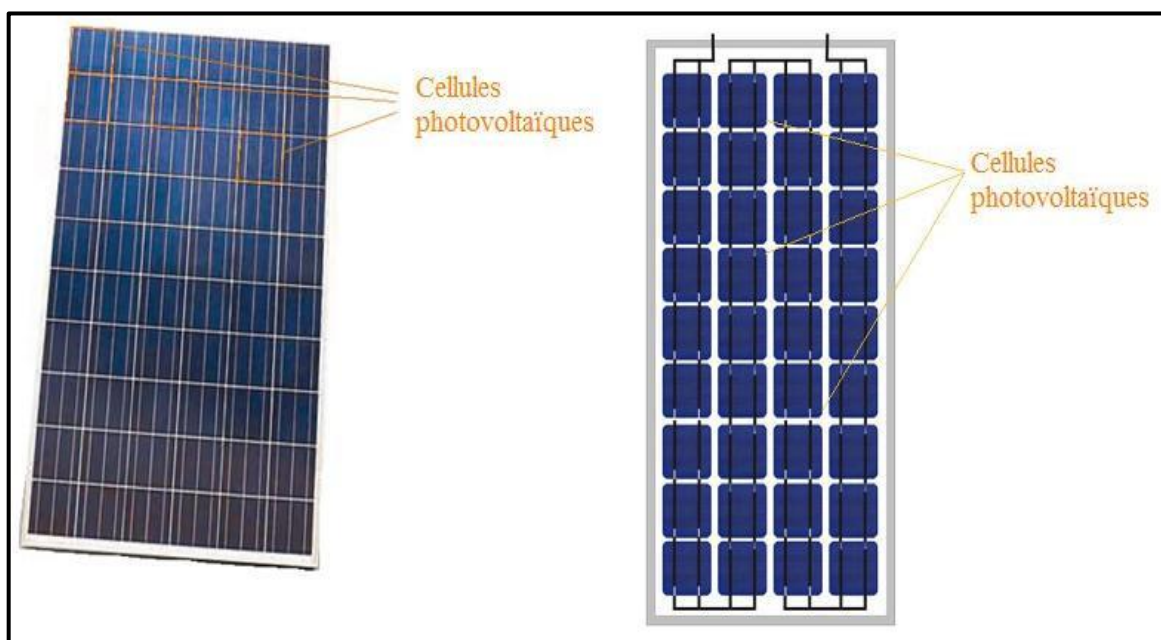


Figure I.6 : Module photovoltaïque

I.7.1 Mise en série/parallèle

I.7.1.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant les **figures (I.6 ; I.7)**. La caractéristique résultante du groupement de la **figure (I.8)** est obtenue par addition des tensions à courant donné ($I_1=I_2= \dots=I_n=I$) [24].

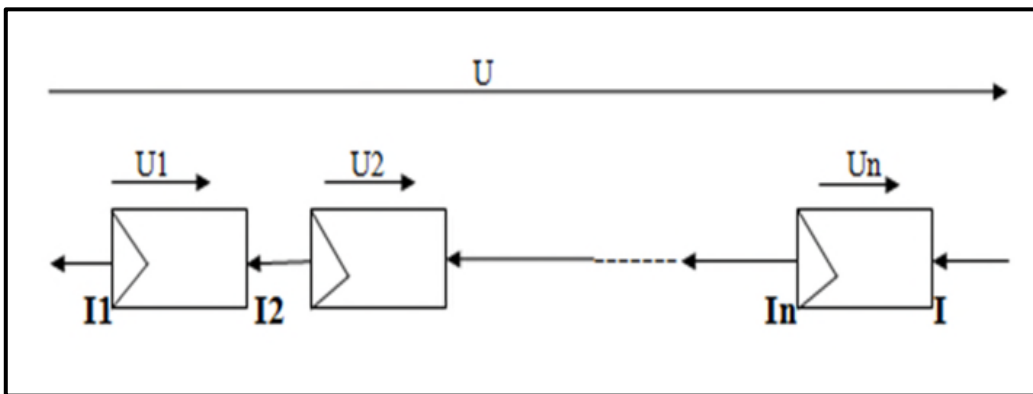


Figure I.7 : schéma équivalent d'association série des panneaux PV [24]

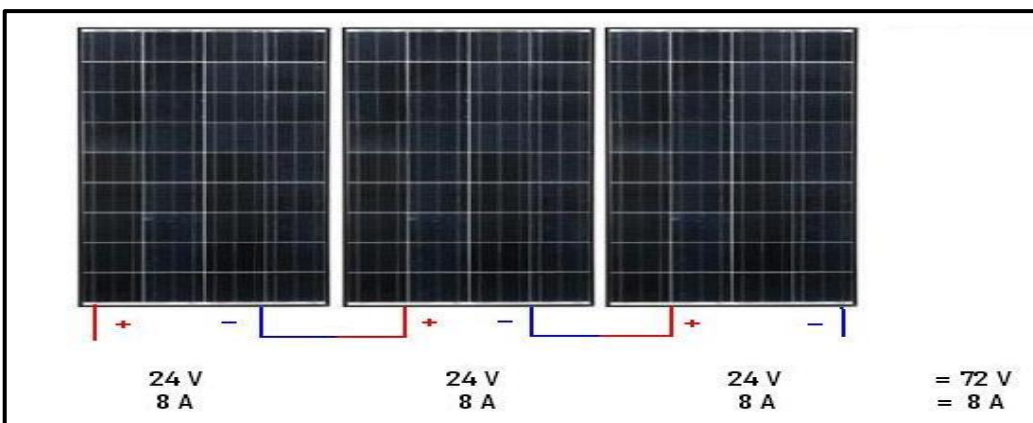


Figure I.8 : Montage série des panneaux photovoltaïques [25].

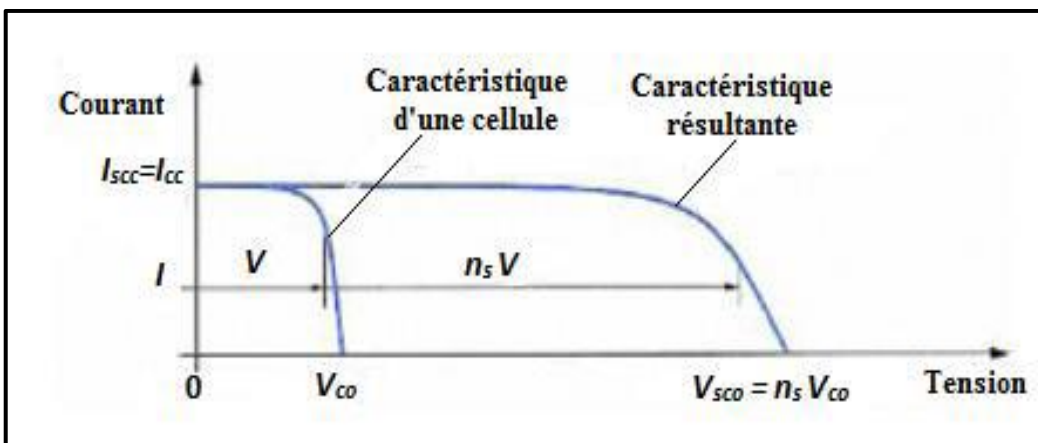


Figure I.9 : Caractéristique résultante d'un groupement de N_s cellules en série [8].

I.7.1.2 Association en parallèle

Une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé les figures (I.9 ; I.10). La caractéristique

résultante du groupement de N_p cellules identiques connectées en parallèle est représentée sur la **figure I.11**, les cellules sont soumises à la même tension ($V_1=V_2= \dots=V_n =V$) [24].

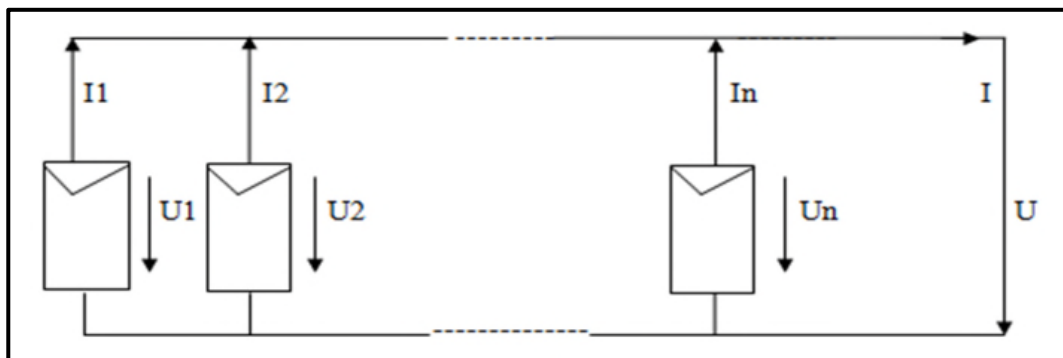


Figure I.10 : schéma équivalent d'association parallèle des panneaux PV [24]

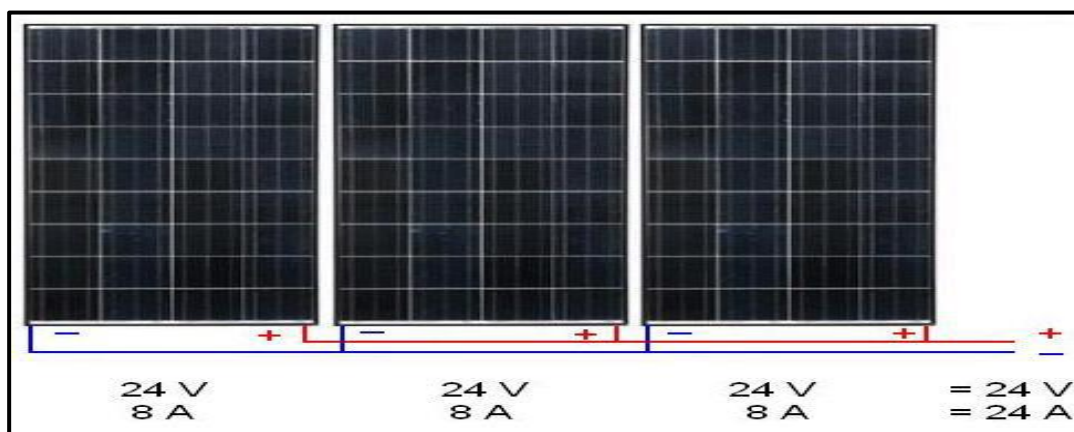


Figure I.11 : Montage parallèle des panneaux photovoltaïques [25]

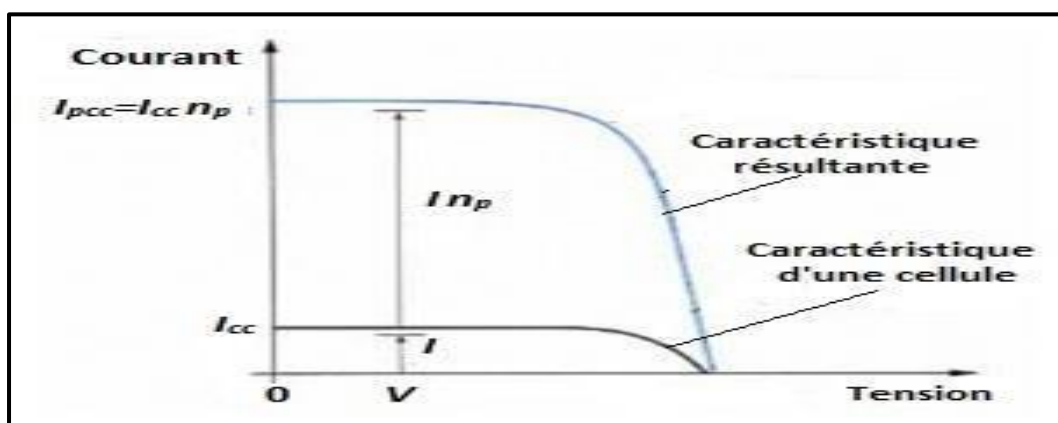


Figure I.12 : Caractéristique résultante d'un groupement de N_p cellules en parallèle [8].

Un groupement parallèle pur des cellules pour la construction d'un module, n'est généralement pas convenable, car un grand courant nécessite une section de câblage plus grande [24].

En plus, une tension basse occasionne des pertes relativement élevées. Pour ces raisons, un groupement en série est plus approprié [24].

I.7.1.3 Association série et parallèle

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{co} sont plus ou moins importantes (**figure I.13**) La caractéristique d'un **GPV** constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [26].

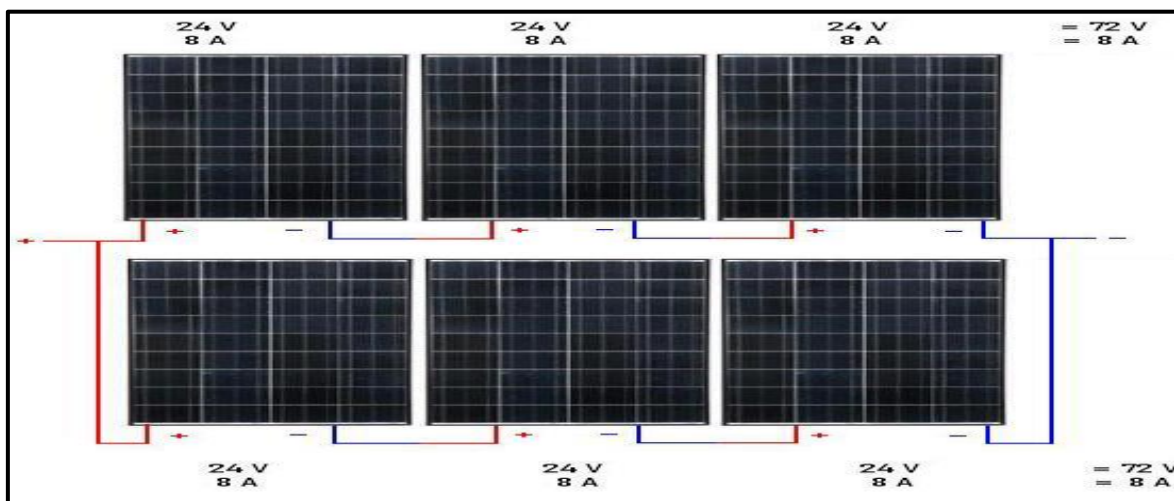


Figure I.13: Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(N_p + N_s)$ panneau identiques [25].

I .7.2 Système photovoltaïque

Il existe une grande variété d'application de l'énergie solaire photovoltaïque. Tout d'abord, il faut distinguer les applications dans le système isolés et des applications **PV** raccordées au réseau électrique, voici la **figure I.14** Suivante qui représente un exemple d'un système PV [27]

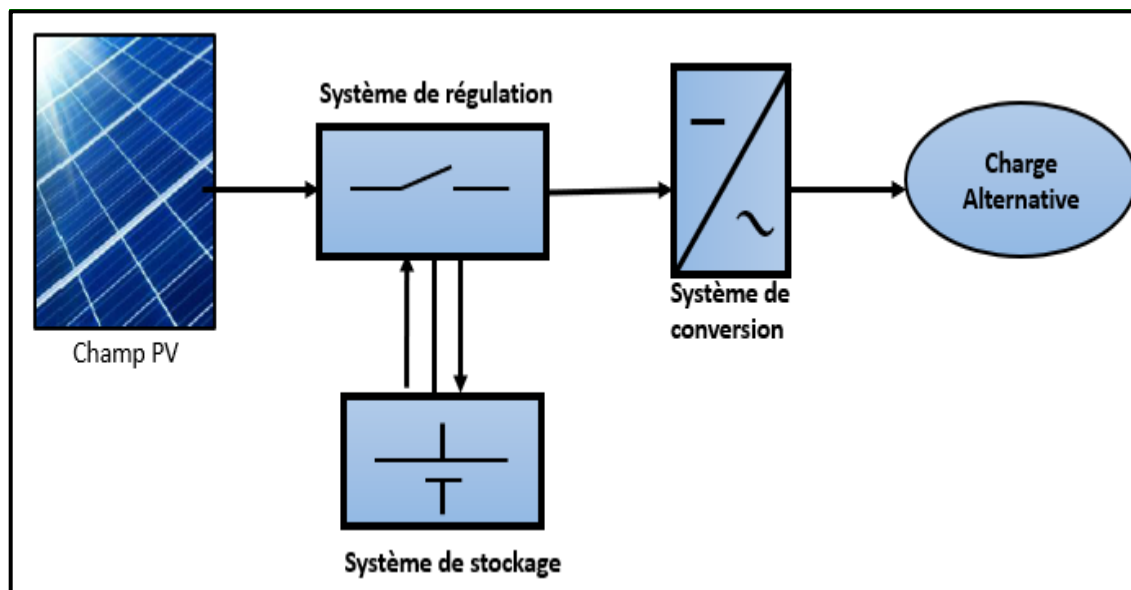


Figure I.14 : Schéma d'un système photovoltaïque [27]

I.7.3 Types de Système PV

I.7.3.1 Système PV autonome

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. En général, ces systèmes sont utilisés dans des zones isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes PV autonomes sont classés comme suit [28] :

a) Système PV autonome sans stockage électrochimique

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage, soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompe à eau : le réservoir d'eau sert de stockage) [28].

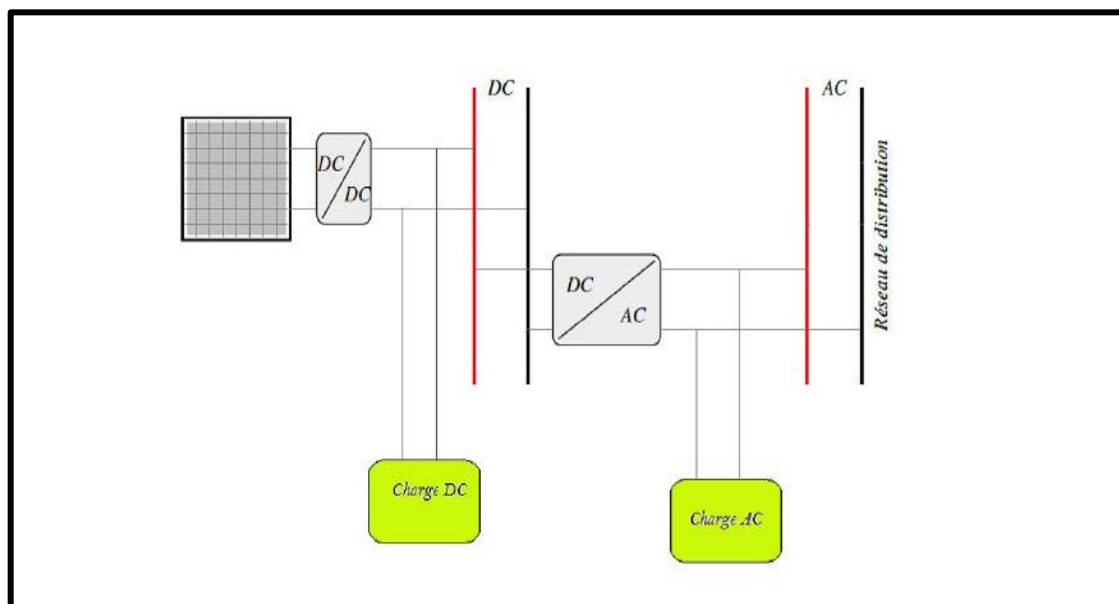


Figure I.15 : Système PV autonome sans stockage électrochimique [30]

b) Système PV autonome avec stockage électrochimique

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ **PV** sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour [28].

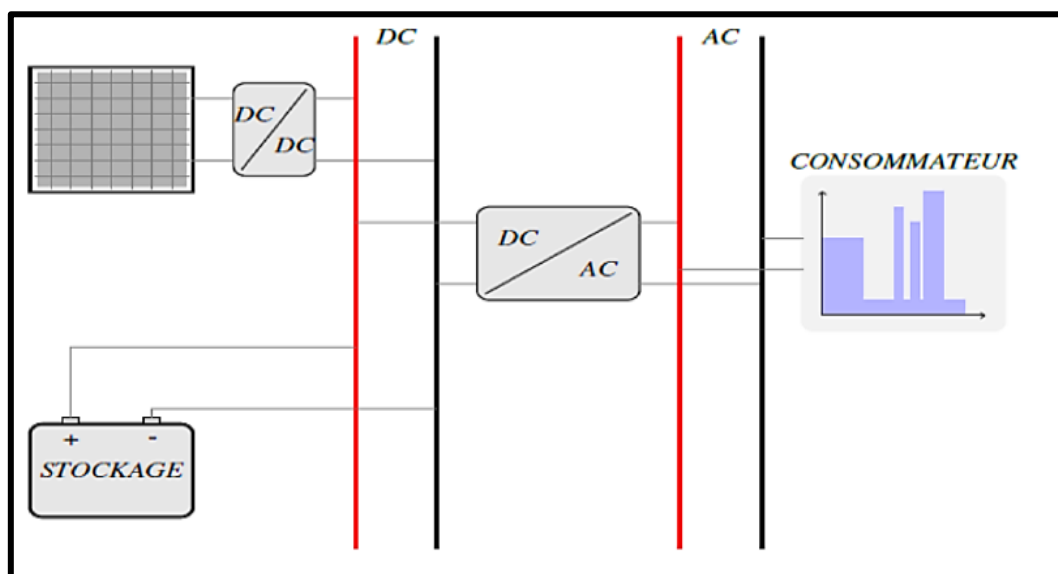


Figure I.16 : système photovoltaïque autonome [29]

I.7.3.2 Système PV connecté au réseau

La **figure I.17** représente un système photovoltaïque connecté au réseau dont le rôle principal est de faciliter la production d'électricité à partir de sources renouvelables sur le réseau. D'un point de vue physique, l'énergie générée par les modules est directement consommée par les charges locales de l'habitation. Tout excédent de production par rapport à la consommation instantanée est injecté dans le réseau. Le réseau est utilisé pour compléter la production **PV** [28].

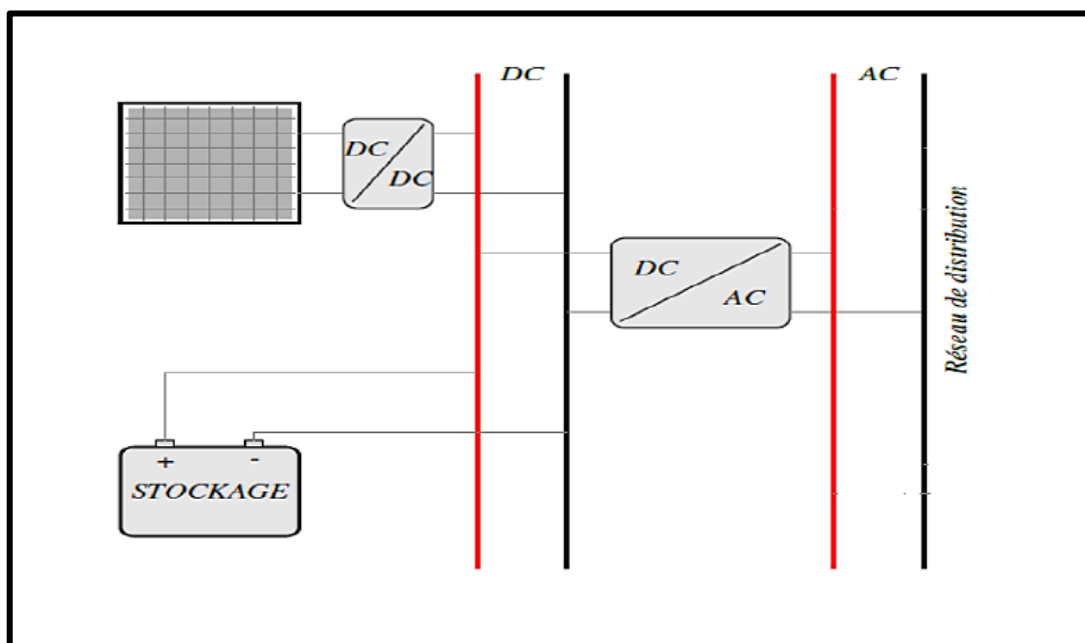


Figure I.17 : Exemple de la structure d'un système **PV** connecté au réseau [29].

I.7.3.3 Système PV autonome hybride

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes. On prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, ce qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque (**GPV**) seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un généra **GPV** et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène..., et même parfois le réseau public d'électricité. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimisées.

