

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

M/621.944



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Protection et Contrôle
des Réseaux électriques

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme :
MASTER

**Modélisation et simulation d'un système
Photovoltaïque**

Présenté par :

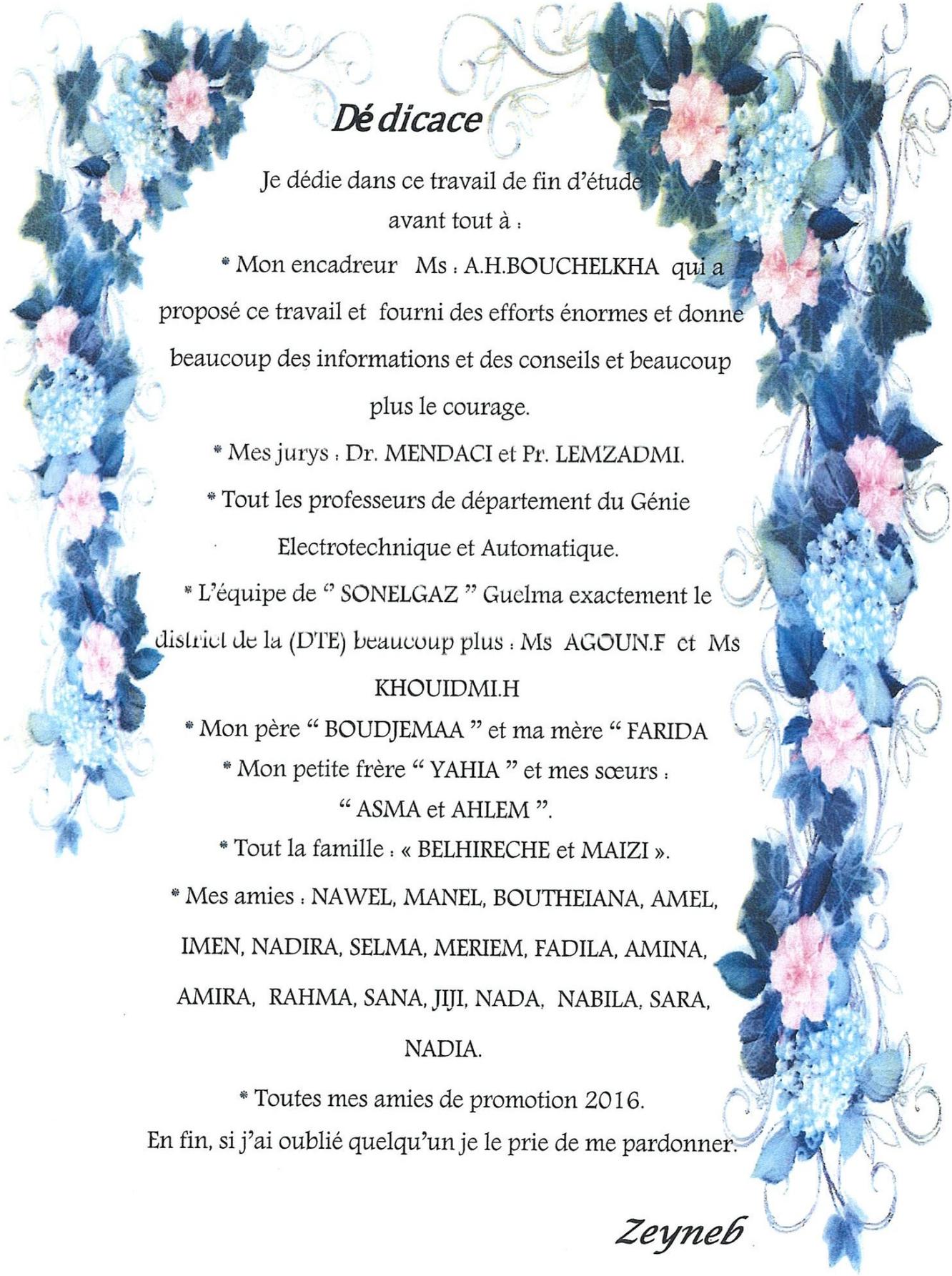
BELHIRECHE ZEYNEB

HABECHE ISMAHAN

Sous la direction de :

Mr. BOUCHELKHA A.H

(juin 2016)



Dédicace

Je dédie dans ce travail de fin d'étude
avant tout à :

* Mon encadreur Ms : A.H. BOUCHELKHA qui a
proposé ce travail et fourni des efforts énormes et donne
beaucoup des informations et des conseils et beaucoup
plus le courage.

* Mes jurys : Dr. MENDACI et Pr. LEMZADMI.

* Tout les professeurs de département du Génie
Electrotechnique et Automatique.

* L'équipe de " SONELGAZ " Guelma exactement le
district de la (DTE) beaucoup plus : Ms AGOUNF et Ms
KHOUIDMI.H

* Mon père " BOUDJEMAA " et ma mère " FARIDA

* Mon petite frère " YAHIA " et mes sœurs :
" ASMA et AHLEM ".

* Tout la famille : « BELHIRECHE et MAIZI ».

* Mes amies : NAWEL, MANEL, BOUTHEIANA, AMEL,
IMEN, NADIRA, SELMA, MERIEM, FADILA, AMINA,
AMIRA, RAHMA, SANA, JIJI, NADA, NABILA, SARA,
NADIA.

* Toutes mes amies de promotion 2016.

En fin, si j'ai oublié quelqu'un je le prie de me pardonner.

Zeyneb



Dédicaces

*Je remercie avant tout ALLAH le tout
puissant qui m'a donné les capacités
physiques et intellectuelles nécessaires à la
réalisation de ce projet de fin d'étude.
Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont aidé
à réaliser ce travail.*

** Amon père*

*En témoignage de ma sincère gratitude pour
ses sacrifices qu'il a consentis pour moi et
pour toute la famille.*

** Am a mère*

*J'espère qu'elle le trouve récompensant de
tous les sacrifices qu'elle a consentis pour moi.*

*Elle m'a donné la vie, la tendresse et le
courage pour réussir*

** A mon frère et mes sœurs*

*Leur trouve toute ma profonde affection et
ma profonde
Considération.*

** A celle qui m'aime*

En témoignage de mon respect.

