

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur  
Département : Electrotechnique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Électrotechnique Industriel

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Etude par Simulation d'un Système Photovoltaïque  
alimentant un Moteur à Courant Continu**

Présenté par : *Guerara Ouarda*  
*Drardja Souhir*

Encadrant : *Dr Bensiali Nadia*

MCA

BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

ZERZOURI NOURA	MCB	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
BENSIALI NADIA	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
KLAIAIA M.S	PR	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

## *Remerciements*

*Nous profitons de cette opportunité pour remercier en premier lieu DIEU tout puissant de nous avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions notre encadreur*

*BENSIALI NADIA*

*pour l'effort qu'elle a déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger. Nous remercions très chaleureusement tous les membres de jury :*

*Mme KLAIAIA M.S et Mme ZERZOURI NOURA*

*pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre travail.*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à élaborer et réaliser ce modeste mémoire.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à ...*

*Mes chers parents, que nulle dédicace ne peut exprimer mes  
sincères sentiments, pour leur patience illimitée*

*Leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon  
profond amour et respect pour ses grands sacrifices.*

*A mon Binôme SOUHIR et à tous mes amies*

*Mes chers frères*

*Mes chères sœurs*

*Surtout mes neveux*

*Khalil et Sultan*

*et mes nièces*

*Safa, Yara, Rihem et Ariem*

*OUARDA*

## *Dédicaces*

*Louange à Dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu*

*A toi ma chère « Tita »...*

*Ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour. Que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir puisse Dieu vous avoir en sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour votre âme.*

*A toute « Ma Famille »*

*Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.*

*A mon binôme « OUARDA »*

*Pour tous les moments que nous avons passé ensemble tout au long de ce projet.*

*Aux chers amis(es) Hana, Maissa, Sara et sa fille, Hadjer, Hani, Aymen et Rahmen*

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment*

*A tous mes collègues d'études surtout ceux D'électrotechnique.*

*SOUHIER*

# Table des matières

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES</b>	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Rappel sur les énergies renouvelables.....	4
I.2.1. L'énergie éolienne.....	5
I.2.2. L'énergie hydraulique .....	6
I.2.3. L'énergie Biomasse .....	6
I.2.4. L'énergie géothermique.....	8
I.2.5. L'énergie solaire.....	8
I.2.5.1. L'énergie solaire thermique .....	8
I.2.5.2. L'énergie solaire photovoltaïque (panneaux photovoltaïques) : .....	9
I.3. Les avantages et les inconvénients d'énergie renouvelable .....	10
I.4. Rappel sur l'énergie solaire .....	11
I.4.1. L'énergie solaire photovoltaïque .....	11
I.4.2. Classification du rayonnement solaire.....	11
I.4.3. Effet photovoltaïque : .....	12
I.4.4. La cellule photovoltaïque : .....	13
I.4.4.1. Constitution d'une cellule PV : .....	13
I.4.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule PV : .....	14
I.4.4.3. Rendement d'une cellule .....	16
I.4.5. Les paramètres des cellules photovoltaïques : .....	17
I.5. Module photovoltaïque :.....	18
I.5.1. Générateur photovoltaïque :.....	18
I.5.2. Caractéristique Courant-Tension de GPV:.....	19
I.6. Association des modules photovoltaïques :.....	20
I.6.1. Association en série : .....	20
I.6.2. Association en parallèle : .....	21
I.6.3. Association série-parallèle : .....	21
I.7. Domaine d'applications des systèmes photovoltaïques .....	22
I.7.1. Systèmes autonomes .....	22
I.7.2. Systèmes hybrides .....	22
I.7.3. Systèmes couplés au réseau.....	23

1.7.4.	Systèmes fonctionnant au fil soleil (Pompage photovoltaïque).....	24
I.8.	Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques .....	25
I.9.	Conclusion .....	26

## **CHAPITRE II MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE**

II.1.	Introduction.....	27
II.2.	Le générateur photovoltaïque.....	27
II.2.1.	Modélisation d'un générateur photovoltaïque .....	28
II.2.2.	Modèle à une diode .....	28
II.2.3.	Modélisation électrique d'une cellule PV .....	30
II.3.	Caractéristique de générateur photovoltaïque .....	31
II.3.1.	Caractéristique Courant-Tension $I=f(V)$ :.....	32
II.3.2.	Influence de température et l'ensoleillement sur le GPV.....	33
II.3.2.1.	Influence de la température.....	33
II.3.2.2.	Influence de l'éclairement.....	33
II.4.	Protections D'un Générateur .....	34
II.5.	Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV .....	35
II.5.1.	Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge :.....	36
II.5.2.	Système de conversion .....	36
II.5.2.1.	Les convertisseurs DC-DC (hacheur) .....	37
II.5.2.2.	Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT) .....	44
II.6.	Conclusion .....	45

## **CHAPITRE III MPPT ET MCC**

III.1.	Introduction.....	46
III.2.	Principe de la commande MPPT.....	46
III.2.1.	Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS :.....	47
III.2.2.	Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :.....	48
III.3.	Les Algorithmes MPPT.....	48
III.3.1.	Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe).....	49
III.3.2.	Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).....	52
III.3.3.	Autres Méthodes .....	54
III.4.	Le moteur a courant continu .....	54
III.4.1.	La réversibilité du moteur a courant continu.....	54
III.4.2.	Constituions de MCC.....	55
III.4.3.	Les types de moteur à courant continu .....	56

III.4.4.	Principe de fonctionnement du moteur à courant continu .....	57
III.4.5.	Avantages et inconvénients .....	58
III.5.	Conclusion .....	59
<b>CHAPITRE IV SIMULATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE</b>		
IV.1.	Introduction .....	60
IV.2.	Simulation d'un GPV .....	60
IV.3.	Convertisseur DC/DC BOOST .....	61
IV.3.1.	Modélisation du hacheur Boost : .....	61
IV.3.2.	Dimensionnement des paramètres de convertisseur BOOST .....	62
IV.3.3.	Simulation de convertisseur DC/DC –BOOST .....	63
IV.3.4.	Le rapport cyclique .....	64
IV.4.	Simulation de panneau PV avec hacheur BOOST et son MPPT .....	65
IV.5.	Simulation de panneau PV-Hacheur BOOST et MPPT (P&O) .....	67
IV.6.	L'efficacité de l'algorithme P&O sur l'irradiation et la température .....	69
IV.6.1.	La variation de l'irradiation .....	69
IV.6.2.	La variation de température.....	71
IV.7.	Les paramètres du moteur à courant continu.....	72
IV.7.1.	Simulation globale du système.....	73
IV.7.2.	Caractéristique de moteur à courant continu.....	73
IV.8.	Conclusion.....	78
<b>Conclusion et Perspectives .....</b>		<b>79</b>
<b>Bibliographie .....</b>		<b>81</b>

# Liste des Figures

Figure 1.1 : Types d'énergie renouvelables .....	5
Figure 1.2 : schéma éolienne .....	5
Figure 1.3 : fonctionnement d'un central hydraulique .....	6
Figure 1.4 : central biomasse. ....	7
Figure 1.5 : fonctionnement d'un central biomasse .....	7
Figure 1.6 : Le stockage de l'énergie solaire .....	8
Figure 1.7 : Schéma d'énergie solaire pour une maison .....	9
Figure 1.8 : Panneaux photovoltaïque .....	9
Figure 1.9: Types de rayonnement solaire reçus au sol. ....	12
Figure 1.10 : schéma d'une cellule photovoltaïque. ....	13
Figure 1.11 : La constitution de la cellule photovoltaïque. ....	14
Figure 1.12 : Structure d'une cellule photovoltaïque .....	15
Figure 1.13: Les images de différents types de la cellule photovoltaïque. ....	16
Figure 1.14 : Représentation d'un Module photovoltaïque. ....	18
Figure 1.15: Composantes d'un GPV. ....	19
Figure 1.16: Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C .....	19
Figure 1.17 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série. ....	20
Figure 1.18 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.....	21
Figure 1.19 : Association mixte des modules solaires.....	21
Figure 1.20 : Système Hybride .....	23
Figure 1.21 : Système PV couplée au réseau .....	23
Figure 1.22 : Système de pompage d'eau (pompage solaire) .....	24
Figure 2.1 : chaine de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	27
Figure 2.2: composants d'un générateur .....	28
Figure 2.3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	28
Figure 2.4: Schéma équivalent d'une cellule solaire .....	31
Figure 2.5: caractéristique d'un PV à condition standard $G=1000w/m^2$ et $T=25c$ .....	32
Figure 2.6: Caractéristiques I_V et P_V du module SunPower PL-SUNP-SPR-290 pour une Température variable et Irradiation constante $G=1Kw/m^2$ .....	33
Figure 2.7: Caractéristiques I_V et P_V du module Sun Power PL-SUNP-SPR-290 pour une Irradiation variable et Température constante $T=25^\circ$ .....	34
Figure 2.8: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.	35
Figure 2.9: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge L'adaptateur communément ....	36
Figure 2.10 : schéma électrique d'un hacheur Buck .....	37
Figure 2.11: Circuit équivalent de convertisseur buck pour Ton .....	38
Figure 2.12: Circuit équivalent de convertisseur buck pour Tof .....	39
Figure 2.13: Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur buck. ....	39
Figure 2.14: Schéma de convertisseur élévateur « Boost ». ....	40

Figure 2.15: Circuit équivalent de convertisseur boost pour Ton .....	41
Figure 2.16: Circuit équivalent de convertisseur boost pour Toff .....	41
Figure 2.17: Formes d'onde des courants et tensions d'un convertisseur Boost.....	42
Figure 2.18: Schéma de convertisseur élévateur « Buck-Boost ».....	42
Figure 2.19 : Circuit équivalent de convertisseur back-boost pour Ton .....	43
Figure 2.20: Circuit équivalent de convertisseur back-boost pour Toff.....	43
Figure 2.21 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost ....	44
Figure 3.1: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	46
Figure 3.2: Principe de la commande MPPT .....	47
Figure 3.3: Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	50
Figure 3.4: l'algorithme de P&O classique.....	50
Figure 3.5: caractéristique de tension-puissance du panneau .....	52
Figure 3.6: la réversibilité de MCC .....	55
Figure 3.7: constitution du moteur a courant continu.....	56
Figure 3.8: types de moteur a courant continue .....	56
Figure 3.9: principe de fonctionnement d'un MCC (fore de la place) .....	57
Figure 3.10: principe de fonctionnement d'un MCC.....	58
Figure 4.1: schéma synoptique d'un système PV avec MPPT .....	60
Figure 4.2: Modèle de simulation du GPV .....	61
Figure 4.3: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque .	61
Figure 4.4 : Modèle Sim Power du hacheur survolteur (Boost) .....	63
Figure 4.5: Caractéristique de la tension de sortie du hacheur Boost .....	63
Figure 4.6 : caractéristique de la puissance à la sortie de boost .....	64
Figure 4.7: caractéristique de courant à la sortie de Boost.....	64
Figure 4.8 : schéma block de rapport cyclique .....	65
Figure 4.9: Schéma de simulation panneau PV_Hacheur_Boost_charge résistive sans MPPT	65
Figure 4.10 : Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique $D=0.5$ .....	66
Figure 4.11 : Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique $D=0.5$ .....	66
Figure 4.12 : Puissances du panneau photovoltaïque et de la charge sans MPPT .....	66
Figure 4.13 : Schéma de simulation panneau PV_Hacheur_Boost_charge résistive avec MPPT .....	67
Figure 4.14: Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT .....	68
Figure 4.15 : Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT .....	68
Figure 4.16 : Puissances du panneau photovoltaïque et de la charge avec MPPT.....	68
Figure 4.17 : Variation de l'Irradiation en fonction du temps .....	69
Figure 4.18: Rapport cyclique D pour G variable .....	70
Figure 4.19 : Puissances du panneau photovoltaïque avec MPPT pour différentes irradiations .....	70

Figure 4.20 : Variation de la Température en fonction du temps .....	71
Figure 4.21 : Rapport cyclique D pour T variable .....	71
Figure 4.22: Puissances du panneau photovoltaïque avec MPPT pour différentes Températures .....	71
Figure 4.23 : schéma synoptique d'association de PV avec MCC .....	72
Figure 4.24: schéma block du système globale (GPV, convertisseur, MPPT (P&O), (MCC) .....	73
Figure 4.25 : caractéristique de vitesse du MCC $\omega = f(t)$ .....	73
Figure 4.26 : caractéristique de couple du MCC $C = f(t)$ .....	74
Figure 4.27: caractéristique de courant du MCC $I = f(t)$ .....	74
Figure 4.28: caractéristique mécanique du MCC à excitation indépendante pour une tension d'induit variable .....	75
Figure 4.29 : Vitesse du moteur en fonction du temps .....	75
Figure 4.30 : Couple de charge en fonction du temps .....	76
Figure 4.31 : Caractéristiques mécaniques du moteur et de la charge .....	76
Figure 4.32 : Caractéristique $P=f(V)$ du GPV utilisé pour alimenter le système .....	76
Figure 4.33: Tension délivrée par le panneau et celle à la sortie de l'hacheur appliquée à l'induit du moteur .....	77
Figure 4.34: La puissance électrique absorbée par le moteur et mécanique en bout d'arbre	77
Figure 4.35: caractéristique de la vitesse en fonction de temps $\omega = f(t)$ .....	78

# Liste des Tableaux

Tableau 1.1: Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables .....	10
Tableau 1.2: Les différents types des cellules avec leur rendement .....	16
Tableau 2.1: caractéristique de panneau PV PL-SUNP-SPR-290.....	32
Tableau 4.1: paramètre du MCC .....	72

# Notations et Abréviations

**AC** : Courant Alternatif

**Ap** : Nombre de module constituant le champ photovoltaïque

**C** : La vitesse de propagation

**CC** : Courant Continue

**CS** : Convertisseur Statique

**CV** : Constant Voltage

**D<sub>opt</sub>** : Le rapport cyclique optimal

**D** : diode

**DC** : Diamètre des conduites

**e** : Encapsulant

**E<sub>g</sub>** : Energie de bande gap

**f** : La fréquence

**G** : Eclairement absorbé par la cellule

**g** : Un abri verre

**Ge** : Germanium

**GPV** : Générateur photovoltaïque

**I** : Courant instantané [A]

**I<sub>ch</sub>** : Le courant aux bornes du champ photovoltaïque (A)

**IGBT**: Insulated –Gate Bipolar Transistor

**I<sub>max</sub>** : Le courant maximale

**IncCond** : Incrementale Conductance (Conductance Incrémentale)

**K** : La constante de Boltzmann  $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{J}$

**L** : L'inductance de filtre de convertisseur statique

**m** : un métal en arrière contact

**MCC** : Moteur à Courant Continue

**MOSFET** : Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor

**MPPT** : Poursuite de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)

**n** : Le facteur de pureté de la diode D

**NOCT** : Nominal Operating Cell Temperature

**N<sub>p</sub>** : Cellules identiques montées en parallèle

**N<sub>s</sub>** : Cellules identiques montées en série

**P&O** : Perturbation et Observation (Perturb&Observ)

**P<sub>c</sub>** : La Puissance Crête

**P<sub>e</sub>** : La Puissance à l'entrée

**P<sub>max</sub>** : La Puissance maximale

**p-n** : Jonction entre les matériaux

**PPM** : Point de Puissance Maximale

**P<sub>s</sub>** : la puissance à la sortie

**PV** : Panneau photovoltaïque

**Q** : Constante de la charge élémentaire  $q=1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$

**R<sub>s</sub>, R<sub>p</sub>** : La résistance série et la résistance parallèle respectivement

**S** : Surface du module photovoltaïque (m<sup>2</sup>)

**Si** : silicium(Si)

**STC** : Standard Test Conditions

**T** : Température en Kelvin

**V<sub>ch</sub>** : La tension aux bornes du champ photovoltaïque (V)

**V<sub>g</sub>** : Energie de Gap du matériel de la cellule PV en [eV]

**V<sub>mp</sub>** : La tension maximale

**V<sub>s</sub>** : Tension instantanée [V]

**V<sub>TH</sub>** : Tension thermique

**I<sub>D</sub>** : Courant circulant dans la diode

$I_C$  : Courant d'une seule cellule  
 $I_L$  : Courant moyen passant à travers l'inductance  
 $I_{Réf}$  : Courant de référence  
 $I_0$  : Courant de la saturation inverse de la diode  
 $R_L$  : Résistance de filtre  
 $V_C$  : Tension d'une seule cellule  
 $V_{Réf}$  : Tension de référence  
 $G_n$  : L'irradiation nominale (l'ensoleillement nominale  $G = 1000 \text{w/m}^2$ )  
 $I_{PH}$  : Courant de la cellule (photo-courant)  
 $I_{PPM}/I_{opt}$  : Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A]  
 $I_{PV}/I_{cell}$  : Courant généré par la cellule (générateur) photovoltaïque  
 $I_{CS}$  : Courant de cour circuit  
 $I_m$  : Courant de modulation  
 $I_{pv}$  : Courant photonique généré par l'irradiation solaire  
 $I_{sc}$  : Courant de cour- circuit [A]  
 $I_{scn}$  : Courant de court-circuit nominal [A]  
 $I_0$  : Le courant de saturation de la diode D  
 $K_i$  : Coefficient de température pour le courant exprimé en [A/K]  
 $K_v$  : Coefficient de température pour la tension exprimé en [V/K]  
 $T_n$  : La température nominale ( $T_n=25c$ )  
 $V_{PPM}/V_{opt}$  : Tension d'un module PV au point de puissance maximale  
 $V_{PV}/V_{cell}$  : Tension généré par la cellule (générateur) photovoltaïque  
 $V_{co}$  : Tension de circuit ouvert [V]  
 $V_{con}$  : Tension de circuit ouvert nominale [V]  
 $V_{c0}$  : Tension à vide  
 $q$  : Charge électron ( $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

**$\alpha$** : le rapport cyclique

**$\lambda$**  : La longueur d'onde

**$\Omega$  réf** : la vitesse de référence [rad/s]

**$\Omega$**  : Vitesse de rotation mécanique [rad/s]

**$I_{rp}$**  : Courant circulant dans la résistance RP

**$R_p$**  : Résistance shunt de la cellule

**$R_s$**  : Résistance série de la cellule

**$\omega$**  : Pulsation électrique du rotor ( $\omega = P \cdot \Omega$ ) [rad/s]

## **Introduction générale**

---

L'énergie s'est imposée comme étant l'élément moteur de toute civilisation à travers les temps. De nos jours, elle consiste un défi d'une très grande importance, et qui se trouve positionnée non loin de la majorité des crises économiques, conflit politiques ou armés contemporains. Ces dernières années, plusieurs inquiétudes ont surgit concernant les sources d'énergies actuelles, il est surtout question de leur pérennité et leur impact sur l'environnement. Parallèlement à cela, un grand intérêt a été porté et dirige vers des ressources d'énergie nouvelles, et surtout renouvelables ; des sources inépuisables, propre et respectueuse de l'environnement telles que l'énergie photovoltaïque (PV), l'énergie éolienne, hydraulique, géothermique, ou encore la biomasse. L'énergie photovoltaïque qui provient de la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique se présente comme étant la plus adaptée pour notre pays vu son étendu, sa position géologique et son gisement solaire. Ce dernier a été évalué à plusieurs TWh/an sellant le centre allemand spécial (DLR). Cela peut justifier l'importance du défi soulevé par le gouvernement visant l'intégration des énergies renouvelable en fixant l'objectif de 5% en 2017 et 40% en 2030. Cependant, l'énergie photovoltaïque (PV) demeure chère vu le cout d'investissement initiale des installations PV. Pour assurer sa compétitive vis-à-vis des sources d'énergie conventionnelle, multiples efforts sont fait pour arriver à une dualité entre le Wh PV et le Wh conventionnelle.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV), basée sur un phénomène physique Apple effet photovoltaïque qui consiste à déduire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu

## *INTRODUCTION GENERALE*

à un générateur photovoltaïque(GPV) qui a une caractéristique courant- tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique I-V du GPV dépend de l'intensité d'éclairement et de la température ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement de GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire de chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes de GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour couplées les deux éléments le plus parfaitement possible.

Cependant les inconvénients majeurs de cette énergie sont le prix de générateur qui reste encore élevé ainsi que le rendement énergétique relativement bas. Pour sur monter ces problèmes, deux voies sont souvent suivies :

- Augmenter le rendement énergétique en adoptant des technologies de très haut niveau lors de la fabrication des cellules PV.
- Maximiser la puissance délivrée par le générateur.

Le but de ce travail est la maximisation de la puissance dans un système photovoltaïque alimentant un moteur à courant continu en utilisant un convertisseur DC/DC de rendement élevé qui convertit la puissance fournie vers un niveau de tension adapté à la charge entraînée.

Le mémoire présenté est organisé en quatre chapitres avec une introduction et une conclusion générale:

Dans le premier chapitre, on a présenté d'une manière générale les différents types d'énergies renouvelables et spécialement l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, on trouve la modélisation du générateur photovoltaïque et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur les caractéristiques de ce dernier. Une étude des convertisseurs DC-DC (hacheur dévolteur, hacheur survolteur et mixte) a été effectué

## *INTRODUCTION GENERALE*

Dans le troisième chapitre, on a effectué une étude comparative entre les différentes techniques utilisées pour la maximisation de la puissance et spécialement l'algorithme (P&O). On a terminé ce chapitre par la présentation et la modélisation du moteur à continu (principe de fonctionnement, types, avantages et inconvénients).

Dans le quatrième chapitre et le dernier la simulation de la chaîne de conversion globale a été effectuée. Le système réalisé sous MATLAB/SIMULINK est constitué d'un panneau photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC, d'un moteur à courant continu et un bloc de commande MPPT assurant la maximisation de la puissance.

En fin, on termine par une conclusion générale et les perspectives.

# Chapitre I

## GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

## **I.1. Introduction**

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque.

En effet le mot "photovoltaïque" vient de la grecque "photo" qui signifie la lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité.

Dans ce premier chapitre, nous allons parler d'une manière générale sur les énergies renouvelables et des systèmes photovoltaïques (PV), les éléments de captage d'un système PV (source d'énergie PV), on parle aussi à domaine d'application des systèmes PV et leurs avantages et inconvénients.

## **I.2. Rappel sur les énergies renouvelables**

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont inépuisables et peu ou pas polluantes.

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables provenant de différentes sources naturelles.[02]



Figure 1.1 : Types d'énergie renouvelables

### I.2.1. L'énergie éolienne

Les éoliennes utilisent le vent pour produire de l'énergie. En effet, le vent fait tourner les pales ces dernières font tourner un générateur électrique permettant de produire de l'électricité. Plus la vitesse du vent augmente, plus la génératrice pourra produire d'énergie.

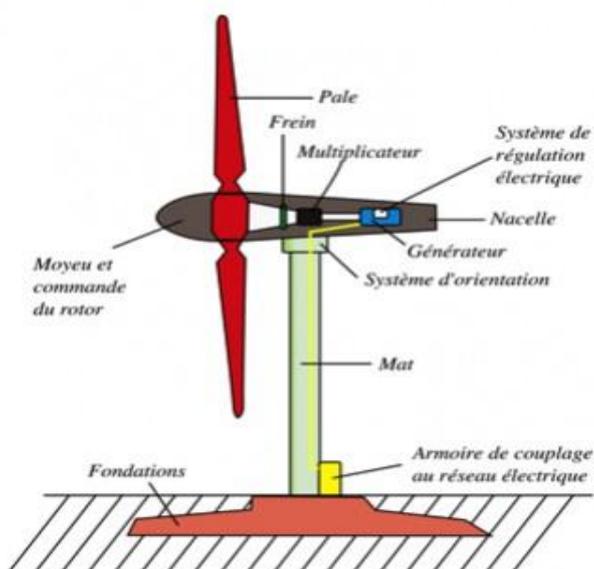
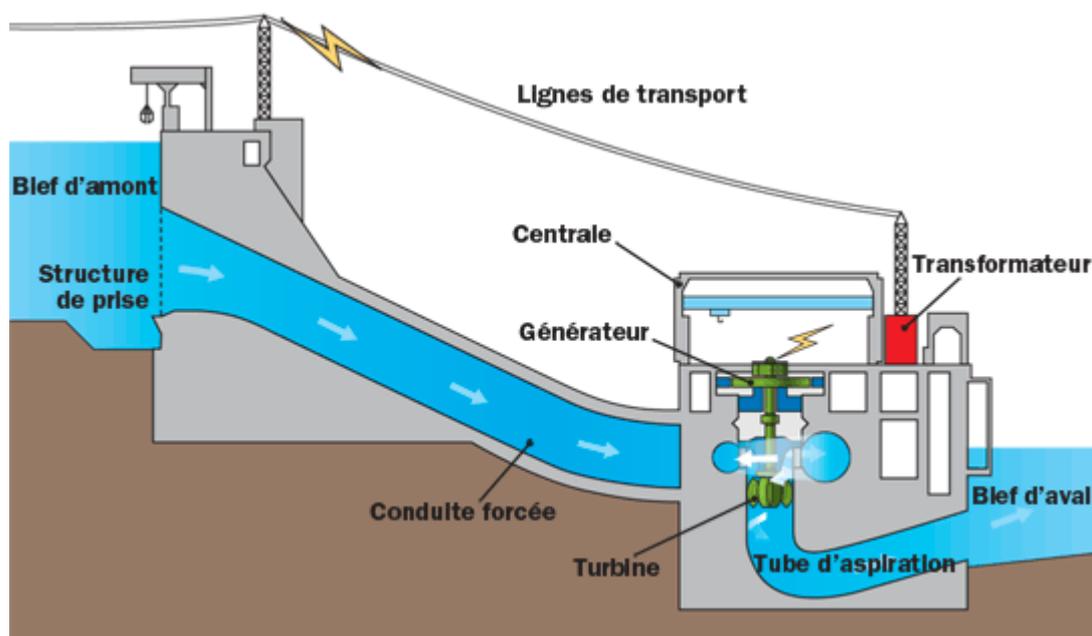


Figure 1.2 : schéma éolienne

### **I.2.2. L'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique permet de produire de l'électricité grâce à l'eau. Le mouvement de l'eau (chute, courant marin, marée) est transformé en énergie mécanique par une turbine hydraulique, puis en énergie électrique par un générateur, pour produire de l'hydroélectricité.