Etant entendu que les sources thermiques et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [28].

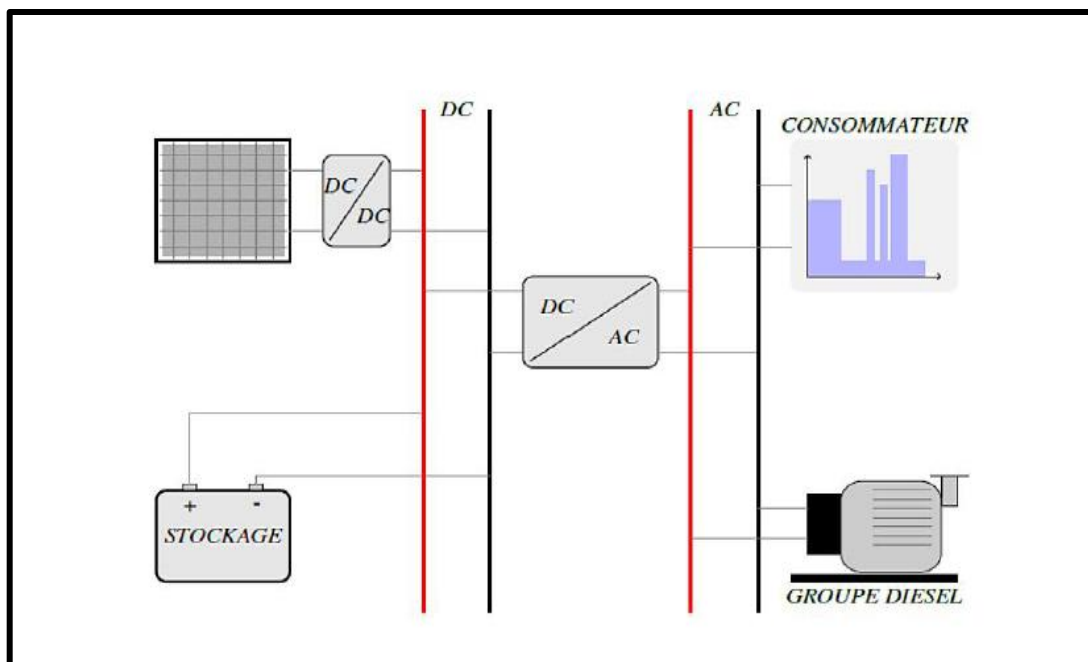


Figure I.18 : Schéma d'un système PV hybride [29]

I .8 Situation actuelle d'énergie photovoltaïque en Algérie [30]

L'énergie photovoltaïque, une forme d'énergie renouvelable, joue un rôle significatif dans l'état des énergies renouvelables en Algérie. En raison de l'ensoleillement abondant dont bénéficie le pays, l'énergie solaire photovoltaïque est devenue une priorité majeure dans sa transition énergétique.

L'Algérie a mis en place des politiques et des programmes pour encourager l'installation de systèmes photovoltaïques à petite et grande échelle. Des projets solaires de grande envergure, tels que le complexe solaire de Hassi R'mel, ont été développés et contribuent de manière significative à la production d'électricité propre. Ces installations solaires de grande capacité permettent de répondre aux besoins croissants en énergie du pays tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

En parallèle, l'Algérie encourage également l'adoption de l'énergie solaire photovoltaïque au niveau résidentiel et commercial. Des incitations financières et des programmes de subvention sont proposés pour promouvoir l'installation de panneaux solaires sur les toits des bâtiments. Ces initiatives visent à stimuler l'autoproduction

d'électricité solaire, à réduire les factures d'énergie et à promouvoir une utilisation plus durable des ressources.

Cependant, malgré les progrès réalisés, il reste des défis à relever pour développer davantage l'énergie photovoltaïque en Algérie. Cela inclut la nécessité de renforcer les capacités techniques, d'améliorer les infrastructures de transmission et de distribution de l'électricité solaire, ainsi que de garantir la durabilité et la maintenance des installations existantes. Néanmoins, l'Algérie est résolue à exploiter pleinement son potentiel solaire pour diversifier son mix énergétique, réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et promouvoir un avenir énergétique plus propre et plus durable.

I.8.1 spécification de la région de Naâma

Dans cette partie les données climatiques utilisées à partir de la station météorologique de Naâma. Ces données ont été fournies par l'O.N.M (Office National de la Météorologie). Et se caractérisent comme suit :

Tableau 04 : les principales caractéristiques d la station de référence (Naâma).

Caractéristique de Station	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Distance approximative à la surface (m)	Rayonnement solaire journalier (KW)
Naâma	1166	33°16' N	00°18W	8	4,42

I.9 Avantage et inconvénient de L'énergie photovoltaïque [31]

I.9.1 Avantage

- ✚ L'énergie solaire est inépuisable et ne pollue pas,
- ✚ Les panneaux solaires peuvent être installés partout (maison, hangar, bâtiment, et même certains véhicules !),
- ✚ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïque est faible,
- ✚ Une installation ne nécessite pas d'entretien régulier, et l'entretien est peu coûteux,
- ✚ Une installation est rentable dans près de **90%** des cas.
- ✚ L'Etat vous aide à passer plus facilement à l'énergie solaire en mettant en place des primes et subventions,
- ✚ Les panneaux photovoltaïques ont une garantie constructrice de **20** ans en moyenne et ont une durée de vie d'environ **30** ans et plus.

- ✚ Production très stable et prédictive d'une année sur l'autre contrairement à l'éolien par exemple

I.9.2 Inconvénient

- ✚ Le coût d'investissement d'une installation est élevé, même s'il reste rentable sur la durée des contrats,
- ✚ Les panneaux photovoltaïques fonctionnent uniquement quand il y a du soleil... mais le solaire est efficace partout. Pour preuve, l'essor du photovoltaïque en Allemagne et dans les pays scandinaves.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs notions essentielles concernant le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous examinons ensuite en détail le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différents types existants. Enfin, nous présentons les différents systèmes PV ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le chapitre suivant se concentre sur la modélisation du système **PV** en utilisant l'**MPPT** (Maximum Power Point Tracking) et le régulateur de tension.

Chapitre II
Modélisation de
l'ensemble GPV-BOOST-
MPPT-BUCK-MOTEUR-
POMPE

II.1 Introduction

Un système photovoltaïque est constitué de plusieurs éléments interconnectés conçus pour accomplir une tâche bien définie, qui peut être de fournir de l'électricité à un réseau de distribution public, de pomper l'eau d'un puits, ou d'utiliser l'une des nombreuses possibilités d'utilisations de l'électricité solaire. Il est généralement constitué des modules photovoltaïques et des convertisseurs (Boost, et Buck), la commande **MPPT** et une régulation (tension, courant ou puissance).

Le schéma ci-dessous décrit le système que nous allons utiliser dans notre étude.

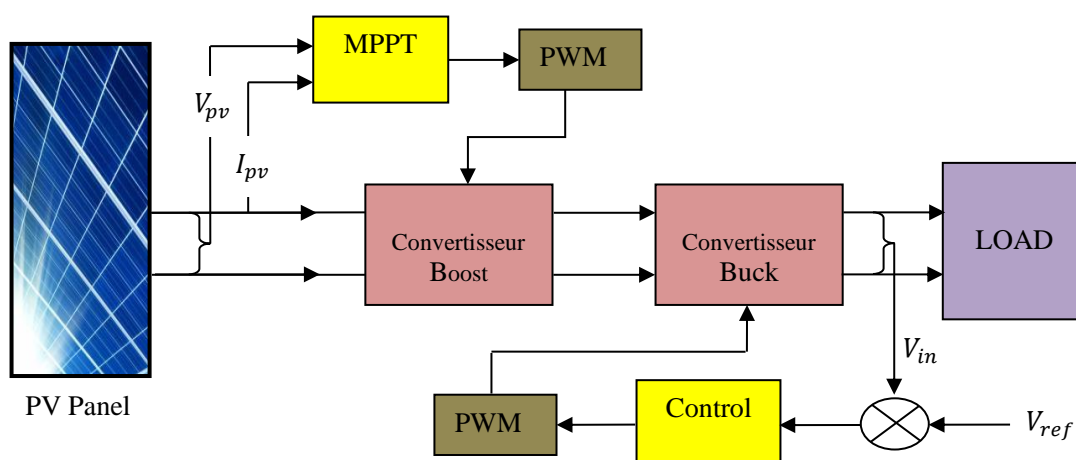


Figure II.1 : Système photovoltaïque avec un algorithme **MPPT** et régulateur de tension (**PI**)

II.2 Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement connectées en série et en parallèle, puis conditionnées sous verre pour obtenir des modules photovoltaïques. Les générateurs photovoltaïques sont constitués de modules interconnectés pour former une unité qui produit une puissance continue élevée compatible avec les équipements électriques couramment utilisés (**Figure II.2**). Les modules photovoltaïques sont généralement connectés en série et en parallèle pour augmenter la tension et le courant à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont installés sur le support métallique et inclinés à l'angle requis en fonction de la position, ce groupe de modules est généralement appelé le champ de module [32].

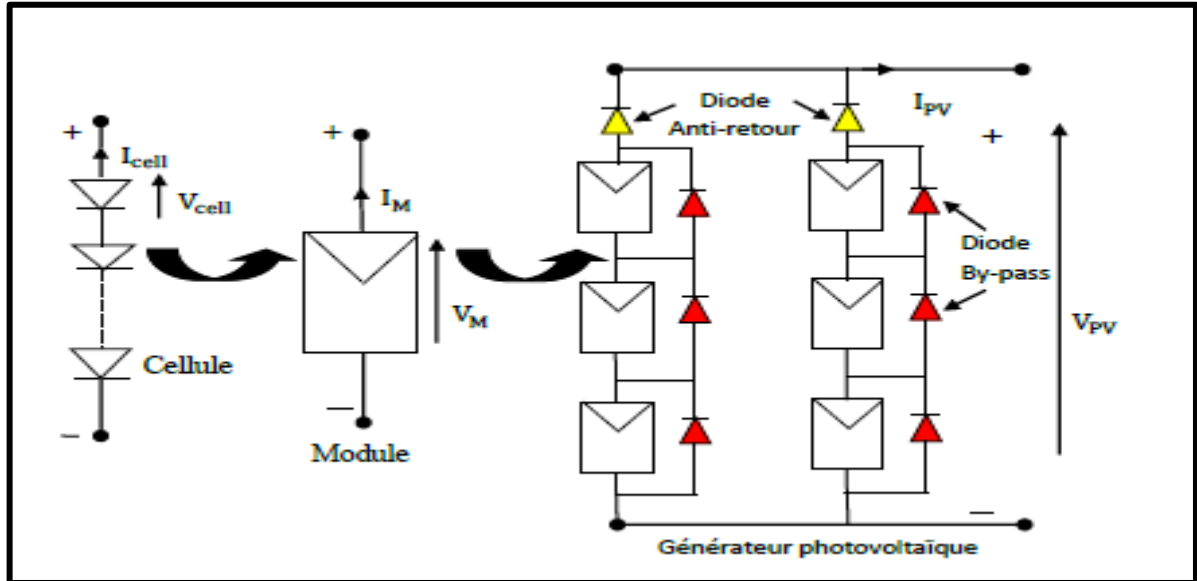


Figure II.2 : Schéma simplifié d'un générateur photovoltaïque (GPV) [33].

II.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque [34] [35]

Le circuit équivalent (réel) de la cellule PV est basé sur une diode, et deux résistances, séries R_s et shunt R_{sh} comme le montre le schéma électrique de la Figure (II.3).

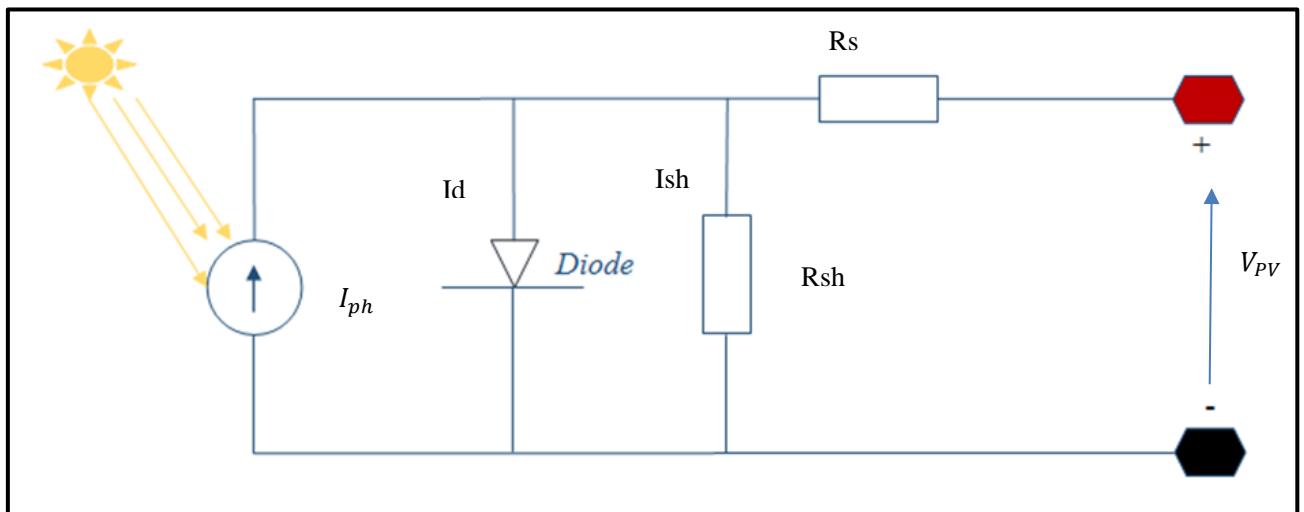


Figure II.3 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [35]

Le courant de sortie d'une cellule d'après la loi de Kirchoff est donné par l'expression :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.1)$$

Avec :

I : le courant délivré par la cellule (A)

I_{ph} : Photo courant(A)

I_d : Courant de diode(A)

I_{sh} : Le courant de la résistance shunt(A).

Avec

$$I_d = I_{rs} \left[e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right] q \quad (\text{II.2})$$

$$V = V_d - R_s \quad (\text{II.3})$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

$$I_{sh} = I_{ph} - I_{rs} \left[e^{\frac{v+R_s I}{V_t}} - 1 \right] - \frac{v+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

Ce qui donne :

$$I = I_{ph} - I_{rs} \left[e^{\frac{v+R_s I}{V_t}} - 1 \right] - \frac{v+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Ou :

I_{rs} : Courant de saturation de la diode [A]

V_d : Tension aux bornes de la diode [V]

V_t : Potentiel thermique [V], donné par :

$$V_t = nKT/q \quad (\text{II.7})$$

Avec :

q : Charge d'électron (1.602*10⁻¹⁹ C)

K : Constante de Boltzmann (1.38 e-23 j /k)

T : Température de la cellule [K]

n : Facteur d'idéalité de la diode

L'expression de la caractéristique est portée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(v_{pv} + R_s I_{pv})}{nkT} \right) \right] \quad (\text{II.8})$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode

n : Le facteur d'idéalité de la diode (ou facteur d'achèvement).

K : La constant de Boltzmann.

q : La charge de l'électron

T : La température de la cellule (kelvins).

Le générateur **PV** est simulé après modélisation mathématique suivant une série d'équations

(II.9) (II.10), (II.11) et (II.12) :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(v_{pv} + \frac{N_s}{N_p} R_s I_{pv} \right)}{N_s n k T} \right) \right]. \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$I_{ph} = [I_{sc} + N_i I_0 (T - TrK)] \frac{G}{1000} \quad (\text{II.10})$$

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{Trk}\right)^3 \left[\exp\left(\frac{qEg\left(\frac{1}{TrkT}\right)}{KT}\right) \right] \quad (\text{II.11})$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s n K T}\right) - 1} \quad (\text{II.12})$$

II.4 Convertisseur statique

II.4.1 Définition

Un convertisseur est un dispositif utilisé pour convertir la tension continue fournie par un panneau ou une batterie pour l'adapter à un récepteur fonctionnant sur une tension continue ou alternative différente [36].

II.4.2 Rôle des convertisseurs DC-DC

Pour la conversion de puissance, un rendement élevé doit être maintenu pour éviter la dissipation de puissance et éviter la surchauffe des composants électroniques. Par conséquent, toute conversion courant alternative doit s'articuler autour d'éléments de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et de commutateurs. L'interrupteur de puissance utilisé dépend du niveau de puissance à convertir ou à contrôler. Les **MOSFET** (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont généralement utilisés pour des puissances relativement faibles (quelques kilowatts), tandis que les **IGBT** (transistors bipolaires à gâchette isolée) sont utilisés pour des puissances plus élevées. Les thyristors ont été largement utilisés et acceptés dans les classes de puissance supérieures. La Figure II.4 montre un diagramme schématique d'un convertisseur **DC/DC**, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [37].

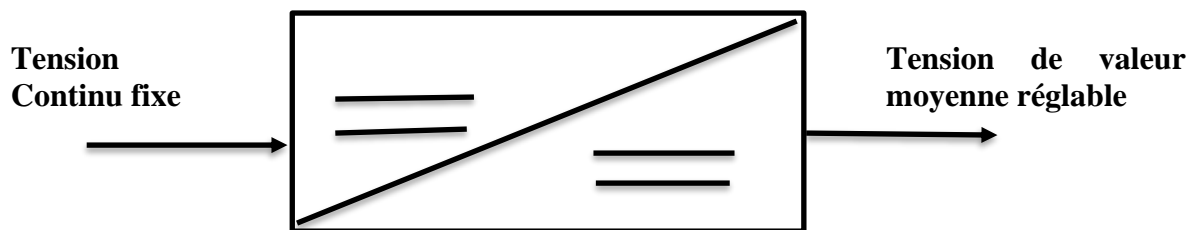


Figure II.4 : Symbole du Convertisseur DC/DC [37]

II.4.3 Convertisseurs statique BOOST

Un convertisseur élévateur « **Boost** » qui convertit la tension continue d'entrée en une tension de sortie plus élevée. Ce convertisseur comprend l'interrupteur (**S**), l'inductance (**L**), la diode qui protège **S** en empêchant le retour du courant et le condensateur l'inductance (**L**), la diode qui protège **S** en empêchant le retour du courant et le condensateur comme la **Figure II.5** suivante [38] :

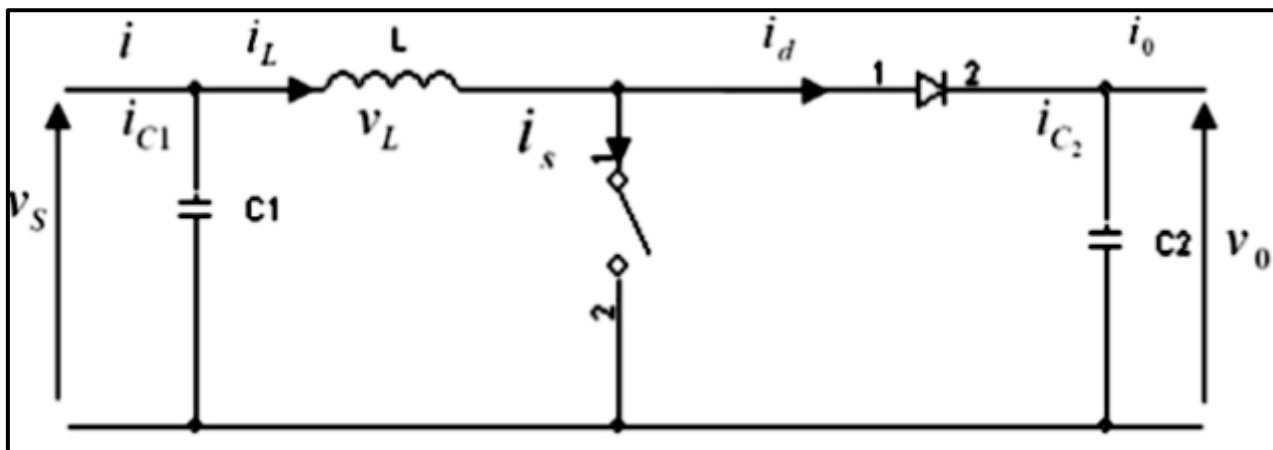


Figure II.5 : Convertisseur élévateur (**Boost**) [38]

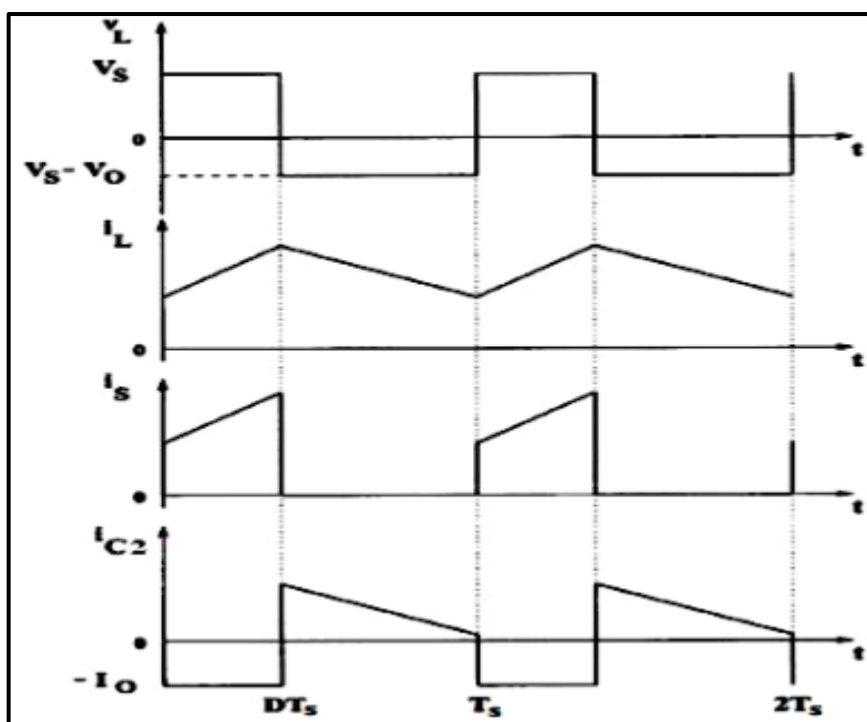


Figure II.6 : Tensions et courants d'entrée et de sortie en **D** et **T_s** pour un **Boost** [38]

Selon la **Figure II.6**, **S** se ferme et la diode est polarisée en inverse pour $t \in [0, DT_s]$. **L** se charge et le courant délivré par la source commence à augmenter progressivement. Pendant cet intervalle de temps on a :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_l(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (\text{II.13})$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_o(t) \quad (\text{II.14})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) \quad (\text{II.15})$$

Pour $t \in [DT_s, T_s]$, **S** est ouvert et **L** libère la tension emmagasinée qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge. On obtient l'ensemble suivant d'équations :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (\text{II.16})$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad (\text{II.17})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) - V_o(t) \quad (\text{II.18})$$

A partir des équations ci-dessus, nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$(V_S)DT_s = ((V_o - V_S) * (1 - D) * T_s) \quad (\text{II.19})$$

Le rapport de conversion **M(D)** s'écrit sous la forme suivante :

$$M(D) = \frac{V_o}{V_S} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{II.20})$$

II.4.4 Convertisseurs statique BUCK

Le convertisseur DC/DC abaisseur, montré dans la **Figure II.7**, convertit la tension de la source **V_S** en une tension plus basse **V_o**. Ce convertisseur est constitué d'un commutateur **S**, de la diode **d**, qui protège **S**, et du filtre inductif **L**. Lorsque l'interrupteur **S** est fermé, le courant **i (t)** circule vers la charge à travers l'inductance **L** qui se charge au fur et à mesure que le courant **i (t)** augmente durant $t \in [0, DT_s]$ lorsque l'interrupteur **S** s'ouvre, l'inductance **L** libère l'énergie emmagasinée sous forme magnétique à la charge et la diode **d** est en état de conduction afin de protéger l'interrupteur, ce durant $t \in [DT_s, T_s]$. La tension et le courant de sortie sont en fonction du rapport cyclique **D** et de la fréquence [38].