** A tous mes amis*

*En témoignage de mon amitié et mon
attachement*

ismahan

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُ لَا إِلَهَ إِلَّا هُوَ الْحَيُّ الْقَيُّومُ لَا تَأْخُذُهُ سِنَّةٌ وَلَا نَوْمٌ
لَهُ مَا فِي السَّمَوَاتِ وَمَا فِي الْأَرْضِ مَنْ ذَا الَّذِي يَشْفَعُ عِنْدَهُ
إِلَّا بِإِذْنِهِ يَعْلَمُ مَا بَيْنَ أَيْدِيهِمْ وَمَا خَلْفَهُمْ وَلَا يُحِيطُونَ
بِشَيْءٍ مِّنْ عِلْمِهِ إِلَّا بِمَا شَاءَ وَسِعَ كُرْسِيُّهُ السَّمَوَاتِ
وَالْأَرْضَ وَلَا يَئُودُهُ حِفْظُهُمَا وَهُوَ الْعَلِيُّ الْعَظِيمُ

صدق الله العظيم

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.1. Introduction	02
1.2. L'énergie solaire	02
1.2.1. Le rayonnement solaire	03
1.2.2. Inclinaison de la terre	05
1.2.3. Inclinaison du module par rapport au soleil	06
1.2.4. Déclinaison du soleil	07
1.2.5. Modèle simplifié de l'éclairement	08
1.2.6. L'utilisation de l'énergie solaire	09
1.2.7. Energie solaire en Algérie	10
1.2.7.1. Le Potentiel Solaire	10
1.2.7.2. Les différentes zones énergétiques de l'Algérie	12
1.3. Configuration d'un système PV	13
1.3.1. Générateur photovoltaïque	14
1.3.1.1. Module photovoltaïque	14
1.3.1.2. La Cellule photovoltaïque et ses performances	17
1.3.1.2.1. L'effet photovoltaïque	17
1.3.1.2.2. Constitutions des cellules photovoltaïques	18
1.3.1.2.3. Dopage des cellules	19
1.3.1.2.4. Les différents types des cellules PV	20
1.3.1.2.5. Association des cellules PV	22
1.3.1.3. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque	24
1.3.2. Les batteries	25
1.3.3. Les récepteurs (charge)	26
1.4. Avantages et inconvénients d'une installation PV	26
1.5. Conclusion	27

Chapitre 2 : Modélisation du générateur photovoltaïque

2.1. Introduction	29
2.2. Modèle d'une cellule idéale	29
2.3. Modèle d'une cellule réelle	30
2.3.1. Modèle à une diode	31
2.3.2. Modèle à deux diodes	33
2.4. Paramètre photovoltaïque	34
2.5. Conclusion	36

Chapitre 3 : Modélisation du système photovoltaïque

3.1. Introduction	38
3.2. Modélisation des hacheurs	38
3.2.1. Hacheur buck (dévolteur)	38
3.2.2. Hacheur boost (survolteur)	41

3.2.3. Détermination des composants du convertisseur de puissance	44
3.3. La modélisation de MPPT	45
3.3.1. Point de puissance maximale (MPP)	46
3.3.2. Suivi de la puissance maximale du générateur PV	49
3.3.3. Principe de la recherche du point de puissance maximal (MPPT)	50
3.3.3.1. Gestion de la MPPT	50
3.3.3.2. Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max (MPPT)	52
3.3.3.2.1. Les méthodes indirectes	53
3.3.3.2.1.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur	53
3.3.3.2.1.2. La méthode de court-circuit	54
3.3.3.2.2. Les méthodes directes	54
3.3.3.2.2.1. La méthode Perturbation & Observation (P&O)	55
3.3.3.2.2.2. Méthode par incrémentation de conductance	57
3.3.3.2.2.3. Méthode à contre réaction de la tension	60
3.3.3.2.2.4. Méthode contre réaction de courants	61
3.4. Conclusion	62

Chapitre 4 : Simulation du système photovoltaïque

4.1. Introduction	64
4.2. L'outil Matlab/Simulink	64
4.3. Simulation du système photovoltaïque	66
4.3.1. Simulation de générateur PV	67
4.3.1.1. Caractéristique du panneau solaire utilisé	67
4.3.1.2. Modèle de simulation	68
4.3.1.3. résultats de simulation	71
4.3.1.3.1 La caractéristique I(V) et P(V) de générateur PV	71
4.3.1.3.2 Influence de la température	73
4.3.1.3.3 Influence de l'Éclairement	73
4.3.1.3.4. Influence de l'association des panneaux Photovoltaïques en Série	74
4.3.1.3.5. Influence de l'association des panneaux photovoltaïques en parallèle	75
4.3.1.3.6. Influence de l'association des panneaux Photovoltaïques mixte	76
4.3.1.3.7. Influence de la résistance série	76
4.3.1.3.8. Influence de l'éclairement et de la température sur les grandeurs maximales	77
4.3.2. Simulation de l'hacheur	78
4.3.2.1. Modèle de simulation	78
4.3.2.2. Paramètres de simulation	78
4.3.2.3. Résultats de simulation	81
4.3.3. Simulation de la commande MPPT	80
4.3.3.1 Modèle de simulation	80
4.3.3.2 Résultats de simulation	81
4.4. Conclusion	81
Conclusion générale.	

liste des figures

Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

Figure 1.1	<i>Spectre d'irradiante solaire</i>	06
Figure 1.2	<i>Composantes du rayonnement solaire</i>	07
Figure 1.3	<i>Courbe de déclinaison du soleil</i>	09
Figure 1.4	<i>Evaluation de rayonnement solaire</i>	10
Figure 1.5	<i>un module thermodynamique</i>	10
Figure 1.6	<i>principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique</i>	11
Figure 1.7	<i>principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque</i>	12
Figure 1.8	<i>Potentiel solaire en Algérie</i>	13
Figure 1.9	<i>les différentes zones énergétiques de l'Algérie</i>	14
Figure 1.10	<i>Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque</i>	15
Figure 1.11	<i>Panneau photovoltaïque</i>	16
Figure 1.12	<i>Module photovoltaïque</i>	17
Figure 1.13	<i>Branchement des modules en série</i>	18
Figure 1.14	<i>Branchement des modules en parallèles</i>	18
Figure 1.15	<i>Structure basique d'une cellule solaire</i>	20
Figure 1.16	<i>Principe de conversion de l'énergie électrique par cellule PV</i>	21
Figure 1.17	<i>les types des cellules PV</i>	23
Figure 1.18	<i>Association de N_s cellules solaires en série</i>	25
Figure 1.19	<i>Association de N_p cellules solaires en parallèle</i>	25
Figure 1.20	<i>Association mixte des cellules solaires</i>	26
Figure 1.21	<i>Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour</i> ...	27
Figure 1.22	<i>Batterie de système PV</i>	28
Chapitre 2 : Modélisation du générateur photovoltaïque		
Figure 2.1	<i>Schéma équivalent d'une cellule idéale</i>	31
Figure 2.2	<i>Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle</i>	33
Figure 2.3	<i>Schéma équivalent d'une cellule PV a deux diodes</i>	36
Chapitre 3 : Modélisation du système photovoltaïque		
Figure 3.1	<i>Schéma électrique d'un hacheur buck</i>	41
figure 3.2	<i>Schéma électrique d'un hacheur buck fermé</i>	42
Figure 3.3	<i>Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert</i>	43
Figure 3.4	<i>Schéma électrique d'un hacheur survolteur</i>	44
Figure 3.5	<i>Schéma électrique d'un hacheur boost fermé</i>	44
Figure 3.6	<i>Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert</i>	45
Figure 3.7	<i>Chaîne élémentaire de conversion PV associée à une commande MPPT</i>	48
Figure 3.8	<i>Courbe de I, V et de puissance de sortie pur un module photovoltaïque</i>	49
Figure 3.9	<i>le point de puissance max (MPP) par la méthode des rectangles</i>	50
Figure 3.10	<i>Caractéristique aux bornes d'un panneau solaire- situation du MPPT</i>	51
Figure 3.11	<i>La caractéristique $I-V, P-V$ et la trajectoire de PPM</i>	51
Figure 3.12	<i>Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale</i>	53
Figure 3.13	<i>Schéma de converge vers le PPM par $P \& O$</i>	58
Figure 3.14	<i>Algorithme de MPPT à base de la méthode $P \& O$</i>	58