Le plus souvent, les centrales hydroélectriques sont alimentées par l'écoulement contrôlé de l'eau accumulée par des barrages.



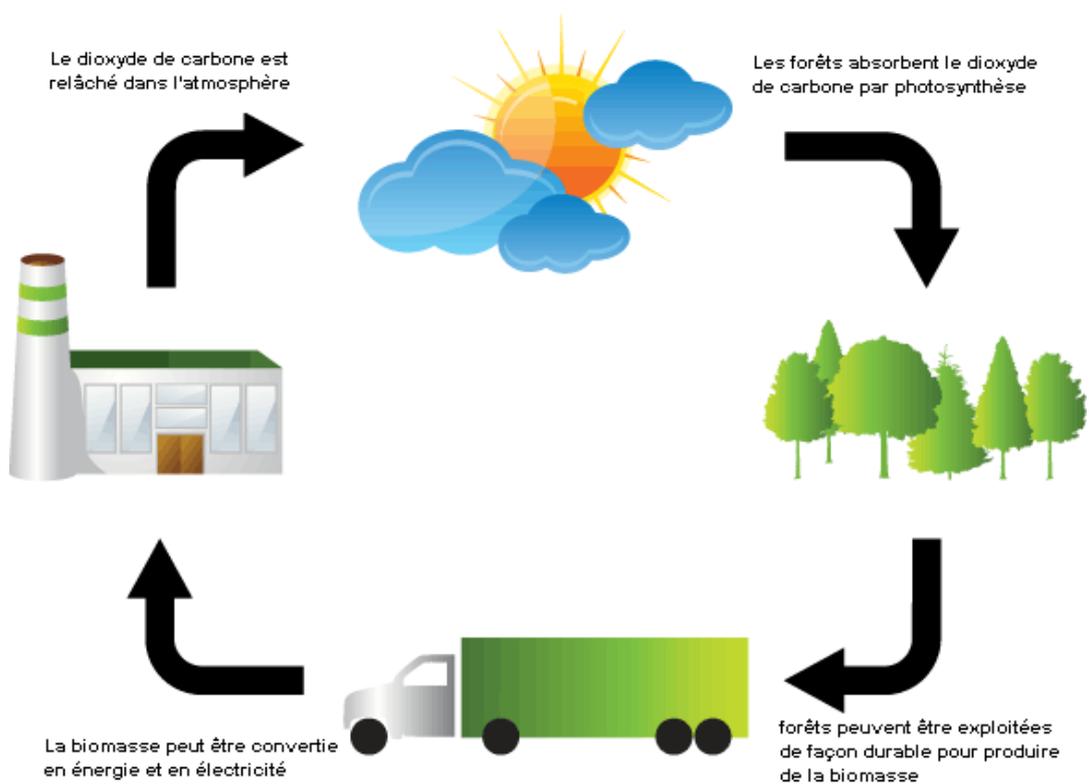
**Figure 1.3 : fonctionnement d'un central hydraulique**

### **I.2.3. L'énergie Biomasse**

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières organiques d'origines végétales et animales, On peut utiliser pour se chauffer, produire des biocarburants et aussi du biogaz qui sera brûlé pour produire de la chaleur et de l'électricité, faire de la chimie.



**Figure 1.4 : central biomasse.**



**Figure 1.5 : fonctionnement d'un central biomasse**

### **I.2.4. L'énergie géothermique**

La géothermie utilise la chaleur du sous-sol pour permettre de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée).

### **I.2.5. L'énergie solaire**

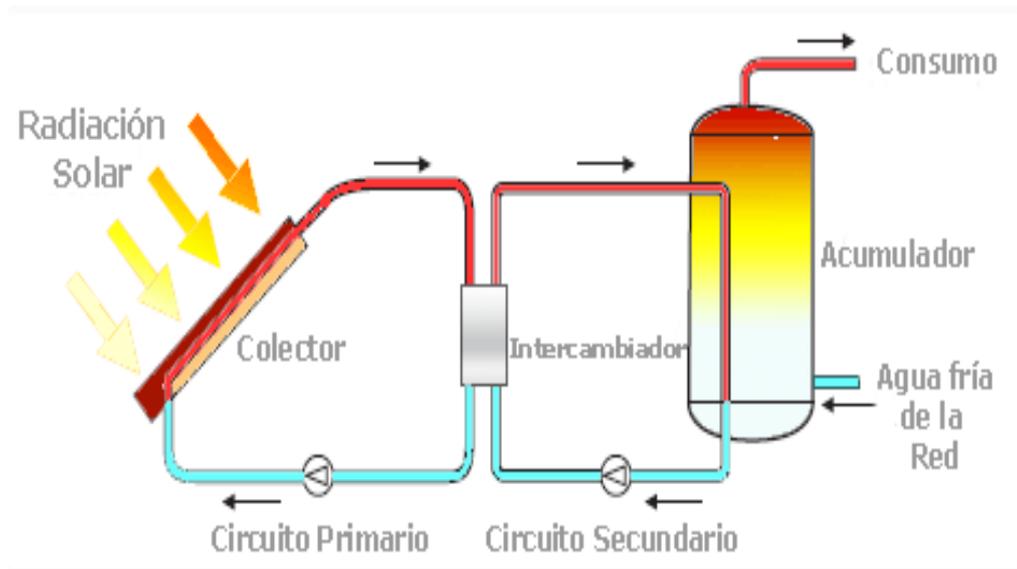
L'énergie solaire puise ses ressources grâce aux rayons du soleil et permet de produire de la chaleur et de l'électricité. On compte deux sortes d'énergie solaire.



**Figure 1.6 : Le stockage de l'énergie solaire**

#### **I.2.5.1. L'énergie solaire thermique**

Cette énergie s'utilise grâce à des panneaux solaires thermiques, similaires aux panneaux photovoltaïques, construit sous forme de tuyaux. Ces derniers vont alors absorber la chaleur du soleil pour transformer leur eau en chaleur.



**Figure 1.7 : Schéma d'énergie solaire pour une maison**

**1.2.5.2. L'énergie solaire photovoltaïque (panneaux photovoltaïques) :**

Est la forme d'énergie solaire la plus connue. L'électricité est produite à partir de la lumière du soleil au moyen d'installations photovoltaïques. Celles-ci alimentent des sites isolés ou le réseau de distribution général.



**Figure 1.8 : Panneaux photovoltaïque**

### I.3. Les avantages et les inconvénients d'énergie renouvelable

Energie Renouvelable	Avantages	Inconvénients
Énergie Solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Investissement rentable</li> <li>● Indépendant au réseau électrique général</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Cher à l'installation</li> <li>● Dépend du climat (moins il y a de soleil, moins il y a de production)</li> </ul>
Énergie Éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>● La surface occupée au sol est peu importante</li> <li>● Coût de production faible par rapport à l'énergie produite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● la production d'énergie est variable à cause de vent intermittente</li> <li>● Cher à la fabrication et à l'installation</li> </ul>
Énergie Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Démarrage et arrêt des centrales très rapides.</li> <li>● Souplesse d'exploitation grâce au système automatisé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Perturbation de la faune et de la flore</li> <li>● Risque pour les personnes lié au barrage.</li> </ul>
Énergie Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>● L'énergie biomasse est fabriquée à partir de déchets réutilisés</li> <li>● Produit plusieurs énergies (électricité, chauffage, Biocarburant)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Les combustions dégagent des substances nocives et polluantes</li> <li>● Risque de déforestation en cas de surexploitation</li> </ul>
Énergie Géothermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ne dépend pas des conditions climatiques</li> <li>● Pas d'espace de stockage nécessaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● se trouve dans des zones montagneuses ou volcaniques</li> <li>● La rentabilité financière prend plusieurs années</li> </ul>

Tableau 1.1: Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables

## **I.4. Rappel sur l'énergie solaire**

### **I.4.1. L'énergie solaire photovoltaïque**

L'électricité est une des formes d'énergie les plus versatiles et qui s'adapte au mieux à chaque nécessité, son utilisation est si étendue, qu'aujourd'hui on pourrait difficilement concevoir une société techniquement avancée qui n'en fasse pas usage. Des milliers d'appareils sont dessinés pour fonctionner grâce à l'énergie électrique, soit sous forme de courant continu de faible tension, soit à partir d'un courant alternatif de tension plus élevée.

Il est très intéressant de produire de l'électricité avec une source d'énergie sûre et pas polluante, comme l'énergie solaire. Il existe deux méthodes pour pouvoir convertir l'énergie solaire en électricité :

- Systèmes de conversion thermodynamique.
- Système directs, fondés sur les interactions physiques entre les photons de la radiation incidente et les électrons du matériau :

L'effet photovoltaïque.[03]

### **I.4.2. Classification du rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10<sup>-6</sup>m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent. Il existe différent type de rayonnement qui est :

#### **➤ Rayonnement direct :**

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

### ➤ Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

### ➤ Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo ( $\epsilon$ )  $0 \leq \epsilon \leq 1$ .

### ➤ Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions directes, diffus et réfléchi



Figure 1.9: Types de rayonnement solaire reçus au sol.

### I.4.3. Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (Photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (Silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.[04]

## CHAPITRE I GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique.

### I.4.4. La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un élément de base dans un panneau solaire. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs généralement à base de Silicium et elle transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique.

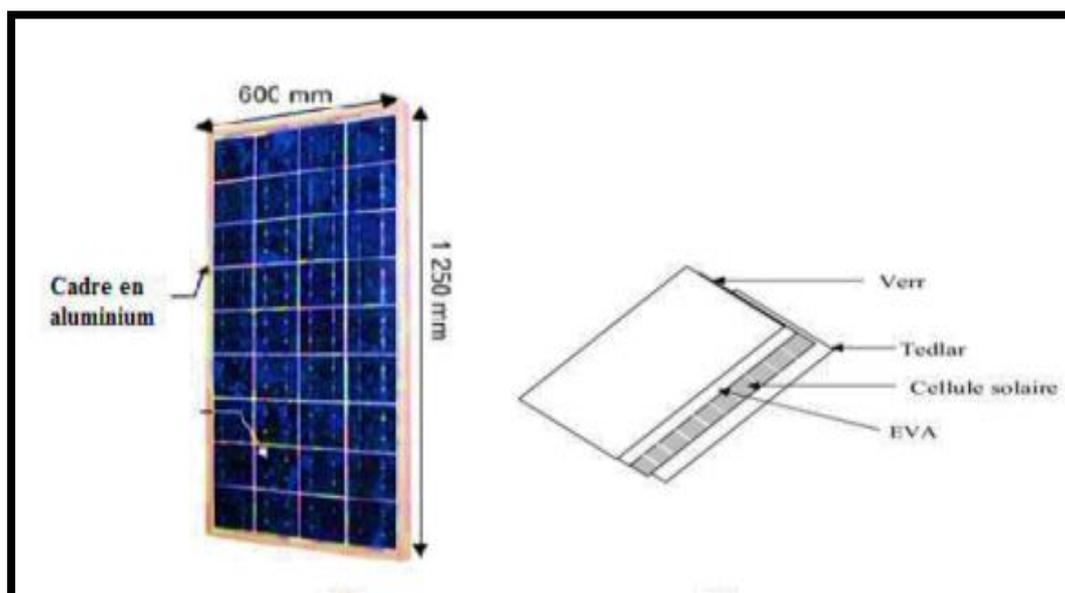


Figure 1.10 : schéma d'une cellule photovoltaïque.

#### I.4.4.1. Constitution d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés

## CHAPITRE I GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

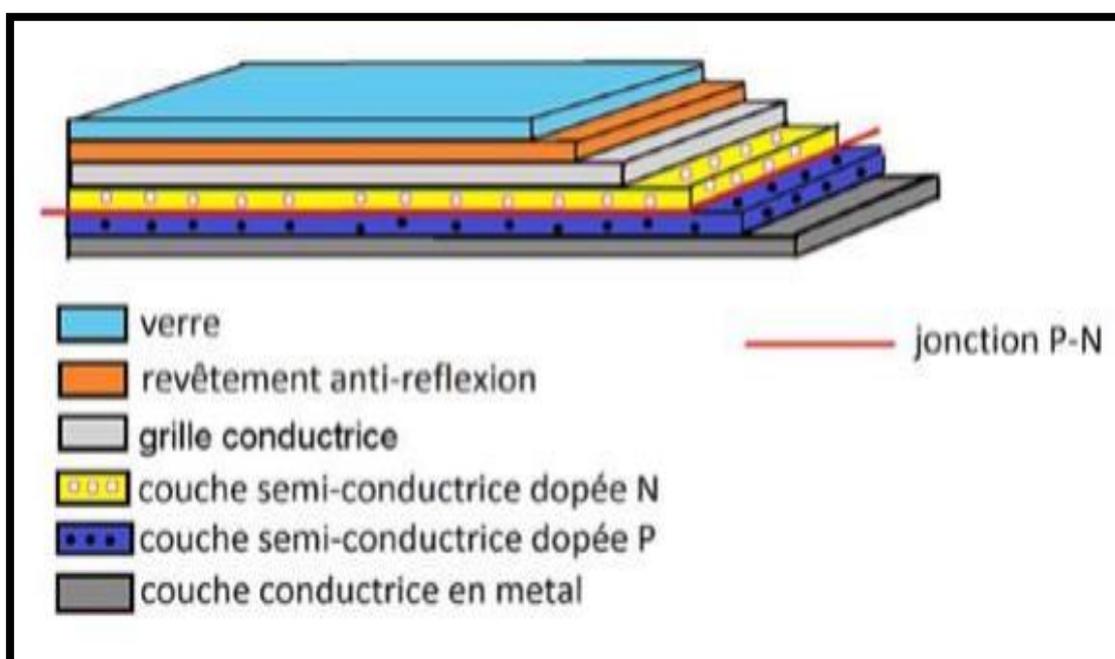


Figure 1.11 : La constitution de la cellule photovoltaïque.

### I.4.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. La taille de chaque cellule va de quelque centimètre jusqu'à 100 cm<sup>2</sup>, sa forme est circulaire carrée ou dérivée des deux géométries. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés

## CHAPITRE I GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

par le semi-conducteur, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

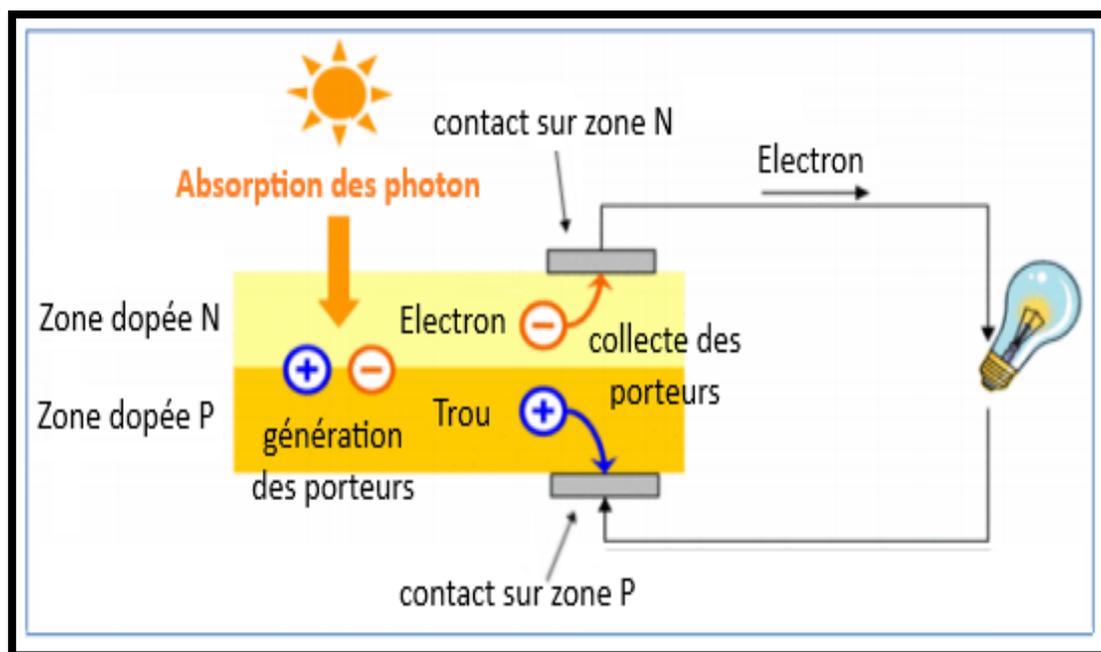


Figure 1.12 : Structure d'une cellule photovoltaïque

Il existe différents types des cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium.

### a. Les cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement ainsi qu'un coût très élevé, du fait que leurs fabrications sont coliques.

### b. Les cellules poly cristallines :

Un rendement plus faible, et un coût de fabrication moins important ainsi qu'une conception plus au moins facile.

**c. Les cellules amorphes :**

Elles sont utilisées dans de petits produits tel que des calculatrices ou encore des montres elles ont un rendement assez faible, elles nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium donc un cout plus élevé.

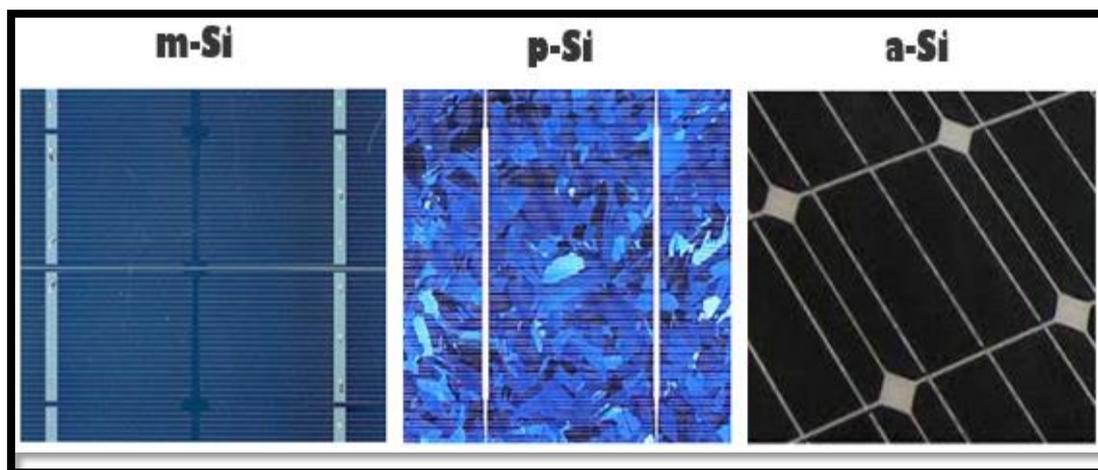


Figure 1.13: Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.

**I.4.4.3. Rendement d'une cellule**

Le tableau suivant présente les différents types des cellules avec leur rendement.

<b>Technologie des cellules</b>	<b>Rendement en laboratoire</b>	<b>Rendement en production</b>
<b>Silicium amorphe (a-Si)</b>	13%	5-9%
<b>Silicium poly Cristallin (p-Si)</b>	19.8%	11 à 15%
<b>Silicium monocristallin (m-Si)</b>	24.7%	13 à 17%

**Tableau 1.2: Les différents types des cellules avec leur rendement**

### **I.4.5. Les paramètres des cellules photovoltaïques :**

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres ces paramètres sont extraits des caractéristiques courant-tension qui permettent de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit :

➤ **Courant de court-circuit  $I_{cc}$  :**

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_{sh}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$ .

$$I_{cc} (V = 0) = I_{ph} \quad (1.1)$$

➤ **Tension à circuit ouvert  $V_{co}$  :**

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$V_{co} = V_t \cdot \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.2)$$

➤ **Rendement énergétique :**

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_{max} (I_{opt}, V_{opt})$  et la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{E \cdot S} \quad (1.3)$$

Avec  $S$  : surface de la cellule en  $m^2$ .  $E$  : l'éclairement en  $W/m^2$ .

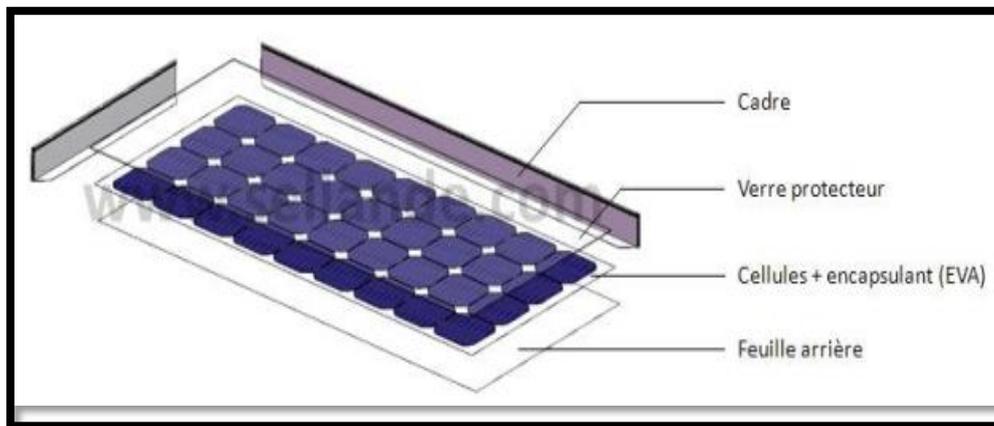
➤ **Facteur de forme :**

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de

circuit-ouvert  $V_{co}$ . 
$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.4)$$

**I.5. Module photovoltaïque :**

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis Encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées.



**Figure 1.14 : Représentation d'un Module photovoltaïque.**

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ❖ Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- ❖ Protection mécanique et support.
- ❖ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur

**I.5.1. Générateur photovoltaïque :**

Un générateur PV est constitué des modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel figure 1.7.

Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur.

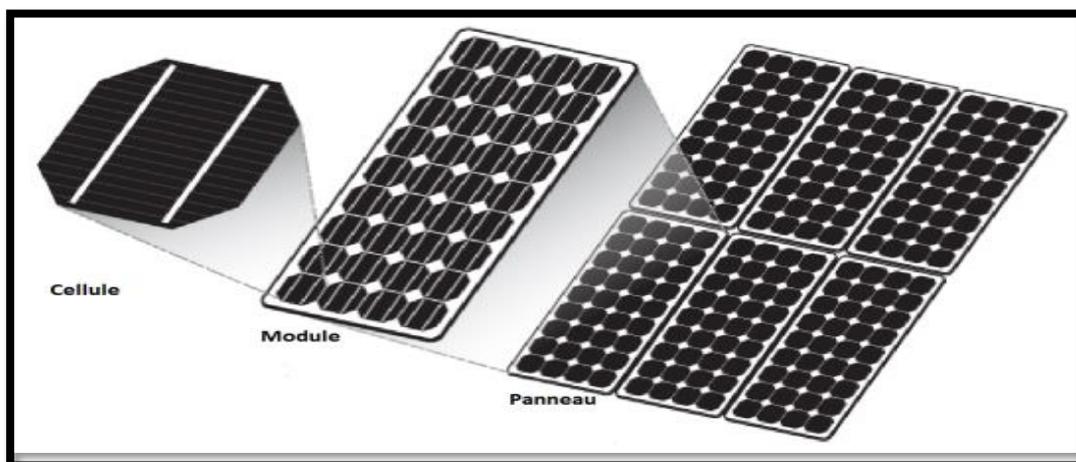


Figure 1.15: Composantes d'un GPV.