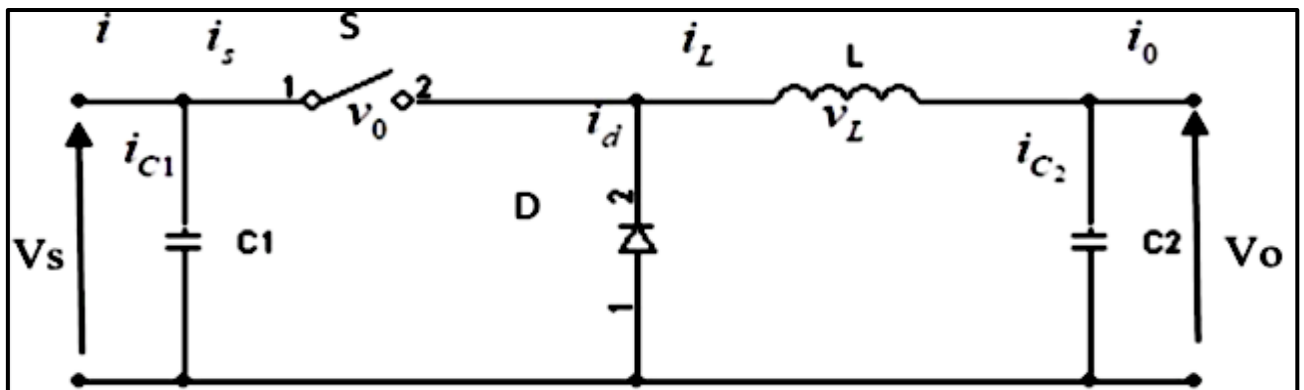


Figure II.7 : Circuit électrique d'hacheur abaisseur [38].

Pour étudier le convertisseur abaisseur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour **S** ouvert et fermé.

➤ Pour $t \in [0, DT_s]$ **S** est fermé :

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_{c_1}(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (\text{II.21})$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_{c_2}(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \quad (\text{II.22})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) - V_0(t) \quad (\text{II.23})$$

➤ Pour $t \in [DT_s, T_s]$ **S** est ouvert

$$i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_{c_1}(t)}{dt} = i(t) \quad (\text{II.24})$$

$$i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_{c_2}(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \quad (\text{II.25})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_0(t) \quad (\text{II.26})$$

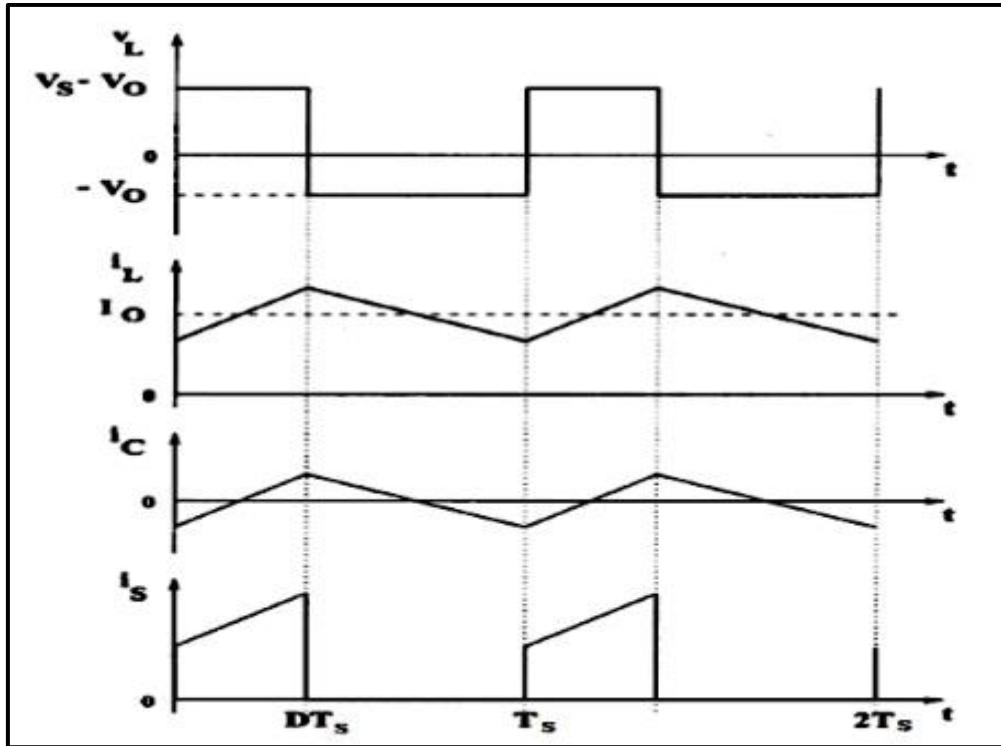


Figure II.8 : Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonction du rapport cyclique D et la période T_s [38].

La tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$V_L(t) = D(V_S - V_0) + (1 - D)(-V_0) = 0 \quad (\text{II.27})$$

La relation de la tension d'entrée V_s et de sortie V_o en fonction du rapport cyclique D est donnée par l'équation(**II.28**)

$$(V_s - V_o)DT_s = V_o(1 - D)T_s \quad (\text{II.28})$$

A partir de l'équation (**II.28**), le rapport de conversion d'hacheur dévolteur est donné par la forme suivant :

$$M(D) = \frac{V_o}{V_s} = D \quad (\text{II.29})$$

Avec le rapport cyclique de commutation D .

II.5 Commande MPPT

Le Commande **MPPT** 'Maximum Power Point Tracking', est le Commande de base pour un fonctionnement optimal des systèmes photovoltaïques. Le principe de ce contrôle repose sur la variation automatique du rapport cyclique D , qui est ajusté à une valeur optimale pour maximiser la puissance délivrée par le panneau **PV** [39]

II.5.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Par définition, la commande **MPPT** associée à la phase d'adaptation intermédiaire peut faire fonctionner le générateur **PV** pour produire en permanence sa puissance maximale. Ainsi, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximal (I_{mpv} V_{mpv}) quelles que soient les conditions météorologiques (température et luminosité). L'adaptation d'impédance prend généralement la forme d'un convertisseur DC-DC, comme la montre la Figure II.9. [40]

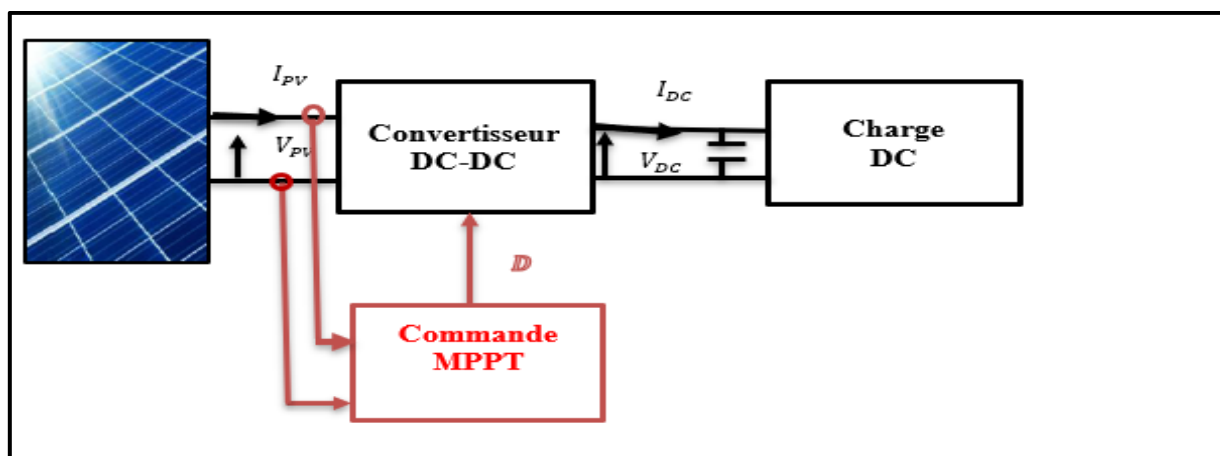


Figure II.9 : Schéma de principe d'adaptation par une commande **MPPT** et représente une Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec **MPPT** [40].

II.5.2 Les techniques de recherche de MPPT

Il y a plusieurs types de commande MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (**P&O**), l'incrément de conductance (**Inc-Cond**) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) [41].

Dans cette étude, nous allons nous intéresser à la méthode de perturbation et observation (P&O).

II.5.2.1 La technique perturbation et observation (P&O) [42]

La méthode de perturbation et d'observation (**P&O**) est largement utilisée dans la recherche **MPPT** en raison de sa simplicité, qui n'a besoin que de mesurer la tension et le courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement, et peut suivre le point de puissance maximum même dans les conditions de lumière et changements de lumière température.

Comme son nom l'indique, la méthode **P&O** fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La figure II.10 représente l'algorithme de la méthode **P&O**. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de **MPPT**. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} , Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du **MPPT** répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins. Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau. L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise

direction, ce que l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance.

Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du **MPPT** durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « Oui » de condition $\Delta P(k) > 0$ dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de **P&O**.

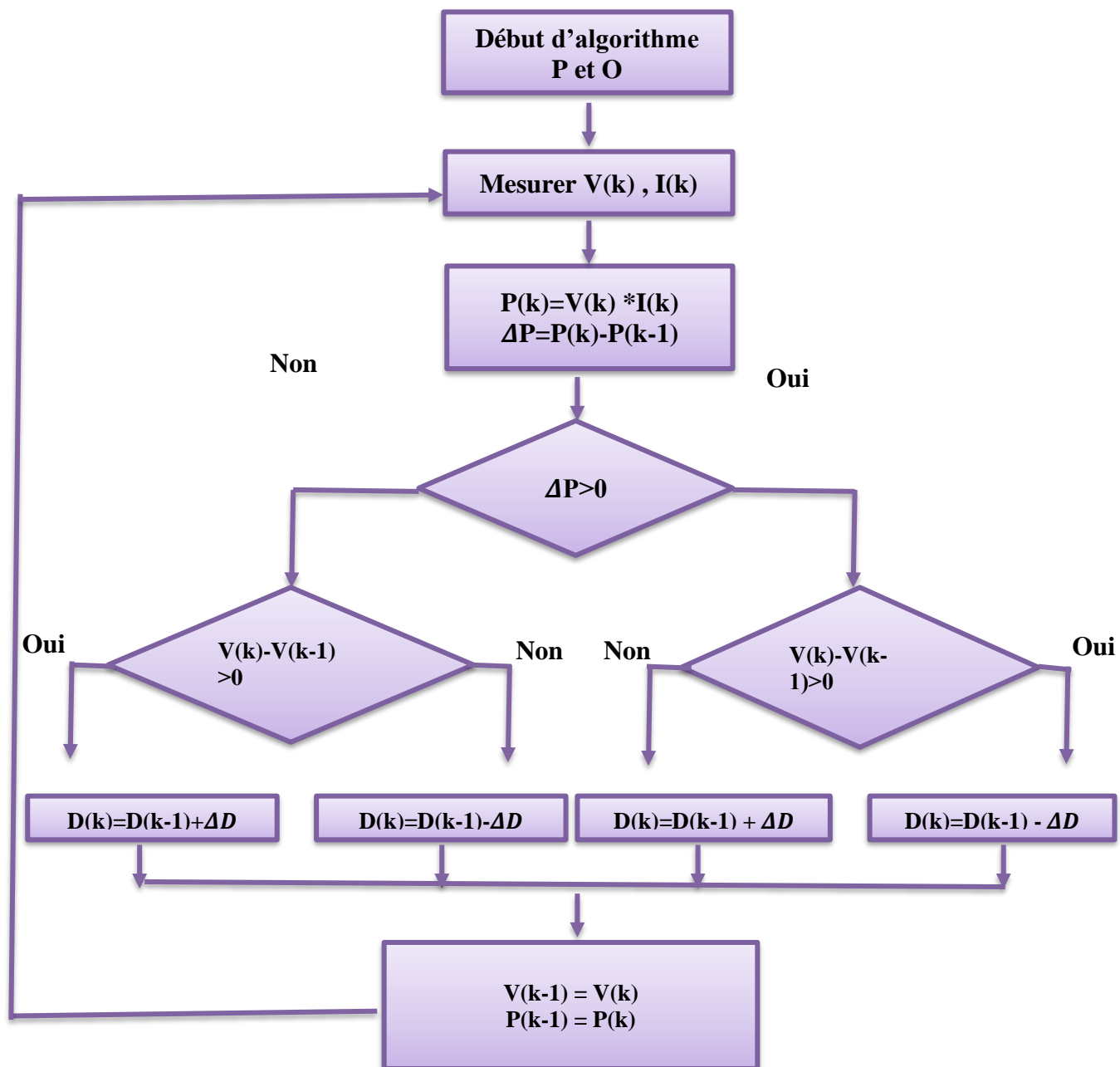


Figure II.10 : Organigramme de la méthode MPPT « perturbation-observation » [42].

II.5.2.2 Technique incrémental conductance (INC) [43].

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP_v}{dV_p} = \frac{d(V_p * I_{pv})}{dV_p} = I_{pv} + V_p \frac{dI_{pv}}{dV_p} = 0 \quad (\text{II.30})$$

$$\frac{dI_v}{dV_p} = -\frac{I_{pv}}{V_p} \quad (\text{II.31})$$

Le terme (I_{pv} / V_p) représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque, et (dI_v / dV_p) représente le terme d'incrémental de conductance. Par conséquent, pour le point de puissance maximum (**PPM**), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (**PPM**), l'inégalité de l'équation (**II.30**) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du **PPM**.

$$\frac{dI_v}{dV_p} = -\frac{I_{pv}}{V_p}, \left(\frac{dP}{dV} = 0 \right) \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{dI_v}{dV_p} > -\frac{I_{pv}}{V_p}, \left(\frac{dP}{dV} > 0 \right) \quad (\text{II.33})$$

$$\frac{dI_v}{dV_p} < -\frac{I_{pv}}{V_p}, \left(\frac{dP}{dV} < 0 \right) \quad (\text{II.34})$$

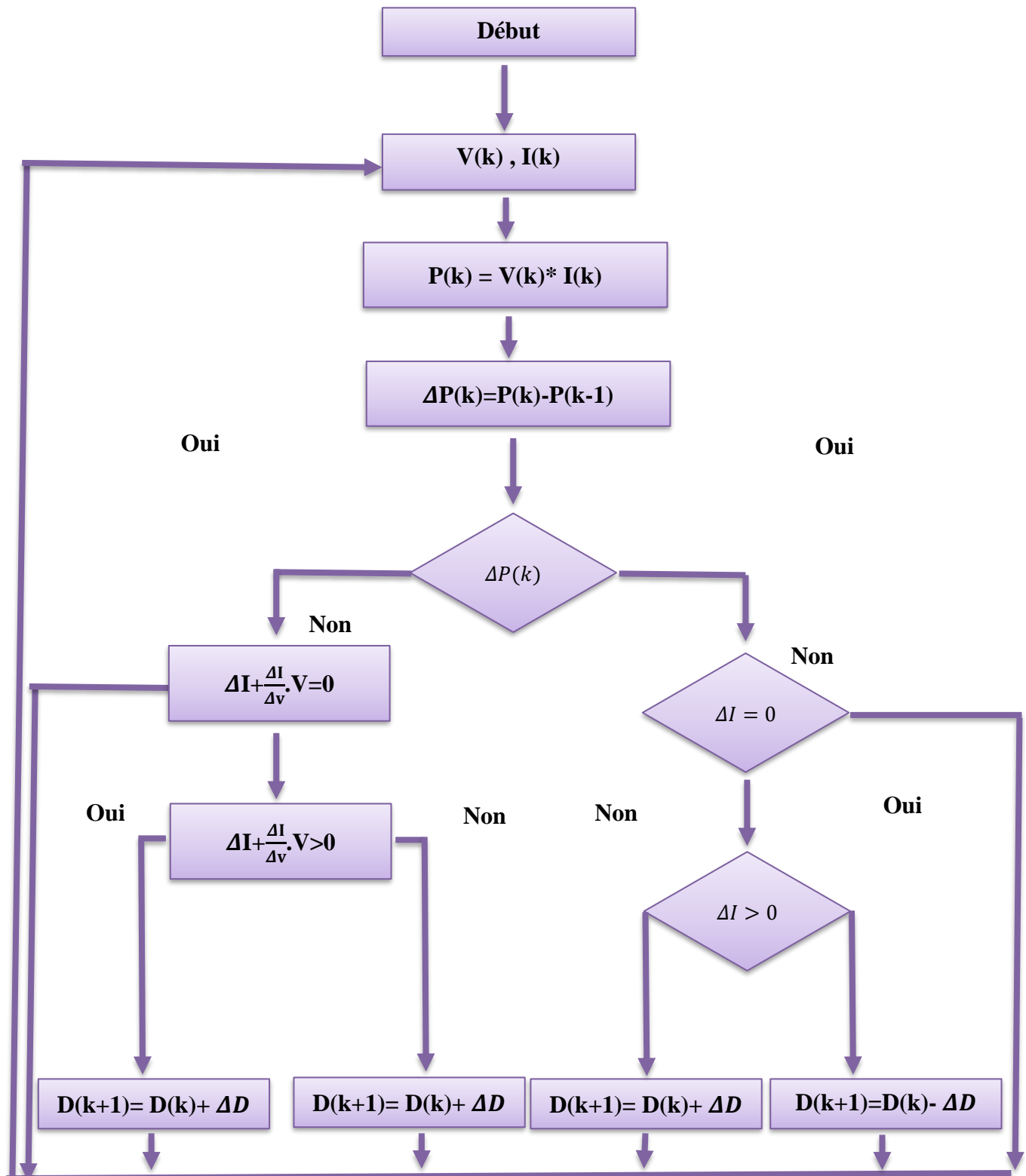


Figure II.11 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance [43]

II.5.3 Avantages et les inconvénients pour les deux techniques

On à présenter les avantages et les inconvénients dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Avantages et les inconvénients pour les méthodes de (P&O) et (INC) [2].

	La technique P&O	La technique INC
Avantages	La structure de régulation simple ainsi que le nombre des paramètres mesures réduit [2].	Bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques [2].
Inconvénients	Existe un dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [2].	Le circuit de commande est complexe et très couteux [2].

II.6 Fonctionnement du régulateur MPPT

L'objet du régulateur **MPPT** est de se placer en permanence côté panneau solaire à la tension la plus optimale afin de maximiser le rendement du panneau. Cette tension dépend à la fois des conditions de température et d'ensoleillement. Le gain quotidien obtenu grâce à un contrôleur **MPTT** bien conçu est de **20 à 30%** (en fonction des conditions d'ensoleillement et de température) [44].

Dans **Figure II.12** ci-dessous, la puissance obtenue du panneau est représentée en fonction de sa tension de sortie. On remarque que le pic de puissance est obtenu à l'extrémité de la zone bleu foncé (c'est à ce point de fonctionnement que se placera le régulateur **MPPT**). La partie bleu clair correspond à la puissance produite par le panneau lorsque celui-ci fonctionne sans régulateur **MPPT** (dans ce cas, il fonctionne sur tension batterie) [44]

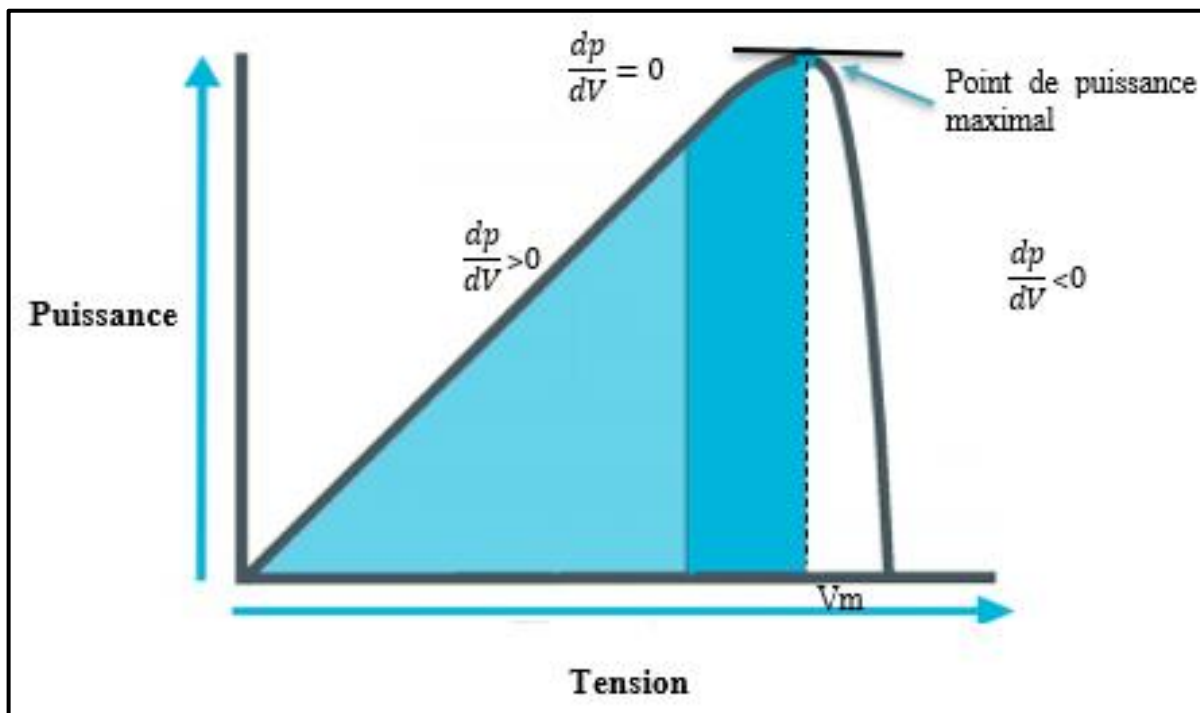


Figure II. 12 : Schéma de Fonctionnement du régulateur MPPT [44]

II.7 Régulation proportionnelle intégration dérivée (PID)

Régulateur **PID** (Proportionnel, Intégral, Dérivé). Il s'agit d'un système autorégulateur (boucle fermée) conçu pour réduire les erreurs entre les valeurs réglées et mesurées [45].

II.7.1 Rôle de la régulation dans les systèmes photovoltaïques

Le régulateur assure deux fonctions principales :

- ✚ L'optimisation du transfert d'énergie du générateur **PV** à l'utilisation
- ✚ La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes [45].

II.7.2 La composante proportionnelle

L'action proportionnelle applique une correction instantanée à tout écart entre la valeur mesurée et le point de consigne, plus la perturbation est importante, plus la correction est importante.

Une grande précision ne peut être atteinte avec ce composant seul, en particulier dans les systèmes à faible inertie [46].

Le régulateur **P** est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante. .

L'action proportionnelle du régulateur s'exprime soit par le gain **Gr** (on emploie aussi **K** et **Kp**), soit par la bande proportionnelle **BP** (également appelée **PB**, **XP%** et **P%**). Cette

dernière est définie comme étant la variation, en pourcentage, à appliquer à l'entrée du régulateur pour que la sortie varie de 100 % ; on a donc [47]

$$BP\% = \frac{100}{Gr} \quad (\text{II.35})$$

L'équation de la commande u de l'action proportionnelle **P** est comme suit :

$$u(t) = k_p e(t) = k_p (y_c(t) - y(t)) \quad (\text{II. 36})$$

Et la fonction de transfert de l'action proportionnelle **P** est :

$$C(s) = k_p \quad (\text{II. 37})$$

II.7.3 La composante intégrale

Cette composante apporte une notion de temps d'intégration à la correction, cette notion de temps s'exprime généralement en seconde.

Cette action est complémentaire de l'action proportionnelle qui permet à l'action proportionnelle de se stabiliser dans le temps, plus l'erreur de mesure est constante, plus la correction est constante.

L'algorithme de la régulation utilisera une mémoire des différents écarts mesurés pour améliorer le temps d'intégration à appliquer pour la correction [46].

L'équation de la commande u de l'action intégrale **I** est comme suit [47]:

$$u(t) = K_i \int_0^t (y_c(\tau) - y(\tau)) d\tau = \frac{k_p}{T_i} \int_0^t (y_c(\tau) - y(\tau)) d\tau \quad (\text{II. 38})$$

Et la fonction de transfert de l'action intégrale **I** est :

$$C(s) = \frac{K_p}{T_i s} = \frac{k_i}{s} \quad (\text{II. 39})$$

II.7.4 La composante dérivée

Cette action augmente la stabilité du système en prédisant la réponse de la régulation en cas de perturbations rapides ou de modifications de la consigne.