Figure 3.15	<i>Signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement</i>	60
Figure 3.16	<i>Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance</i>	61
Figure 3.17	<i>Méthode contre réaction de la tension</i>	62
Figure 3.18	<i>Méthode contre réaction de courants</i>	63
Chapitre 4 : Simulation du système photovoltaïque		
Figure 4.1	<i>Schéma représente le logiciel MATLAB.</i>	66
Figure 4.2	<i>Bibliothèque SIMULINK.</i>	68
Figure 4.3	<i>Simulation de système PV globale</i>	69
Figure 4.4	<i>Simulation de la GPV.</i>	70
Figure 4.5	<i>Schéma de la simulation de générateur PV</i>	70
Figure 4.6	<i>Schéma bloc du photo-courant.</i>	71
Figure 4.7	<i>Schéma bloc du courant circulant dans la résistance parallèle</i>	71
Figure 4.8	<i>Schéma bloc du courant de saturation nominal de la diode.</i>	71
Figure 4.9	<i>Schéma bloc du courant de saturation.</i>	72
Figure 4.10	<i>Schéma bloc du courant de la diode.</i>	72
Figure 4.11	<i>la caractéristique $I(V)$ de générateur PV.</i>	73
Figure 4.12	<i>Les différentes zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV</i>	73
Figure 4.13	<i>la caractéristique $P(V)$ de générateur PV.</i>	74
Figure 4.14	<i>Caractéristique $I(V)$ d'un module PV pour différentes température.</i>	75
Figure 4.15	<i>Caractéristique $P(V)$ d'un module PV pour différentes température.</i>	75
Figure 4.16	<i>Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes éclairément solaire.</i>	76
Figure 4.17	<i>Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes éclairément solaire</i>	76
Figure 4.18	<i>Caractéristique $I(V)$ des panneaux PV associer en série</i>	76
Figure 4.19	<i>Caractéristique $P(V)$ des panneaux PV associer en série</i>	76
Figure 4.20	<i>Caractéristique $I(V)$ des panneaux PV en parallèle.</i>	77
Figure 4.21	<i>Caractéristique $P(V)$ des panneaux PV associer en série.</i>	77
Figure 4.22	<i>La caractéristique $I(V)$ des panneaux PV mixte.</i>	78
Figure 4.23	<i>La caractéristique $P(V)$ des panneaux PV mixte.</i>	78
Figure 4.24	<i>Caractéristique $I(V)$ des différentes valeurs de la résistance R_s</i>	79
Figure 4.25	<i>Caractéristique $P(V)$ des différentes valeurs de la résistance R_s</i>	79
Figure 4.26	<i>Simulation global d'un hacheur survolteur.</i>	80
Figure 4.27	<i>Modèle du hacheur survolteur.</i>	80
Figure 4.28	<i>la tension à l'entrée et à la sortie du hacheur $(V_e, V_{ch,d}) = f(t)$.</i>	81
Figure 4.29	<i>la tension moyenne à l'entrée et la sortie du hacheur $(V_{em}, V_{chm,d}) = f(t)$.</i>	81
Figure 4.30	<i>le courant à l'entrée et à la sortie du hacheur $(I_e, I_{ch}, I_m, d) = f(t)$.</i>	82
Figure 5.31	<i>Modèle de simulation pour l'algorithme P & O.</i>	82
Figure 4.32	<i>la caractéristique $I(V)$.</i>	83
Figure 4.33	<i>la caractéristique $P(V)$.</i>	83

liste des tableaux

Tableau 1.1	<i>la durée d'ensoleillement et l'énergie moyenne reçue en Algérie</i>	.....	11
Tableau 1.2	<i>Les différentes zones énergétiques en Algérie</i>	.....	13
Tableau 1.3	<i>Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïque</i>	.....	22
Tableau 4.1	<i>caractéristique du module photovoltaïque utilisé.</i>	.....	67
Tableau 4.2	<i>effet de l'éclairement et de la température sur les grandeurs maximales du GPV</i>	.....	77
Tableau 4.3	<i>les paramètres de la simulation de l'hacheur</i>	.....	78

liste des symboles

- E: L'éclairement absorbé par la cellule.
 $E_{\text{réf}}$: L'éclairement de référence (1000 w/m^2).
 E_m : L'éclairement maximal
 E_g : Energie de gap (ev).
 G_n : Eclairement de référence (1000 W/m^2).
 G : Eclairement (W/m^2).
 n : Facteur d'idéalité de la photopile.
 u : Le rapport cyclique.
 S : Surface du module photovoltaïque (m^2).
FF: Facteur de forme.
 R_p : Résistances parallèle shunt (Ω).
 R_s : Résistance série (Ω).
 T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}\text{K}$].
 T_n : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}\text{K}$].
 I : Courant générer par la cellule photovoltaïque.
 I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).
 I_d : Le courant circulant dans la diode.
 I_p : Le courant circulant dans la résistance parallèle (R_p)
 I_{sat} : Courant de saturation (A).
 I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).
 I_{opt} : Courant optimum (A).
 I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
 P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).
 V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
 V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).
 V_{opt} : Tension optimale (V).
 V : La tension de sortie.
 N_{ss} : Nombre de cellule en série.
 N_{ps} : Nombre de panneau en série.
 N_{pp} : Nombre de panneau en parallèle.
 η : le rendement.
 c : vitesse de la lumière dans le vide ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 ν : fréquence (s^{-1}).
 λ : longueur d'onde (m).
 h : Constante de Planck ($6.62\cdot 10^{-34} \text{ j}\cdot\text{s}$).
 K : Constant de Boltzmann ($1,38\cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).
 q : Charge de l'électron ($1,6\cdot 10^{-19} \text{ C}$).

Abréviations utilisées

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

Introduction générale :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre.