### I.5.2. Caractéristique Courant-Tension de GPV:

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe  $I(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (1.16) représente trois zones essentielles :

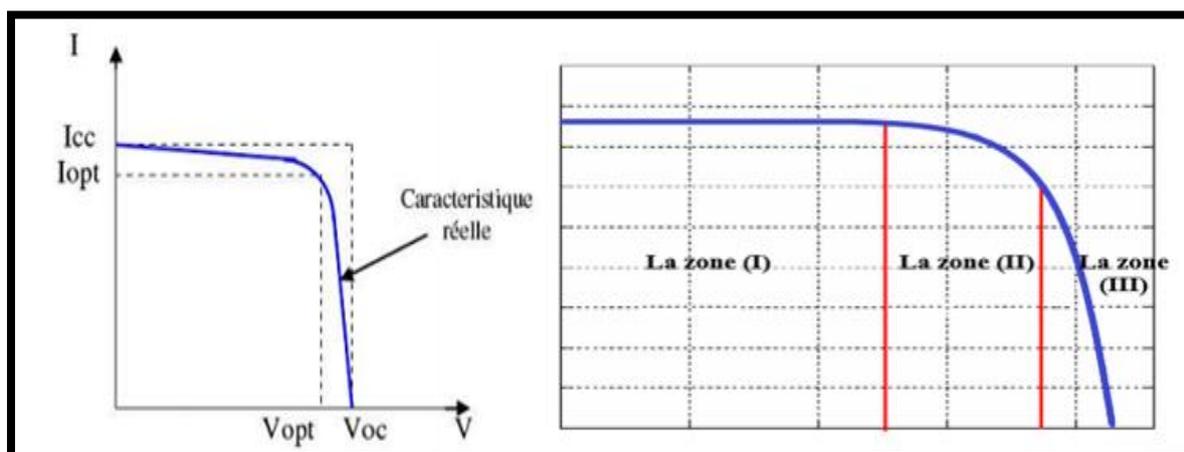


Figure 1.16: Les différentes zones de la caractéristique  $I(V)$ ,  $T=25^{\circ}\text{C}$

- **La zone (1) :** Où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (2) :** Représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (3) :** Qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

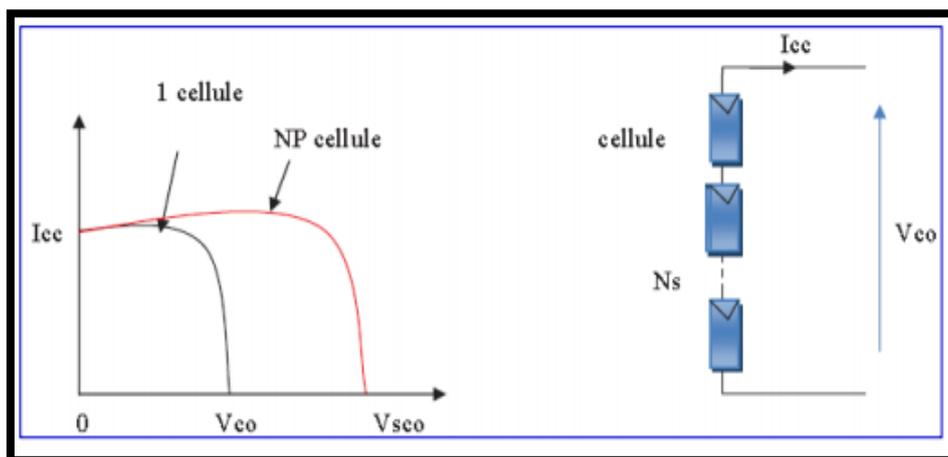
## **I.6. Association des modules photovoltaïques :**

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique.

### **I.6.1. Association en série :**

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (1.17) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant.

$$V_{coNs} = V_{co} \cdot N_s \quad (1.5)$$



**Figure 1.17 : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série.**

### I.6.2. Association en parallèle :

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule figure (1.18) permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé, les cellules sont soumises à la même tension.

$$I_{ccNp} = I_{cc} \cdot N_p \quad (1.6)$$

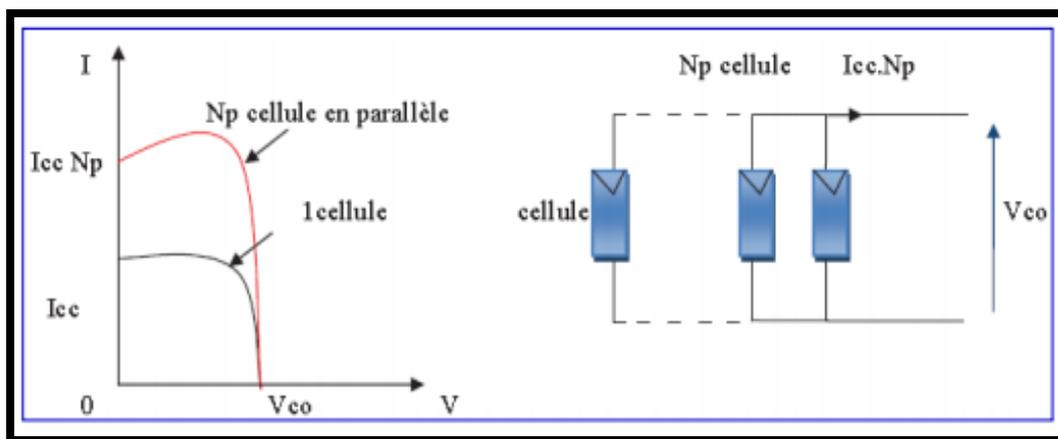


Figure 1.18 : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

### I.6.3. Association série-parallèle :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle

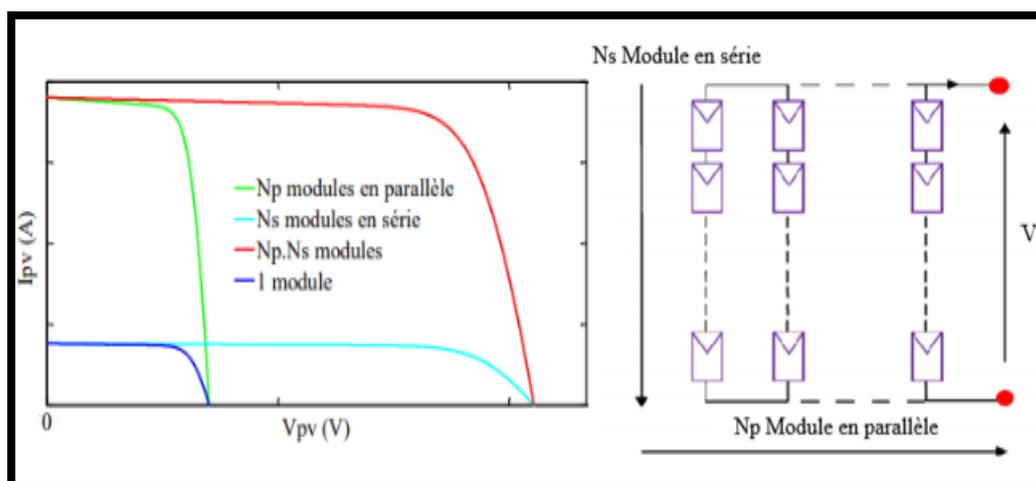


Figure 1.19 : Association mixte des modules solaires.

## **I.7. Domaine d'applications des systèmes photovoltaïques**

Les principales applications des systèmes photovoltaïques sont énumérées ci-après.[05]

### **I.7.1. Systèmes autonomes**

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergie. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Une telle installation doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a pas de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps).il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée dans des batteries.

### **I.7.2. Systèmes hybrides**

Les systèmes hybrides consistent en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue dans le temps. Les systèmes hybrides fonctionnent tels que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y'a du vent).

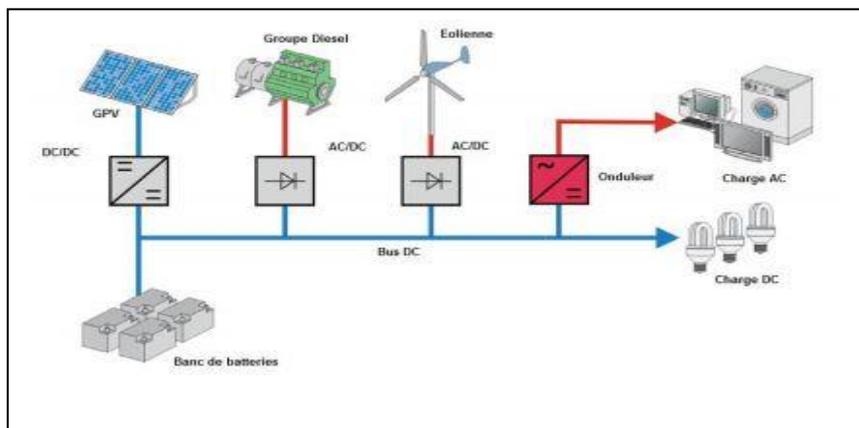


Figure 1.20 : Système Hybride

### I.7.3. Systèmes couplés au réseau

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur raccordée au réseau électrique.

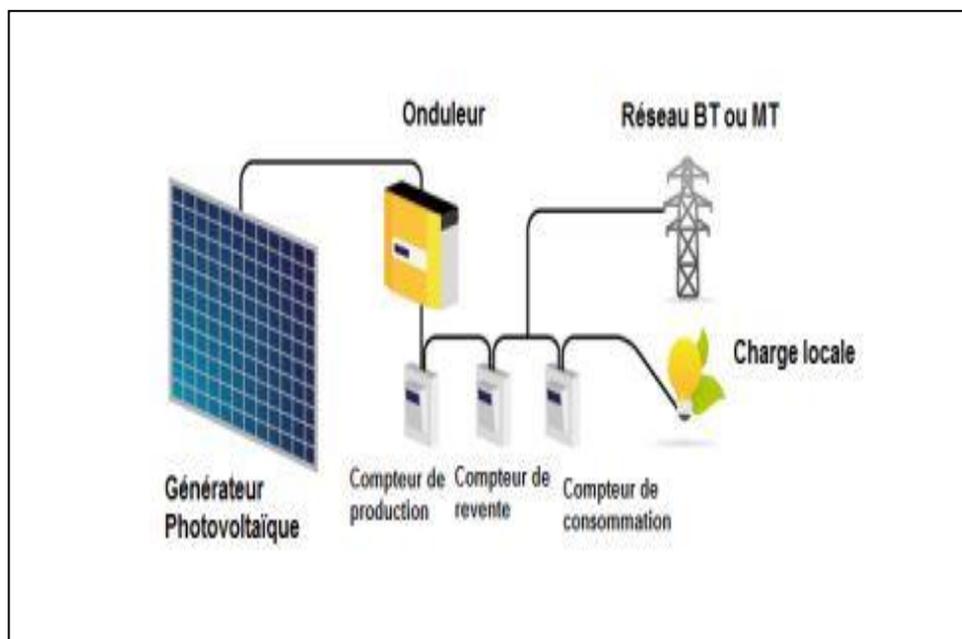
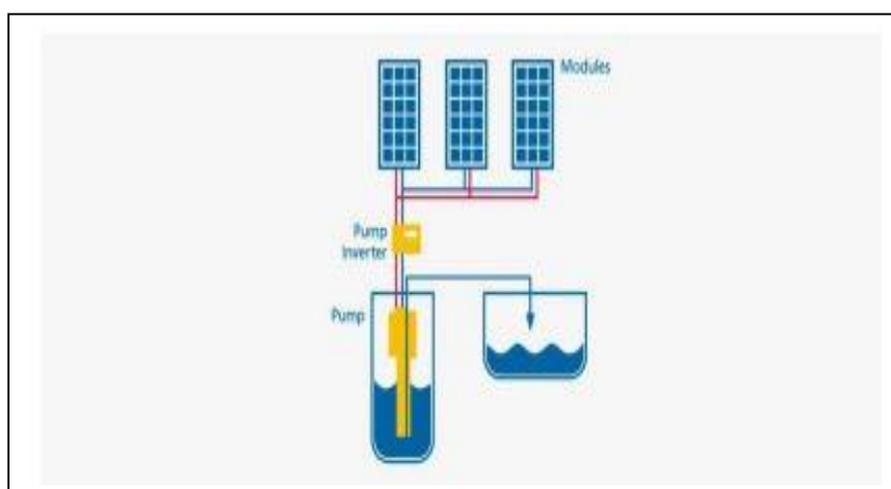


Figure 1.21 : Système PV couplée au réseau

**I.7.4. Systèmes fonctionnant au fil soleil (Pompage photovoltaïque)**

Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, l'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations. Le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie à l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique, généralement, les système de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque , un convertisseur du courant électrique qui peut être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu et d'un groupe motopompe. Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque.



**Figure 1.22 : Système de pompage d'eau (pompage solaire)**

## **I.8. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques**

### **Avantages**

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.
- Ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- Ils ne peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.

### **Inconvénients**

- Prix : les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15%.
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (<à 30v) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.

## **I.9. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les fondements de bases de l'énergie solaire photovoltaïque en passant en revue la cellule photovoltaïque qui à la base de la conversion de l'énergie rayonnée par le soleil en électricité. On a présenté également les principales applications des systèmes photovoltaïques à savoir : les systèmes autonomes, les systèmes connectés au réseau et enfin les systèmes de pompage photovoltaïque. Les schémas de principes de chaque type de système et aussi on a parlé aux avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.

La conversion photovoltaïque rencontre depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque.

Pour assurer un fonctionnement à puissance maximale quelque soit la charge et les conditions, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ceci fera l'objet du chapitre II.

# **CHAPITRE II**

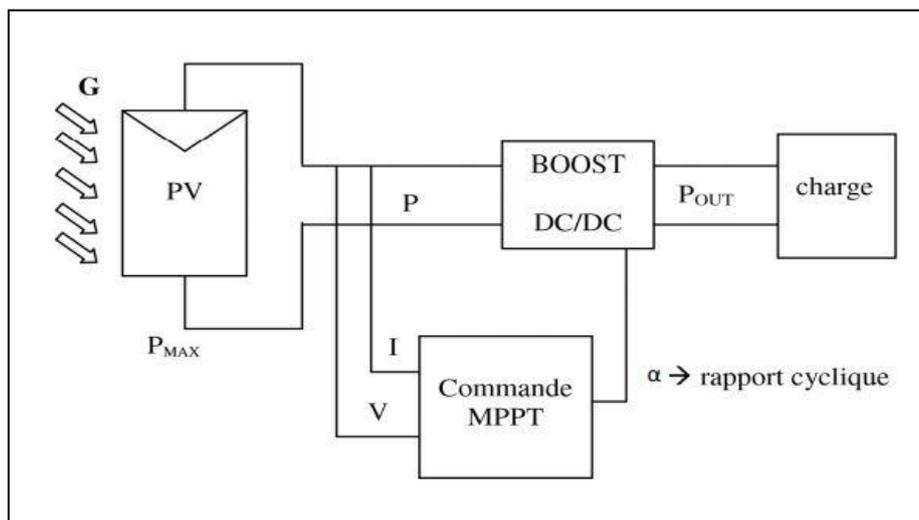
## **MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE**

## **II.1. Introduction**

Après avoir étudié et cité les différents composants de notre système, nous procédons à la modélisation de ce dernier, ce qui nécessite un ensemble d'équation caractérisant chaque élément de notre système.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord une modélisation des différentes parties de notre système (à commencer par le modèle du générateur photovoltaïque). Cette modélisation sera faite utilisant l'environnement (MATLAB/SIMULINK).

La figure suivante décrit le système étudié

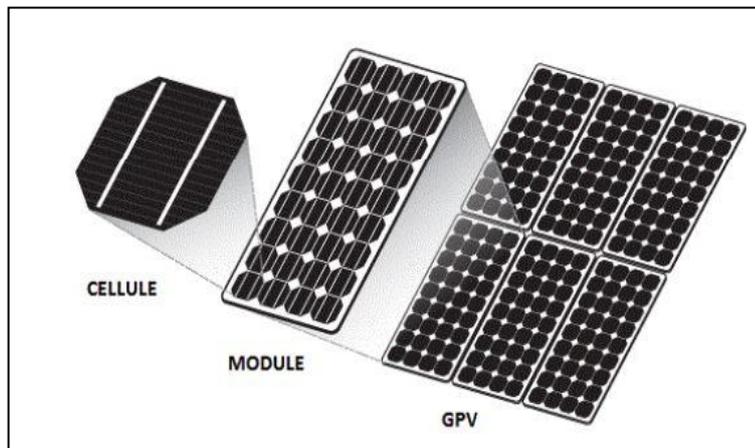


**Figure 2.1 : chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge**

## **II.2. Le générateur photovoltaïque**

Pour obtenir la puissance supérieure il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Dans certaine application, il est possible d'utiliser un ou plusieurs modules de quelque dizaine de cellule. Pour des utilisations plus importantes les générateurs PV sont groupe dans un champ de plusieurs modules. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former

une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel.[06] [07]



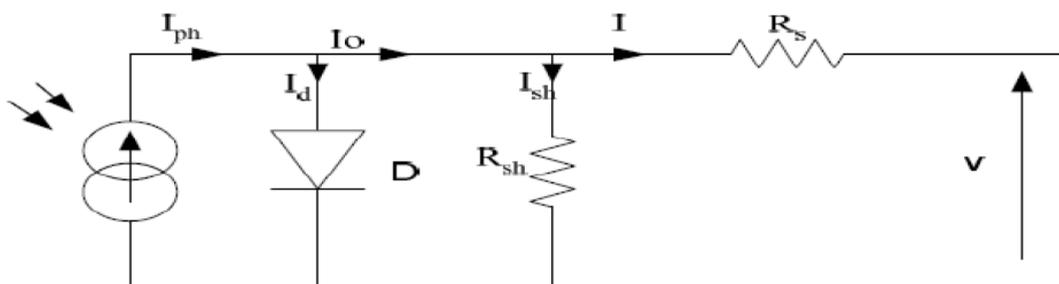
**Figure 2.2: composants d'un générateur**

### **II.2.1. Modélisation d'un générateur photovoltaïque**

Dans la littérature ; il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque, parmi ces modèles nous avons utilisé le modèle à une diode

### **II.2.2. Modèle à une diode**

Les modèles des modules PV sont habituellement tirés des circuits électriques équivalents. Ce modèle est le plus courant. Il est utilisé par de nombreux auteurs pour obtenir des valeurs de certains paramètres de la caractéristique courant - tension d'une cellule solaire par des méthodes d'approximations. A partir de la figure (2.3) nous définissons le modèle à une diode du générateur



**Figure 2.3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque**

## **CHAPITRE II MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE**

- **$R_{sh}$**  : Résistance shunte qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.
- **$R_s$**  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).
- **$D$**  : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

La loi des nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d - IR_{sh} \quad (2.1)$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \left( 1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right) \quad (2.2)$$

- **$E_{sref}, T_{jref}$**  : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.
- **$T_j$**  : température de jonction.
- **$P_1, P_2, P_3$**  : paramètres constants.

La température de jonction  $T_j$  de la cellule est donnée par la relation suivante :

La température de jonction  $T_j$  de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left( \frac{Noct - 20}{800} \right) \quad (2.3)$$

Avec

NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) et  $T_a$  est la température ambiante.

$$I_d = I_0 d \left[ \exp \left( \frac{q}{k.A.ns.T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Avec :

- $I_{0d}$  : courant de saturation de la diode (A).
- $q$  : Charge élémentaire (1.6.10-19 C).
- $K$  : constante de Boltzmann (1.38.10-23(SI)).
- $A$  : coefficient d'idéalité de la cellule.
- $n_s$  : nombre de cellules connectées en série.

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) \quad (2.5)$$

- $E_g$  : énergie de gap.
- $P_4$  : paramètre constant.

$$I_{Rsh} = \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante :

$$I = P_1 E_s \left( 1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right) - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \cdot \left[ \exp\left(\frac{q}{K \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I)\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

### **II.2.3. Modélisation électrique d'une cellule PV**

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque peut être représenté sous diverses variantes. La configuration de la figure (2.4) peut être considérée comme la plus usuelle (Standard). Elle comporte une source de courant variable, monté en parallèle avec une diode D caractérisant la jonction, une résistance (résistance parallèle) simulant les courants de fuites de la jonction, et une résistance en série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions, et qui dépend principalement de la résistance du semi-conducteur.[08]

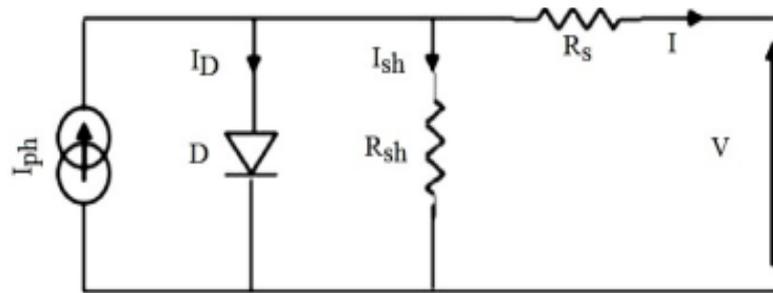


Figure 2.4: Schéma équivalent d'une cellule solaire

Pour déterminer le courant généré par la cellule, il faut appliquer la loi des nœuds de Kirchhoff, ce qui nous donne :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{\alpha K T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

Où :

**I** : Courant généré par la cellule photovoltaïque IPV.

**V** : tension générée par la cellule photovoltaïque.

**$\alpha$**  : Facteur d'idéalité de la diode et la valeur typique de  $\alpha$  est 1.3.

**T** : est la température de la cellule en Kelvin.

**q** : est la charge de l'électron  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

**K** : est la constante de Boltzmann  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

**R<sub>sh</sub>** : Résistance shunt de la cellule.

**R<sub>s</sub>** : Résistance série de la cellule.

### II.3. Caractéristique de générateur photovoltaïque

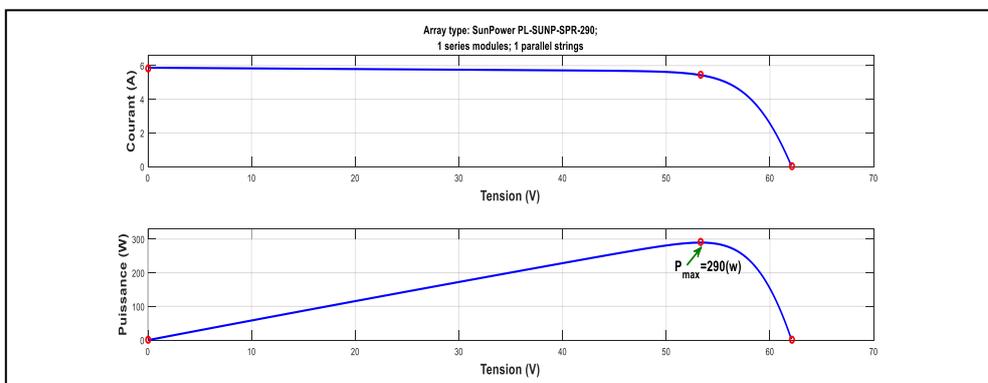
Le modèle choisi est un modèle intégré dans la bibliothèque « Simulink » du logiciel « MATLAB 2016 ». Type du panneau : **SunPower PL-SUNP-SPR-290**. Il est composé d'un module série et un parallèle. Un module est constitué de 96 cellules en série. Les paramètres du panneau sont indiqués dans le tableau (2.1).

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Puissance maximale Pmax	290.485w
Tension maximale Vmax	53.3v
Courant maximale Imax	5.45A
Courant de saturation de la diode Id	6.149 e-12
Nombre de module en série	1
Nombre de module en parallèle	1

**Tableau 2.1: caractéristique de panneau PV PL-SUNP-SPR-290**

### II.3.1. Caractéristique Courant-Tension $I=f(V)$ :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire, définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalée le long de l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.



**Figure 2.5: caractéristique d'un PV à condition standard  $G=1000w/m^2$  et  $T=25c$**

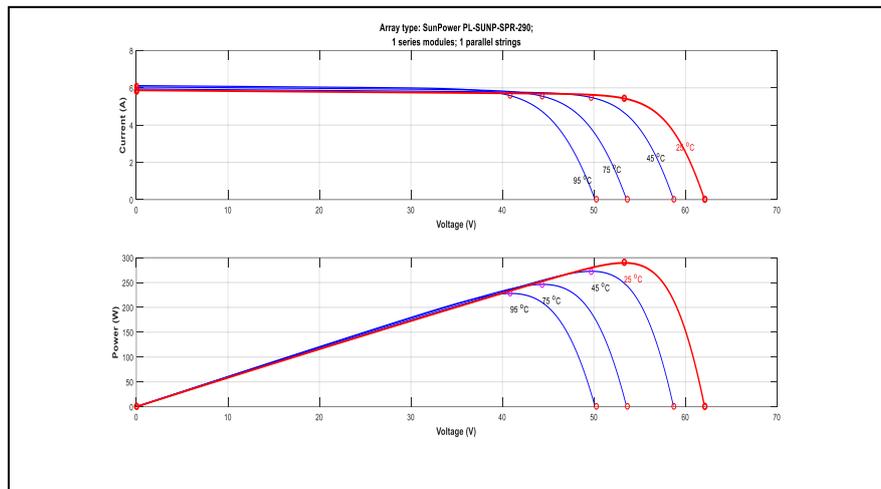
La figure (2.5) représente la courbe  $I = f(V)$  &  $P = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1 Kw/m^2$  et une température de  $25^{\circ}c$ .