On peut donc dire que cette composante compense tout dépassement excessif de la consigne [46].

L'équation de la commande u de l'action dérivée **D** est comme suit [47] :

$$u(t) = k_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{II. 40})$$

Et la fonction de transfert de l'action dérivée **D** est :

$$C(s) = k_p T_d s \quad (\text{II. 41})$$

II.7.4.1. Effet du régulateur PID [2]

Les effets de chaque correcteur (K_p , K_i et K_d) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le **tableau II.2** suivant :

Tableau II.2 : Caractéristiques du régulateur PID [2]

Augmentation de	Stabilité	Précision	Rapidité
K_p	Diminue	Augment	Augment
K_i	Augment	Pas d'influence	Diminue
K_d	Diminue	Pas d'influence	Augment

II.8 Moteur à courant continu

Un moteur à courant continu se compose de deux parties principales : le rotor (la partie qui tourne) et le stator (la partie qui ne tourne pas et qui est immobile). En génie électrique (la science qui traite de l'électricité en tant qu'énergie), le stator est également appelé un inducteur (pour l'induction) et le rotor est appelé une armature (pour l'induction) [42].

II.8.1 Différents types de machines à courant continu [42]

Il existe cinq types de moteurs à courant continu dans la **Figure II.13**

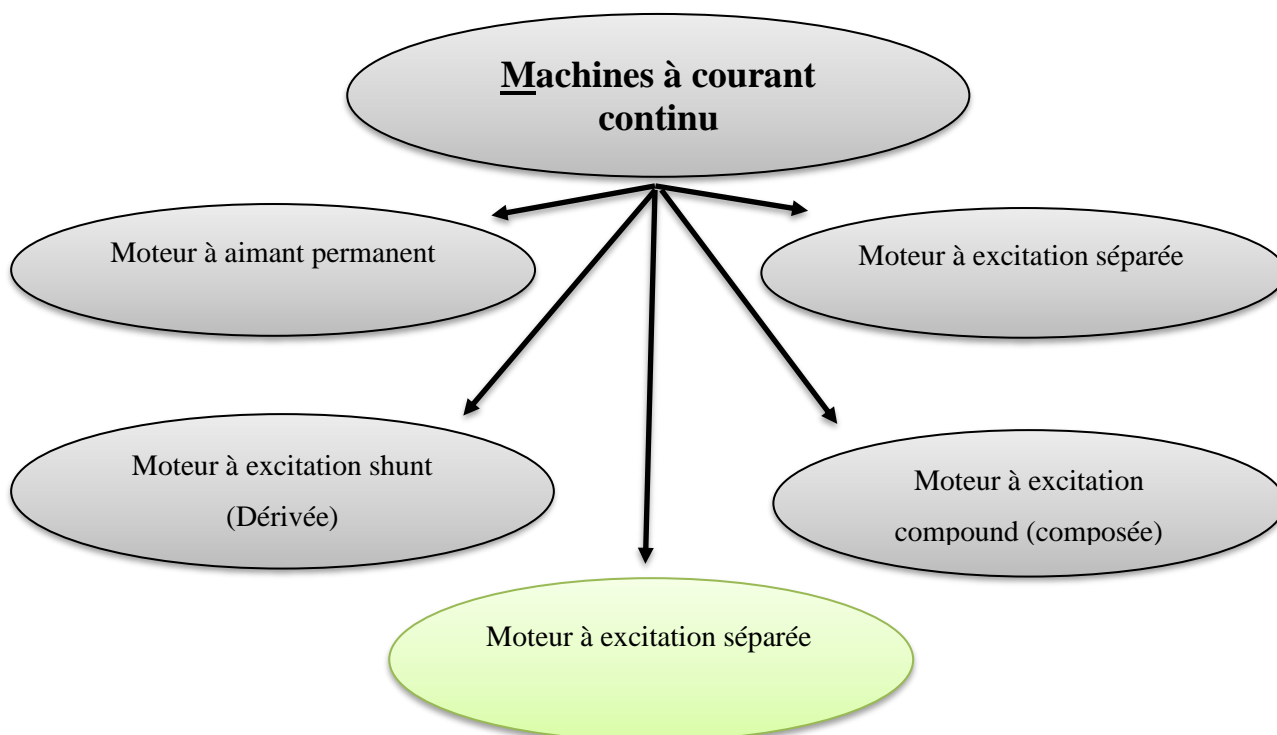


Figure II.13 : Schéma différents types de machines à courant continu

II.8.2 Avantages et inconvénients des machines à courant continu

II.8.2.1 Avantages [42]

Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie (autonome) : pile ou batterie.

- ✚ Une large gamme de variation de vitesse au-dessus de la vitesse de régime.
- ✚ Un fonctionnement avec des couples constant ou variables.
- ✚ Une accélération, un freinage et une inversion de sens de rotation très rapide, ce qui est avantageux dans le cas des appareils de levage et des machines-outils.
- ✚ Une vitesse de rotation qui peut être réglée par l'intermédiaire d'un système rétroaction.
- ✚ Une facilité de récupération d'énergie (fonctionnement dans les 4 quadrants).

I.8.2.2 Inconvénients [42]

- ✚ Une alimentation statorique et rotorique par courant continu (pont redresseur).
- ✚ Un mauvais facteur de puissance à basse vitesse.
- ✚ Nécessite beaucoup de maintenance, notamment pour le remplacement des balais et collecteur.
- ✚ Ne peut pas être utilisé dans des environnements explosifs, le frottement des balais sur le collecteur engendre des étincelles.

II.8.3 Modélisation d'une MCC à excitation séparée

II.8.3.1 Mise en équation de la machine

La modélisation de l'ensemble moteur + charge est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu et de la relation fondamentale de la dynamique.

Le schéma électrique d'une MCC à excitation indépendante est le suivant [42] :

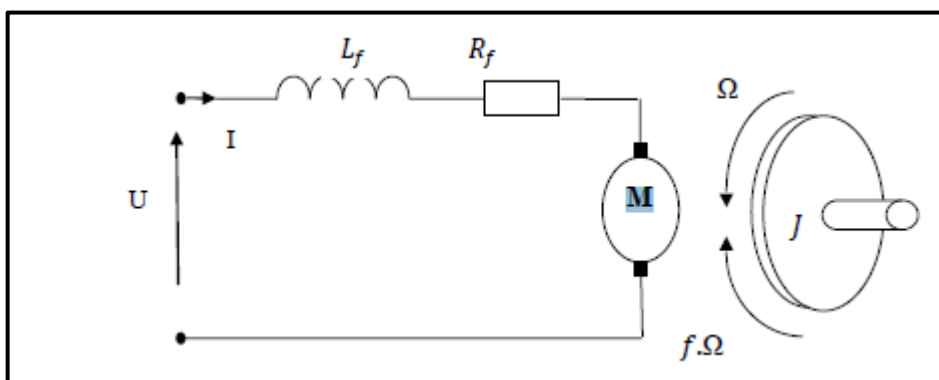


Figure II .14 : Schéma électrique d'une MCC à excitation séparée [42].

L'indice 'e' correspond à « excitation », l'indice 'a' correspond à « alimentation ».

- **Equation de l'inducteur :**

$$U_e = R_e I_e + \frac{dI_e}{dt} \quad (\text{II. 42})$$

- **Equation de l'induit :**

$$U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + K\Omega\Phi_e \quad (\text{II. 43})$$

Avec

Ω : Vitesse de rotation en radians/seconde.

- **Equation du flux :**

On réalise une simulation simple où le flux est toujours une fonction linéaire de courant d'excitation et donc on néglige les effets de la saturation :

$$\Phi_e = M_{ea} \cdot I_e \quad (\text{II. 44})$$

- **Equation du couple :**

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique :

$$P_e = I_a \cdot E = I_a K\Omega\Phi = C_e \cdot \Omega \quad (\text{II. 45})$$

Ce qui donne :

$$C_e = K \cdot I_a \cdot \Phi_e \quad (\text{II. 46})$$

- **Equation mécanique :**

$$C_e - C_r = \Sigma j \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \quad (\text{II. 47})$$

Où C_e est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant imposé par la charge, Σj le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et f le frottement proportionnel à la vitesse de rotation.

II.9 Pompe photovoltaïque

II.9.1 Pompage du fil du soleil

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée dans des réservoirs au-dessus du sol lorsqu'il y a suffisamment de soleil. Distribuez ensuite par gravité comme vous le souhaitez. Comme indiqué, le pompage de l'eau sur le soleil se traduit par un système photovoltaïque plus simple [42].

II.9.2 Pompage avec batterie

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée pour être utilisée aussi pour d'autres besoins ultérieurs. L'inconvénient majeur, voire handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie [42].

II.9.3 Différents types des pompes [48]

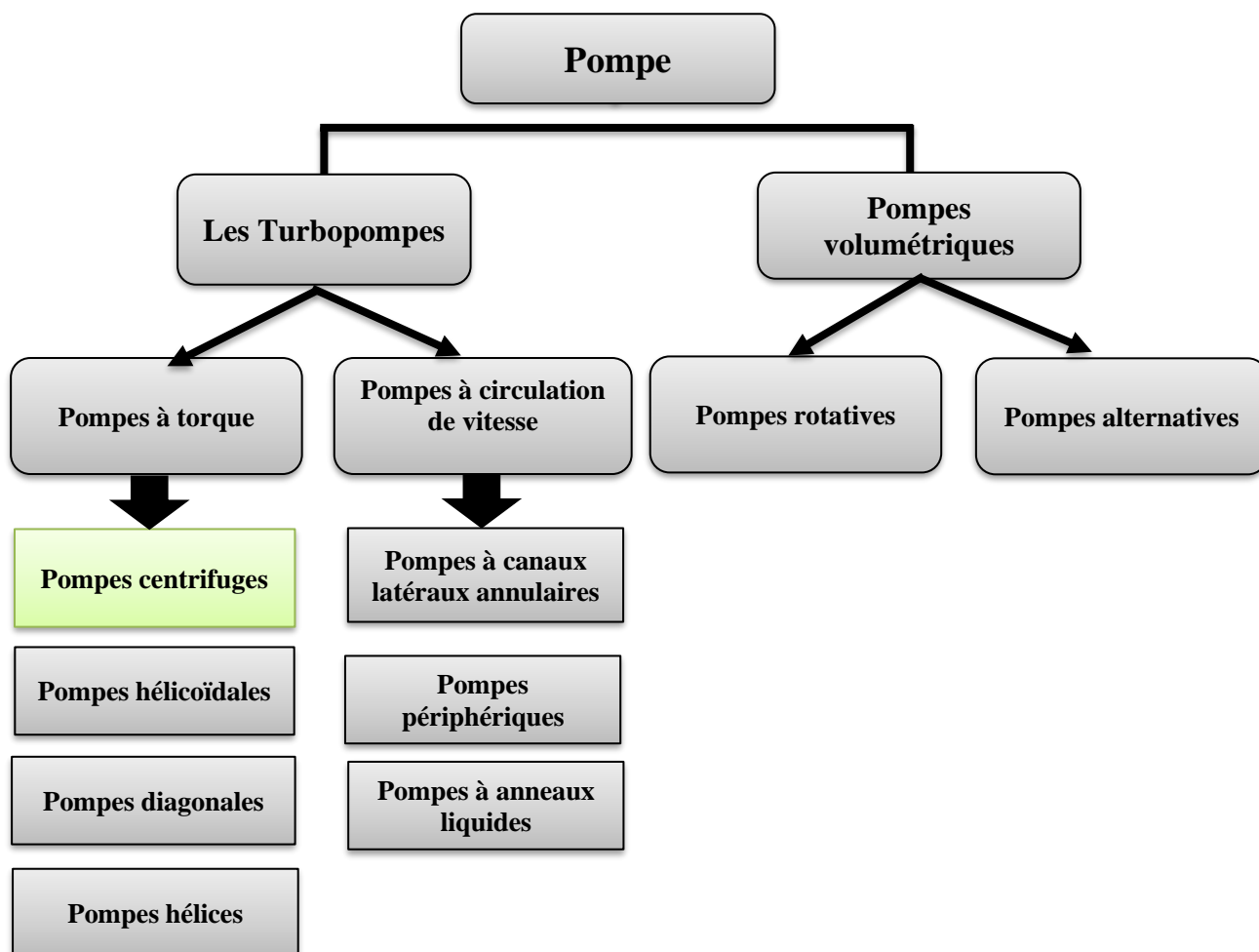


Figure II.15 : Différents types des pompes [48].

II.10 Pompe centrifuge

Une pompe centrifuge est un système ouvert, en quelque sorte un trou ou encore un conduit, dans lequel est mis en place un champ de forces centrifuges. Elle n'est pas basée sur le transport du fluide dans un godet ou sur la variation dans le temps d'un volume d'emprisonnement, le fluide n'est plus poussé par une paroi matérielle, mais mis en mouvement et équilibré par un champ de forces. Cela est une notion très simple, « que nous allons le voir dans ce qui suit », elle est basée sur d'autres principes. La pompe centrifuge fonctionne et s'utilise selon d'autres lois, qui sont l'objet de l'ensemble des paragraphes qui vont suivre, Nous avons traité l'essentiel, cependant certains domaines restreints ou certains aspects particuliers n'ont pas été abordés .

Les pompes sont des machines permettant de transmettre l'énergie mécanique au fluide sous forme de débit (énergie cinétique) ou de pression (énergie potentielle). Elle est entraînée par un moteur électrique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique [49].

II.10.1 Fonctionnement d'une pompe centrifuge

C'est le type que nous allons étudier dans ce mémoire, une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe un liquide en le forçant à travers d'une roue à aube ou d'une hélice appelée impulseur (souvent nommée improprement turbine). C'est le type de pompe industrielle le plus commun.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

On définit la hauteur manométrique totale (**HMT**) d'une pompe qui est le travail mécanique utile fourni au fluide refoulé par unité de poids. La pompe centrifuge conçue pour une **HMT** relativement fixe. Elle est constituée essentiellement des éléments suivants : [50]

- Une roue à aubes tournant autour de son axe
- Un distributeur dans l'axe de la roue
- D'un corps de pompe
- Tubulure d'aspiration
- Tubulure de refoulement
- Arbre et chemises
- Collecteur à volute

➤ Anneaux d'usure

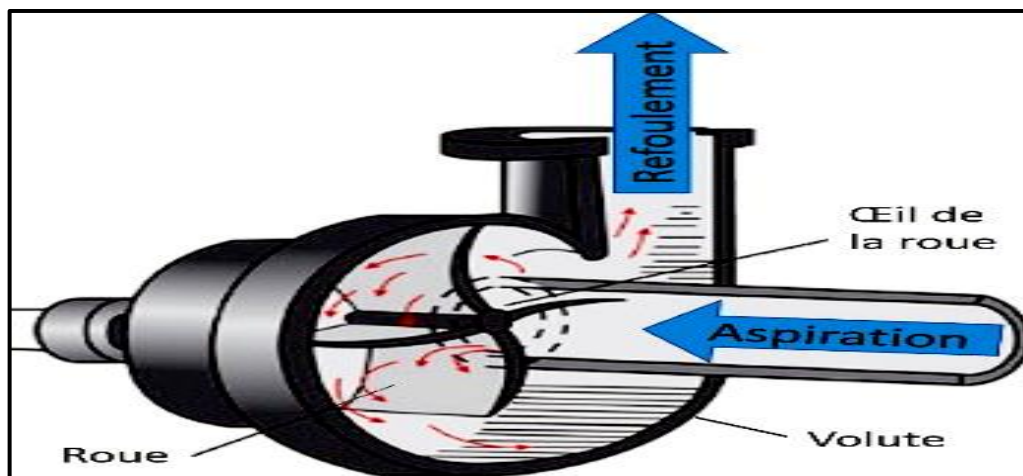


Figure II.16: Schéma explicatif d'une pompe centrifuge [50].

II.10.2 Avantages et Inconvénients des pompes centrifuges [51]

II.10.2.1 Avantages

Parmi les avantages des pompes centrifuges on cite :

- Construction simple, peu de composants mobiles, longue durée de service.
- Débit de refoulement facile à ajuster par une soupape à la sortie de la pompe ou par la vitesse de rotation
- Vitesse de rotation élevée, entraînement direct possible par moteur électrique ou turbine
- Fonctionnement très silencieux grâce à un bon équilibrage des masses et à l'absence de masses oscillantes
- Refoulement continu sans pulsations
- Convient à des puissances élevées
- Concentration élevée de la puissance et petit espace de construction.
- Rendement très stable et constant

II.10.2.2 Inconvénients

Les inconvénients des pompes centrifuges sont :

- Risque de cavitation avec de l'eau chaude ou des pressions d'aspiration faibles.
- Le débit volumétrique dépend de la pression de refoulement.
- Pas auto-amorçant (des types spéciaux tels que la pompe à canal latéral peut être auto-amorçant).
- Plusieurs étages requis pour les pressions de refoulement élevées.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique d'un **GPV**, les différents types des convertisseurs **DC-DC** utilisés dans ce mémoire telle que convertisseur Boost et Buck. Nous avons montré théoriquement que la valeur moyenne de la tension de sortie peut être ajustée en variant la valeur du rapport cyclique. Ainsi les différentes techniques d'optimisation pour produire une puissance maximale et obtenir une efficacité maximale (on étudie quelques méthodes **MPPT** comme l'algorithme de **P&O** et la méthode **INC**).

On a donné aussi un aperçu théorique sur la régulation proportionnelle intégration dérivée (**PID**), des machines à courant continu et les pompe photovoltaïque.

Dans le chapitre prochain, en exploité le modèle mathématique obtenu pour chaque composant, nous a permet d'étudier plus facilement ce système et d'effectuer son processus de simulation sur Matlab Simulink.

Chapitre III

*Simulation, résultats et
discussions*

III.1 Introduction

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutifs. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale **MPP**.

Cette simulation digitale sert afin de comprendre le comportement opérationnel de ces composants et les interactions entre eux. Depuis la simulation de la performance d'un système, on peut tracer toutes les étapes de la conversion d'énergie et identifier en détail les pertes à travers le système.

Ce chapitre, à pour but l'étude modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté a un convertisseur « boost » et convertisseur « buck » avec une commande **MPPT** numérique « perturbation et observation »

Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel **MATLAB** [53]

III.2 L'outil Matlab/Simulink

Matlab

Fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK

Est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [53].

III.3 Simulation, résultats et discussions

III. 3.1 Simulation du générateur PV

Le modèle de générateur PV est conçu par le logiciel **MATLAB / Simulink**, illustré à la **Figure III.1**

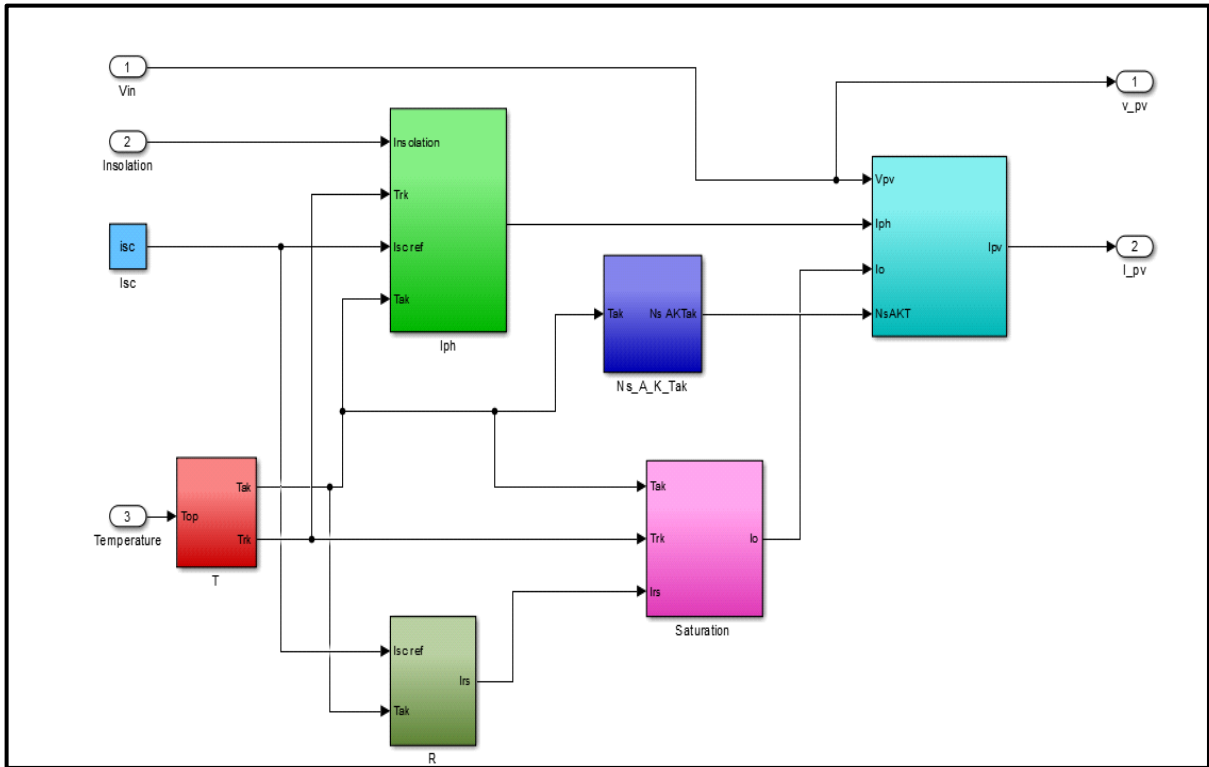


Figure III.1 : Modèle de générateur PV réalisée dans MATLAB/Simulink (Subsystem)

III. 3.1.1 Caractéristique électrique du générateur

Le logiciel **MATLAB/Simulink**, comme la montre la **figure III.2**, a été utilisé pour créer le modèle de générateur PV. Afin de modéliser le PV, les outils Matlab -Simulink ont été utilisés Irradiance de 1000W/m² et courbes P=f (V) et I=f (V) du générateur Temperature 25°C.