De nos jours la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes Photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variation de l'éclairement, de la température ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, en plus ce dernier ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie : c'est le principe nommé Maximum Power Point Tracker (MPPT) et qui fait, en plus de l'étude du GPV, l'objet principal de ce mémoire dont l'intitulé est **" Modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT"**

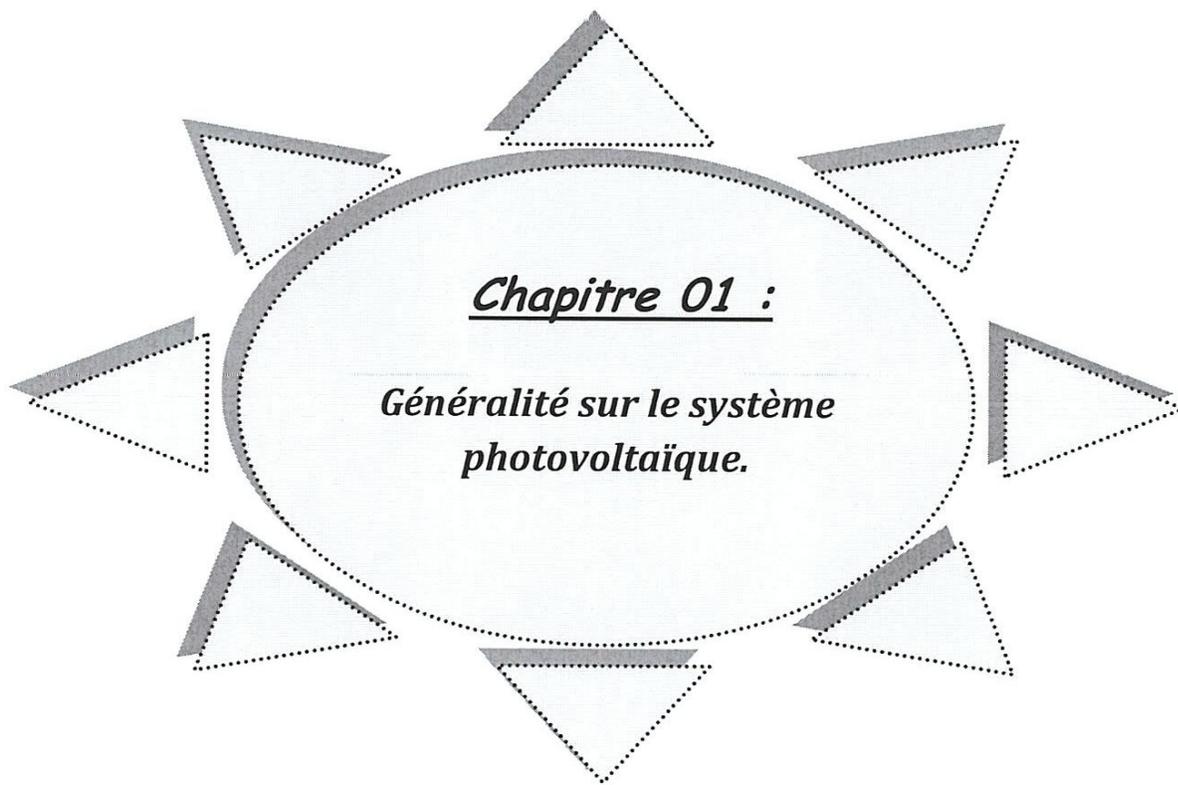
Ce mémoire est présente en quatre chapitres :

· Le premier chapitre, donne des notions générales sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, et sur les systèmes PV et leurs configurations.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation d'un générateur photovoltaïque.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation des convertisseurs DC-DC et la commande MPPT et ces différents algorithmes de commande.

Le quatrième chapitre, est consacré à la simulation du Générateur photovoltaïque, avec son étage d'adaptation et son MPPT. Pour cela Matlab et le module simulink avec sa boîte outil intégrée SimPowerSystems sont utilisées.



1.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [4].

Dans ce chapitre on a présenté les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules et modules photovoltaïques et systèmes ph.

1.2. L'énergie solaire :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [3].

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère [18].

Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation suivant:

$$E = h * \nu = \frac{h * c}{\lambda} \quad [1.1]$$

Avec :

h: constante de Planck (j.s^{-1})

c : vitesse de la lumière dans le vide (m.s^{-1})

ν : fréquence (s^{-1})

λ : longueur d'onde (m)

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [7].

1.2.1.Le rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.106Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.106GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autre sources d'énergie [7].

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm .

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9% dans la bande des ultraviolets (< à 0.4 μm).
- 47% dans la bande visibles (0.4 à 0.8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges (> à 0.8 μm).

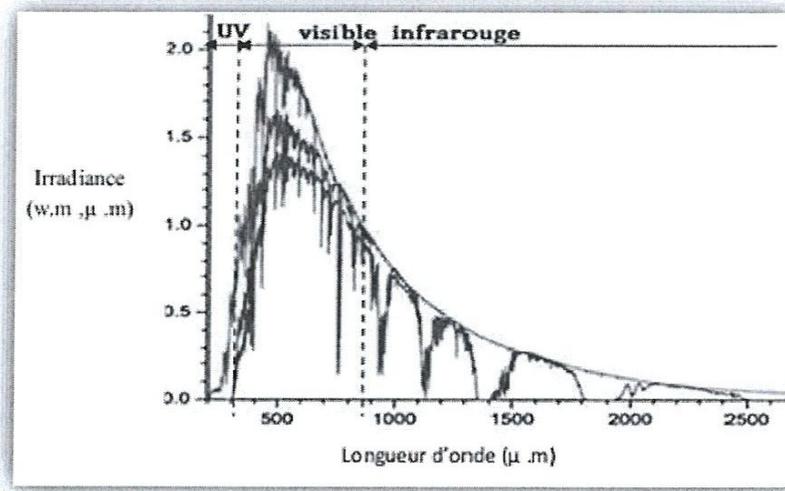


Figure 1.1: Spectre d'irradiance solaire.

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.).

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales:

❖ **Rayonnement direct :**

Se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

❖ **Rayonnement diffus:**

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

❖ Rayonnement albedo :

Est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. [9].