## **II.3.2. Influence de température et l'ensoleillement sur le GPV**

### **II.3.2.1. Influence de la température**

Pour pouvoir étudier l'influence de la température sur les paramètres de sorties d'un panneau photovoltaïque nous avons fixé l'éclairement à ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ) et on a tracé les caractéristiques puissance-tension et courant-tension pour différentes températures.



**Figure 2.6: Caractéristiques I\_V et P\_V du module SunPower PL-SUNP-SPR-290 pour une Température variable et Irradiation constante  $G=1\text{Kw/m}^2$**

De la figure (2.6) on remarque que la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente. On remarque aussi que le courant varie légèrement ; par contre la température influe négativement sur la tension. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule ( $P_{max}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### **II.3.2.2. Influence de l'éclairement**

Dans ce cas, les simulations ont été faites pour une température fixe  $T=25^\circ$  et plusieurs irradiations.

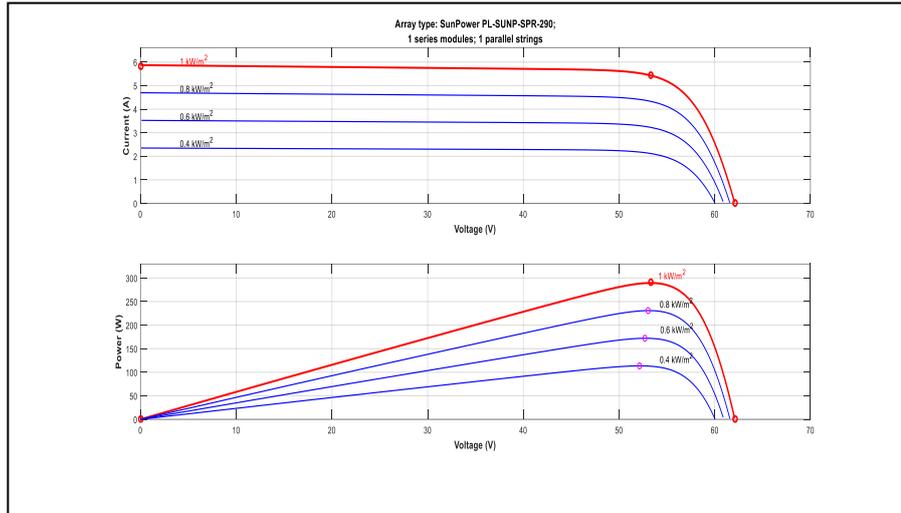


Figure 2.7: Caractéristiques I\_V et P\_V du module Sun Power PL-SUNP-SPR-290 pour une Irradiation variable et Température constante  $T=25^{\circ}$

D'après la figure (2.7) il est clair que le courant subit une variation importante. On remarque que plus l'éclairement diminue plus le courant diminue. Comme la puissance est proportionnelle au courant, il est évident qu'elle se dégrade plus l'éclairement décroît ; par contre on remarque une légère variation de la tension.

### II.4. Protections D'un Générateur

Le groupement des cellules photovoltaïque présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène). donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles.[09]

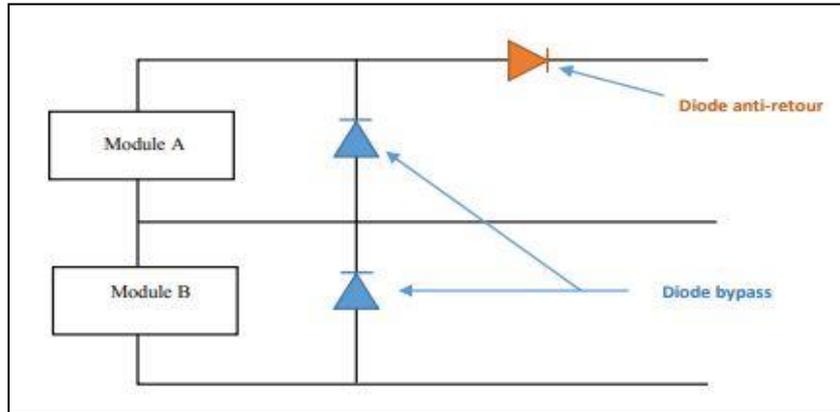


Figure 2.8: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

### II.5. Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV

Le générateur PV est l'élément principal d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système.

### II.5.1. Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge :

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (2.9). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P<sub>MAX</sub> disponible.

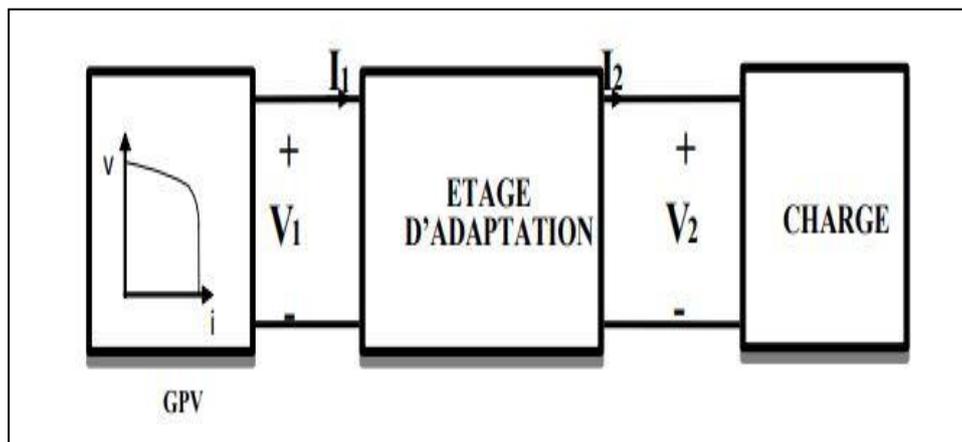


Figure 2.9: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge L'adaptateur communément

### II.5.2. Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge, sans stockage avec charge en continue, il

portera le nom de convertisseur continu-continu, soit onduleur ou convertisseur continu-alternatif.

### II.5.2.1. Les convertisseurs DC-DC (hacheur)

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur dévolteur (ou Buck)
- Convertisseur survolteur (ou Boost)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-boost). [10] [11]

#### A. Hacheur Buck

L'hacheur Buck est un convertisseur DC-DC illustré sur l'hacheur dévolteur (Buck) a pour rôle de convertir sa tension d'entrée  $V_i$  en une tension de sortie inférieure. L'interrupteur  $K$  peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

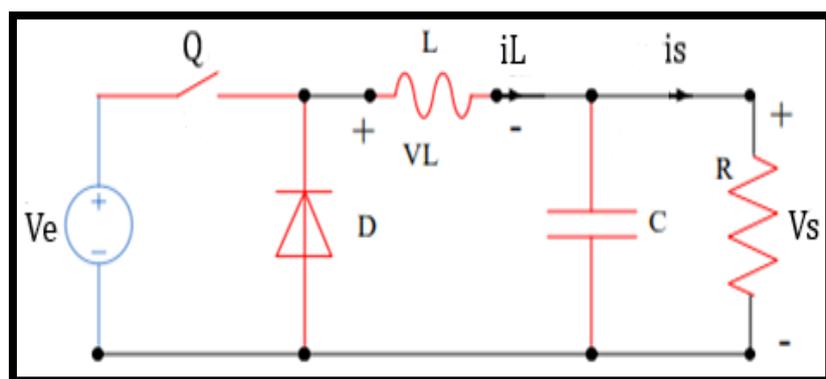


Figure 2.10 : schéma électrique d'un hacheur Buck

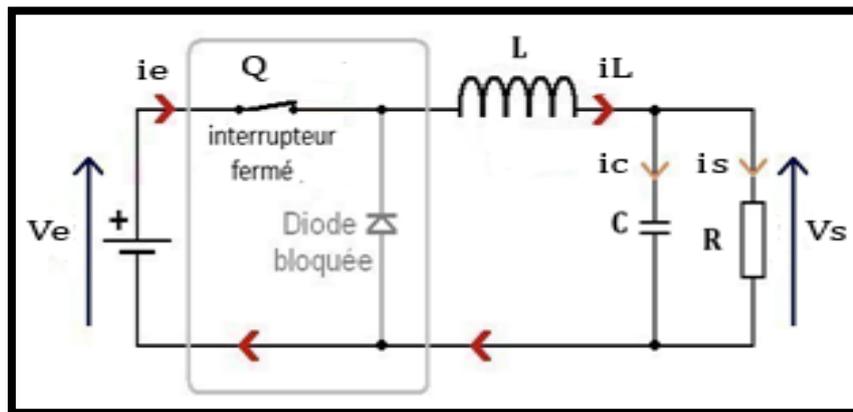
➤ **Principe de fonctionnement :**

Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP. Alors, pour les deux modes de fonctionnement on a :

- Pour  $T_{on}$  (Q fermé): Si le commutateur Q est activé à  $t_0$ , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée.

Le courant  $i_L$  n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance  $L$  la figure 2.4 Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{l} \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{i_L - i_s}{c} \end{cases} \quad (2.9)$$



**Figure 2.11: Circuit équivalent de convertisseur back pour Ton**

- Pour  $T_{off}$  (Q ouvert) : Si Q est désactivé après  $t = t_1$ , la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension figure (2.12):

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{V_s}{L} \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{i_s - i_L}{C} \end{cases} \quad (2.10)$$

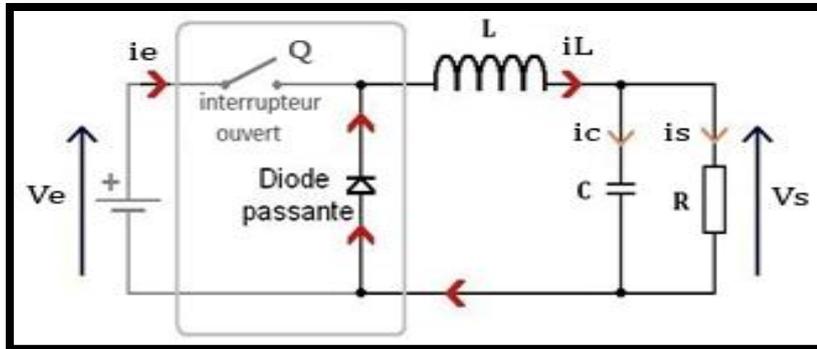


Figure 2.12: Circuit équivalent de convertisseur buck pour ToF

La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_s = \frac{T_{on}}{T} V_e \rightarrow V_s = DV_e \quad (2.11)$$

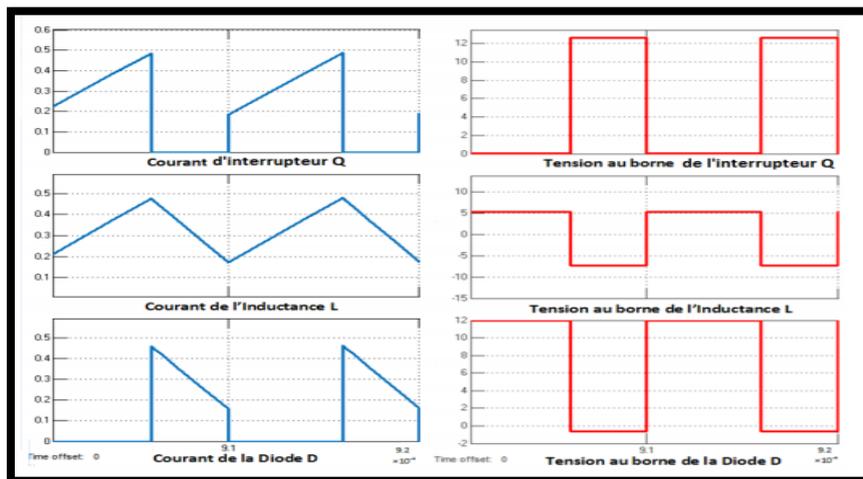


Figure 2.13: Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur buck.

## B. Hacheur Boost

Le convertisseur Boost ou hacheur parallèle, est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance, ce convertisseur est caractérisé par le fait que de la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

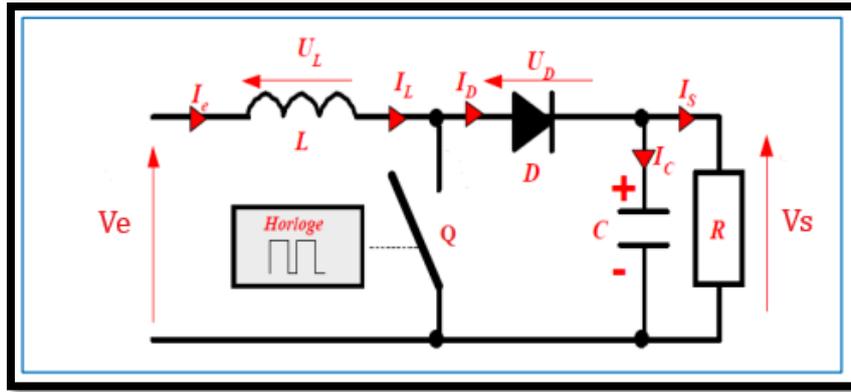


Figure 2.14: Schéma de convertisseur élévateur « Boost ».

➤ **Principe de fonctionnement :**

Le convertisseur peut alors travailler suivant deux modes de fonctionnement dépendant de sa capacité de stockage d'énergie et de la période H de commutation.

Ces deux modes de fonctionnement sont :

- **Mode continu :** dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement et donc le courant dans celle-ci ne s'annule pas.
- **Mode discontinu :** dans ce cas, au contraire, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement et donc le courant dans celle-ci s'annule.

Dans notre travail, l'étude de fonctionnement est basée sur le mode de conduction continu, le fonctionnement du circuit peut se diviser en deux selon l'intervalle de commutation ( $T_{on}$ ,  $T_{off}$ ) :

- Pour  $T_{on}$  (Q fermé) : ( $0 < t < DT$ ), Lorsque le commutateur est fermé figure (2.15), la tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur C est omis. Le courant du circuit  $i_L$  circule à travers l'inductance L et augmente.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \\ \frac{dV_s}{dt} = -\frac{i_s}{C} \end{cases} \quad (2.12)$$

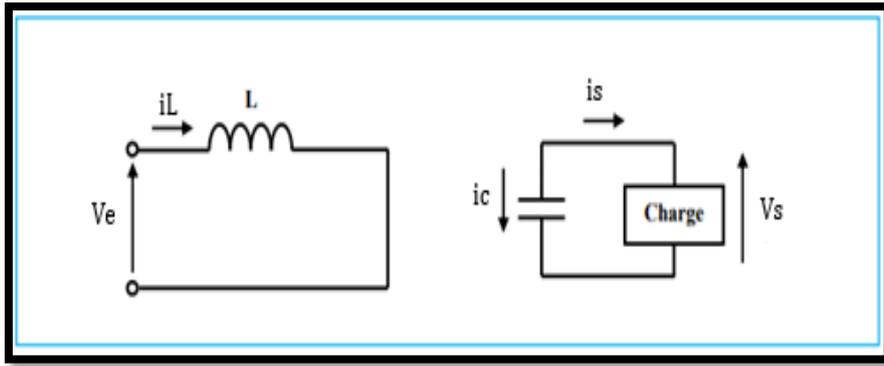


Figure 2.15: Circuit équivalent de convertisseur boost pour Ton

- Pour  $T_{off}$  (Q ouvert) : ( $DT < t < T$ ), Le courant  $i_L$  traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement. Car :  $V_s > V_e$

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{i_L - i_s}{C} \end{cases} \quad (2.13)$$

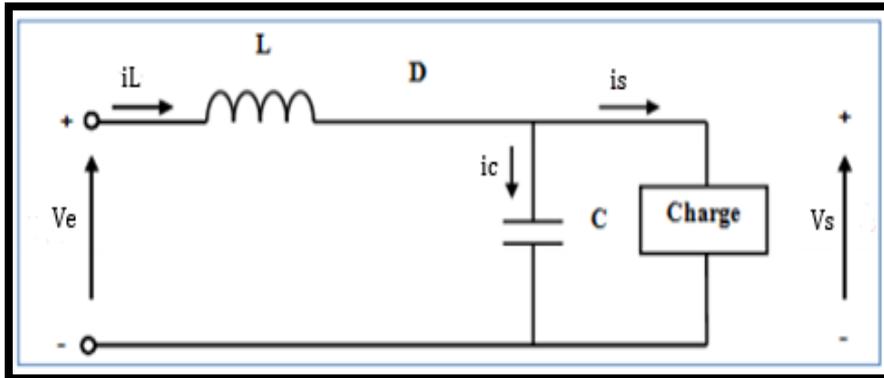


Figure 2.16: Circuit équivalent de convertisseur boost pour Toff

La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C, lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge.

La tension de la charge est donnée par :

$$V_s = \frac{1}{1-D} V_e \quad (2.14)$$

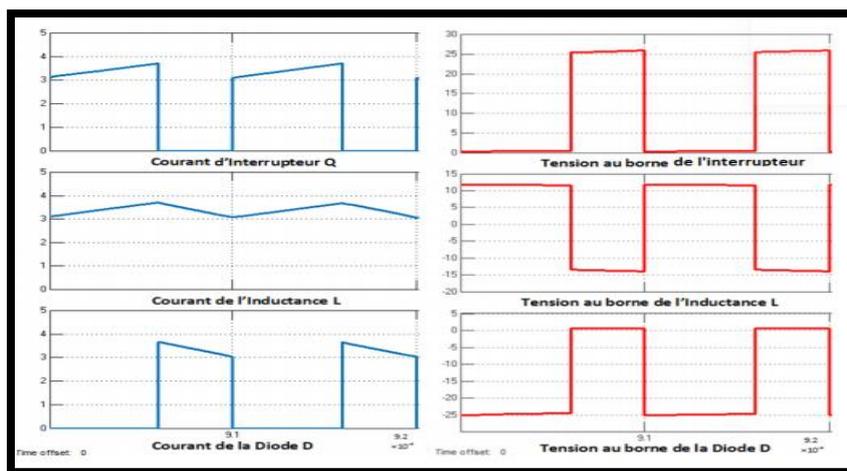


Figure 2.17: Formes d'onde des courants et tensions d'un convertisseur Boost

### C. Hacheur « BUCK - BOOST » :

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

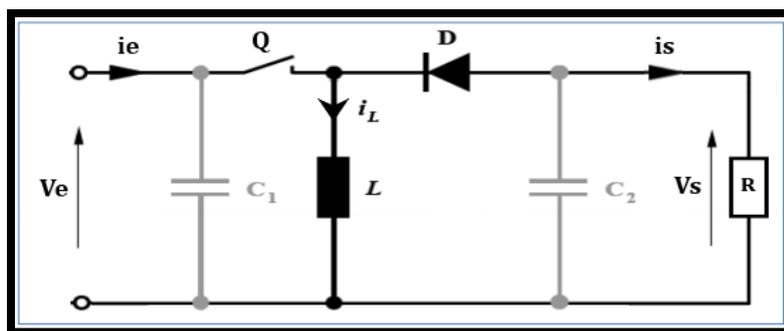


Figure 2.18: Schéma de convertisseur élévateur « Buck-Boost ».

#### ➤ Principe de fonctionnement :

Durant l'état fermé, l'énergie apportée par la source (générateur PV) est stockée dans l'inductance. L'énergie stockée dans l'inductance L est livrée ensuite à la charge pendant l'état off.

- Pour  $T_{on}$  (Q fermé) : l'interrupteur Q est conducteur pendant le temps  $DT$  le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, la diode D est alors bloquée. Figure (2.19).

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{i_s}{C_2} \end{cases} \rightarrow \frac{dV_e}{dt} = \frac{i_e - i_L}{C_1} \quad (2.15)$$

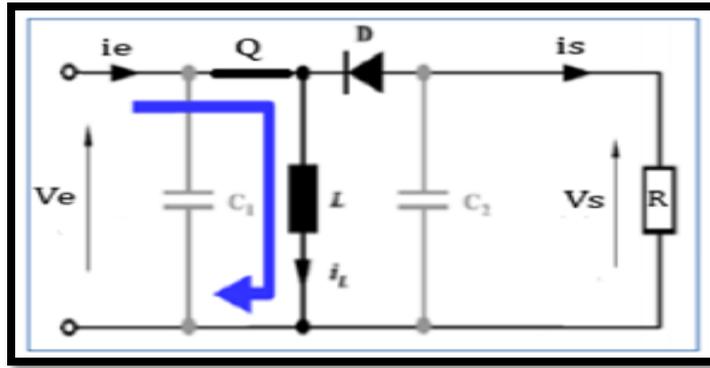


Figure 2.19 : Circuit équivalent de convertisseur back-boost pour Ton

- Pour  $T_{off}$  (Q ouvert) : le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. Cette décharge peut être totale ou partielle figure (2.20).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

$$\begin{cases} \frac{dv_e}{dt} = \frac{i_e}{C_1} \\ \frac{dv_s}{dt} = \frac{i_L - i_s}{C_2} \end{cases} \quad (2.16)$$

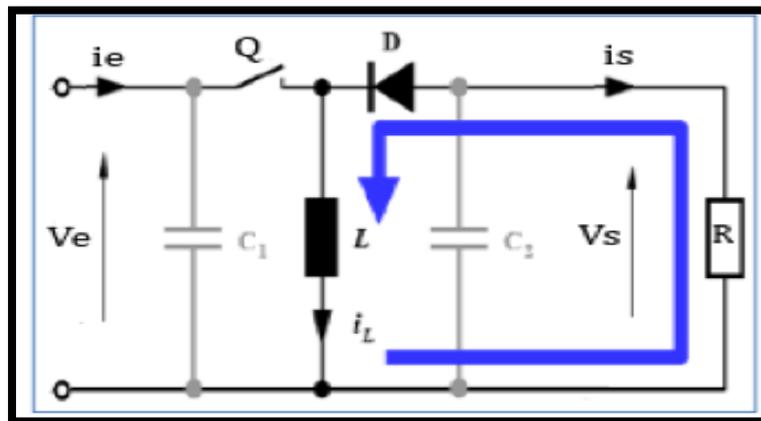


Figure 2.20: Circuit équivalent de convertisseur back-boost pour Toff

En raison de la présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent,  $V_s$  a une polarité opposée à  $V_e$ . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur

## CHAPITRE II MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

inverseur. Le condensateur C1 soutient la tension d'alimentation  $V_s$ , C2 lisse la tension de la charge.

En conclusion, l'amplitude de  $V_s$  peut être inférieure ou supérieure à  $V_e$  suivant la valeur de  $T_{on}$  et  $O_{ff}$

$$V_s = \frac{T_{on}}{T} V_e \rightarrow V_s = \frac{D}{(1-D)} V_e \quad (2.17)$$

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Buck-Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure (2.21) :

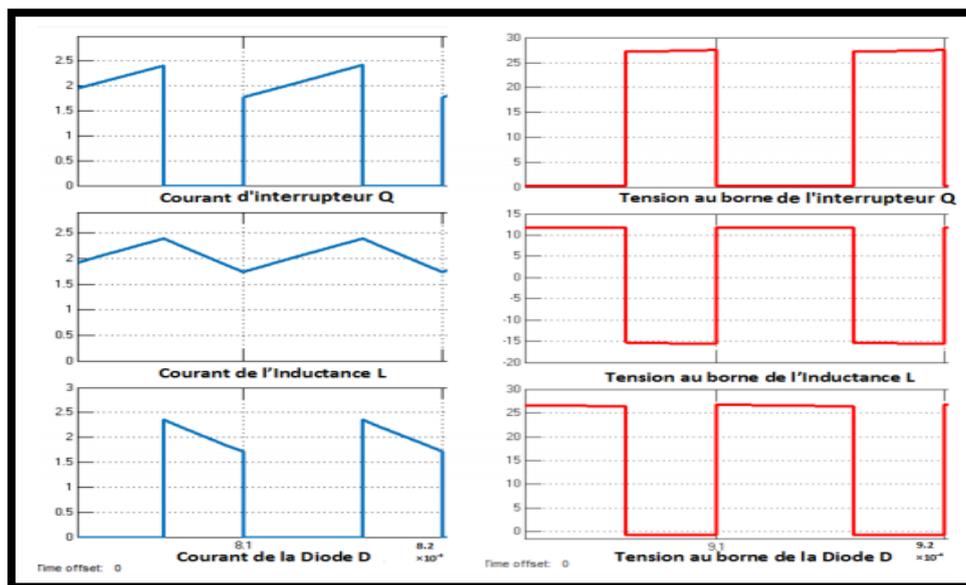


Figure 2.21 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost

### II.5.2.2. Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique  $\alpha$  de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT. Cette partie fera l'objet du chapitre suivant.