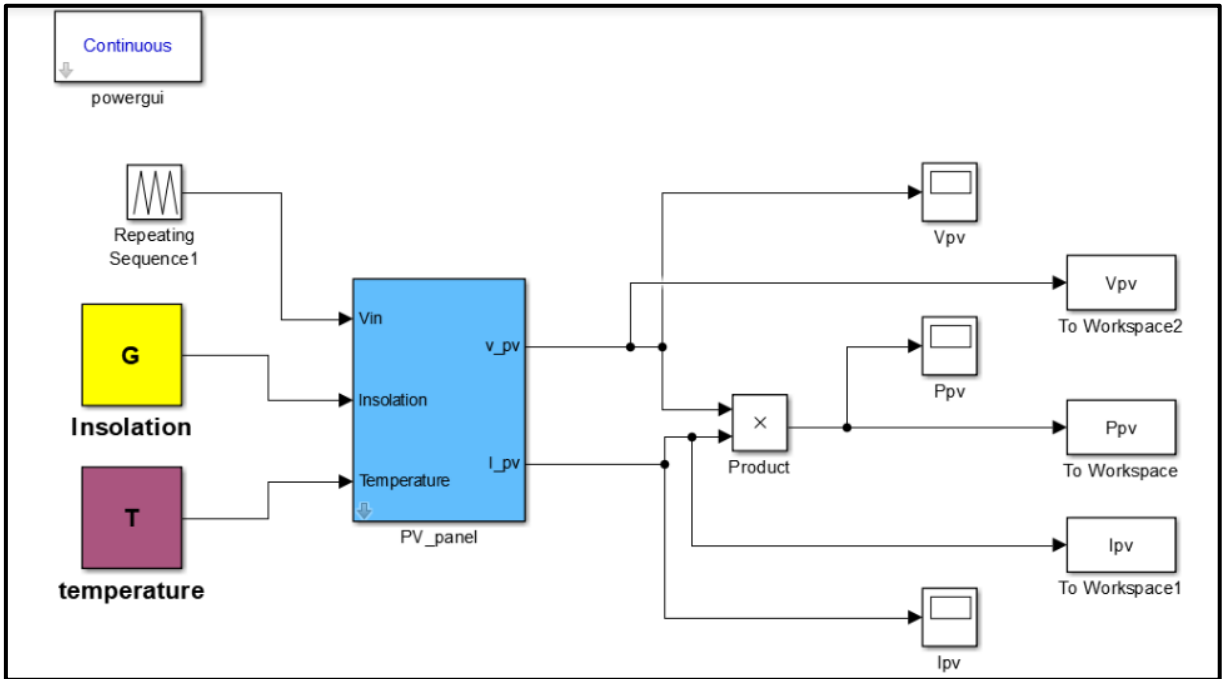


Figure III.2 : Modèle de générateur PV réalisée dans MATLAB /Simulink

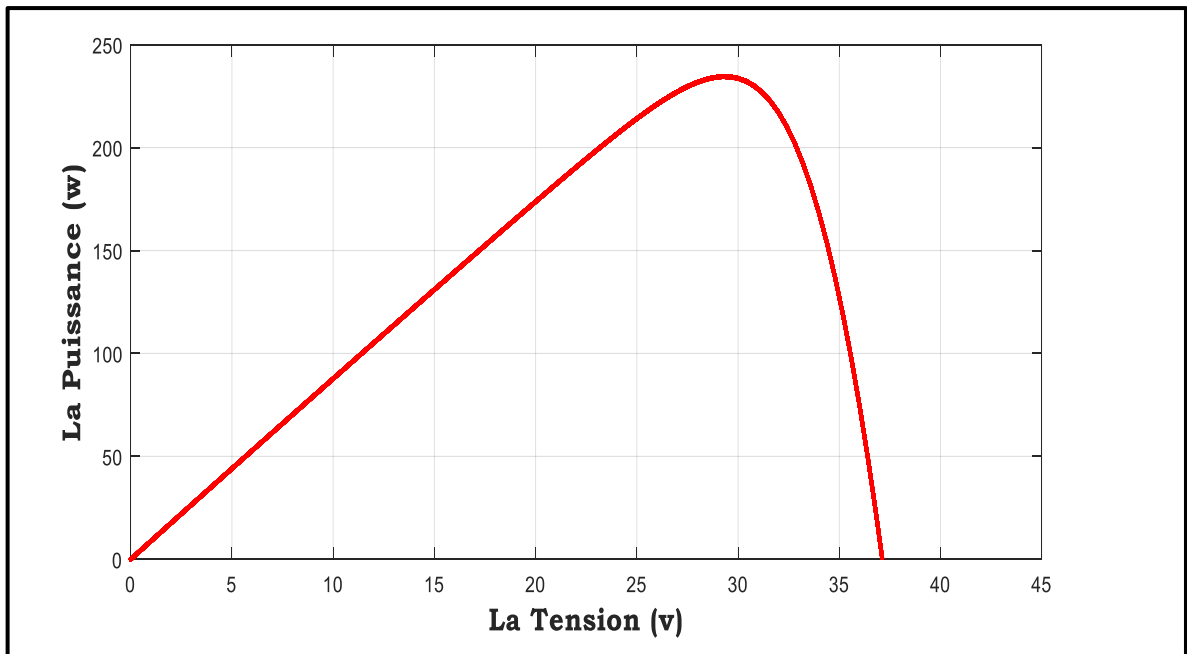


Figure III.3 : Caractéristique $P = f(V)$ d'un panneau PV

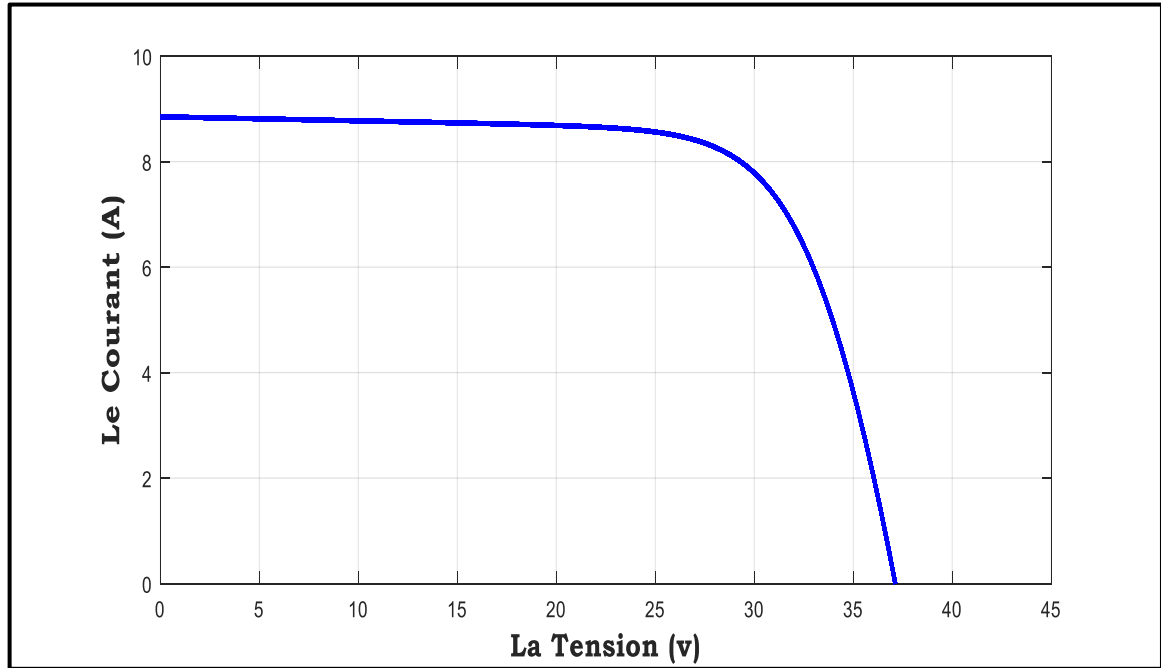


Figure III.4 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un panneau PV

III.3.2.1 Influence de la température et l'ensoleillement sur le GPV

➤ Influence de la température

Influence de la température 15, 25,35, et 45 [°C] et une irradiation constante de $1000W/m^2$

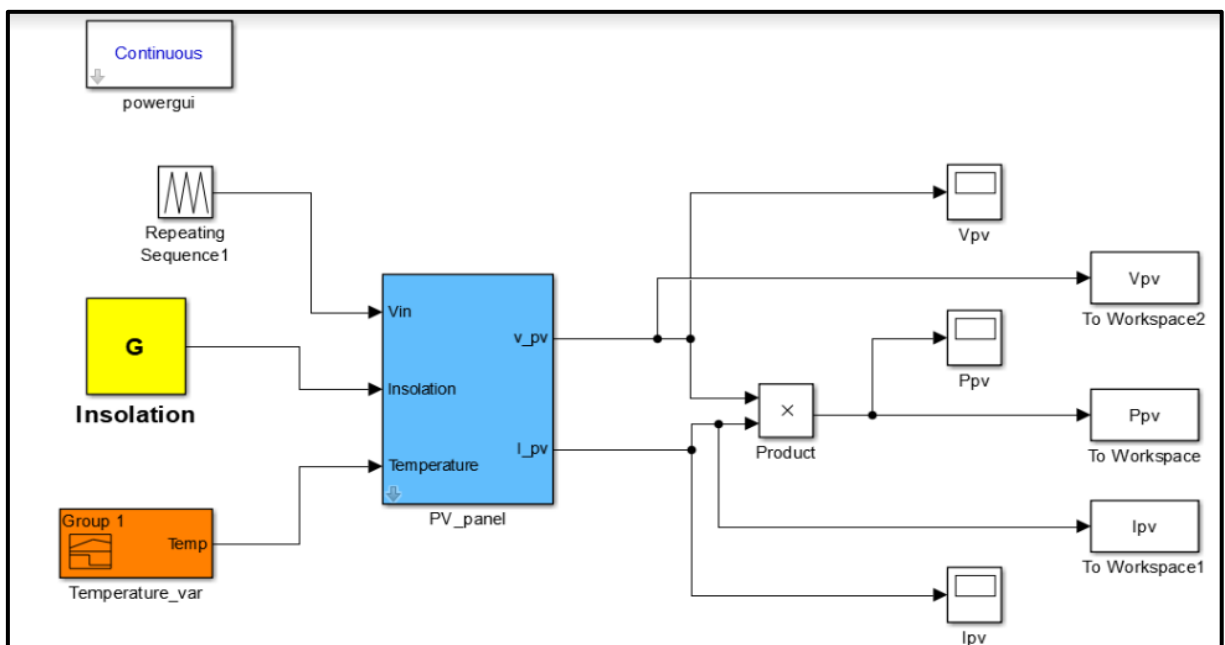


Figure III.5 : Modèle de générateur PV réalisée dans MATLAB /Simulink
(Différents des températures)

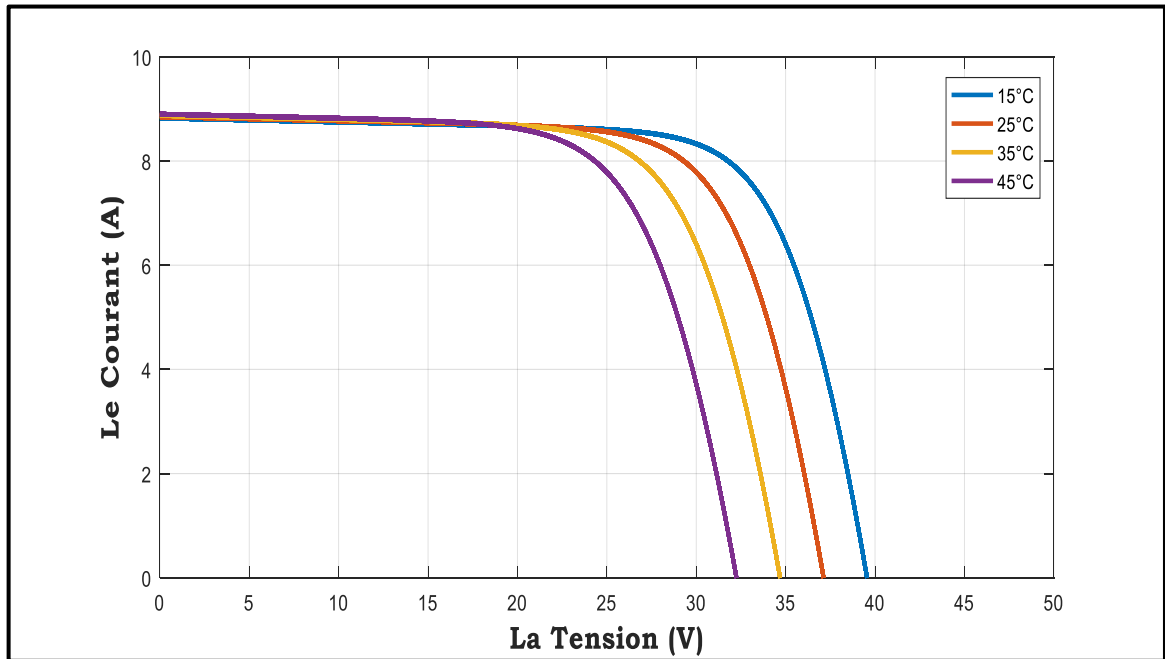


Figure III.6 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un GPV pour différents niveaux de Température

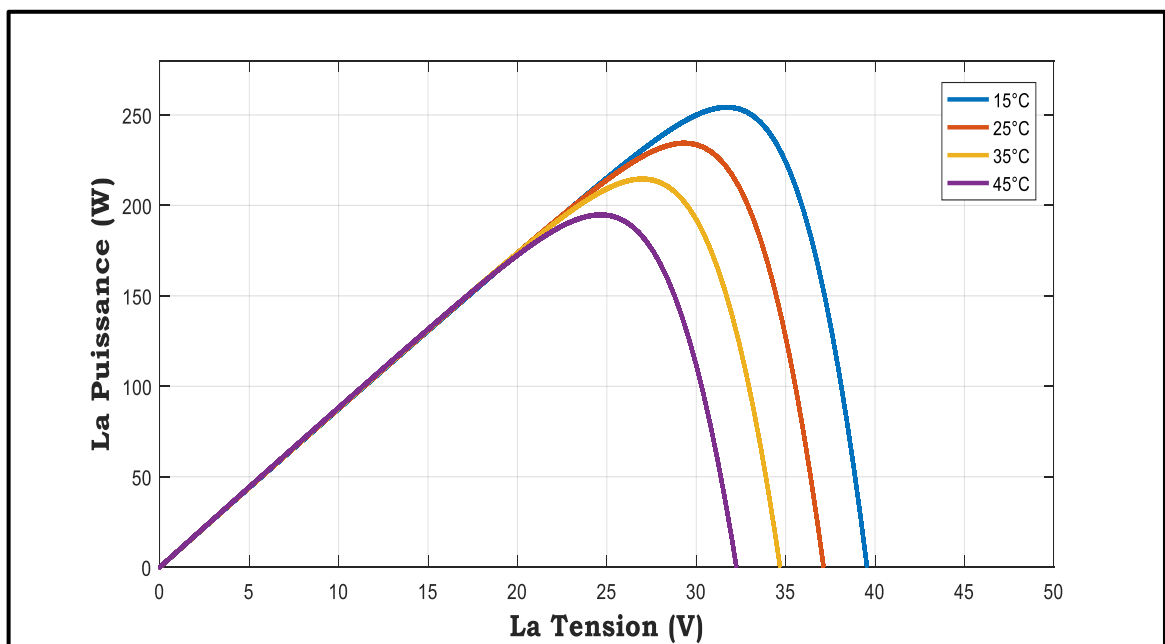


Figure III.7 : Caractéristique $P=f(V)$ d'un GPV pour différents niveaux de Température

Discussion

Les figures (III.6), (III.7) représente les caractéristiques ($I-V$) et ($P-V$) d'un module PV pour un niveau d'éclairement constant (1000 W/m^2) et pour différentes températures ($15,25,35, 45^\circ\text{C}$).

Nous remarquons que la tension à vide (**Voc**) d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module **PV** (de la cellule). Le courant de court-circuit (**Icc**), par contre, augmente légèrement avec la température du module **PV** (de la cellule solaire).

Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

➤ **Influence De L'enseillement**

Influence de l'enseillement **1000, 800, 600, et 400 [w/m²]** la température constante **25°C** :

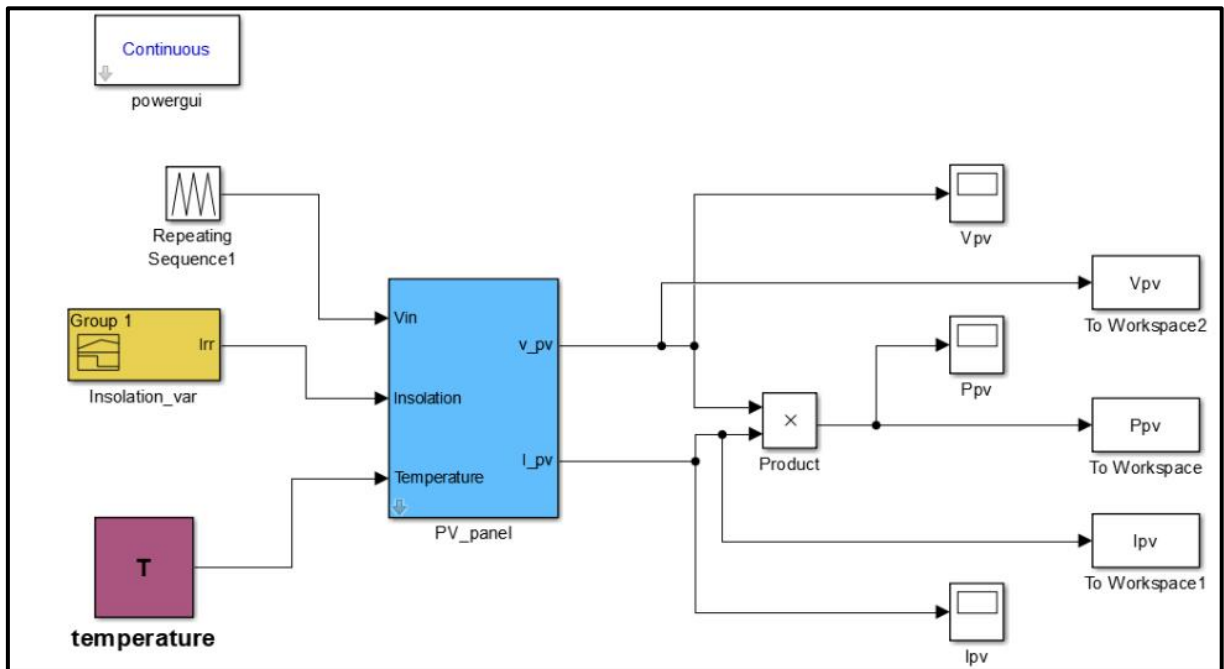


Figure III.8 : Modèle de générateur PV réalisée dans **MATLAB / Simulink**.
(Variation de l'irradiation)

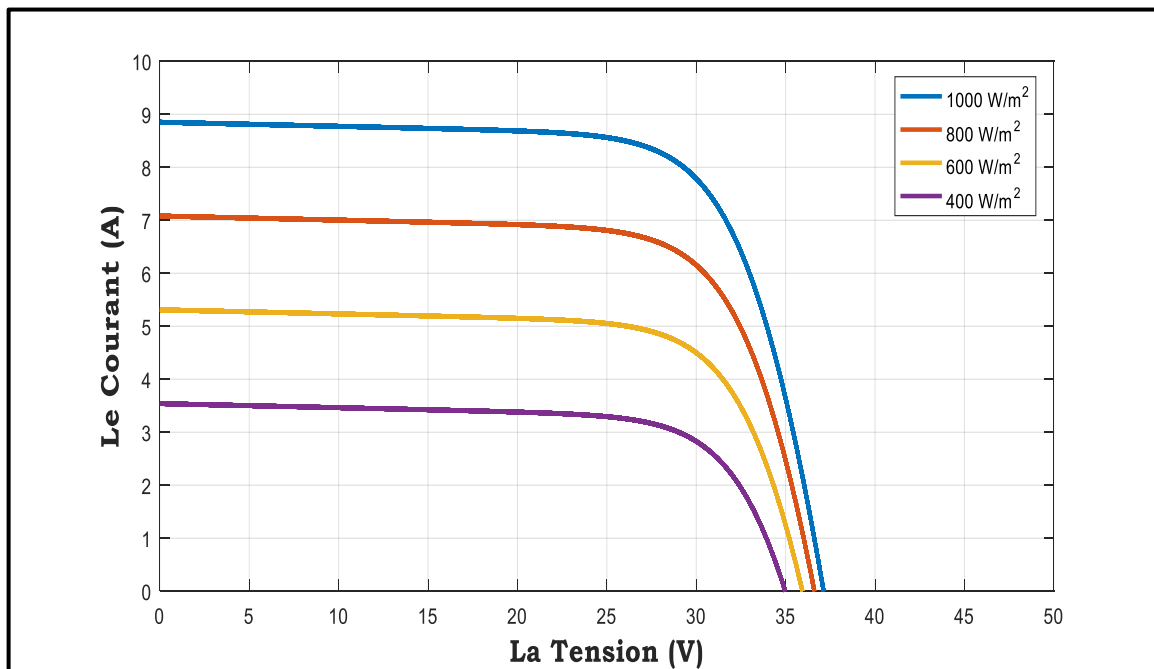


Figure III.9 : Caractéristique I/V d'un GPV pour différents niveaux d'éclairement

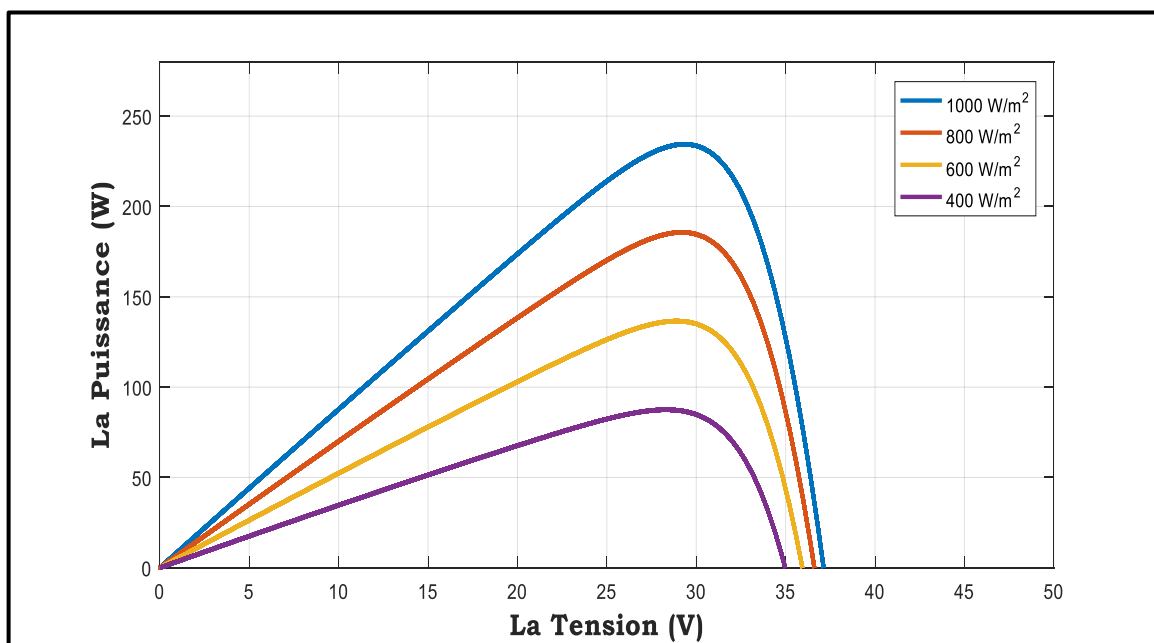


Figure III.10 : Caractéristique P/V d'un GPV pour différents niveaux d'éclairement

Discussion

Les figures (III.9), (III.10) et donnent les caractéristiques électriques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur PV. Ces courbes ont été tracées à des niveaux d'irradiations solaires variables de 1000 w/m², 800 w/m² et 600 W / m², 400 W/m² et à une température constante de 25 °C.

On remarque sur la figure (III.10) que la valeur du courant de court-circuit (I_{cc}) est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. En revanche, la tension en circuit

ouvert (V_{co}) ne varie pas dans le même rapport et reste quasiment constante même à faible éclairage. De même, pour la caractéristique $P(V)$ représentée sur la figure (III.10), on peut observer que le niveau de puissance maximale varie avec Éclairage.