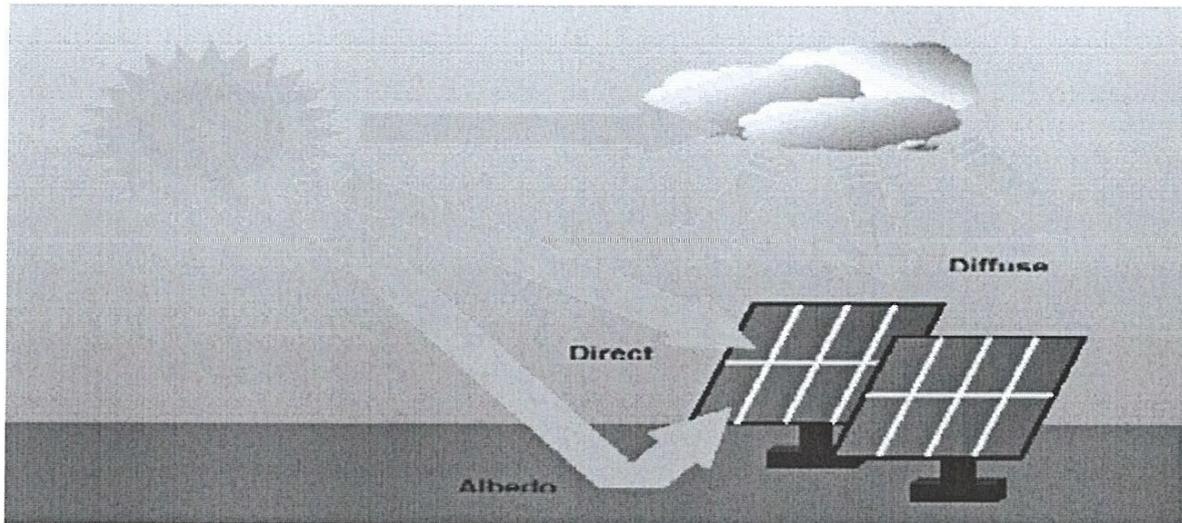


Figure 1.2 : Composantes du rayonnement solaire.

1.2.2. Inclinaison de la terre :

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial est donné par :

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \times (N - 82) + 2 \sin \left(\left(\frac{360}{365} \right) \times (N - 2) \right) \right] \right] \quad [1.2]$$

Où : N est le nombre de jours de l'année à partir du premier janvier.

1.2.3. Inclinaison du module par rapport au soleil :

Les panneaux solaires doivent être placés perpendiculairement au soleil pour obtenir un résultat optimal. Pour récupérer un maximum de rayonnement solaire, on doit ajuster à la fois l'orientation et l'inclinaison du panneau solaire.

L'orientation indique vers quel point cardinal un panneau est exposé : face au sud, au nord, à l'est, ou à l'ouest; alors que l'inclinaison est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

L'ajustement sur le plan horizontal (azimut) s'obtient en pointant les panneaux solaires : vers le sud lorsqu'on est dans l'hémisphère nord, vers le nord lorsqu'on est dans l'hémisphère sud.

L'ajustement sur le plan vertical nécessite de connaître la trajectoire du soleil, en fonction de la saison et du lieu géographique.

Aux équinoxes du 21 mars et du 21 septembre, le soleil est perpendiculaire à l'Equateur. Au solstice du 21 juin, il est perpendiculaire au tropique du Cancer (hémisphère nord). Au solstice du 21 décembre, il est perpendiculaire au tropique du Capricorne (hémisphère sud).

Le soleil se lève à l'Est et se couche à l'ouest et le Québec se situe dans l'hémisphère nord à une latitude de 46° environ. Le soleil au zénith est donc vers le sud. Globalement, les rayons du soleil viennent donc plus du sud que des autres directions, d'autant plus qu'à midi, lorsque le soleil est au Zénith et donc plein sud, le rayonnement est le plus intense.

1.2.4. Déclinaison du soleil :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, sa valeur en degré est donnée par la relation de Cooper suivante :

$$\delta = 23.45 * \sin\left[2\pi * \left(\frac{284+j}{365}\right)\right] \quad [1.3]$$

Où j : est le numéro d'ordre du jour de l'année ($n=1$ pour le 1er Janvier, $n=32$ pour le 1er Février, ... etc) [11]

La déclinaison varie entre $-23,45^\circ$ le 21 décembre et $+23,45^\circ$ le 21 juin.

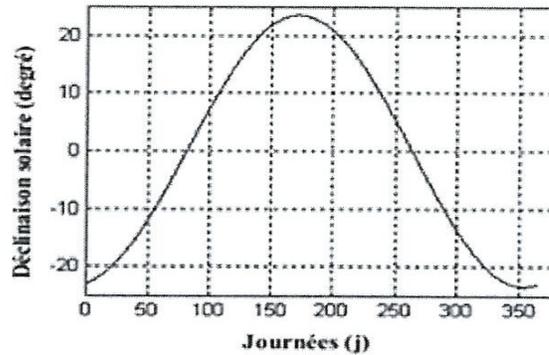


Figure 1.4 : Courbe de déclinaison du soleil.

1.2.5. Modèle simplifié de l'éclairement:

La quantification de l'éclairement incident pour une journée est donnée par une expression mathématique qui s'écrit comme suit :

$$E = E_m \sin\left[\frac{\pi(t-t_0)}{12}\right] \quad [1.4]$$

Avec :

E_m : L'éclairement maximal du site (W/m^2).

t : Temps solaire en heure.

t_0 : Temps de la levée du soleil (6h).

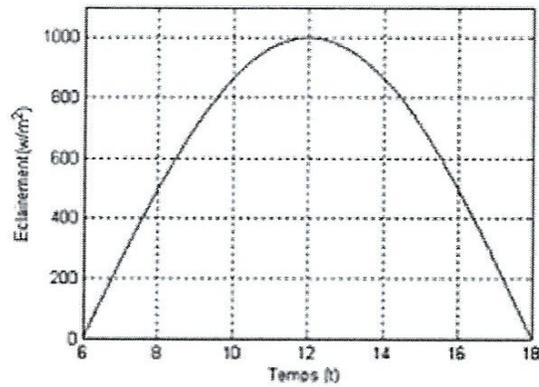


Figure 1.5 : Evaluation de rayonnement solaire

1.2.6. L'utilisation de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

❖ L'énergie solaire thermodynamique :

Est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. la chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité [10].

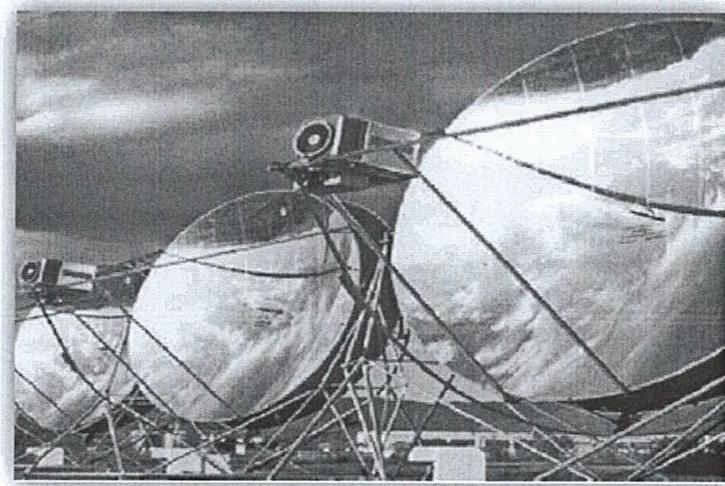


Figure 1.6 : un module thermodynamique.

❖ L'énergie solaire thermique :

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, cette conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Si on veut générer l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique en électricité (par exemple, moteurs à air chaud) [10].