## **II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque et l'étude de ses caractéristiques et ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Pour la partie commande MPPT, nous présentons ce type de commande de manière beaucoup plus approfondie dans le chapitre suivant.

# **CHAPITRE III**

## **MPPT ET MCC**

### III.1. Introduction

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum.

### III.2. Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la Figure suivante :

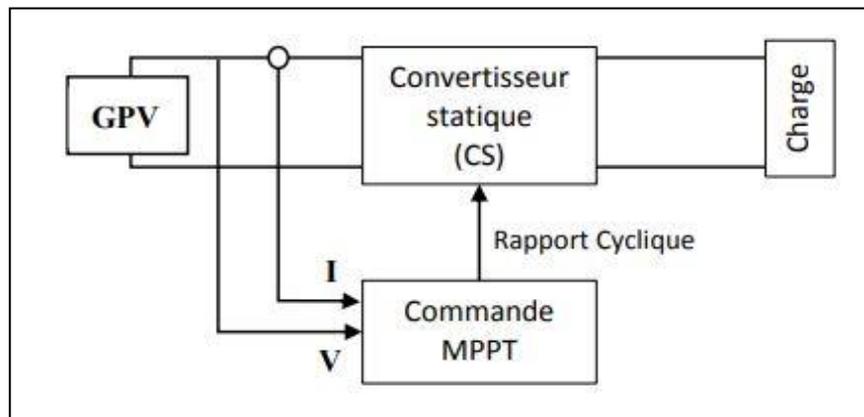


Figure 3.1: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du

rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

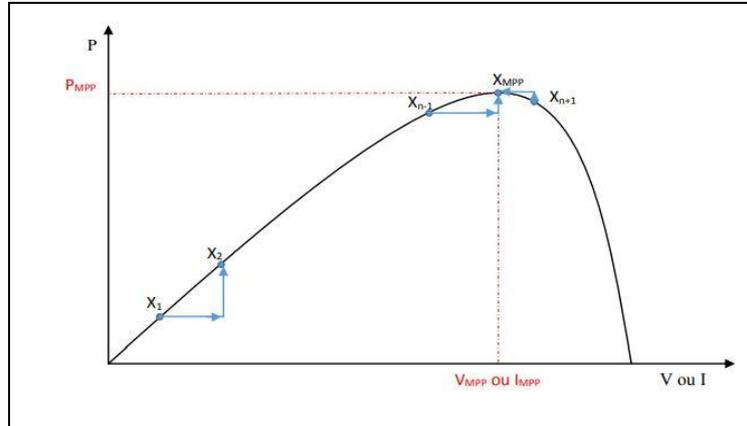


Figure 3.2: Principe de la commande MPPT

Classification Des Commandes MPPT Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. [13] [14]

### III.2.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS :

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien les commandes qui sont basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal ( $VOPT$  et  $IOPT$ ) et les paramètres caractéristiques du module PV ( $VOC$  et  $ICC$ ).

### **III.2.2. Commandes MPPT fonctionnent à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de  $P_{max}$  est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

#### **a. MPPT Indirect**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable.

#### **b. MPPT Direct**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement.

### **III.3. Les Algorithmes MPPT**

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis

de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Dans notre étude on a basé sur deux algorithmes : perturbation & Observation et incrémentation c.

### **III.3.1. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)**

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension  $V_{\text{réf}}$ , ou du courant  $I_{\text{réf}}$ , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ( $P=VI$ ). Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension  $V_{\text{PV}}$ , ce qui engendre une variation de la puissance. Figure (3.3) montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{\text{pv}}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{\text{pv}}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P(V)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

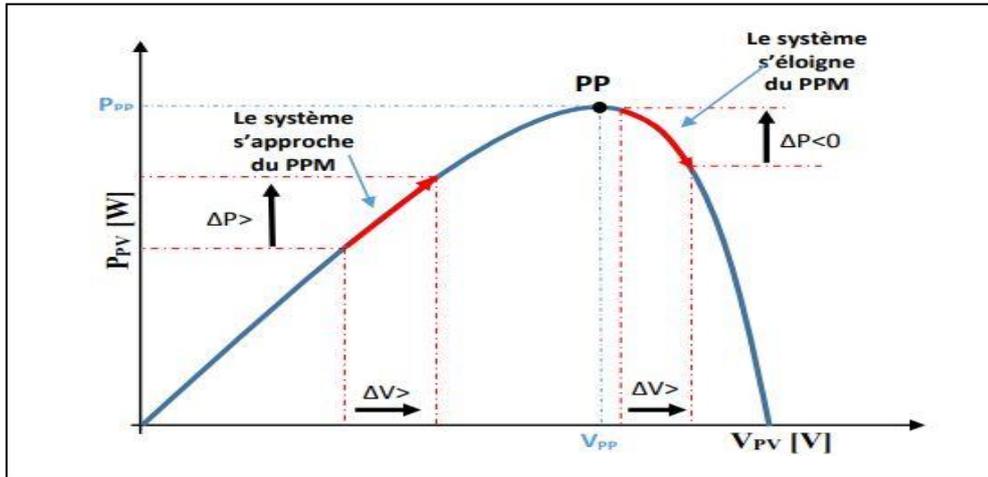


Figure 3.3: Recherche du PPM par la méthode (P&O)

La Figure (3.4) représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

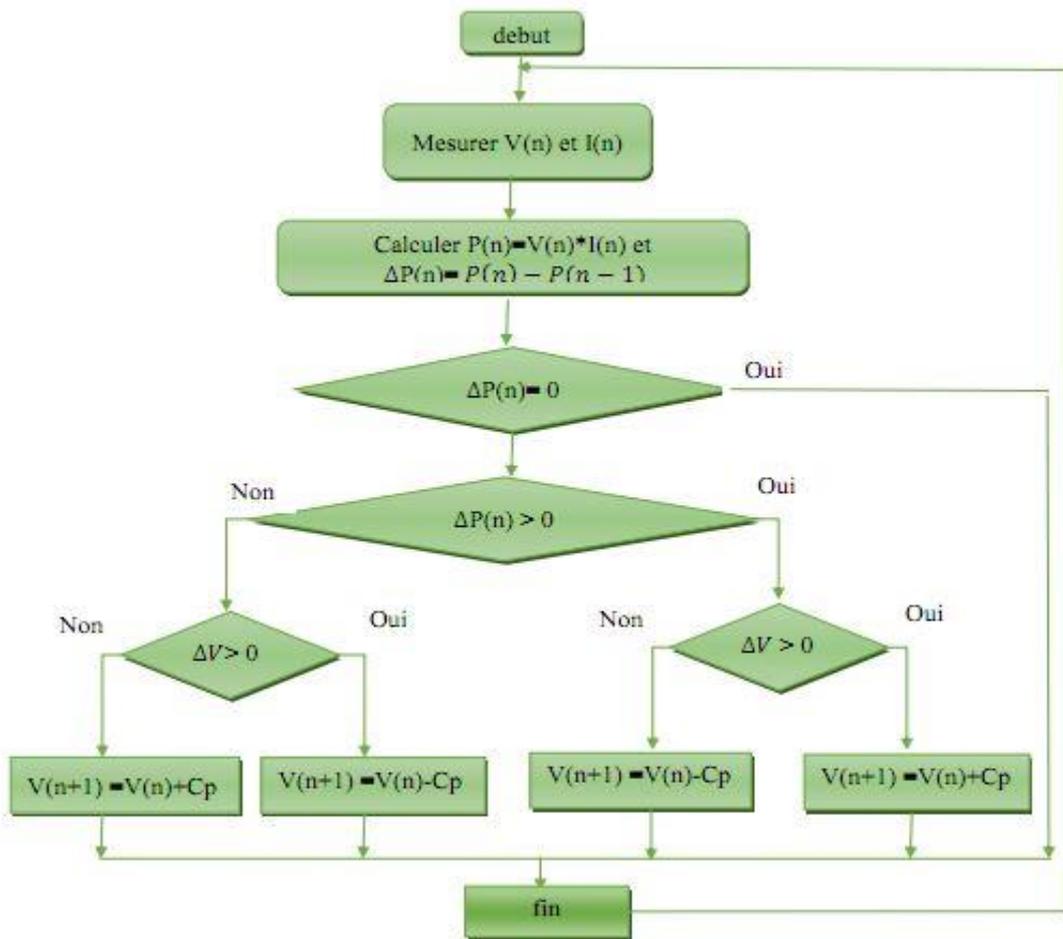


Figure 3.4: l'algorithme de P&O classique

### *CHAPITRE III MPPT ET MCC*

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la résonance et répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.
- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnements, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

### III.3.2. Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite.

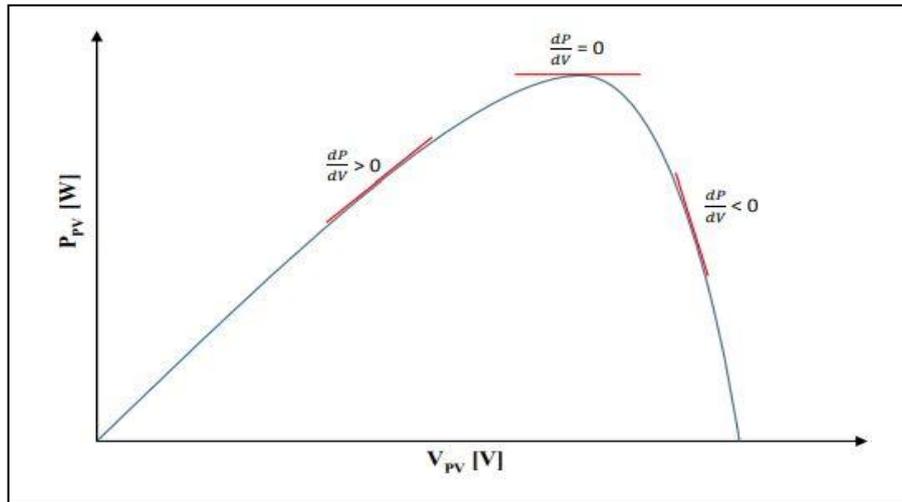


Figure 3.5: caractéristique de tension-puissance du panneau

On observe que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{au PMM} \\ \frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{à gauche au PMM} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{à droite au PMM} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :  $P = V \times I$  (3.2)

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + \frac{VdI}{dV} \cong I + \frac{V\Delta I}{\Delta V} \quad (3.3)$$

Donc, la dernière équation peut être écrite comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{1}{V} \text{ Le point de fonctionnement est sur le PMM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{1}{V} \text{ Le point de fonctionnement est à gauche du PMM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{1}{V} \text{ Le point de fonctionnement est à droite du PMM} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

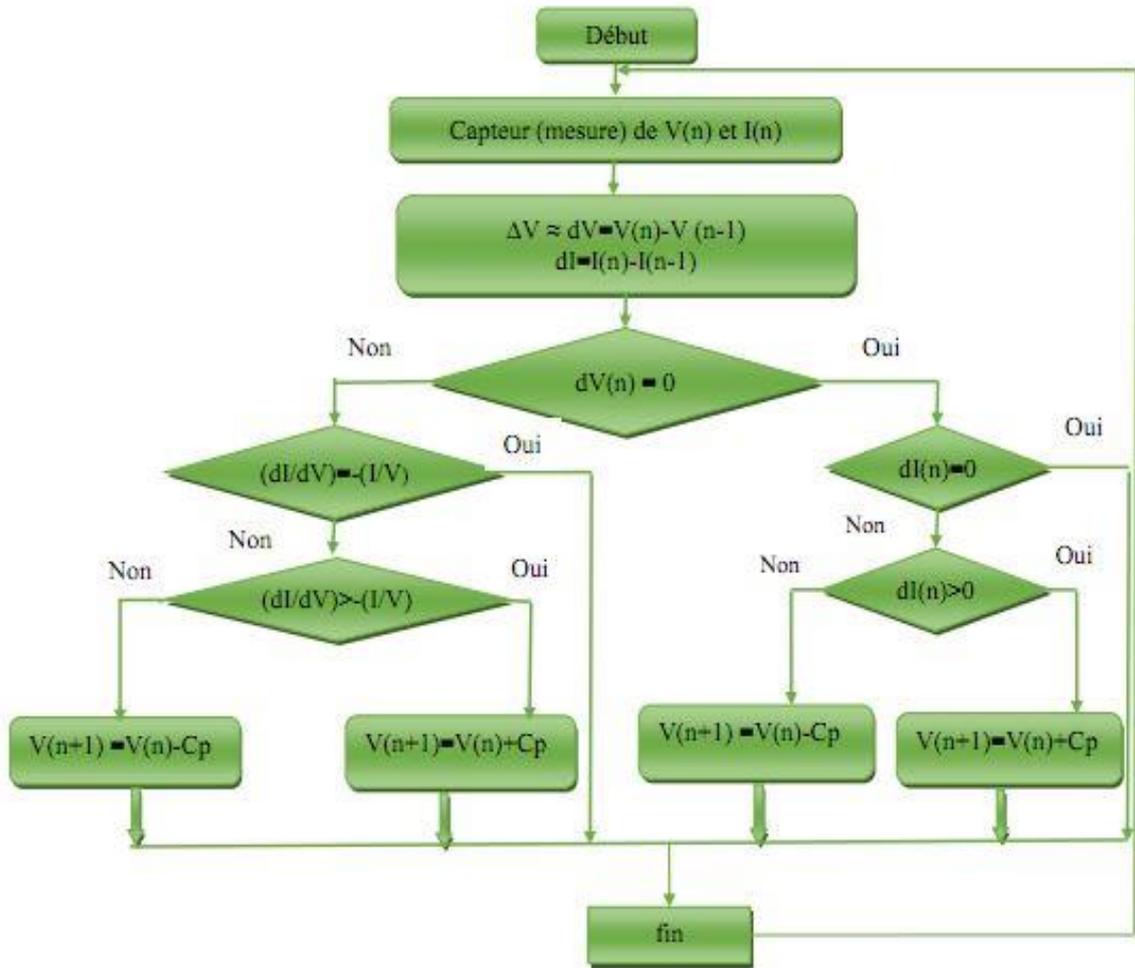


Figure 3.6: l’algorithme IncCond classique

Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d’utiliser l’algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive

proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  sur le courant de court-circuit  $I_{sc}$ . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrémentation de la conductance pour générer un signal d'erreur [15]

### **III.3.3. Autres Méthodes**

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer :

- les algorithmes à base de réseau de neurones

- Méthode de look-up table
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de  $\beta$
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

## **III.4. Le moteur à courant continu**

Les moteurs à courant continu sont des machines qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice

### **III.4.1. La réversibilité du moteur à courant continu**

La machine à courant continu est réversible. La même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice, c'est-à-dire que la constitution d'une génératrice est identique à celle du moteur.

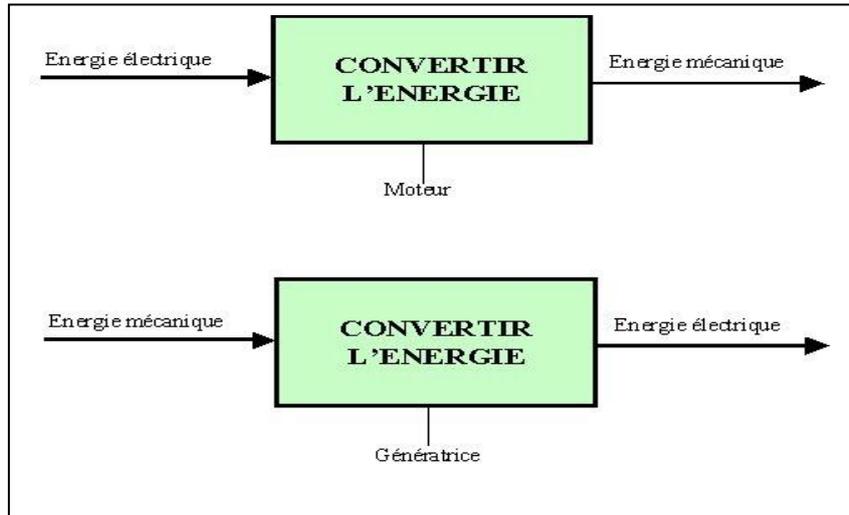


Figure 3.6: la réversibilité du MCC

### III.4.2. Constitution de MCC

Le moteur à courant continu est constitué de trois parties :

#### A. L'inducteur ou Le stator

C'est la partie fixe de la machine, elle est constituée soit d'un aimant permanent, soit d'un enroulement d'excitation qui sert à créer un champ d'induction magnétique.

#### B. L'induit ou le rotor

C'est la partie mobile ou tournante de la machine, elle est formée d'un empilage cylindrique de tôles isolées, Dans lequel des encoches en été aménagées afin de loger les conducteurs de l'enroulement rotorique. Le rotor est séparé du stator par un entrefer n'excédant pas quelques millimètres.

#### C. Collecteur et balais:

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. Les balais (en charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.

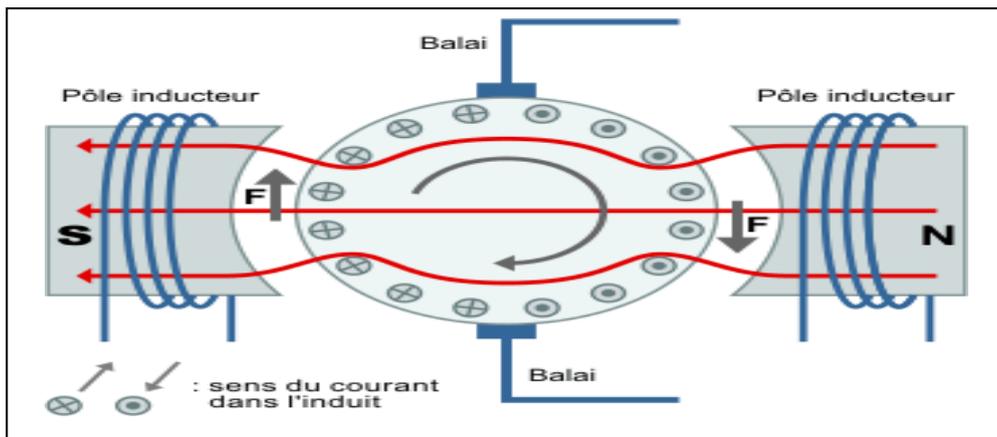


Figure 3.7: constitution du moteur à courant continu

### III.4.3. Les types de moteur à courant continu

Selon le type d'inducteur et son mode de branchement, on trouve :

- Les moteurs dont l'inducteur est constitué par des aimants permanents.
- Les moteurs à excitation séparée (l'inducteur peut être alimenté séparément par une source d'énergie autre que celle de l'induit)
- Les moteurs à excitation série (l'inducteur est branché en série avec l'induit).
- Les moteurs à excitation dérivation (l'inducteur en branché en parallèle sur l'induit).

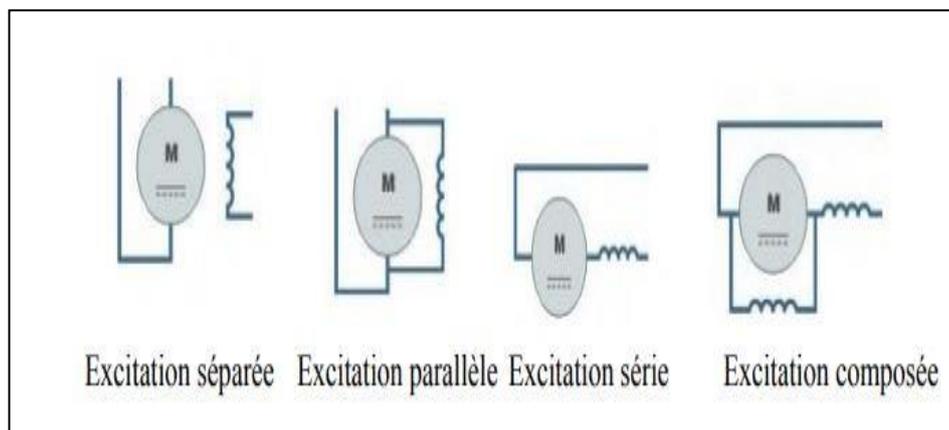


Figure 3.8: types de moteur à courant continu

### III.4.4. Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est mis en rotation grâce à une force magnétique induite : la force de LAPLACE

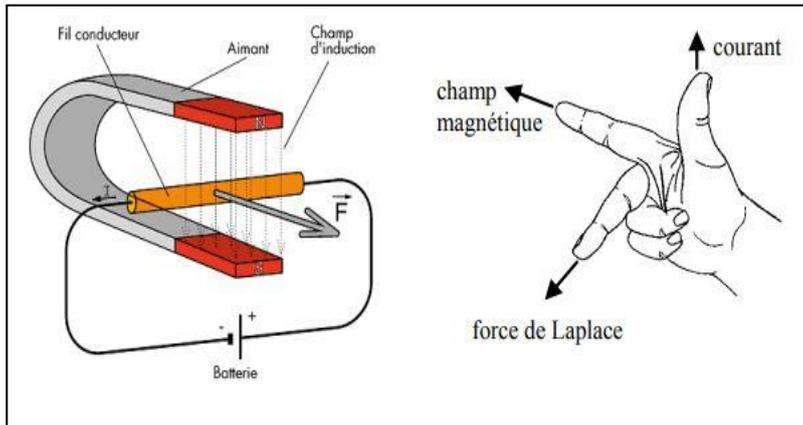


Figure 3.9: principe de fonctionnement d'un MCC (force de la place)

Cette force s'applique à un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique. L'orientation de cette force est donnée par la règle des trois doigts de la main droite :

- L'index est placé dans le sens du champ magnétique.
- Le pouce donne le sens de parcours des lignes de champ.
- Le majeur montre le sens de la force induite de LAPLACE.

Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme la figure ci-dessous), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud. Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique. De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteur.

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés

de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces  $F_1$  et  $F_2$  égales mais de sens opposé en créant un couple moteur, l'induit se met à tourner

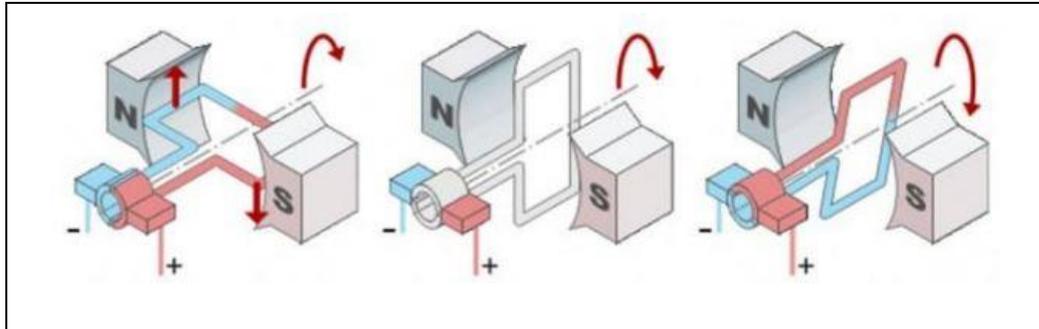


Figure 3.10: principe de fonctionnement d'un MCC

### III.4.5. Avantages et inconvénients

L'avantage principal, qui a fait le succès du moteur à courant continu réside dans son adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation 'les variateurs de vitesse', voir leur raccordement direct à la source d'énergie 'batteries d'accumulateur, piles

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. De plus il faut signaler que :

- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important.
- Aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement.
- Le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique.

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. On a étudié aussi le moteur à courant continu constitution, types et principe de fonctionnement et leur avantage et inconvénient.

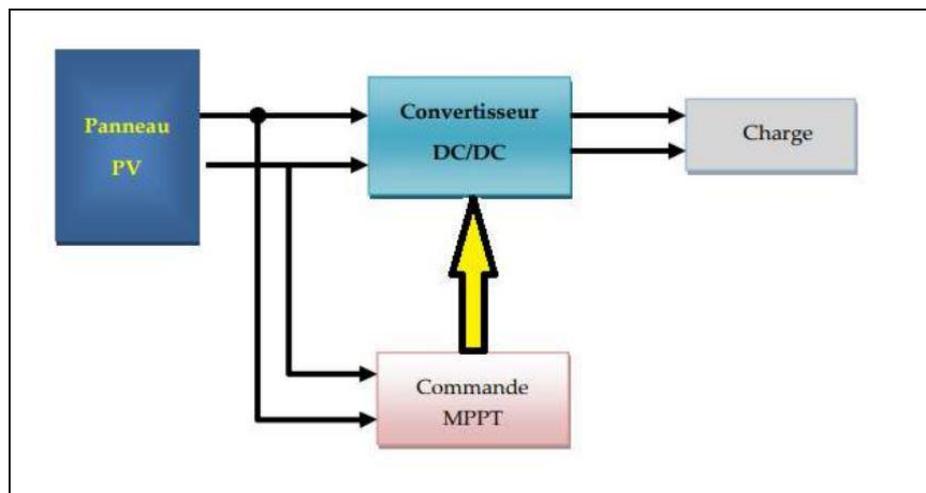
# **CHAPITRE IV**

## **Simulation de la Chaine de Conversion Photovoltaïque**

## **IV.1. Introduction**

Dans le présent chapitre nous allons montrer les différentes simulations effectuées sur un système PV constitué principalement d'un panneau PV, charge et hacheur. Ce dernier est piloté par la technique de commande MPPT Perturbation & Observation (P&O) permettant une meilleure adaptation source/charge, pour un transfert maximum de puissance. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/SIMULINK.