III. 3.2 Simulation d'un convertisseur DC/DC Boost

Ce convertisseur est modélisé par MATLAB / Simulink, étant donné :

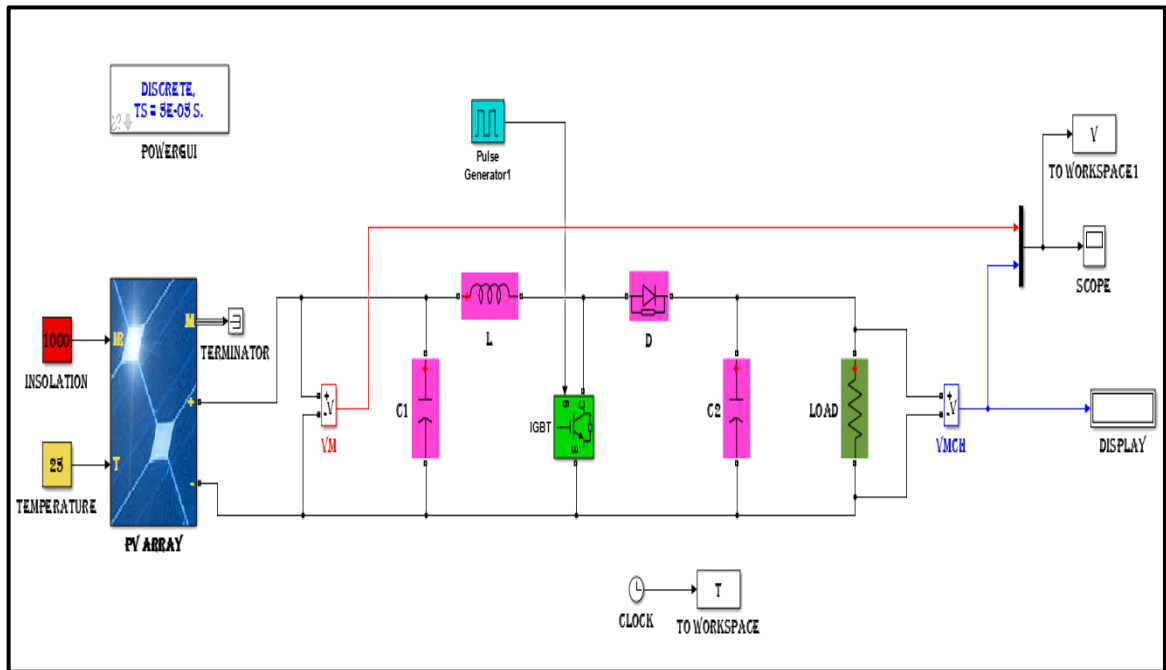


Figure III.11 : Simulation de convertisseur DC/DC Booste dans MATLAB/ Simulink

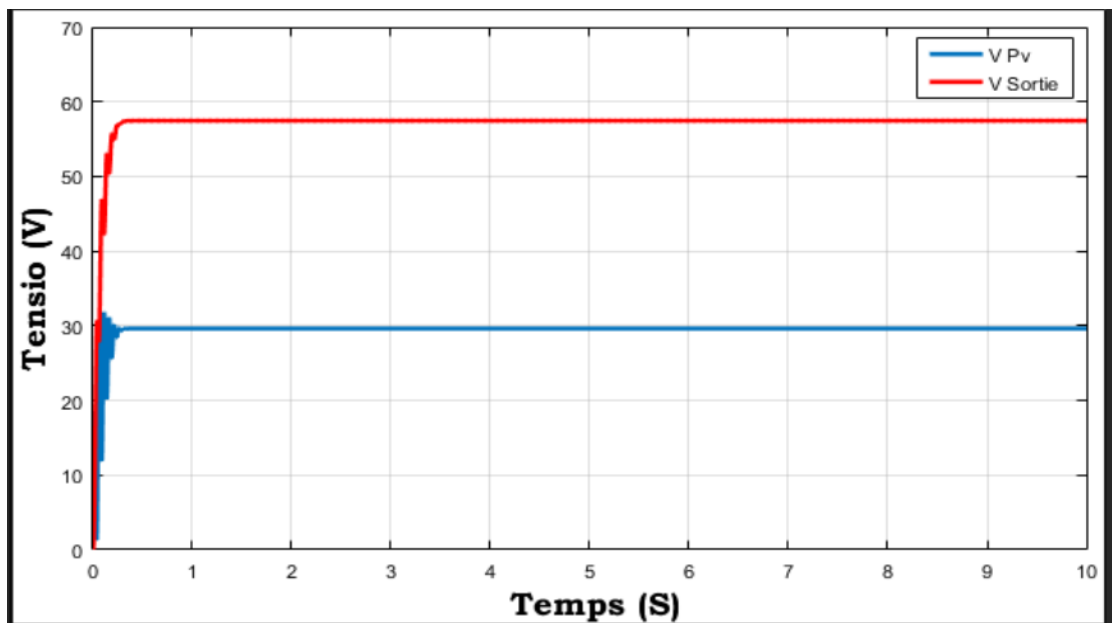


Figure III.12 : Caractéristiques de la tension de sortie et la tension d'entrée du convertisseur

Discussion

La Figure III.12 et représentent les caractéristiques de la tension de sortie et la tension d'entrée en fonction du temps pour une irradiation constante égale à 1000W/m^2 et une température aussi constant égale à 25°C .

Et on remarque que Pour une tension d'entrée $V_{pv} = 30\text{ V}$ la tension de sortie est presque égale à 60V , avec les chutes de tension au niveau du BOOST tel que $V_s \cong 58\text{V}$.

Donc les résultats de l'hacheur BOOST effectue correctement sans rôle puisque la tension de sortie d hacheur boost est supérieur a celle l'entrée.

III. 3.3 Simulation du système photovoltaïque

La Figure III.13 donne le schéma block de notre system photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés : GPV, DC-DC et MPPT.

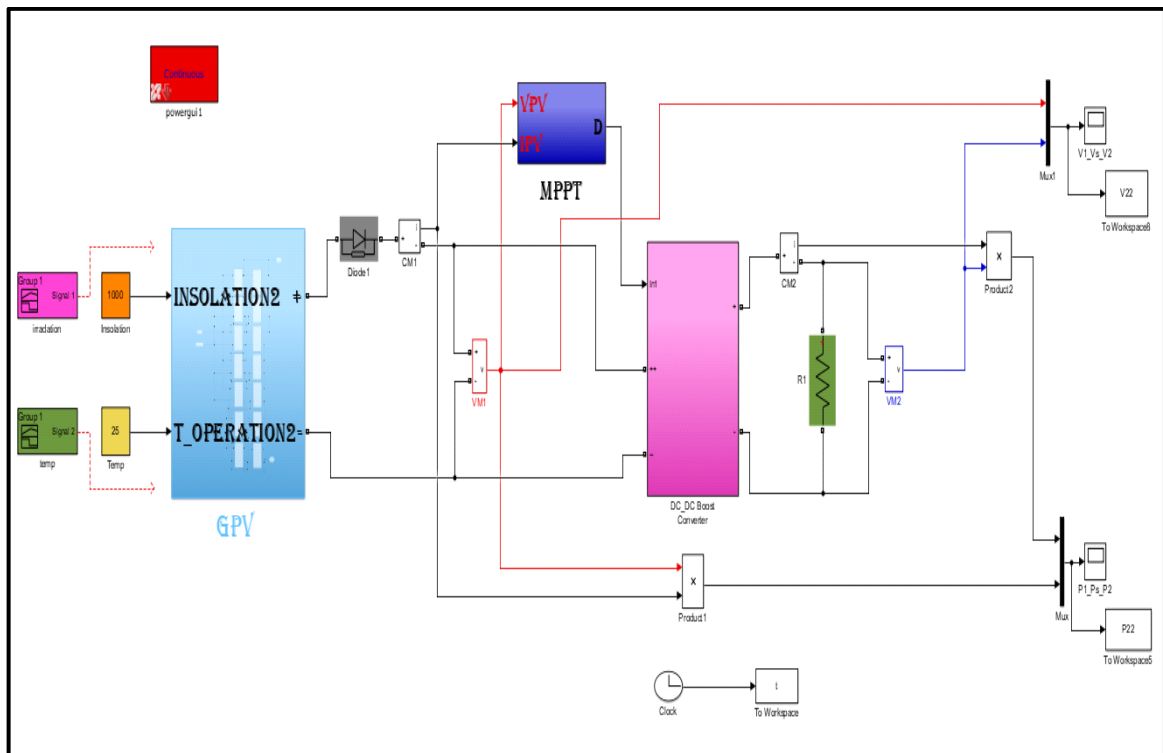


Figure III.13 : Model de simulation du système photovoltaïque.

III. 3. 3.1 Résultats de GPV avec MPPT

Dans les conditions standards en prend des valeurs initiales fixes et optimales :

- Irradiation = 1000 W/m^2
- La température= 25°C

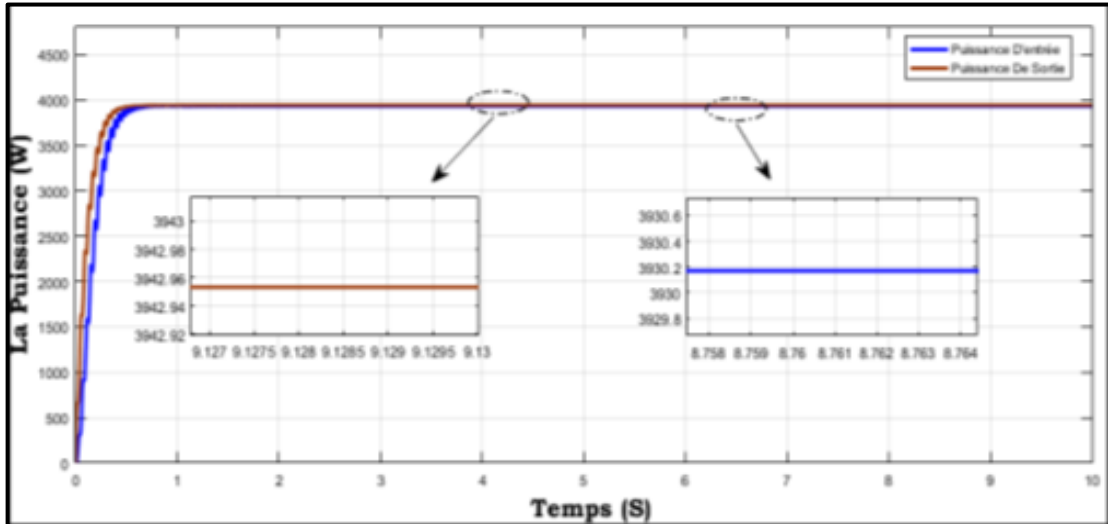


Figure III.14 : Courbes des puissances d’entrée et de sortie de DC/DC Boost dans les conditions standards.

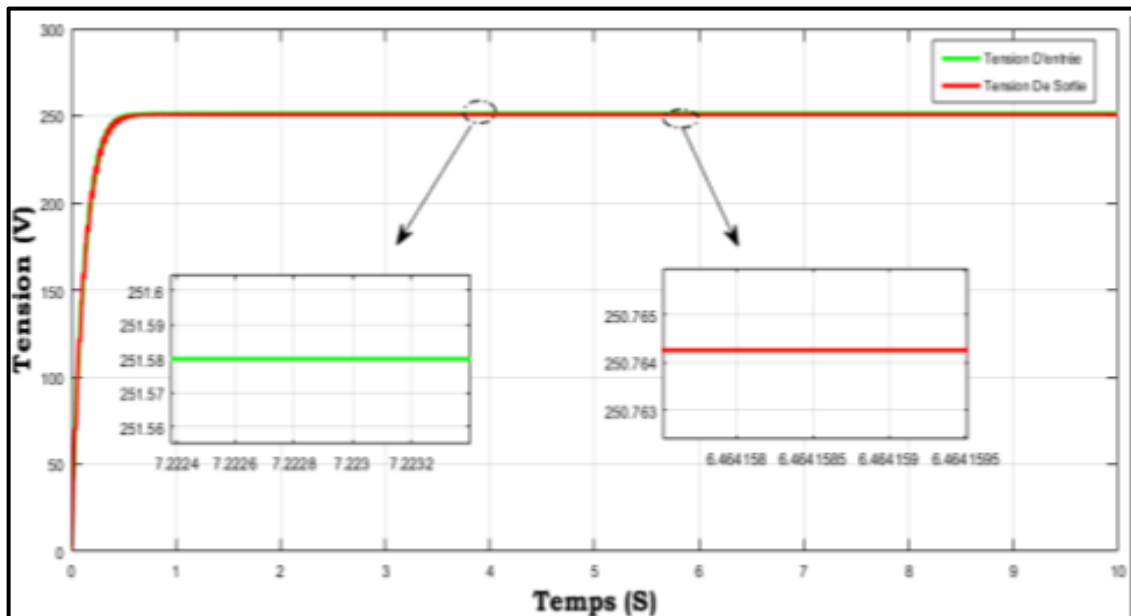


Figure III.15 : Courbes des tensions d’entrée et de sortie de DC/DC Boost dans les conditions standards.

Discussion

D’après ces résultats on remarque la (Figure III.14, et Figure III.15) que la commande par l’algorithme (P&O) répond très rapide pour trouver la meilleure itération pour relever la tension a sont point maximale qui nous donne la puissance maximale possible dans ce cas.

III.3.3.2 Résultats de GPV-MPPT avec une variation de température et irradiation

Variation de températures (45/35/25 et 15°C) et l’irradiation fixe (1000 W/m²) :

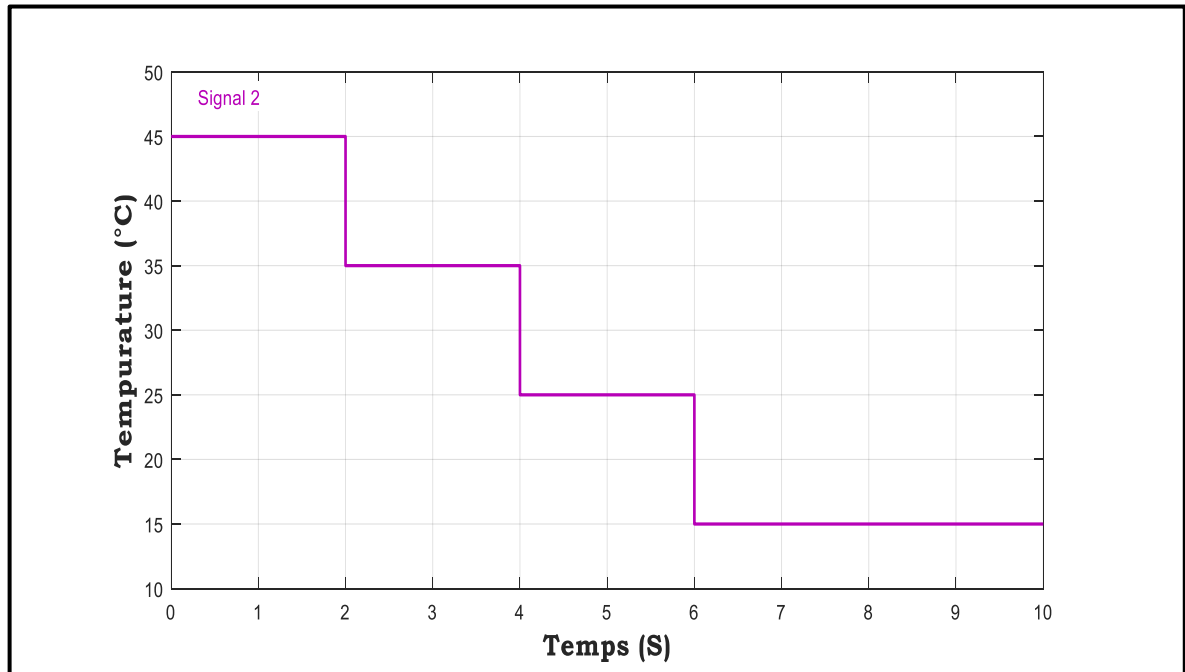


Figure III.16 : Variations du profil de température.

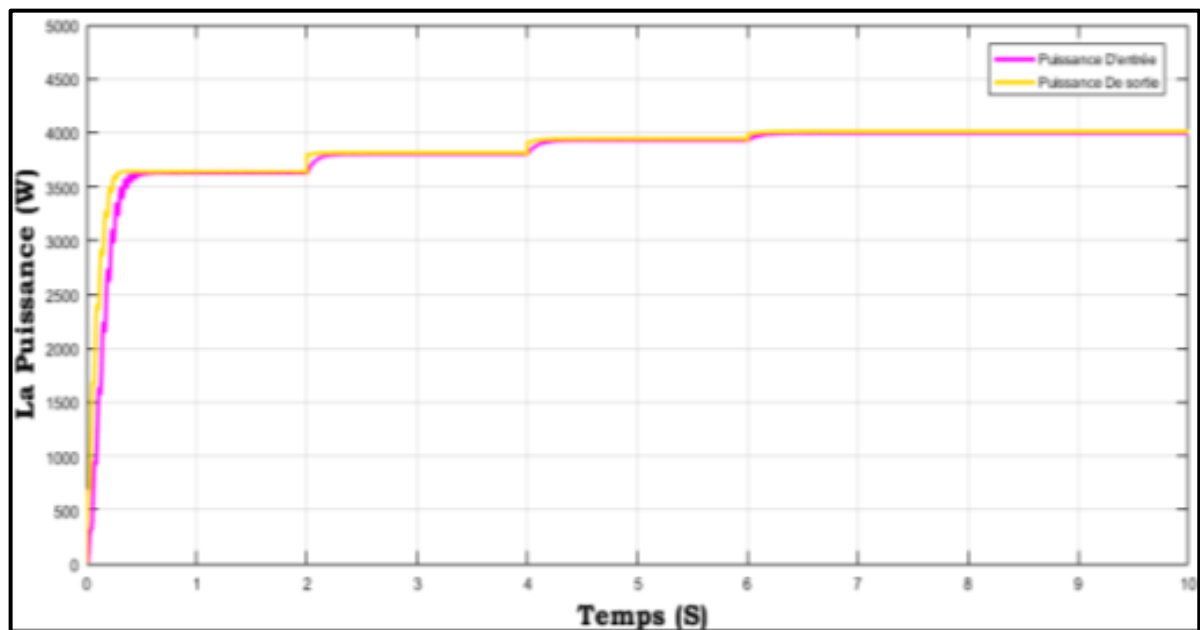


Figure III.17 : Courbes des puissances (Entrée/sortie) avec la variation de température.

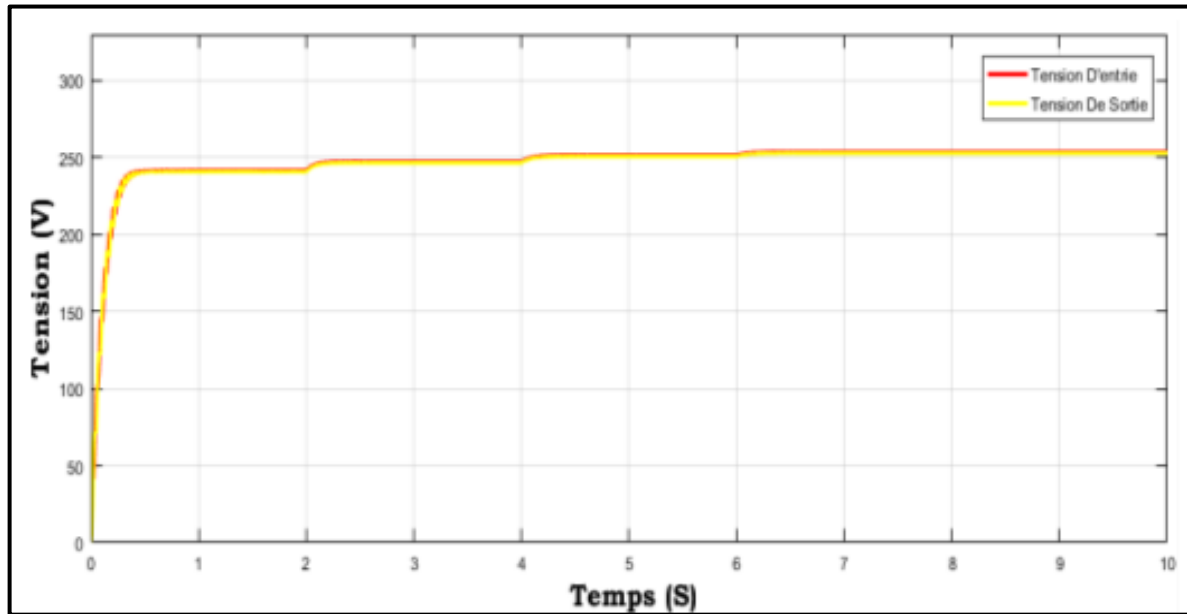


Figure III.18 : Courbes des tensions (Entrée/sortie) avec la variation de température.

Discussion

La figure III.17 montre les caractéristiques de puissance de sortie et d'entrée en fonction du temps pour une irradiation constante de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et des températures variables [45, 35, 25,15] °C, on remarque que les deux puissances sont dans une croissance continue sa dépend la variation de température.

La figure III.18 représenté la variation de la tension d'entrée et de sortie en fonction du temps. Ce dernier elle augmente jusqu'à la valeur limite 250V et reste constante.

Les résultats montrent l'efficacité de notre algorithme pendant tout le temps de simulation dans la poursuite du point de puissance maximale, nous remarquons que l'algorithme du MPPT réagit rapidement malgré le changement soudain des conditions climatiques.

Variation d'irradiation ($1000/800/600$ et $400\text{W}/\text{m}^2$) et température fixe(25°C) :

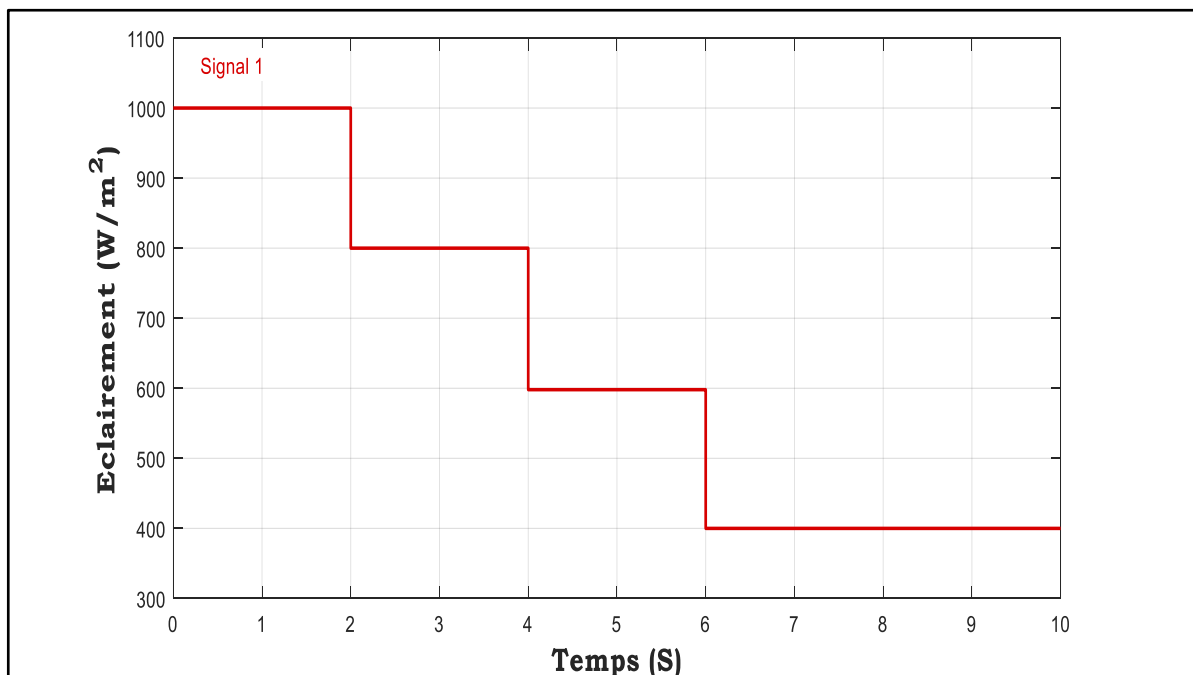


Figure III.19 : Variations du profil d'éclairement.

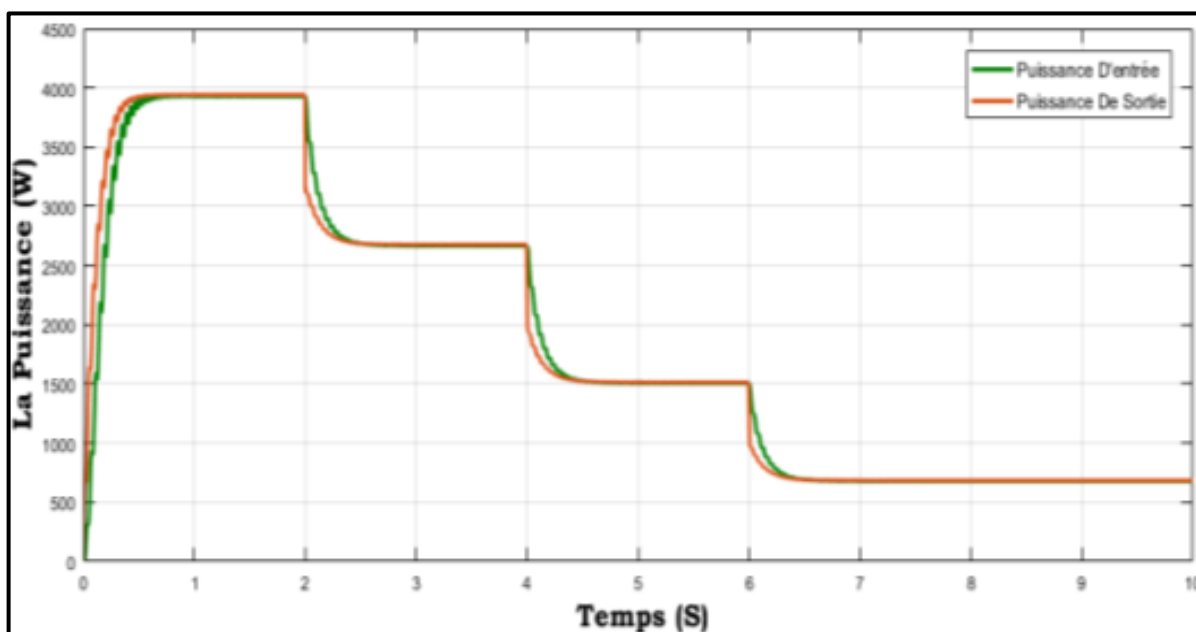


Figure III.20 : Courbes des puissances (Entrée/sortie) avec la variation d'éclairement.