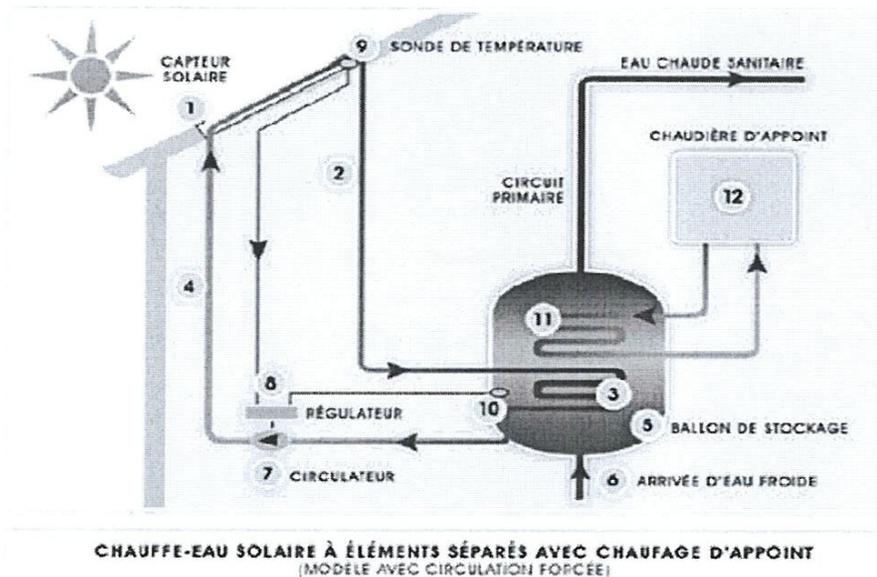


Figure 1.7 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

❖ L'énergie solaire photovoltaïque :

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) et donna également son nom à l'unité de mesure de la tension « le volt », alors le photovoltaïque signifie littérairement « la lumière électricité » .

Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

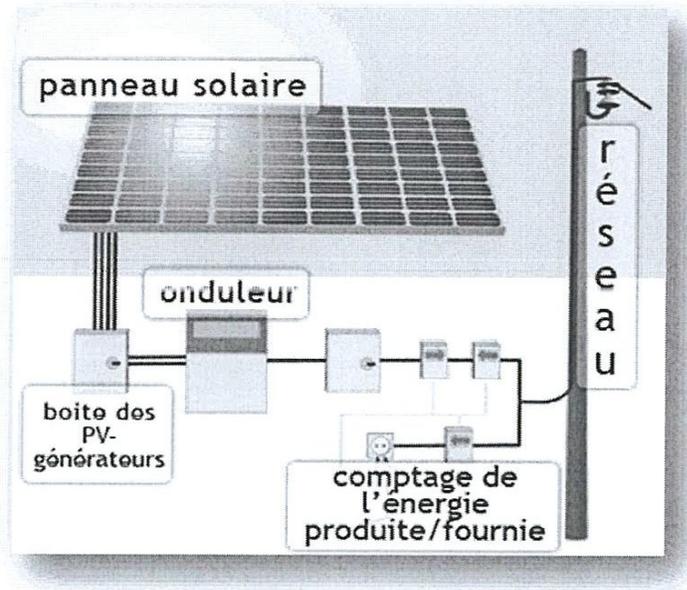


Figure 1.8 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque.

1.2.7. Energie solaire en Algérie :

1.2.7.1. Le potentiel solaire

Par la situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au nord et $2263\text{kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable. Il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [12]

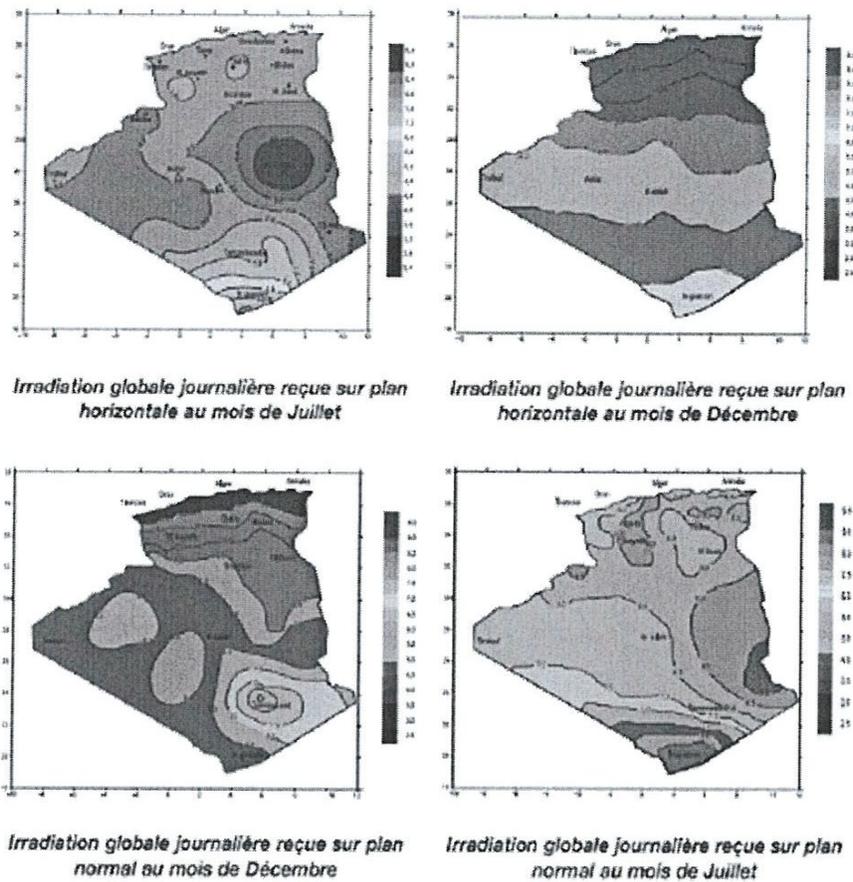


Figure 1.9 : Potentiel solaire en Algérie.

Remarque : Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an.

Régions	Régions cotières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 1.1 : la durée d'ensoleillement et l'énergie moyenne reçue en Algérie.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement [12].

1.2.7.2. Les différentes zones énergétiques de l'Algérie :

On peut dire qu'il y peu de pays qui reçoivent autant de flux d'énergie solaire que l'Algérie car elle est située entre les latitudes 20 et 37 degré nord partant du principe que l'altitude et le climat sont liés à l'ensoleillement, c'est par la connaissance des altitudes et du climat des localités de territoire algérien, L'Algérie possédant un gisement solaire important, de par son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m².

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6Kw/m² et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 KWH/m², la carte suivante représente les zones énergétiques en Algérie [9].