La figure (4.1) illustre le schéma d'un système PV avec MPPT qui alimente une charge.



**Figure 4.1: schéma synoptique d'un système PV avec MPPT**

## **IV.2. Simulation d'un GPV**

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel MATLAB/Simulink en se basant sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre 2, l'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée sur la figure (4.2) :

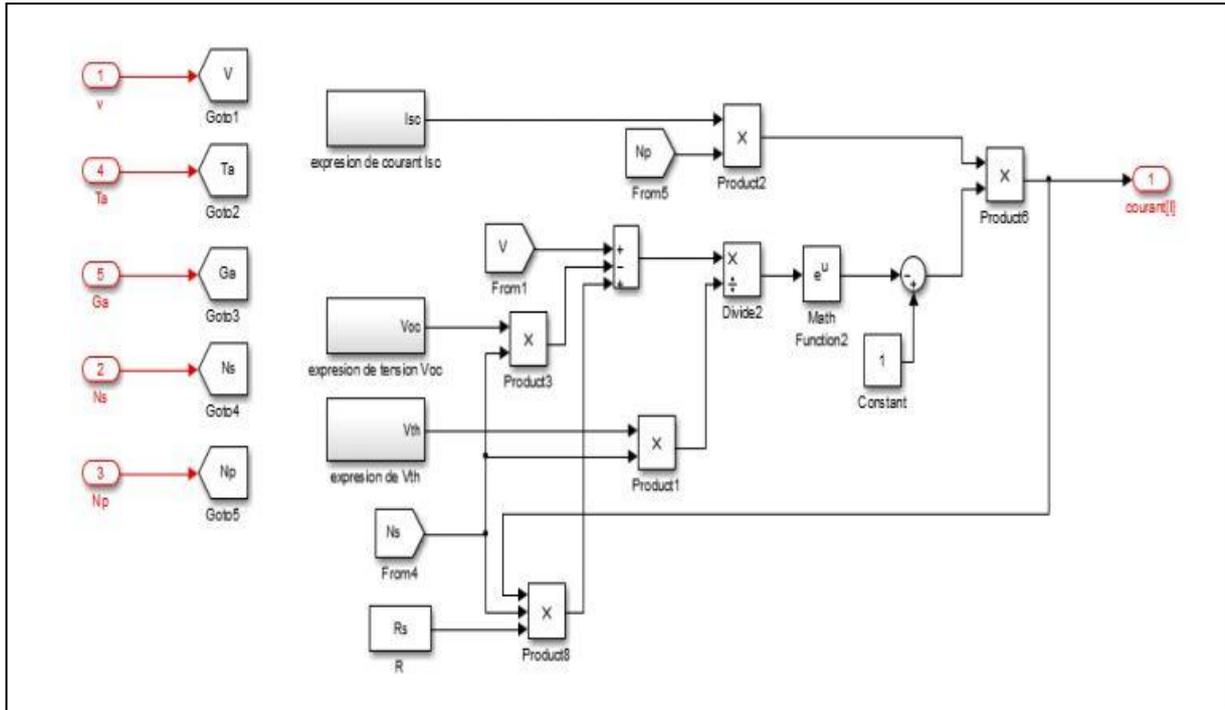


Figure 4.2: Modèle de simulation du GPV

### IV.3. Convertisseur DC/DC BOOST

#### IV.3.1. Modélisation de l'hacheur BOOST :

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Dans ce cas, la tension d'entrée de l'hacheur BOOST représente la tension du GPV la Figure (4.3).

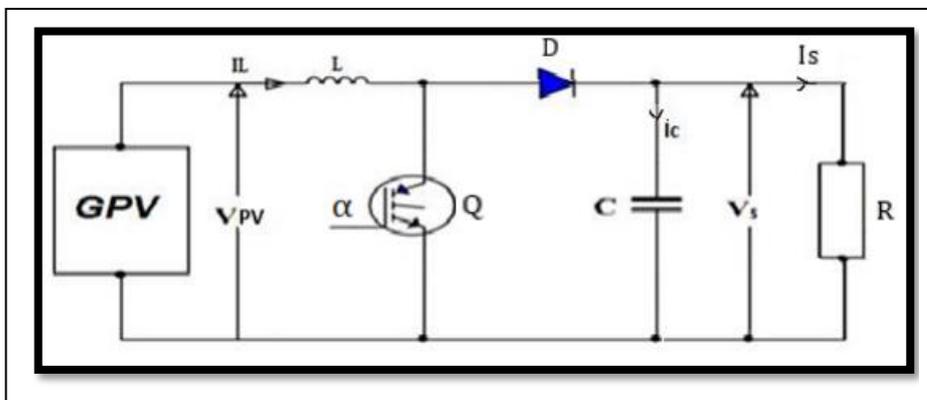


Figure 4.3: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque

### IV.3.2. Dimensionnement des paramètres du convertisseur

#### BOOST

Dans cette partie nous allons voir comment choisir les éléments qui permettent de réaliser et assurer le fonctionnement d'un hacheur élévateur.

Pour dimensionner les composants d'un hacheur élévateur, il faut connaître le paramètre d'entrées et celle de sortie (tension, courant, puissance).

$$I_e = \frac{P_e}{V_e} \quad (4.1)$$

Soit :

$$I_{e_{max}} = \frac{P_{e_{max}}}{V_{e_{max}}} \quad (4.2)$$

#### A. Rapport cyclique

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{V_{out} + V_d}{V_{in} + V_{out} + V_d} \quad (4.3)$$

Avec  $V_{in}$  la tension d'entrée,  $V_{out}$  la tension de sortie et  $V_d$  la tension de seuil de la diode.

#### B. L'inductance

Les valeurs de l'inductance sont déterminées principalement par l'ondulation du courant acceptée.

Ondulation du courant dans la source  $\Delta I_l$  :

- **Phase 1:**  $0 < t < \alpha T$   $il(t) = \frac{V_{pv}}{L} t + I_{min}$  (4.4)

- **Phase 2:**  $\alpha T < t < T$   $il(t) = \frac{V_{pv} - V_s}{L} (t - \alpha T) + I_{max}$  (4.5)

$$\text{Donc : } \Delta I_l = \frac{V_{pv} \cdot \alpha}{L \cdot f} = \frac{V_s \cdot \alpha (1 - \alpha)}{L \cdot f} \Rightarrow L \geq \frac{V_s}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{l_{max}}} \quad (4.6)$$

### C. Condensateur de filtrage

On tient compte désormais de l'ondulation de la tension  $V_s(t)$ . Cette ondulation est due à la composante alternative du courant dans la charge.

Pour :  $0 \leq t \leq aT$  ; on a  $V_s(t) = V_{max} - \frac{I_s}{C} \cdot t$

Donc : en  $t=aT$  , on a

$$V_s(t = aT) = V_{max} - \frac{I_s}{C} at \Rightarrow C \geq \frac{amax.Vs}{R.\Delta Vs.f} \quad (4.7)$$

### IV.3.3. Simulation de convertisseur DC/DC –BOOST

La figure représente le schéma Simulink du hacheur BOOST

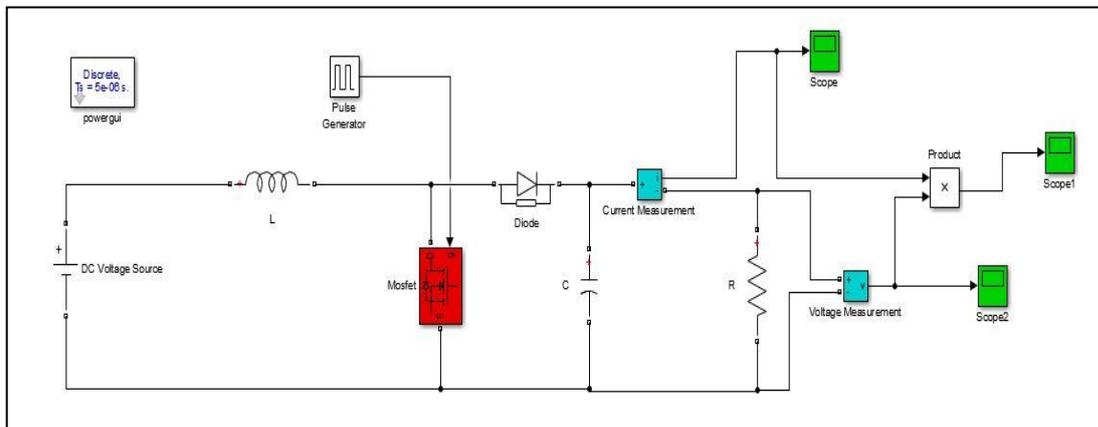


Figure 4.4 : Modèle Sim Power du hacheur survolteur (Boost)

- Les figures (4.5), (4.6), (4.7) représentent respectivement la tension, la puissance, le courant de l'hacheur BOOST

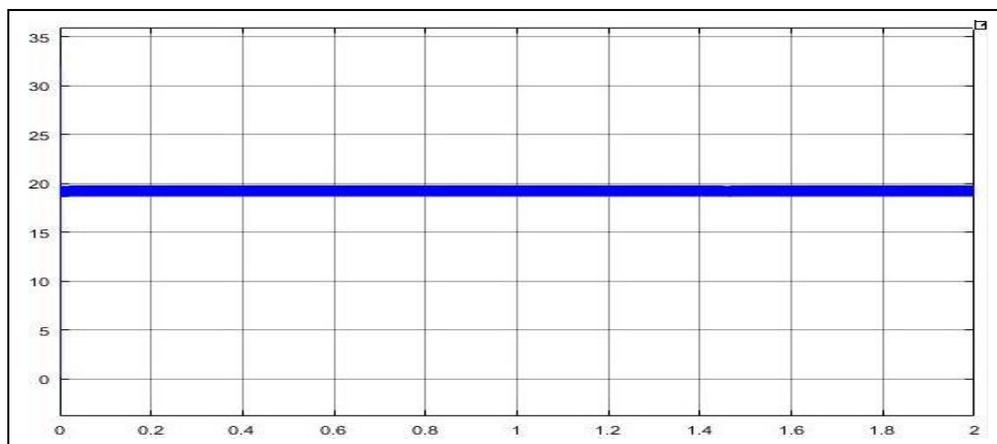
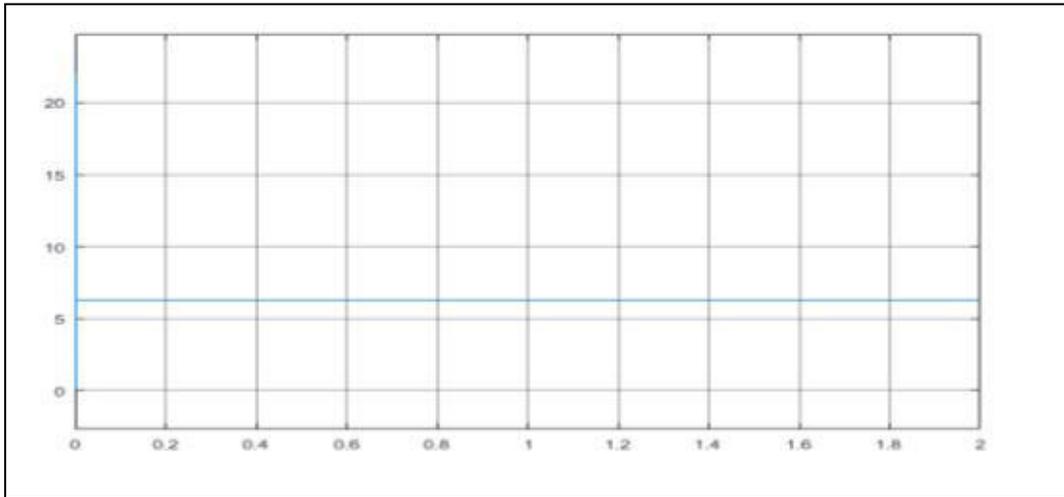
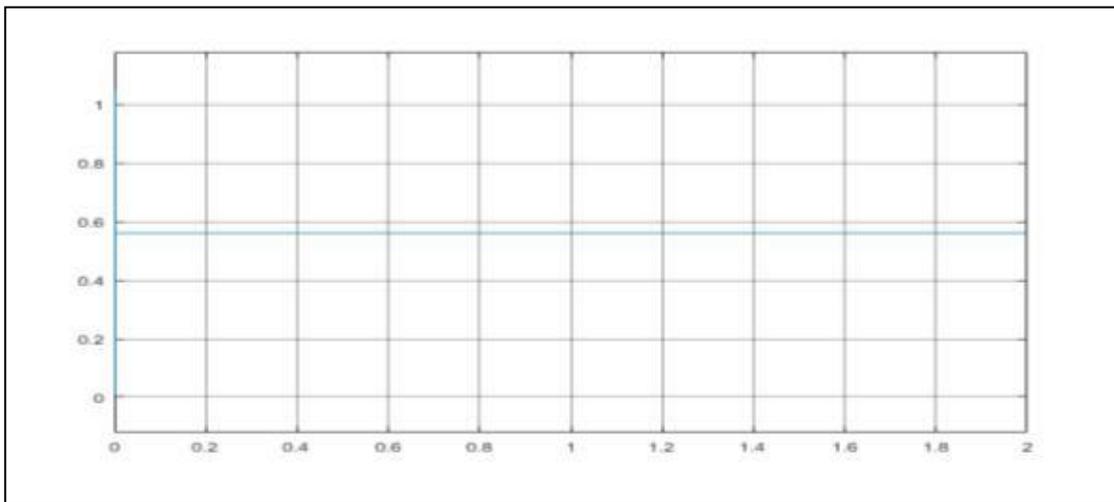


Figure 4.5: la tension de sortie du hacheur Boost



**Figure 4.6 : la puissance à la sortie de boost**



**Figure 4.7 : le courant à la sortie de Boost**

Donc les résultats du hacheur boost effectué correctement sont bons puisque la tension de sortie d'hacheur boost qui égale à 20v est supérieure à celle l'entrée qui égale à 12v.

### **IV.3.4. Le rapport cyclique**

La figure suivante représente le schéma block de rapport cyclique sous Matlab/Simulink.

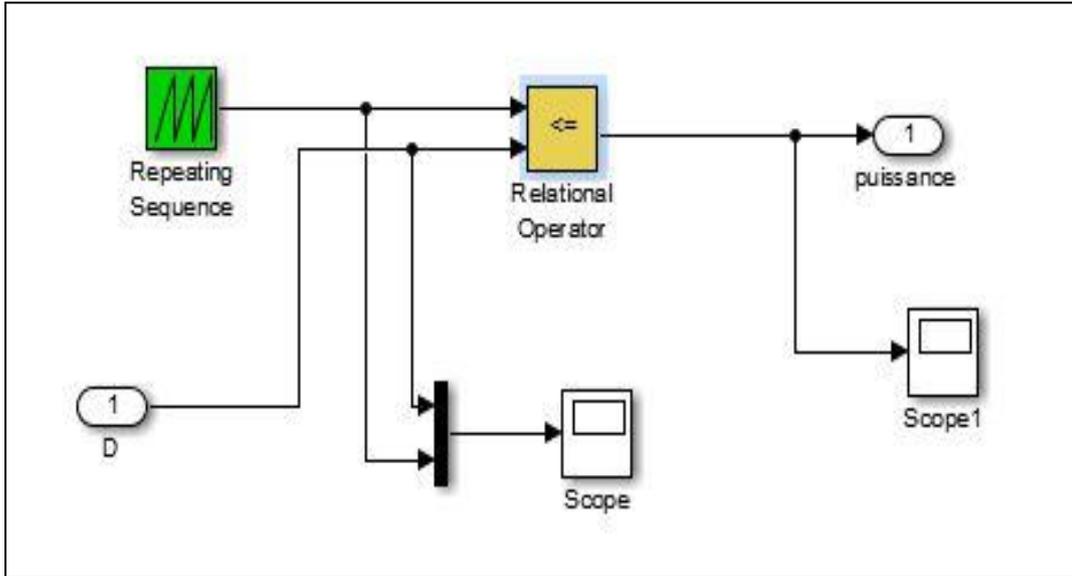


Figure 4.8 : schéma block de rapport cyclique

## IV.4. Simulation de panneau PV avec hacheur BOOST et son MPPT

Pour vérifier la faisabilité de module solaire simulé en Simulink nous avons réalisé le schéma (Figure 4.9). Pour une alimentation d'une charge résistive à travers un hacheur élévateur.

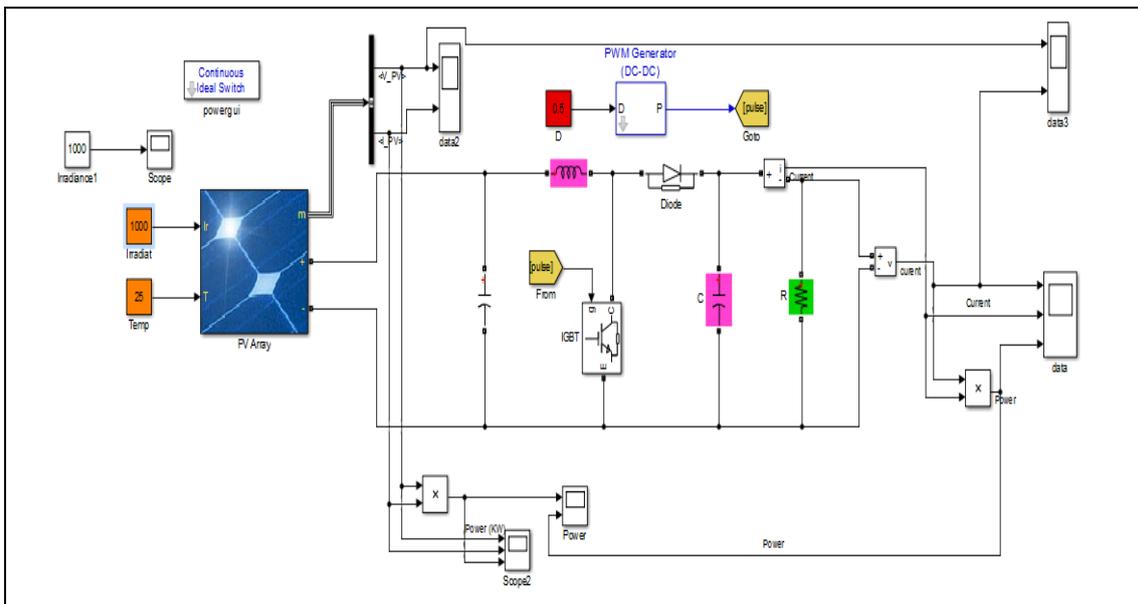


Figure 4.9: Schéma de simulation panneau PV\_Hacheur\_Boost\_charge résistive sans MPPT

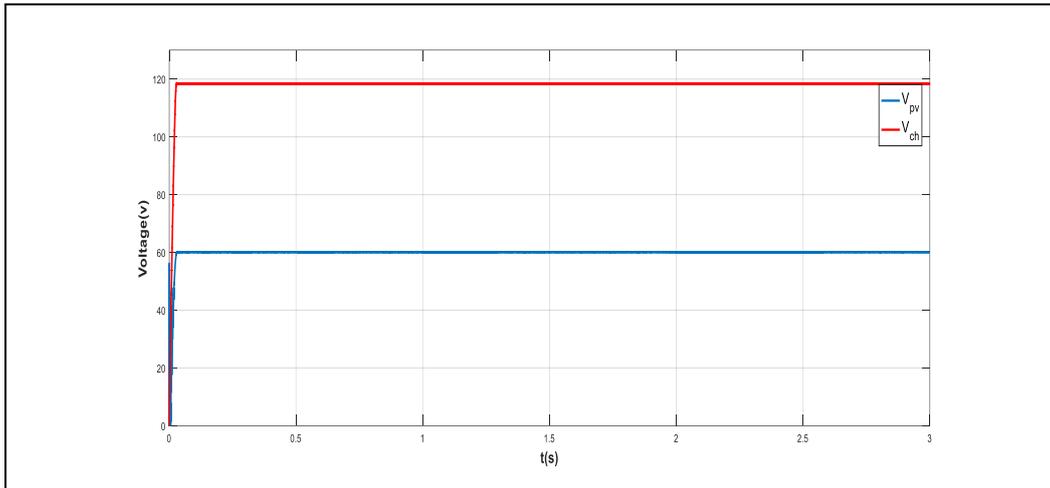


Figure 4.10 : Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique  $D=0.5$

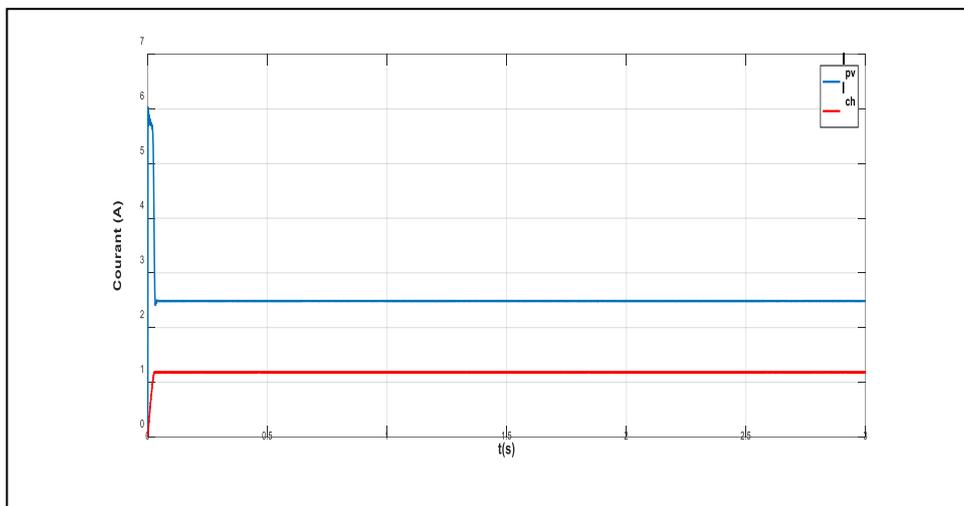


Figure 4.11 : Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique  $D=0.5$

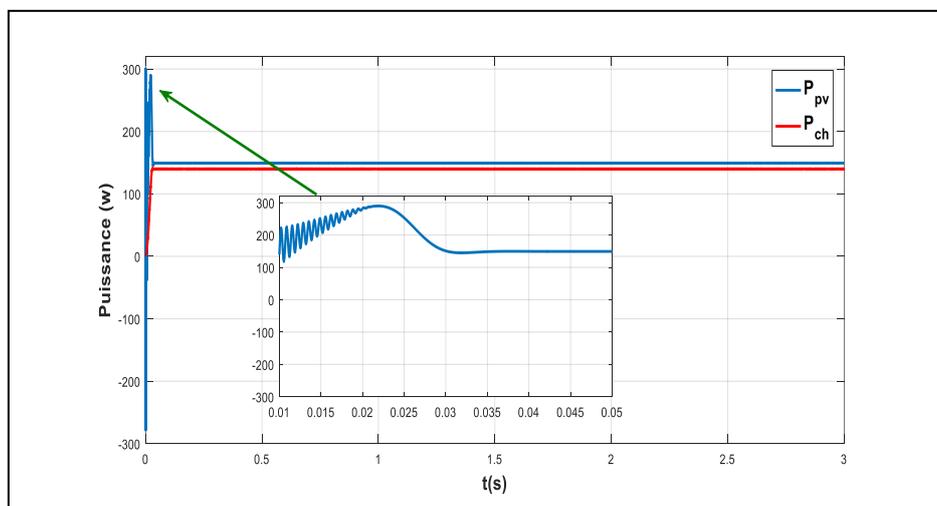
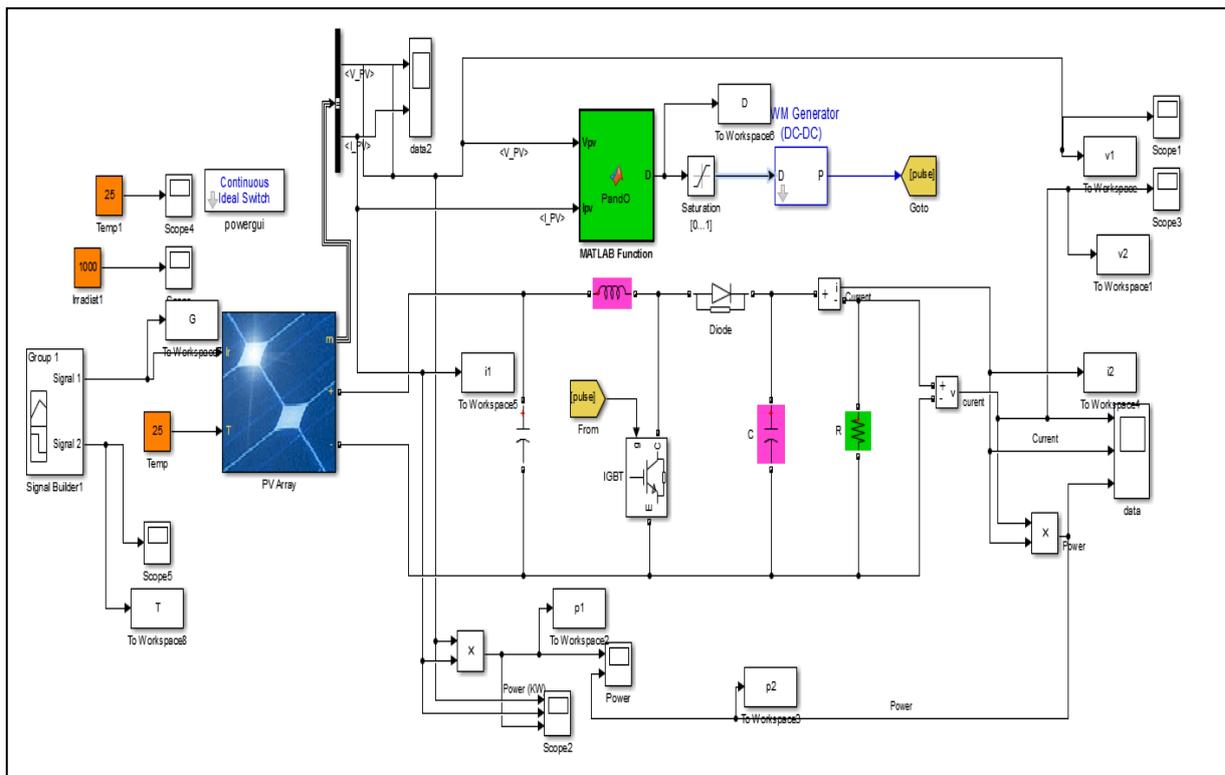


Figure 4.12 : Puissances du panneau photovoltaïque et de la charge sans MPPT

Les figures (4.10) (4.11) et (4.12) représentent respectivement les tensions, les courants et les puissances délivrés par le panneau et aux bornes de la charge sans MPPT. On constate que la tension à la sortie de l'hacheur BOOST est supérieur à celle de l'entrée par contre la puissance ne converge pas vers son maximum mais vers une valeur inférieure, d'où la nécessité d'appliquer une technique de poursuite du point de puissance maximale MPPT pour garantir l'efficacité de l'installation.