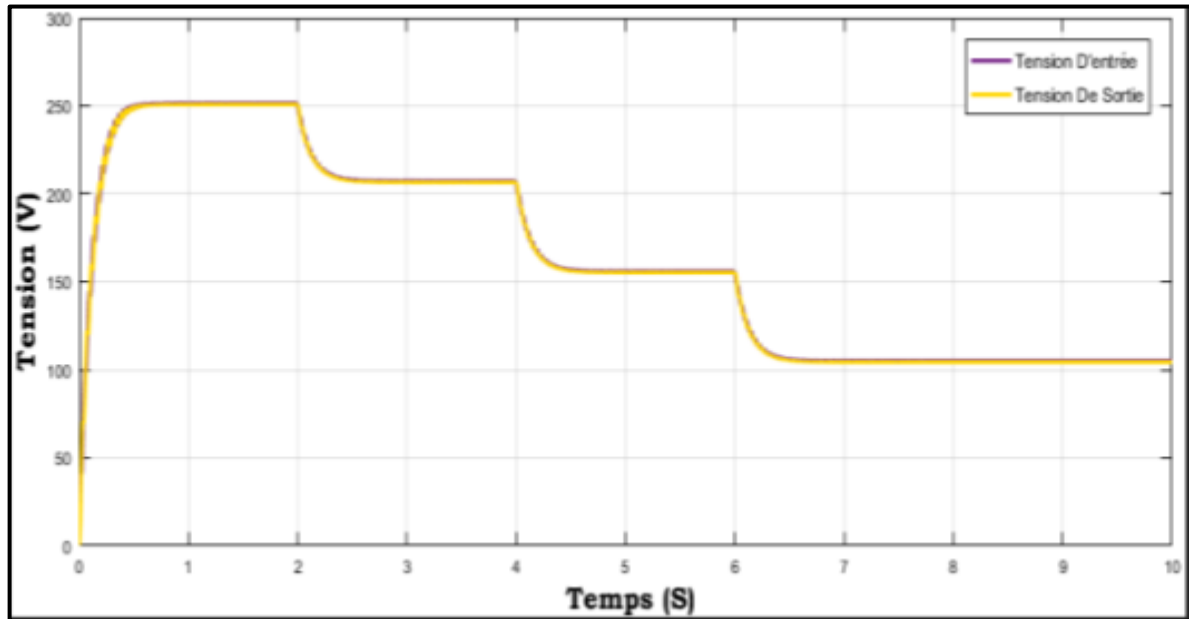


Figure III.21 : Courbes des tensions (Entrée/sortie) avec la variation des d'éclairement.

Discussion

La Figure III .20 représentent les caractéristiques de la puissance de sortie et d'entrée en fonction du temps pour une irradiation variable égale à [1000 / 800 / 600 et 400 W/m²] et une température fixe 25°C d'après sa en constatent que les deux puissances sont dans une croissance continue sa dépend la variation de l'irradiation donc on a une courbe devisée sur quatre périodes il est clair que la première période et la plus motivant pour notre système.

III. 3.4 Simulation d'un convertisseur DC/DC BUCK

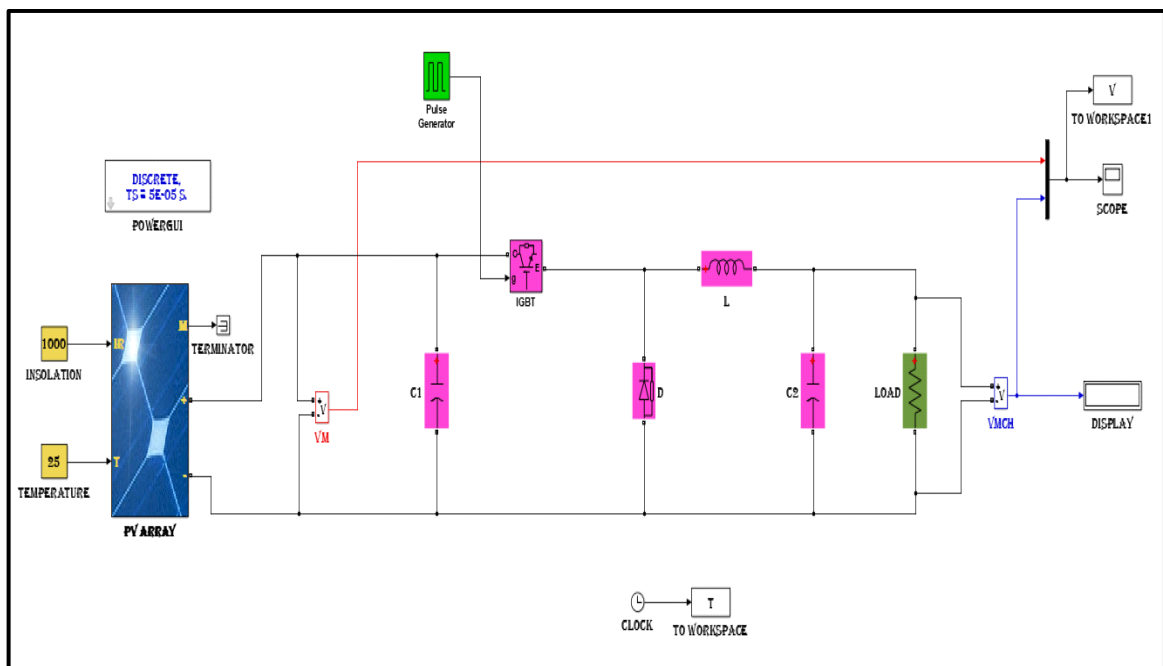


Figure III.22 : Simulation de convertisseur DC/DC BUCK dans MATLAB/SUMILINK

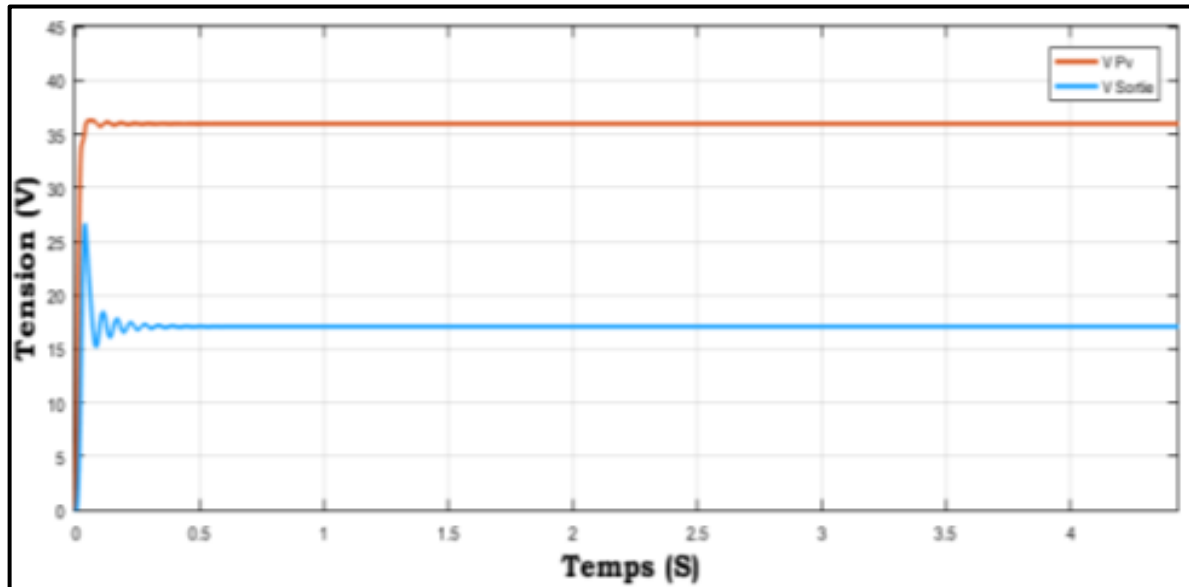


Figure III.23 : Tensions d’entrée et de sortie du convertisseur BUCK.

Discussion

La figure III.23 illustre la variation des tensions d’entrée et de sortie d’un convertisseur BUCK, on note que pour une tension d’entrée $V_{pv} = 36\text{ V}$ la tension de sortie V_{sortie} est égale à 17V , avec les chutes de tension au niveau du BUCK tel que $V_s \cong 17,5\text{ V}$

Donc les résultats de BUCK effectuée correctement sans rôle puisque la tension de sortie d’hacheur boost est inférieur à la tension du cellule (V_{pv}).

III. 3.5 Simulation du système global

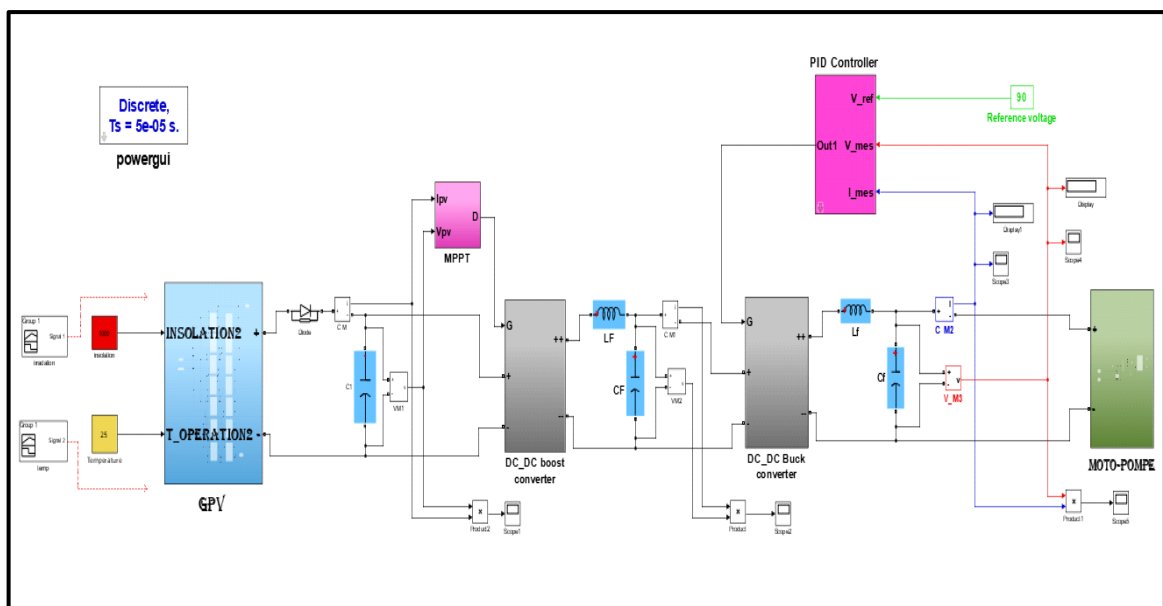


Figure III.24 : Schéma bloc dans MATLAB/SUMILINK du système global.

III. 3.5.1 Évaluation de la réponse du convertisseur Buck avec le contrôleur PID proposé

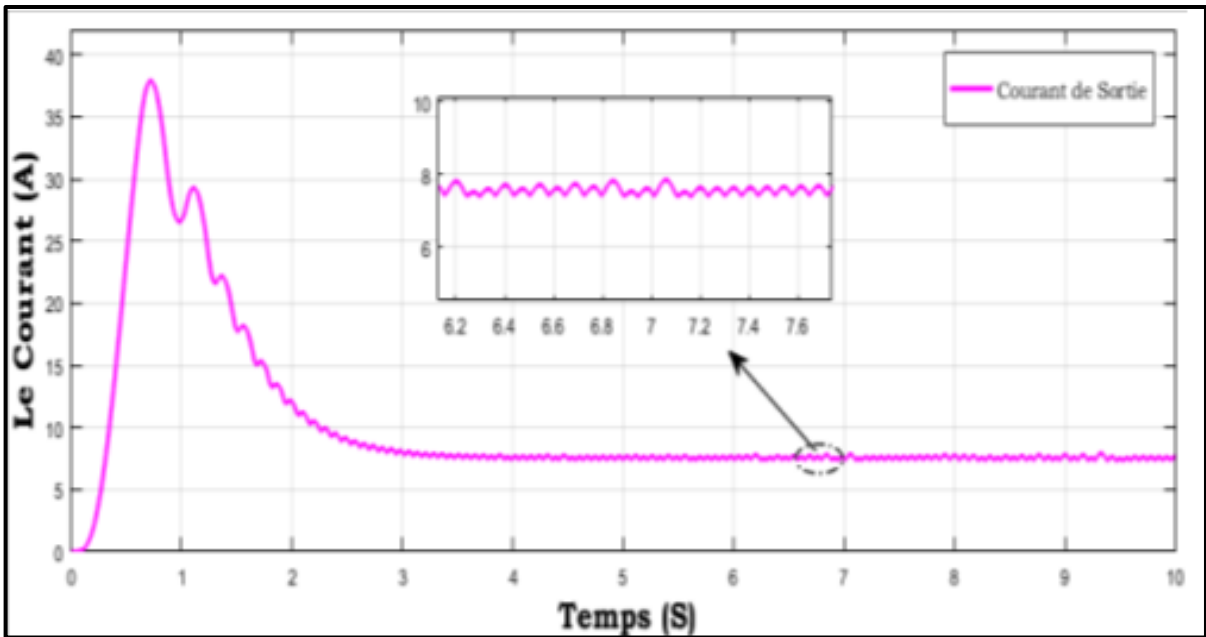


Figure III.25 : Courbes de courants de sortie du convertisseur Buck.

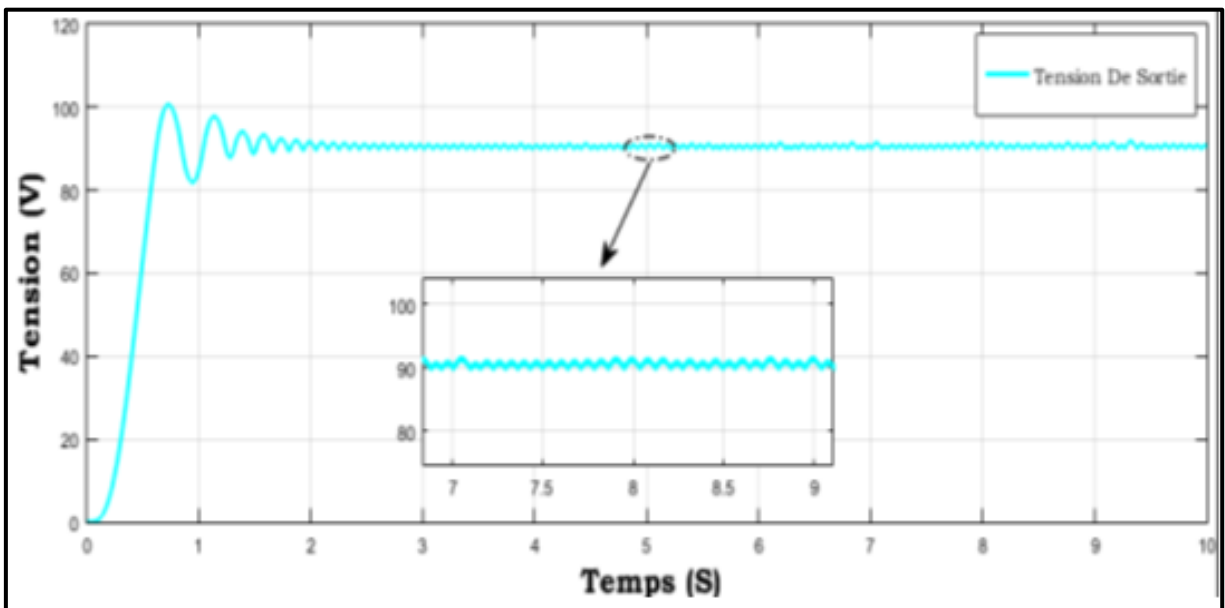


Figure III.26 : Réponse du convertisseur Buck.

Discussion

Les résultats de la tension de sortie du convertisseur **Buck** avec le contrôleur basé sur **PID** ont de bonnes performances de contrôle transitoire. En outre, ce contrôleur **PID** garantit une tension **DC** de 90 V à la sortie du convertisseur **Buck** et confirme de manière satisfaisante le

rejet des perturbations.

III.3.6. Résultats de simulation de la Moto-pompe

Figure III.27 présente le modèle de la pompe centrifuge avec moteur à courant continu

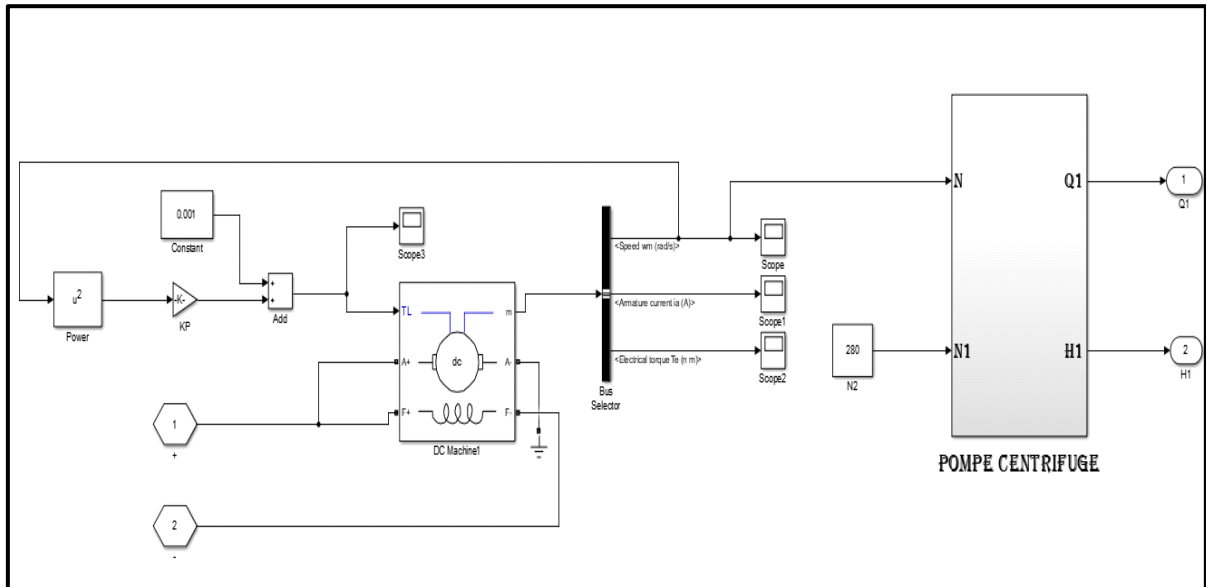


Figure III.27. Schéma bloc d'une croupe Moto-pompe.

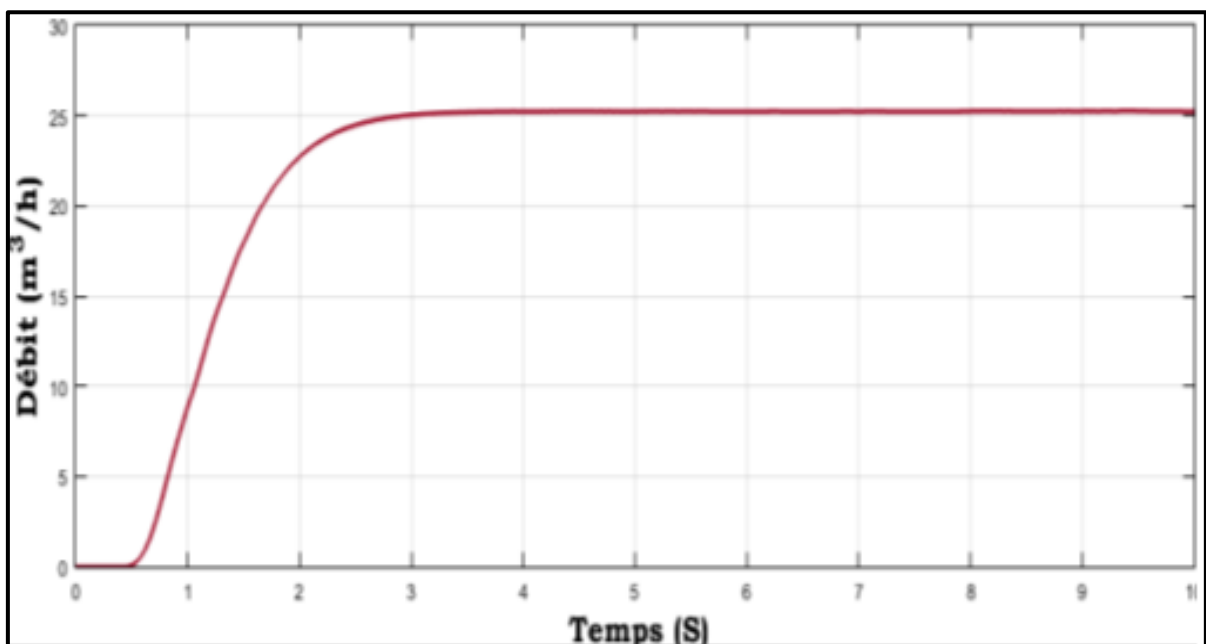


Figure III.28 : Débit de la pompe Q(t).

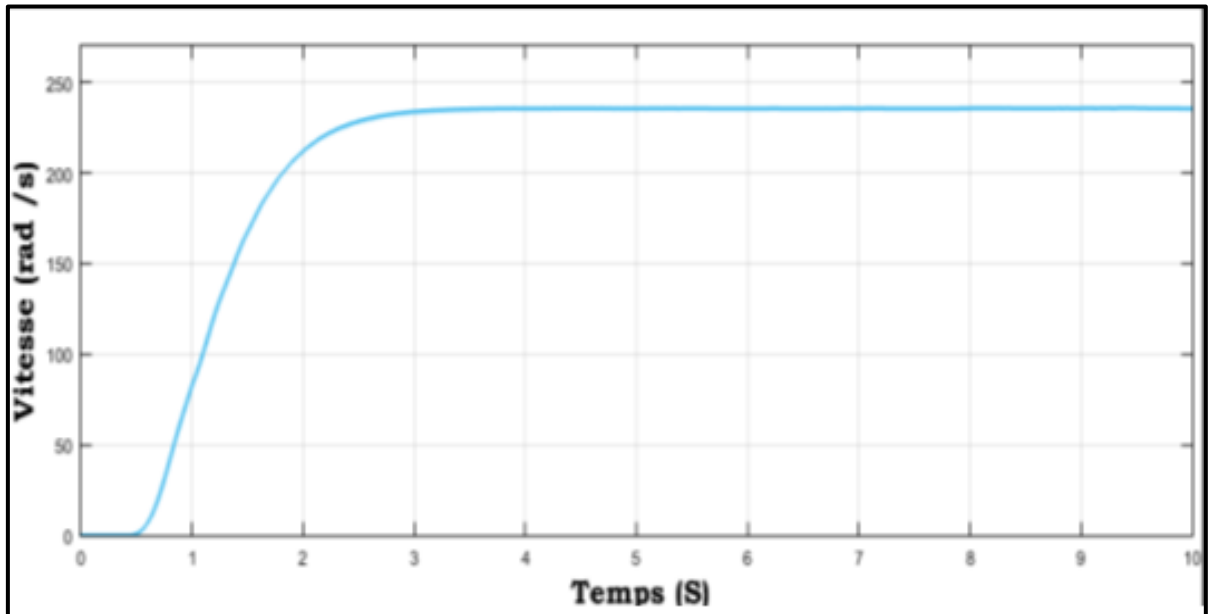


Figure III.29 : La Vitesse

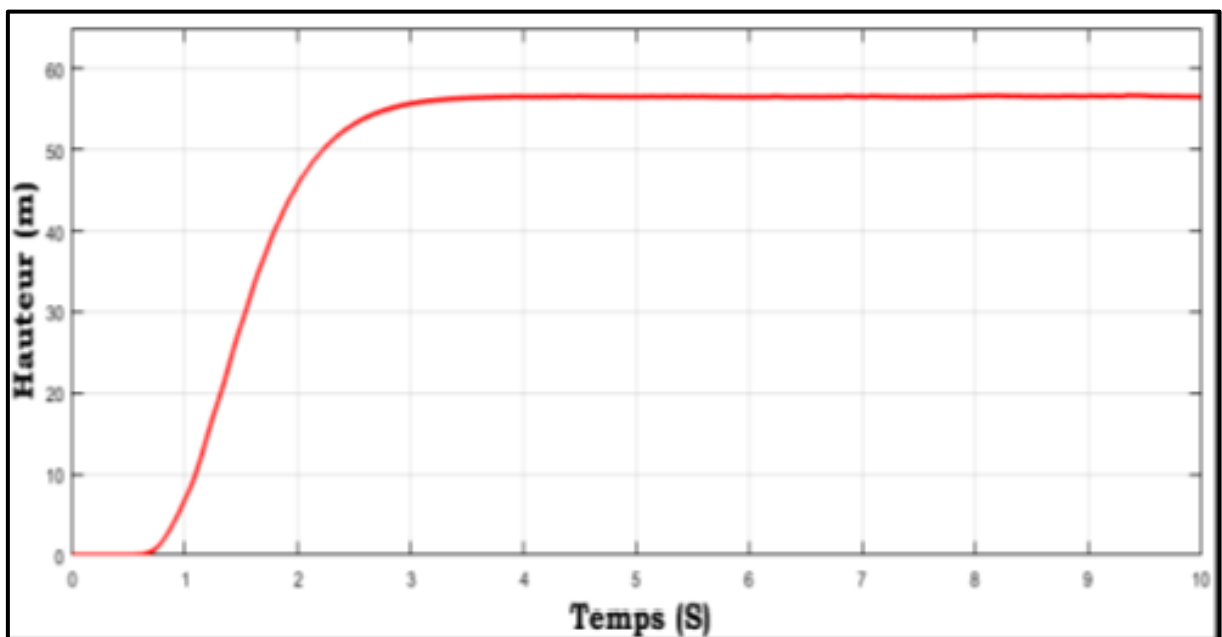
Figure III.30 : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$.