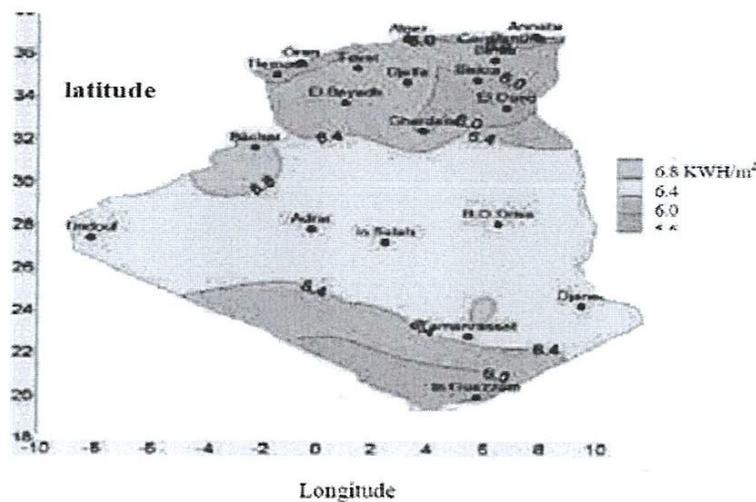


Figure 1.10 : les différentes zones énergétiques de l'Algérie

L'Algérie comporte 37 stations partagées en huit (8) zones, le tableau suivant représente les différentes zones énergétiques :

Zones énergétiques	Type des stations	Numéro de station énergétique
Z01	ANNABA 02	02
Z 02	ALGER 04	01,04 ,06, 08 09,12
Z03	BATNA 10	07, 10, 11, 15,17
Z04	OUARGLA 22	14, 16, 18, 19, 20, 21, 22,23
Z 05	INSALH 32	24, 26, 28, 29, 31, 32, 33, 34,35
Z06	ADRAR 30	25, 27,30
Z07	TAMENRASSET 37	37
Z 08	DJENET 36	36

Tableau 1.2 : Les différentes zones énergétiques en Algérie.

1.3. Configuration d'un système PV :

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- un système de régulation et de stockage.
- une source auxiliaire d'appoints [11].

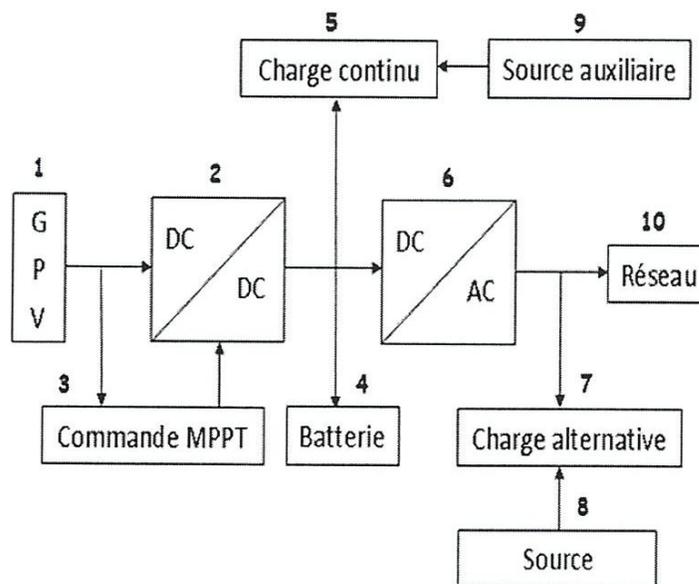


Figure 1.11 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque.

1.3.1. Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque ou bien le panneau solaire (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

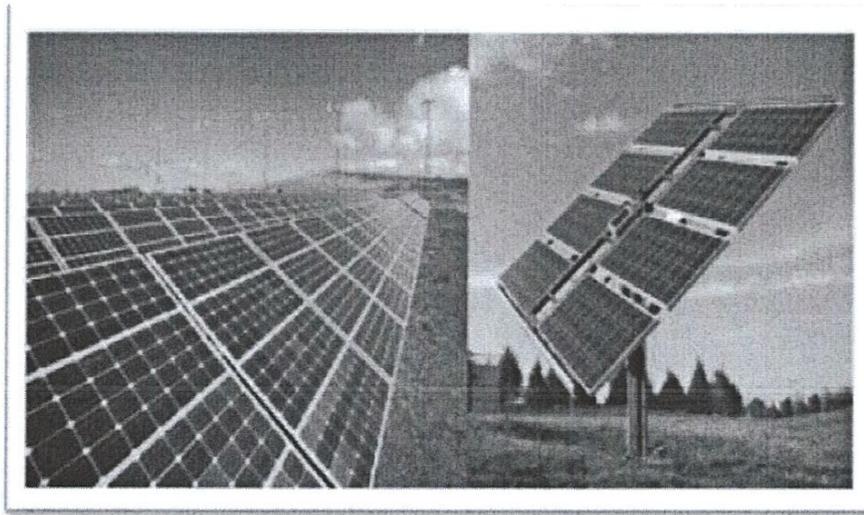


Figure 1.12 : Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui les regroupe, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [4].

1.3.1.1. Module photovoltaïque :

Les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une

puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série.

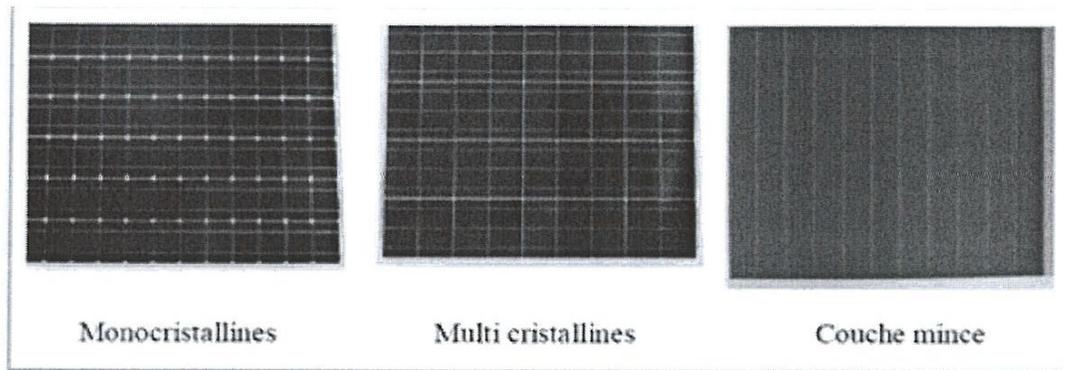


Figure 1.13 : Module photovoltaïque.

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 [4].

Les modules photovoltaïques sont montés selon configurations :

a) Montage en série :

Les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique, lorsque les panneaux sont montés en série l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si l'ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible. L'intensité restant faible, les sections de câbles sont moins importantes [8]

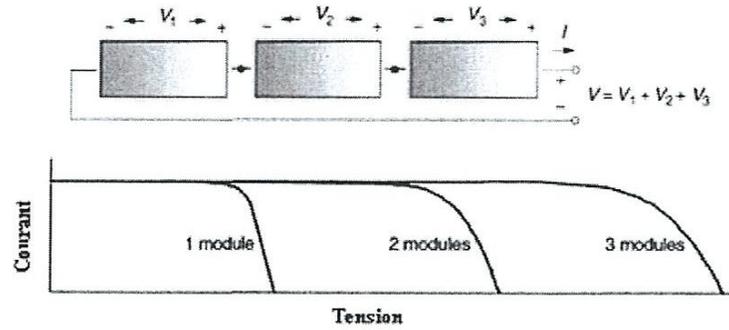


Figure 1.14 : Branchement des modules en série.

b) Montage en parallèle :

Les courants des différents modules s'additionnent et la tension reste identique.