### **IV.5. Simulation de panneau PV-Hacheur BOOST et MPPT (P&O)**

Schéma représenté sur la figure (4.13) correspond au panneau PV connecté à la charge par l'intermédiaire d'un contrôleur MPPT (P&O) et un convertisseur Boost.



**Figure 4.13 : Schéma de simulation panneau PV\_Hacheur\_Boost\_charge résistive avec MPPT**

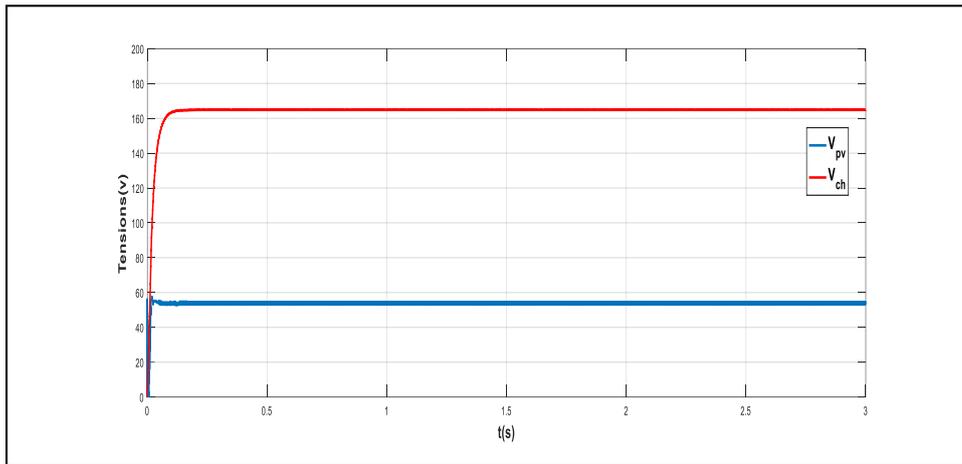


Figure 4.14: Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT

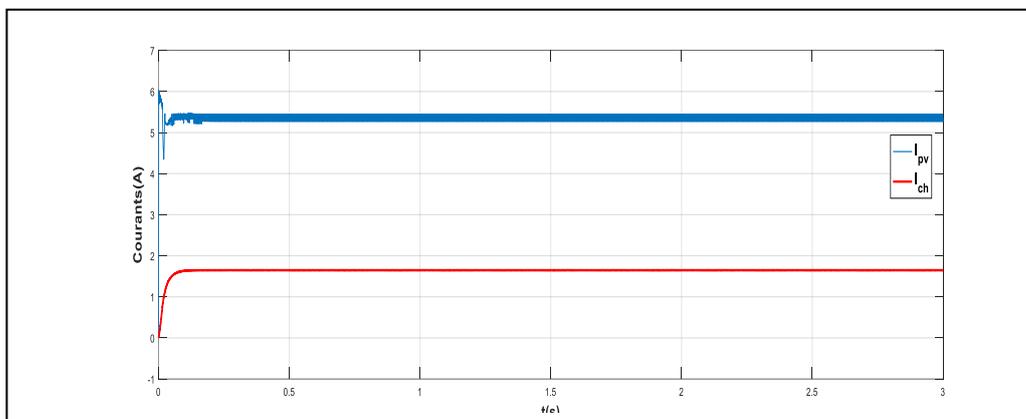


Figure 4.15 : Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT

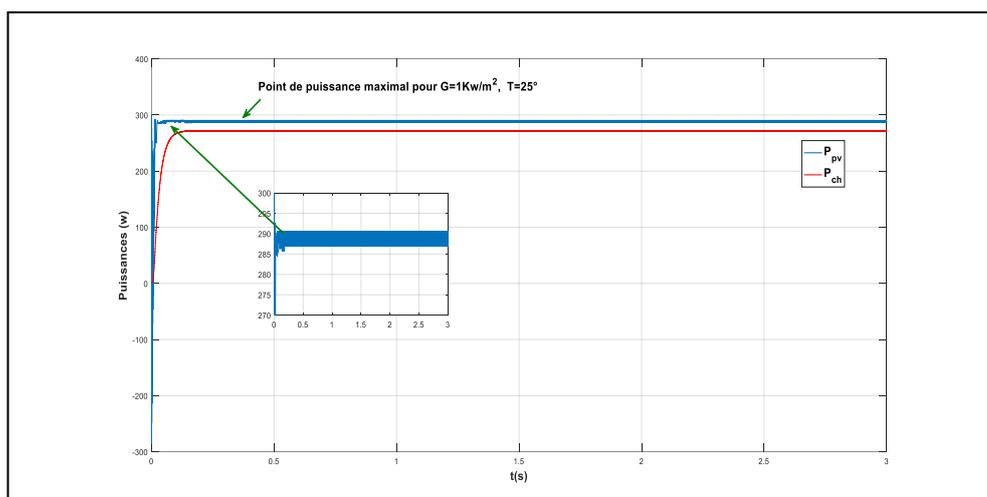


Figure 4.16 : Puissances du panneau photovoltaïque et de la charge avec MPPT

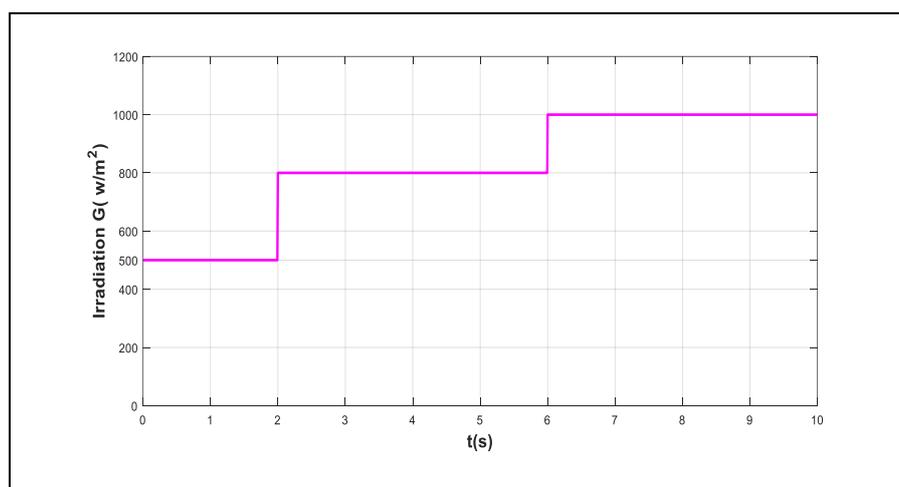
➤ **Interprétation :**

D'après les figures (4.13), (4.14) et (4.15) représentant les tensions, les courants et les puissances à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT, on constate qu'en appliquant la technique P&O la tension délivrée par le panneau converge vers la valeur correspondant au point de puissance maximale, la tension à la sortie de l'hacheur boost est supérieure à celle à son entrée et que la puissance converge vers la valeur maximale.

## **IV.6. L'efficacité de l'algorithme P&O sur l'irradiation et la température**

Pour valider l'efficacité de l'algorithme P&O de poursuite du point de puissance maximale ; plusieurs simulations ont été effectuées. Pour une variation de l'Irradiation en fonction du temps figure (4.17) et Pour une variation de la température en fonction du temps figure (4.20).

### **IV.6.1. La variation de l'irradiation**



**Figure 4.17 : Variation de l'Irradiation en fonction du temps**

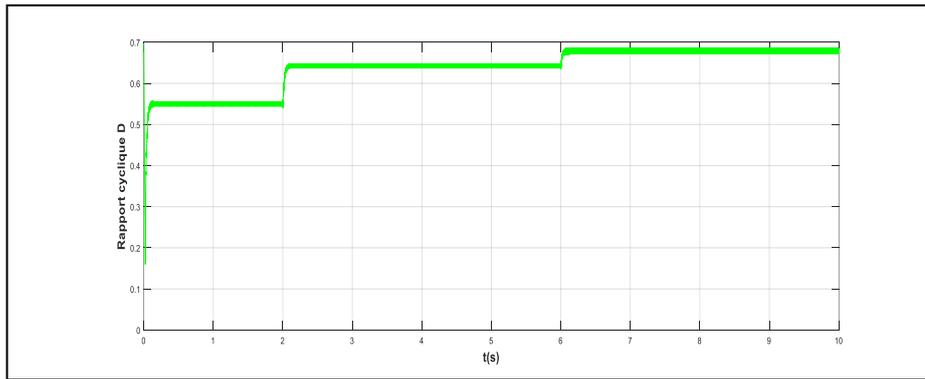


Figure 4.18: Rapport cyclique D pour G variable

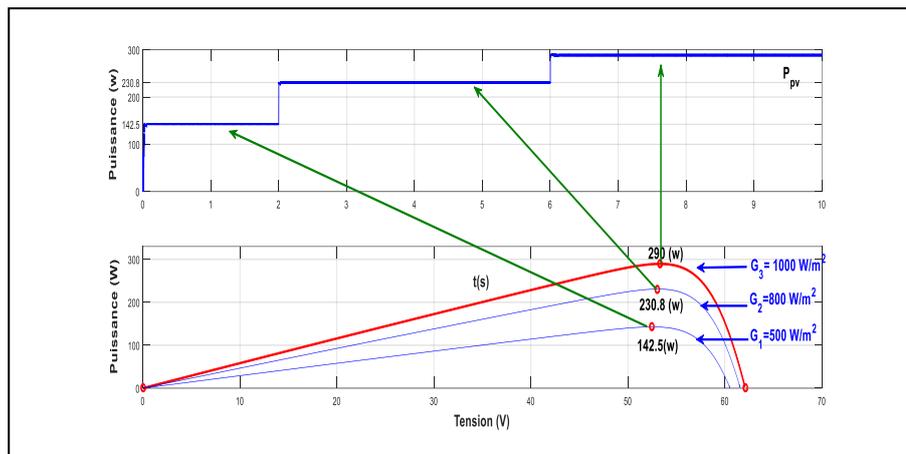


Figure 4.19 : Puissances du panneau photovoltaïque avec MPPT pour différentes irradiances

La figure (4.19) illustre les résultats obtenus pour différentes irradiances  $G_1=500 \text{ w/m}^2$ ,  $G_2=800 \text{ w/m}^2$ ,  $G_3=1000 \text{ w/m}^2$ . On constate que la puissance délivrée par le panneau converge vers le point correspondant à la puissance maximale.

## IV.6.2. La variation de température

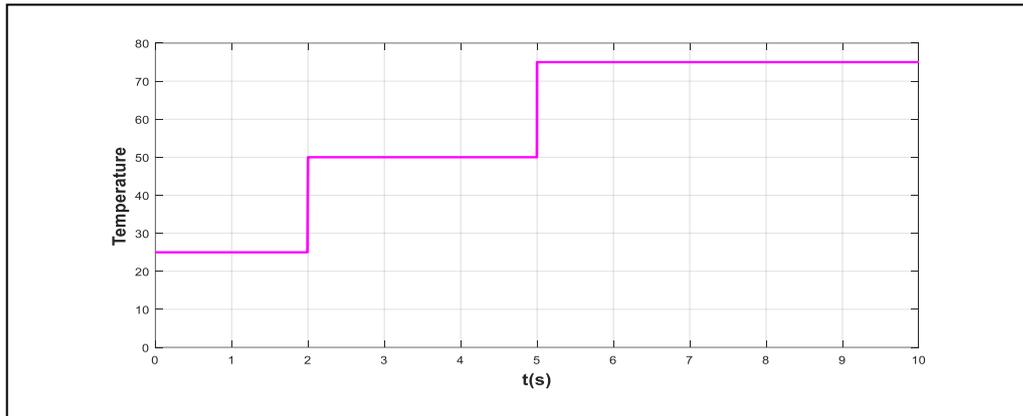


Figure 4.20 : Variation de la Température en fonction du temps

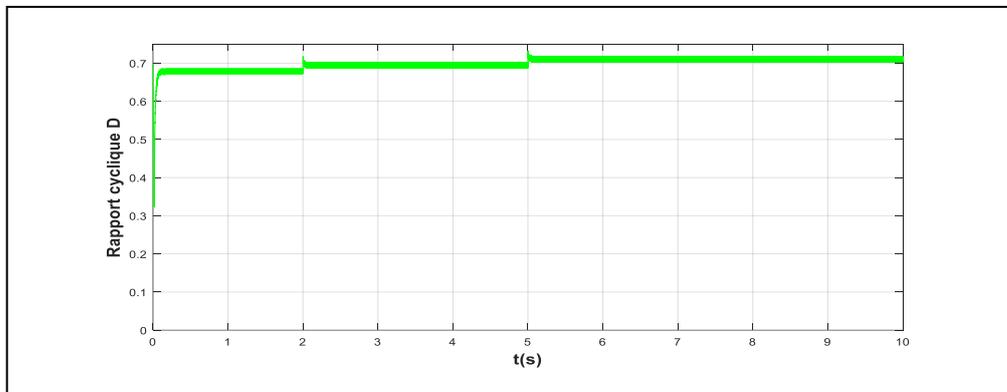


Figure 4.21 : Rapport cyclique D pour T variable

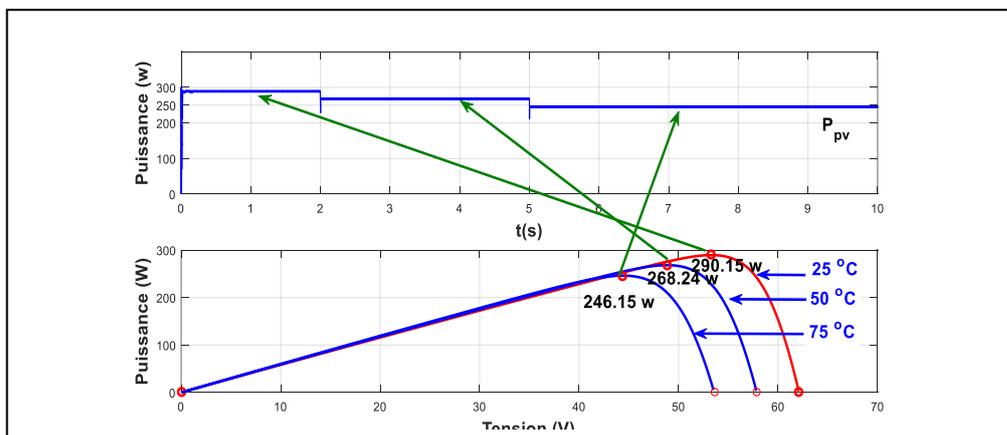


Figure 4.22: Puissances du panneau photovoltaïque avec MPPT pour différentes Températures

La figure (4.22) illustre les résultats obtenus pour différentes Températures  $T_1=25^\circ$ ,  $T_2=50^\circ$ ,  $T_3=75^\circ$ . On constate que la puissance délivrée par le panneau converge vers le point correspondant à la puissance maximale.

## IV.7. Les paramètres du moteur à courant continu

Les paramètres du moteur à courant continu utilisée dans notre simulation sont donnés par le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Résistance et inductance au champ	$R_f=240\Omega$ , $L_f=120H$
Résistance et inductance d'induit	$R_a=0.6 \Omega$ , $L_a=0.012H$
La tension nominale	$V_n=240v$
La vitesse	$N=1740 \text{ tr/min}$
Inertie totale	$J=1 \text{ Kg.m}^2$
Inductance de champ- armature	$L_{af}=1.8 \text{ H}$
La puissance mécanique	$P=5 \text{ HP}$

Tableau 4.1: paramètre du MCC

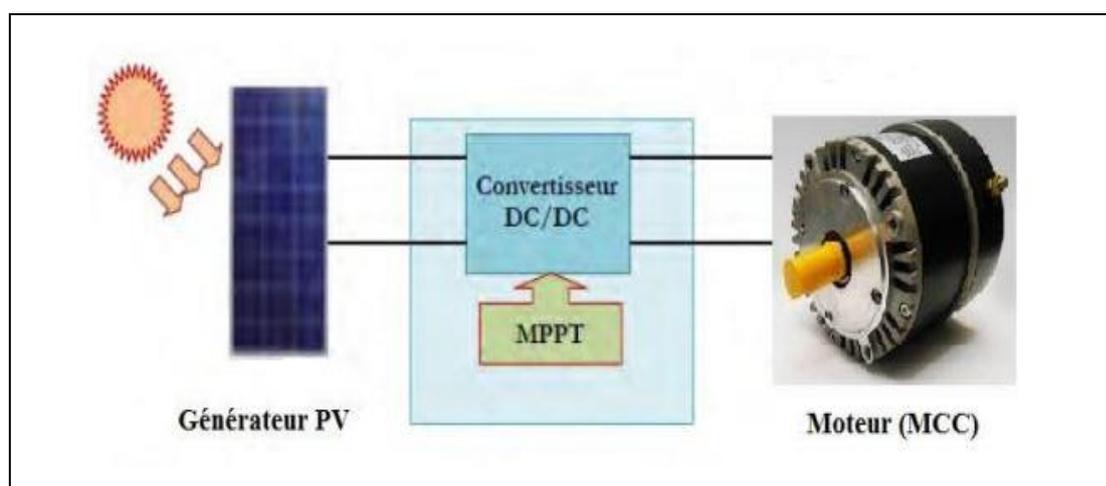


Figure 4.23 : schéma synoptique d'association de PV avec MCC

### IV.7.1. Simulation globale du système

Le schéma block qui contient un GPV, convertisseur DC/DC(boost),MPPT et un moteur a courant continu et qui été réalisée par Matlab / Simulink

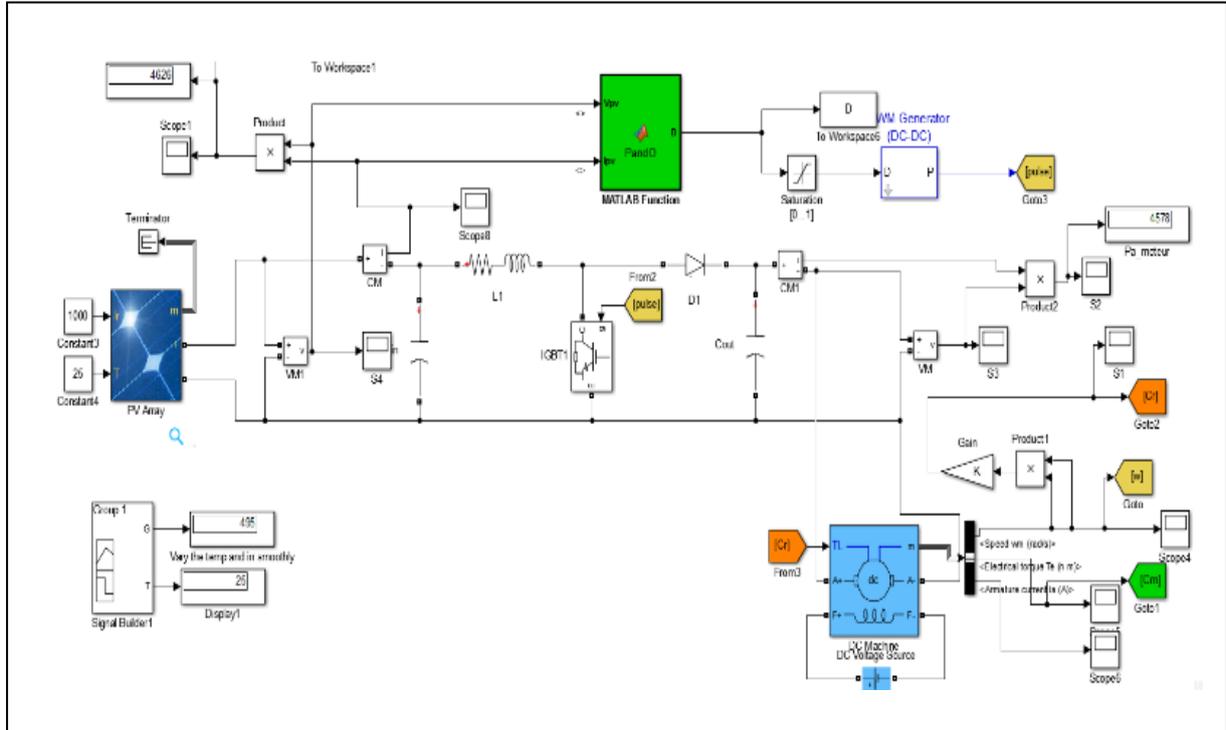


Figure 4.24: schéma block du système globale (GPV, convertisseur, MPPT (P&O), (MCC)