Tableau III.1 montre l'analyse des performances du convertisseur abaisseur dans des conditions de simulation en utilisant le contrôleur **PID** proposé.

Tableau III.1: Evaluation du régulateur **PID**.

Paramètre	Profile
Amplitude de crête (V)	9.59
Temps de montée(s)	0.345
Dépassement (%)	1.03

III.4 Conclusion

En résumé, ce chapitre a confirmé l'efficacité de la chaîne de pompage grâce à des simulations. Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'utilisation d'un adaptateur **MPPT** permet d'optimiser la puissance générée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement.
- La tension à la sortie du hacheur **BUCK** est la seule variable qui influence la commande de la vitesse du moteur à courant continu.
- En contrôlant la vitesse du moteur, il est possible de réguler le débit et la hauteur manométrique totale du système de pompage.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire est une source d'énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est pourquoi elle est de plus en plus utilisée dans le monde. En même temps, la demande en électricité ne cesse d'augmenter, surtout dans les zones rurales et les endroits isolés, notamment pour les systèmes de pompage d'eau. Habituellement, on utilise des groupes électrogènes fonctionnant avec des combustibles conventionnels sur ces sites. Cependant, cette forme d'énergie présente des contraintes telles que le transport du combustible et les entretiens réguliers des moteurs diesel.

L'objectif de ce projet de recherche était d'examiner, en utilisant des simulations, un système de pompage d'eau qui est intégré à un générateur photovoltaïque. Ainsi, grâce à ce mémoire, nous avons pu comprendre et observer à quel point l'utilisation de l'énergie solaire est essentielle dans diverses applications, notamment le pompage d'eau.

En outre, des efforts ont été déployés pour modéliser et simuler divers composants du système, tels que le hacheur, le moteur à courant continu et la pompe, qui sont connectés à un générateur photovoltaïque. Cette modélisation et simulation ont été réalisées dans l'environnement de programmation **MATLAB/SIMULINK**. Les résultats obtenus grâce à ces simulations démontrent que les caractéristiques clés d'une pompe, à savoir le débit et la hauteur, varient en fonction des conditions météorologiques.

Enfin, pour la continuité de cette humble initiative, nous proposons les perspectives suivantes :

- L'ajout d'une batterie de stockage pour pouvoir pomper l'eau même la nuit ;
- L'optimisation du système photovoltaïque par des d'autres techniques comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels etc...

Références bibliographiques

- [01] SOLTAN BELKEHAL « Conception & commande des machines à a aimants permanents dédiées aux énergies renouvelable », thèse doctorat, université de Constantine
- [02] AIDAT Halima et BOUSSAID Rabia, 2022. « Implémentation d'un algorithme MPPT avec régulateur de tension de la sortie pour un système photovoltaïque autonome ». Master en Énergie renouvelable. CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA.
- [03] Meunier, Francis. (2008). Les énergies renouvelables. Le Cavalier bleu.
- [04] Yves Roulet-Ingénieur Environnement, mai 2005. « Différentes utilisations de l'énergie solaire et intégration des capteurs solaires » département des infrastructures service des bâtiments, monuments et archéologie.
- [05] Olivier Delbard, 2011 « dictionnaire de l'environnement et du développement durable » UNIVERS POCHE.
- [06] Anthony ROY, Décembre 2019. Thèse de doctorat N° 601de« Gestion optimale d'un système multi-sources pour un site isolé en mer ». UNIVERSITE DE NANTES. Génie électrique.
- [07] TRAORE Massitan, 2017. Gestion du système photovoltaïque d'une alimentation privée connecte au réseau. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.
- [08] GUEDJALI Sofiane et AROUN Kenza, 2015.«Fonctionnement autonome d'un système photovoltaïque incluant un système de stockage d'énergie». UNIVERSITE DE BEJAIA.
- [09] <https://www.semanticscholar.org/paper/Une-m%C3%A9thode-d'estimation-du-rayonnement-solaire-par-Tadili-Bargach/683f78a1cf13616049ce8b8fc1e564d4b24d9775/figure/1>
- [10] Belhadj Mohammed, 2008. « Modélisation d'un Système De Captage photovoltaïque Autonome» Mémoire de Magister. Centre universitaire De Bechar
- [11] Helali Kamelia, juin 2012. «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative » mémoire de Magister, UMMTO, TIZI OUZOU.
- [12] S.M.A. Bekkouche, 2009. «Modélisation du comportement thermique de quelques Dispositifs Solaires ».Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE TLEMCEM
- [13] Ouled Hammadi, S., et Selma, S. (2013). « Dégradation des modules PV dans un milieu de type saharien» (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAÏA-ADRAR).
- [14] Al-salarymen A., 2006. «Model for the prediction of global daily solar radiation on horizontal surfaces for Amman city, Emirates». J Eng RES 2006; 11(1):49–56
- [15] Borhaneddine, BENNACEUR. (2017). «Conception et Réalisation d'un traceur

- pour champ photovoltaïque » (Doctoral dissertation, Faculte detechnologie/UNIVERSITEMOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [16] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- [17] CHLLIL Radia et YAZLI Nora, 2021«Etude technico-économique de system de pompage photovoltaïque sur un site semi-aride (Etude de cas : sebeseb Ghardaïa, Algérie) »UNIVERSITEM'HAMED BOUGARA BOUMERDES.
- [18] BAGGAR Abderrahmane et SISSAOUI Mohamed, 2019 «étude et analyse des onduleurs des systèmes solaires photovoltaïque » Mémoire UNIVERSITEM'HAMED BOUGARA BOUMERDES.
- [19] Issam HOUSSAMO, 2012. «Contribution à l'étude théorique, à la modélisation et à la mise en œuvre d'un système multi source appartenant à un micro-réseau électrique. Considérations sur la qualité de l'énergie».Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'UTC.
- [20] A. Labouret, M. Viloz, 2006« Energie Solaire Photovoltaïque », Edition Dunod, Paris.
- [21] M, Capderou. « Atlas solaire de l'Algérie», O.P.U, Alger 1985.
- [22] **A. Bousskine, N. Guermouche, 2010.** «Contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque».Mémoire d'ingénieur, UNIVERSITE DE BEJAIA.
- [23] Azzoug, Y. (2008). «Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque». (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [24] AOUMER Amel et HARFOUCHE Kenza, 2015«Maximisation de l'Energie d'un Système Photovoltaïque». Master Commande des Systèmes Electriques. UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAIA
- [25] **AYACHE IDIR, 2020.** « Etude et contrôle d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome », Master en Electromécanique, UniversitéAbderrahmane-Mira de Bejaia
- [26] Alonso C. 2003. « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie » UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III
- [27] <https://lenergie-solaire.net/energie-solairephotovoltaique/elements/installations-autonomes>
- [28] BOURAD Kahina, 2020 « Dimensionnement d'un système photovoltaïque avec stockage» Master En Electrotechnique. Université A.MIRA-BEJAIA.
- [29] BENBIA Youssouf, 2020 « Étude Et Réalisation D'une Installation PV Connectée Au Réseau Avec Gestion D'énergie ». Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra

- [30] S.MOHADJER, « Contribution à l'optimisation du rendement des générateur photovoltaïque et éolienne par l'intégration des systèmes électronique d'adaptation à commande MPPT », Thèse de doctorat, université de ABOU BEKR BELKAID Tlemcen, Algérie.
- [31] LIVRE BLANC « libre énergie », 2019.
- [32] BENADEL Faiza, 2015 «Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV ». Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [33] https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/energie-electrique-generation-photovoltaique
- [34] Ressa.Noureddine, Merabet Leila et Omeiri Amar, 2018. « Perturb and Observation MPPT algorithm for the performance of Solar Photovoltaic System». Article. Electrotechnical Engineering Department, Electrotechnical Laboratory, Badji Mokhtar University 23000 Annaba, P.O. Box 12, Algeria.
- [35] T. T.Guingane, Z.Koalaga, E.Simonguy, F.Zougmore, D.Bonkougou, 2017«Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) Avec le logiciel MATLAB/SIMULINK». Article. Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement, Université Clermont Auvergne, 2016,2(1), 10.18145/jitipee. v1i2.80.G59. Hal-01495747.
- [36] A.Mohammedi, 2016 « étude d'un système de pompage photovoltaïque », Option Electromécanique, UNIVERSITE A. MIRA DE BEJAIA.
- [37] FERRAH Fateh, 2013« Etude et simulation d'un étage mppt pour un système à énergie renouvelable», Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi.
- [38] Nedjma Aouchiche. «Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque». Autre. Université Bourgogne Franche Comté, 2020. Français.NNT:2020UBFCA001.tel-02902953.
- [39] H. Abbes, H. Abid 2, K. Loukil, A. Toumiet M. Abid, 2014«Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque». Laboratory of Computer and Embedded Systems, Lab-CES. Laboratory of Sciences and Techniques of Automatic, Control & Computer Engineering, Lab- STA National School of Engineering of Sfax, University of Sfax PO Box, 1173, 3038 Sfax, Tunisia. Article. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 435 – 445.

- [40] GUEDDOU Oussama, ZIANI Sami et KANDI Bilal, 2019. « Etude d'une machine asynchrone dédiée à un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire Master. UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA.
- [41] BERREZIGA Nassim et BABOU Smail, 2018. « Commande directe par la méthode Incrémental Conductance (Inc-Cond) d'un panneau photovoltaïque ». Mémoire Master. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [42] AHMADI Ismail, 2012. « Étude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque ». Mémoire Master. UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM ELBOUAGHI.
- [43] AOUIFI Saliha, 2014. « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister. UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF-1 UFAS (ALGERIE).
- [44] <http://blog.seatronic.fr>
- [45] BELABBAS Arezkiet CHERIF Aghiles, 2016. « Dimensionnement d'une Centrale Photovoltaïque Autonome de 16 kW ». Mémoire Master. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [46] <https://www.abcclim.net/regulation-p-pi-pid.html>
- [47] DOUADI Fadila, 2014. « Méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur PID pour un système CSTR ». Mémoire de Master. UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF
- [48] DROUICH Othman, 2020 « étude et conception d'un pompage centrifuge et identification des paramètres d'amélioration de performance ». Mémoire de Master. UNIVERSITE sidi Mohamed Ben Abdellah.
- [49] HADJAB, A., et HADJAB, Y. (2020). « Revêtement des ailettes d'une pompe centrifuge endommagée sous l'effet de la cavité ». (Doctoral dissertation, Univ Msila).
- [50] BENTOUR Yassine et ELHOR Abederrahmane, 2019. « Étude du convertisseur de puissance d'un système de pompage au file de soleil ». Mémoire de Master. UNIVERSITE TELMECEN.
- [51] MECHRI Abdelraouf et ROUSSI Mohammed, 2021 « Optimisation des systèmes photovoltaïque utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes » mémoire de Master UNIVERSITE CHAHID LAKHDER
- [52] BENADEL Faiza, 2015 « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV » mémoire de Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.

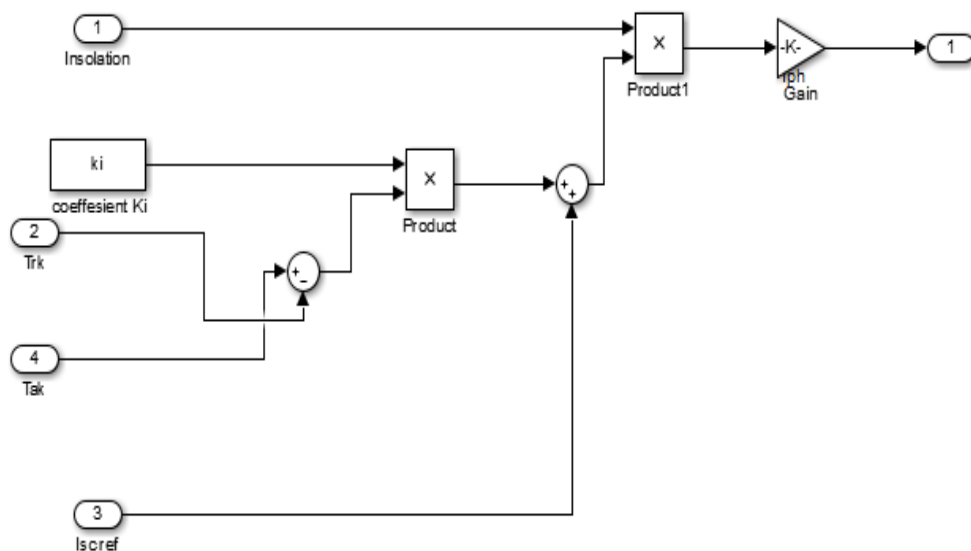
Annex

Annex A

Réalisation d'un **GPV** dans l'environnement **MATLAB/SIMULINK**

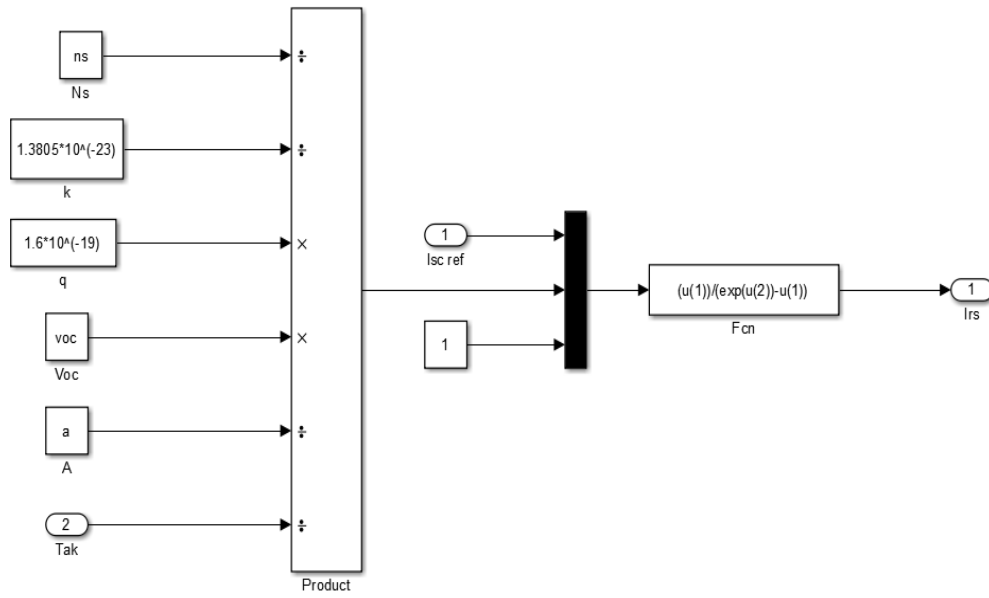
1. Equation d'un photo-courant :

$$I_{ph} = [I_{sc} + N_i I_0 (T - TrK)] \frac{G}{1000}$$



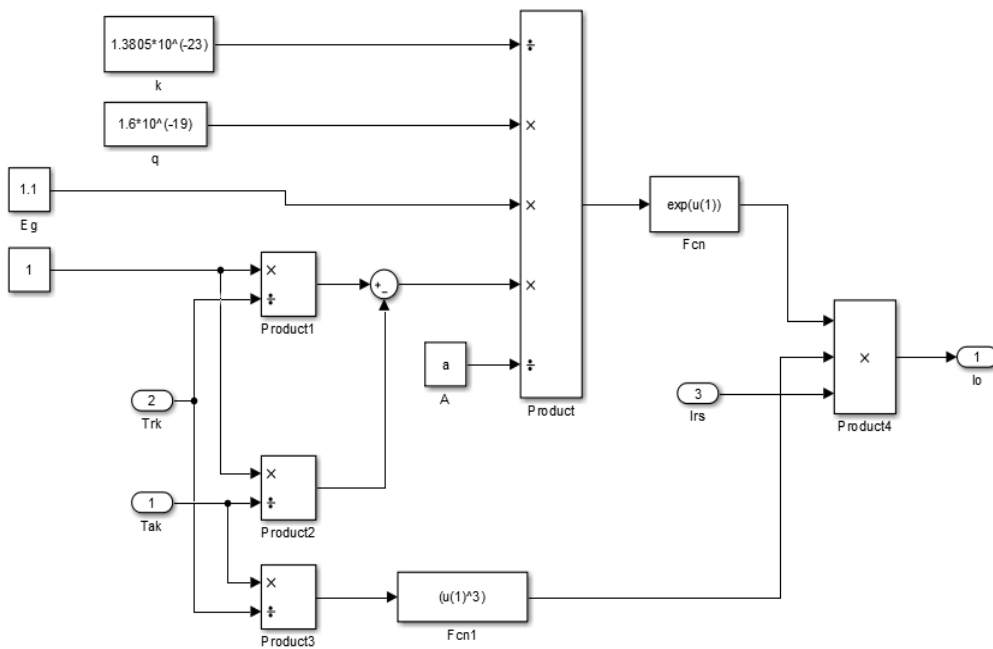
2. Equation d'un Courant circulant dans la résistance RS :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s n K T}\right) - 1}$$



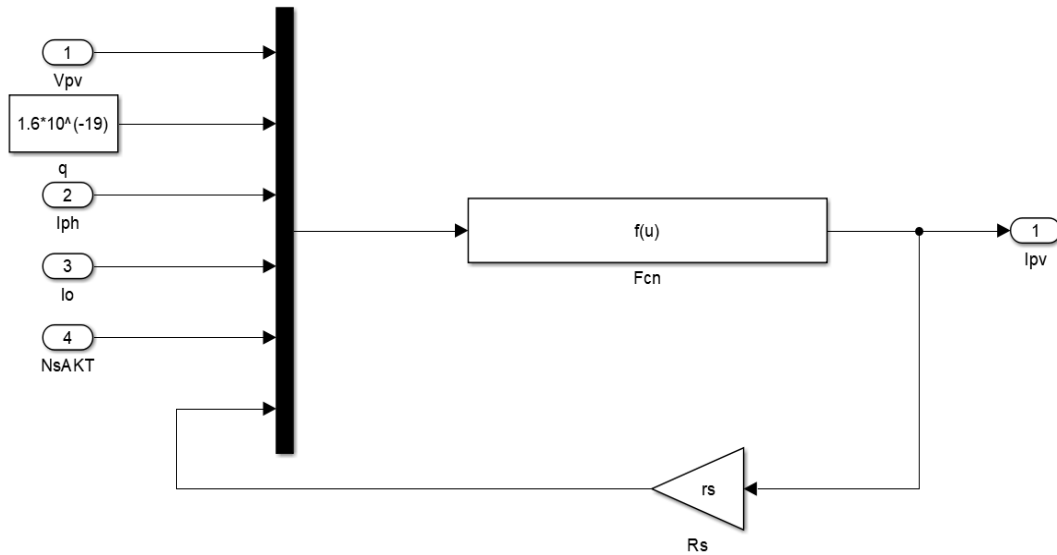
3. Equation d'un courant de saturation :

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{Trk}\right)^3 \left[\exp\left(\frac{qEg\left(\frac{1}{TrkT}\right)}{KT}\right) \right]$$



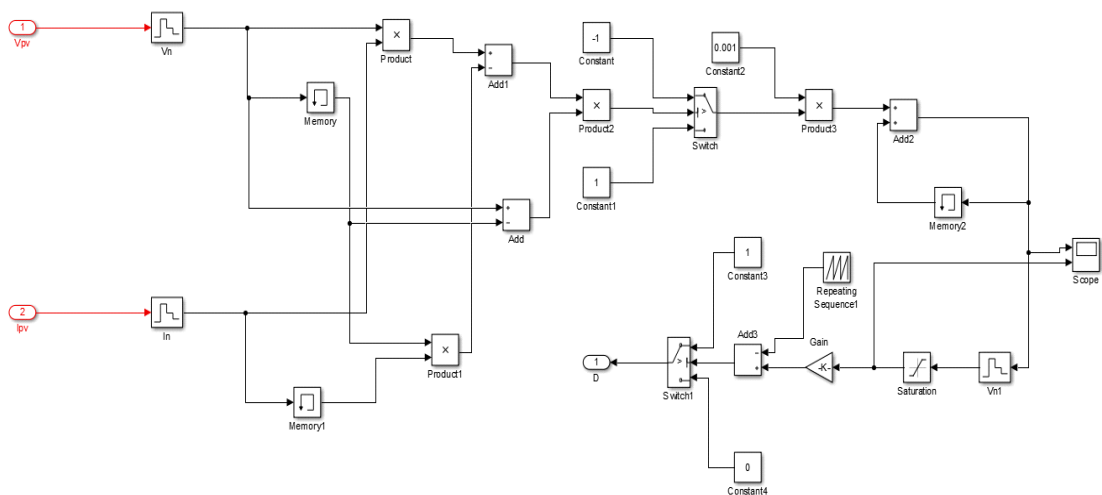
4. Equation d'un Courant généré par le générateur photovoltaïque

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(v_{pv} + \frac{N_s}{N_{ppp}} R_s I_{pv} \right)}{N_s n k T} \right) \right]$$



Annex B

Réalisation d'un algorithme MPPT (P&O) dans l'environnement
MATLAB/SIMULINK



Annex C

Le générateur photovoltaïque, moteur continue, pompe utilisée dans cette étude ont les paramètres suivantes

Température aux conditions standard, T	T=25 °C
Eclairement aux conditions standard, E	E = 1000 W/m ²
Tension de circuit ouverte, Voc	37.2
Courant de court-circuit, Isc	8.8668
Nombre de cellules connectées en série par module, Ns	60
Facteur d'idéalité de la diode, α	1.4464
Résistance série, rs	0.2470
Résistance parallèle, rp	130.07
Constante représentant la variation du courant avec la température [A/K], Ki	0.0025

Moteur à courant Continu :

Tension de l'induit, U	240 V
Puissance	5HP
Couple électromagnétique nominale, CN	20.0812 N.m
Vitesse nominale	1750 tr/min
L'inductance de l'induit, La	0.028 H
Résistance de l'induit, Ra	2.581 Ω
Moment d'inertie, J	0.02215 kg.m ²
Coefficient de frottement, f	0.002953 N.m.s
Constant, Ke	1.0665

Le pompe centrifuge

Vitesse	2900 tr/min
Puissance	14 kW
Débit	30 m ³ /h
Hauteur	80 m