### IV.7.2. Caractéristique de moteur à courant continu

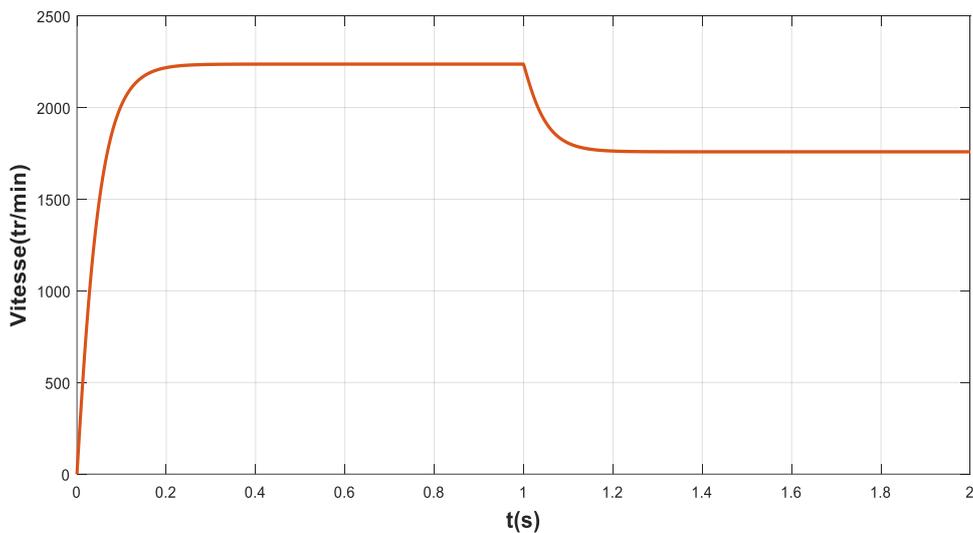


Figure 4.25 : caractéristique de vitesse du MCC  $\omega = f(t)$

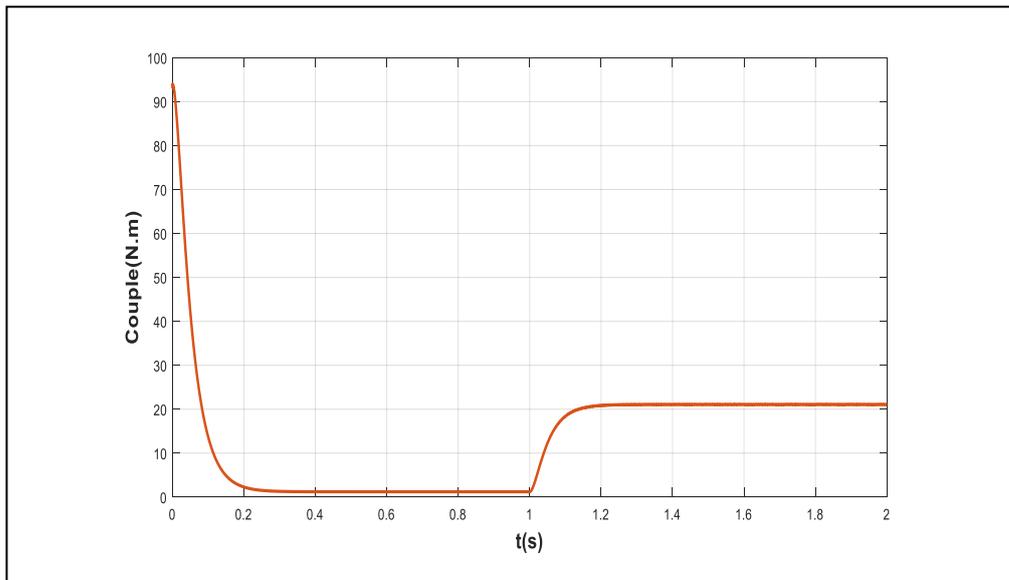


Figure 4.26 : caractéristique de couple du MCC  $C = f(t)$

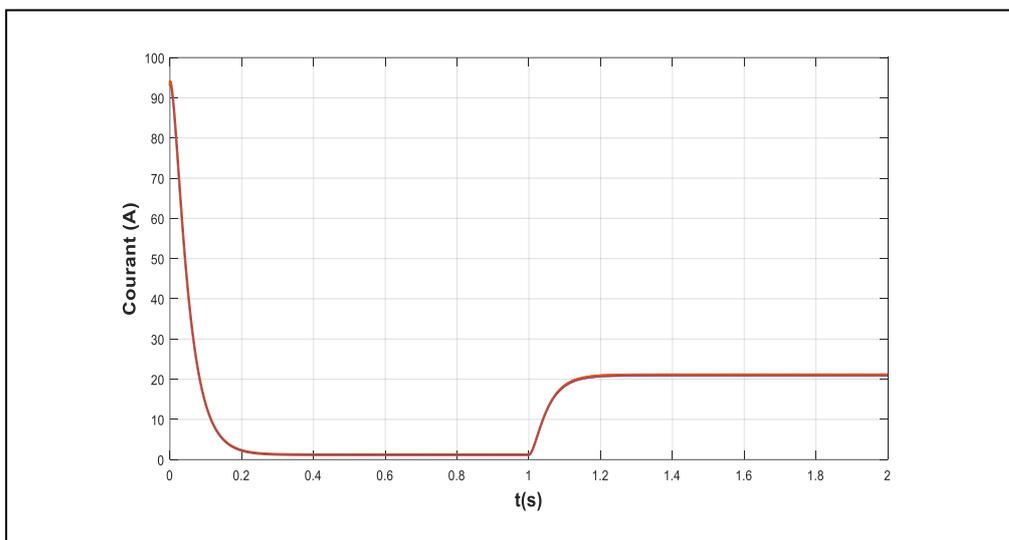


Figure 4.27: caractéristique de courant du MCC  $I = f(t)$

➤ **Interprétation :**

Les figures représentent l'évaluation des variables de sortie (vitesse, couple et courant) du moteur à courant continu en fonction de temps.

On remarque que le couple varie proportionnellement avec le courant selon la loi  $C = K\Phi I$  et la vitesse est inversement proportionnelle au courant.

## CHAPITRE IV SIMULATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

La vitesse se stabilise après 0.2s et converge une valeur  $N=2250\text{tr/min}$ . l'application d'un couple de charge  $C_r=20\text{ N.m}$  a  $t=1\text{ s}$  la vitesse diminue jusqu'à  $N=1750\text{tr/min}$ , le couple tend vers une valeur qui correspond au couple de charge.

Les figures suivantes représentent la vitesse, le couple de charge et la caractéristique mécanique du MCC.

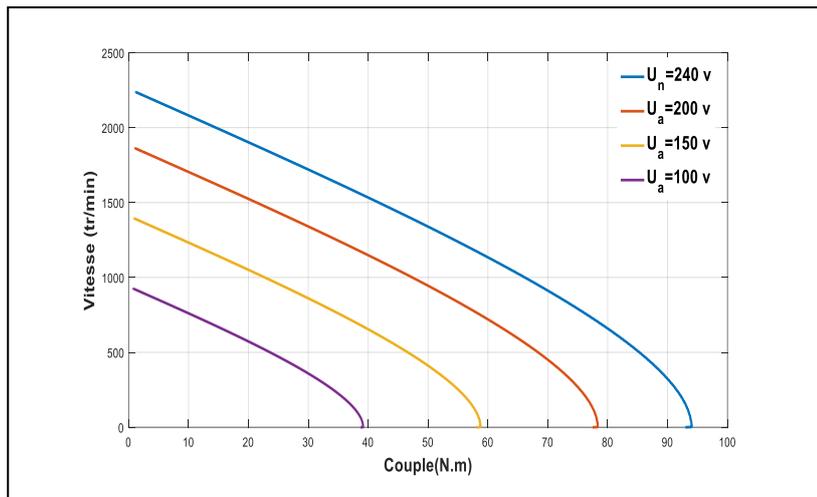


Figure 4.28: caractéristique mécanique du MCC à excitation indépendante pour une tension d'induit variable

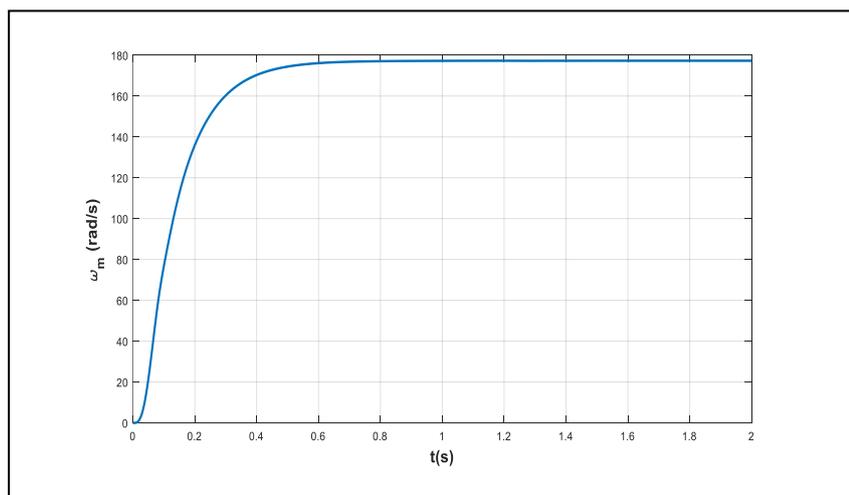


Figure 4.29 : Vitesse du moteur en fonction du temps

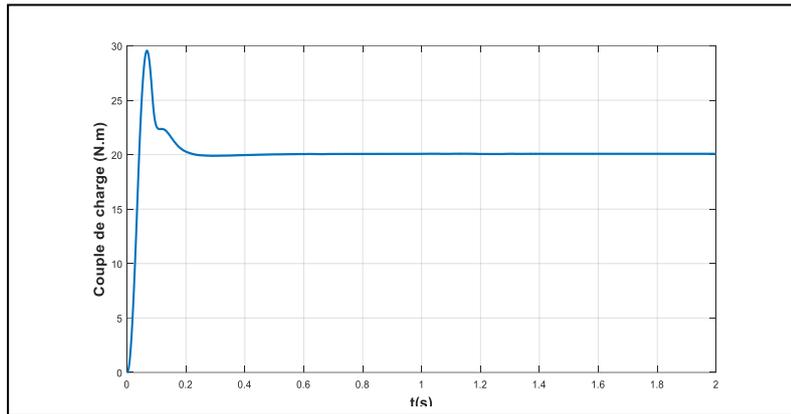


Figure 4.30 : Couple de charge en fonction du temps

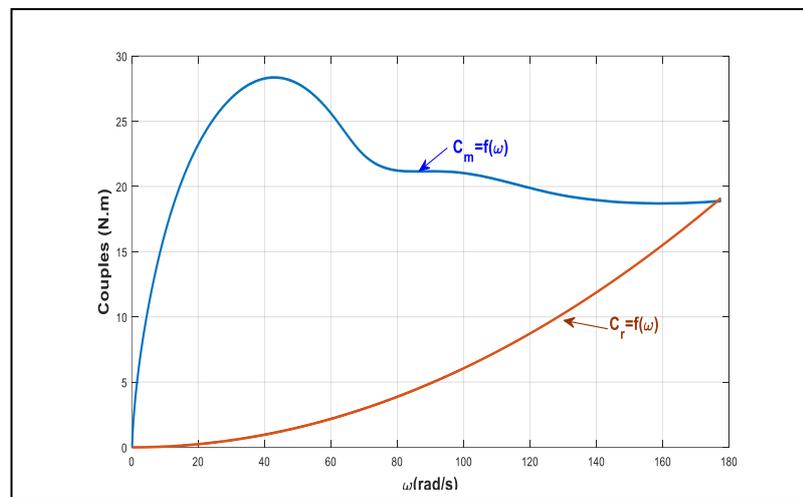


Figure 4.31 : Caractéristiques mécaniques du moteur et de la charge

On remarque que le couple moteur est proportionnel au carré de la vitesse

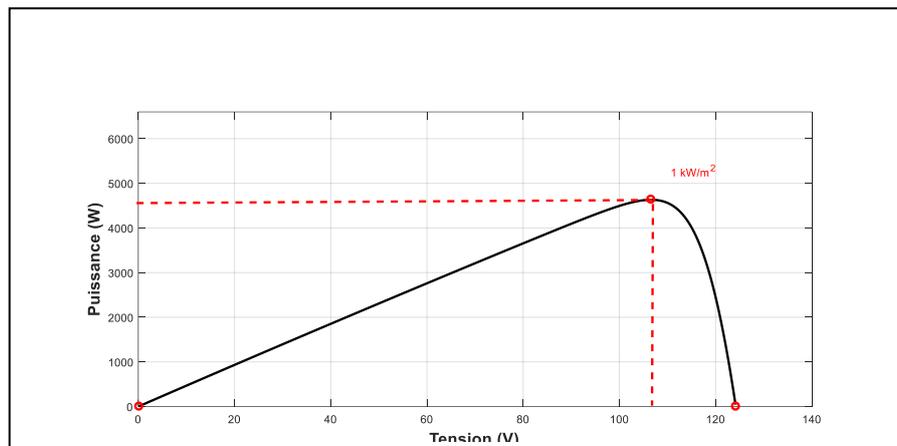


Figure 4.32 : Caractéristique  $P=f(V)$  du GPV utilisé pour alimenter le système

La figure (4.33) représente la tension délivrée par le panneau et la tension de sortie de l'hacheur qui appliquée sur l'induit de moteur.

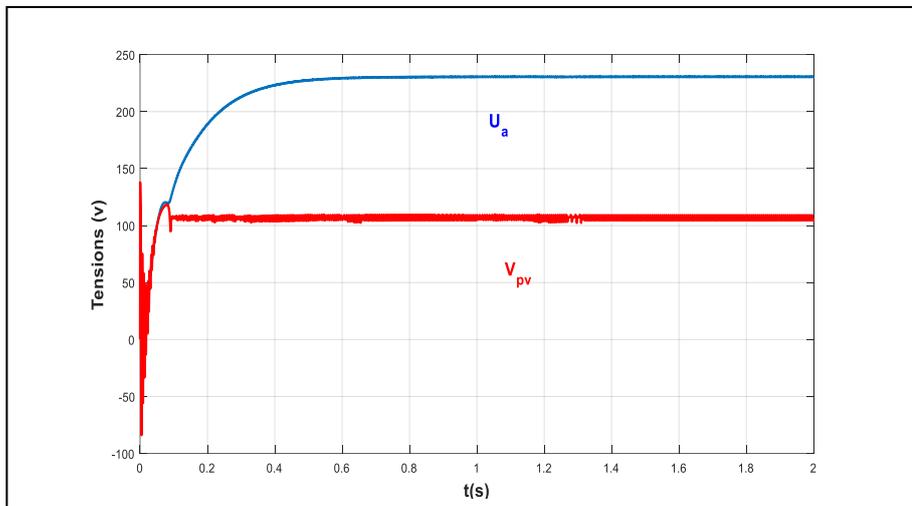


Figure 4.33: Tension délivrée par le panneau et celle à la sortie de l'hacheur appliquée à l'induit du moteur

On remarque de la figure que la tension de sortie de l'hacheur est supérieure à celle de panneau car l'effet de l'hacheur Boost et la commande MPPT

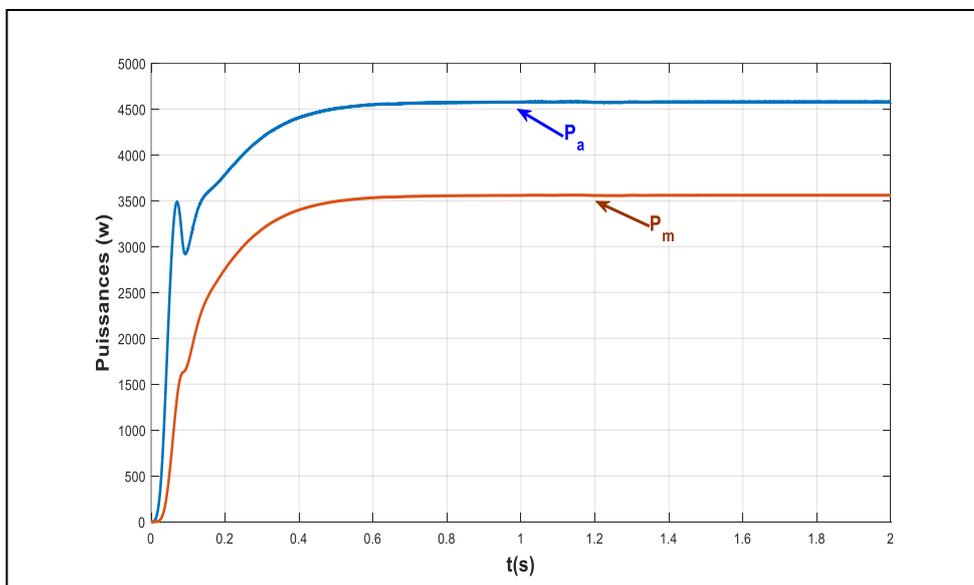


Figure 4.34: La puissance électrique absorbée par le moteur et mécanique en bout d'arbre

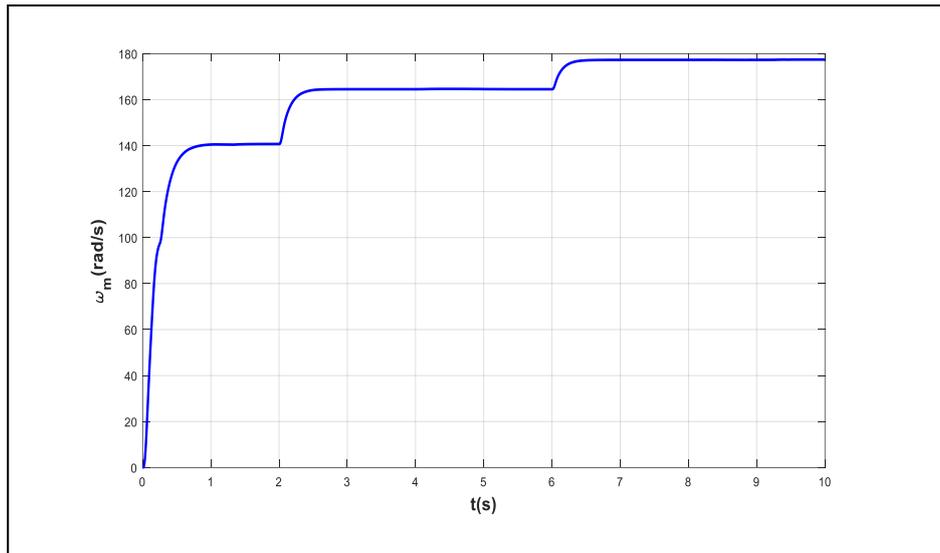


Figure 4.35: caractéristique de la vitesse en fonction de temps  $\omega = f(t)$

## IV.8. Conclusion

Ce dernier chapitre est consacré à la simulation des parties d'un système PV qui délivre une tension à un moteur à courant continu à l'aide d'un hacheur boost commandé par MPPT (P&O). Les résultats obtenus montrent que le rapport cyclique varie d'une manière automatique de telle façon que le système converge vers les conditions optimales indépendamment de l'intensité changeante de l'irradiation solaire.

Ces résultats, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

## **Conclusion et perspectives**

---

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commande MPPT ont été étudiés pour la poursuite du point maximum de puissance. Dans cet objectif, ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en place d'une commande MPPT permettant de traquer la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

Pour ce faire, nous avons commencé par introduire le lecteur pas à pas au domaine des systèmes photovoltaïques en rappelant quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque ainsi que le domaine d'application de cette dernière. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales ainsi que leurs types.

Dans le deuxième chapitre, on a effectué la modélisation et la simulation du système photovoltaïque dans le but d'analyser ses performances sous l'influence de quelque paramètre atmosphérique (température et ensoleillement). Une étude détaillée des différents modèles de convertisseur DC/DC a été élaborée. Dans notre étude on s'est intéressé au convertisseur BOOST qui représente un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

Pour la maximisation de la puissance on a appliqué la méthode P&O vue son efficacité et sa simplicité.

Finalement, on a terminé ce travail par l'étude et l'analyse du comportement dynamique d'un moteur à courant continu alimenté par un générateur photovoltaïque et l'influence des variations atmosphériques sur les caractéristiques mécaniques de ce dernier.

On peut conclure que :

- Les performances de générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les

## *CONCLUSION ET PERSPECTIVES*

variations de la charge. Les performances de GPV sont évaluées à partir des conditions standards (STC).

- L'hacheur survolteur et la commande MPPT (P&O) effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- Ces résultats, très intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Comme perspectives de ce travail,

- Il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou d'espace, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.
- Utiliser d'autres algorithmes de poursuite de puissance maximale (neuro-fuzzy, algorithmes génétiques ...)
- Implémenter en temps réel le système étudié.

# **BIBLIOGRAPHIE**

---

- [01] : Programme des Energies Renouvelables et de L'efficacité énergétique. Mars 2011 réalisation SATINFO.
- [02] : Guide des Energie Renouvelables, Edition 2007, Ministère de l'Energie et des Mines.
- [03] : B. Flèche – D. Delagnes "Energie solaire photovoltaïque .doc "juin 07.
- [04]: H.S.Rauschenbach.Solar cell array design hand book. Van Nostrand, 1980.
- [05] : [http:// www.lei.ucl.be/multimedia/elEE/realisations/energiesRenouveleble Filière Solaire/solair.htm](http://www.lei.ucl.be/multimedia/elEE/realisations/energiesRenouveleble_Filière_Solaire/solair.htm)
- [06] : J.Martin, "Energies éoliennes ", Technique de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. 8 585 1 – B8 585 21.
- [07] : A.Ould Mohamed Yahya et I.Youm, "étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque ", énergies renouvelables, vol.11 N°3 (2008) 473 – 483 Modélisation gé.
- [08] : P.Leconte, M. Rapin, E.Széchenyi, <<Eoliennes>>, techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp.BM4 640 21.
- [09] Techniques d'ingénieur (énergie solaire).
- [10] : BOUZERIAHAMZA, ZOUITEN ISSAM" étude des hacheurs et leur application dans l'optimisation des générateurs photovoltaïque" Mémoire de master d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar, Annaba .2011.
- [11] : Extrait d'un cours magistral de Stéphan ASTIER Professeur Des Universités – INPT – ENSEEIHT.
- [12]: D.Turcotte, M .Ross and F.Sheriff. "Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools" PV Horizon, Canada, 2001.ARTICLE PDF.
- [13] : Geoff Walker. Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model. Journal of Electrical&Electronics Engineering Australia, 21 (1), 2001.
- [14] : Y. Sukamongkol, S.Chungpaibulapatana and W.Ongsakul, "Simulation Model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads, Renewable Energy, Vol.27 , N°2, pp. 237 - 235 , 2002.
- [15] : Cahier techniqueN0 152 perturbations harmoniques dans les réseaux.
- [16]: P.W.Carlin, A.S. Laxon, E.B.Muljadi," the history and state of art of variable speed wind turbine technology ", NRLE/TP\_500\_28607, Février 2001.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [17] : M. Seddik bacha, (les systèmes de l'électronique de puissance dédiée à la distribution électrique-appliquer à la qualité de l'énergie). Thèse de doctorat laboratoire d'électrotechnique de Grenoble Ikerlan(Mondragon, Espagne), septembre 2003.
- [18] : Wildi Théodore, Sybille Gilbert, " électrotechnique", de boeck, 4e édition, 2005.
- [19] : Dr.F.Bouchafaa, « Cours Électronique de puissance », <http://www.usthb.com>, 2008/2009.
- [20] : Christian BISSIERES, « Conversion statiques des énergies, Physique Appliquée » <http://www.cbissprof.free.fr>.
- [21] : Philippe LETENNEUR, « Les alimentations électrique », 2003-2004.
- [22] : M. Belkacem. Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen-Algérie, Faculté desSciences, 2015.
- [23] : Y.Nettari. Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Fe-Rhat Abbas, Sétif-Algérie, Faculté de Technologie, 2014.
- [24]: W.Xiao, « A Modifed Adaptative Hill Colombin Maximum Power Point Training (MPPT) Control Method for Photovoltaïque Power System», Université de Columbia, 2003
- [25]: Antonio Luque and Steven Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [26]: Antonio Luque and Steven Hegedus, «Handbook of Photovoltaïque Science and Engineering», John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [27] : S. ABADA ,, Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur spic “ Mémoire Maître Sciences, Université Laval, 2011.
- [28] : F. Bouchtouche cherfa « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT ». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [29] : W. Lawrance, B. Wichert, and D. Langridge, “Simulation and performance of a photovoltaic pumping system,” in *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, vol. 1, pp. 513–518, February 1995.

# Résumé

Durant ces dernières années, il y a eu un intérêt considérable pour les énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie photovoltaïque.

La puissance de sortie d'un générateur PV dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode perturbation et observation (P&O). Ce mémoire présente une étude par simulation d'un système PV alimentant un MCC dont l'objectif est d'analyser, simuler et évaluer les performances du système global sous des conditions de fonctionnement variables.

## Mots clés :

Panneau Photovoltaïque, Convertisseur DC-DC, MPPT, Machine à Courant Continu.

## ملخص

في السنوات الأخيرة ، كان هناك اهتمام كبير بالطاقات المتجددة وبشكل أكثر تحديدًا الطاقة الكهروضوئية.

انتاج الطاقة من مولد PV تعتمد على عدد من المعايير، بما في ذلك كثافة الإشعاع الشمسي، درجة حرارة الخلية ... إلخ. نظرًا للخصائص الكهربائية غير الخطية القوية للخلايا وارتباطاتها ، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية من خلال الحلول القائمة على تقنيات MPPT. هناك طرق MPPT التقليدية التي يتم استخدامها غالبًا، مثل طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O). تقدم هذه الأطروحة دراسة محاكاة لنظام الكهروضوئية المدعوم من مركز التحكم في المحرك ذو التيار المستمر من أجل التحليل، محاكاة وتقييم نظام الطاقة الكهروضوئية الشامل في ظل ظروف تشغيل مختلفة . للقيام بهذه النماذج الرياضية لمكونات النظام الكهروضوئية تم استعمال النظام الآتي : (مولد GPV ، محول DC-DC يتم التحكم فيه بواسطة ( P&O ) MPPT ، الشحنة)

## الكلمات المفتاحية :

لوحة ضوئية، محول DC-DC ، MPPT ، آلة التيار المستمر .