Un tel montage peut demander une section de câble plus importante due à la forte intensité [8].

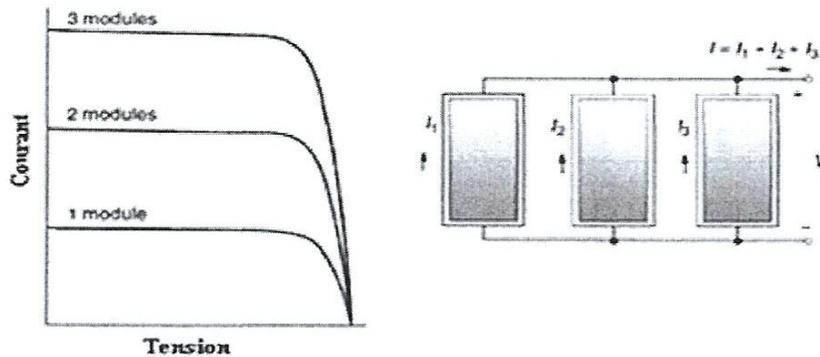


Figure 1.15 : Branchement des modules en parallèles.

- On monte les modules en série pour les installations sans ombre : c'est la solution la plus simple, mais il convient de calculer la tension maximale par rapport à celle demandée.
- On monte les modules en parallèle pour les installations qui ont une partie à l'ombre, ou lorsque les modules de tension important dépassent la tension demandée.

1.3.1.2. La Cellule photovoltaïque et ses performances :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs qui transforment directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

1.3.1.2.1. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés":

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est « l'effet PV » [3].

Donc une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [4].

1.3.1.2.2. Constitutions des cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est constituée généralement :

- 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 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 multi couches réfléchissantes justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

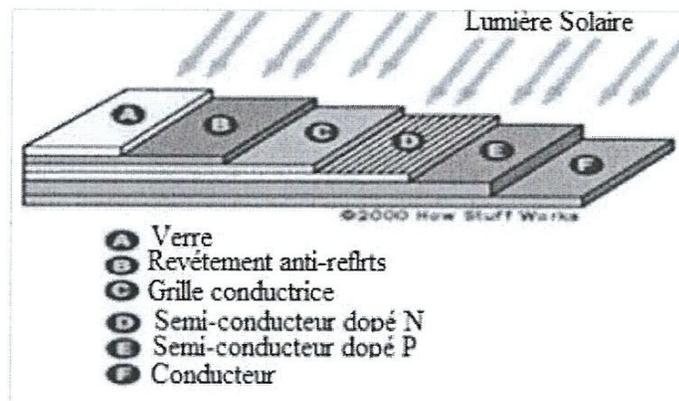


Figure 1.16 : Structure basique d'une cellule solaire.

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron- trou».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

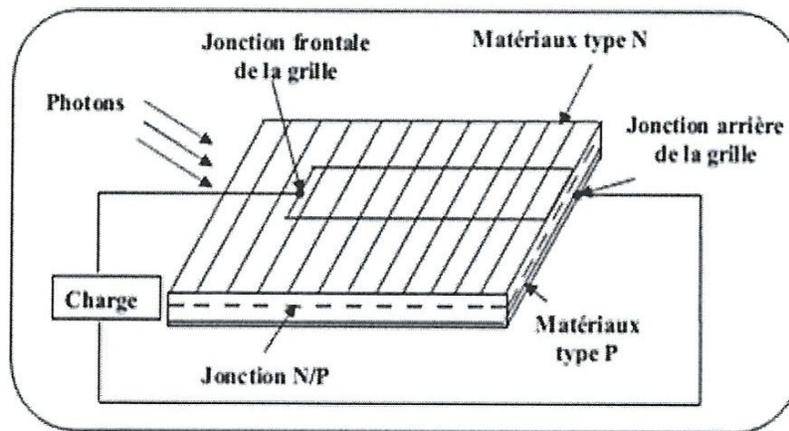


Figure 1.17 : Principe de conversion de l'énergie électrique par cellule PV.

1.3.1.2.3. Dopage des cellules:

❖ Le dopage de type N (négatif) :

Consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres [11].

❖ Le dopage de type P (positif) :

Utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque.

Remarque : Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6 V).

1.3.1.2.4. Les différents types des cellules PV :

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe).

Les cellules solaires de type (GaAs) sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable [5].

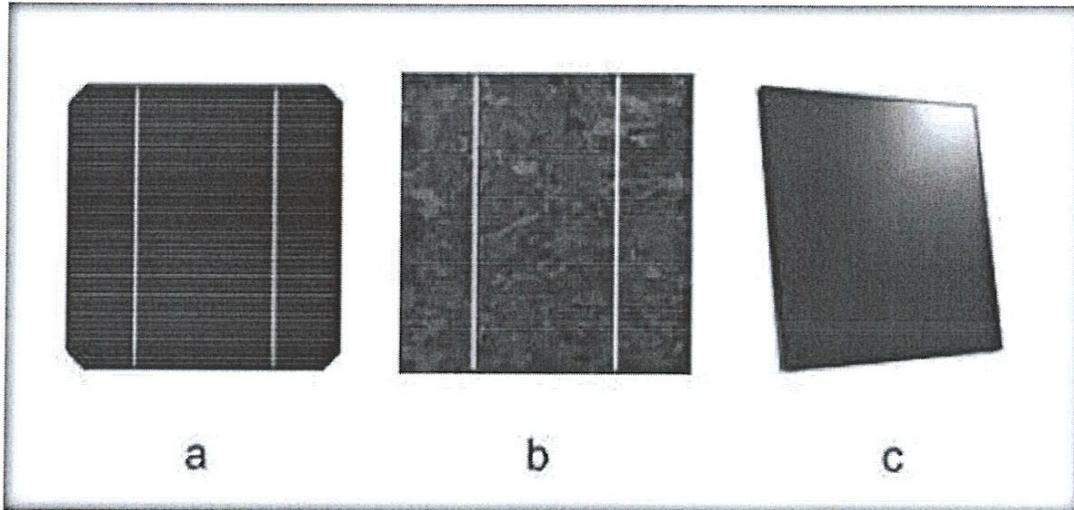


Figure 1.18 : les types des cellules PV.

(a) Silicium monocristallin, (b) silicium poly Cristallin, (c) silicium amorphe

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

- a. Les cellules monocristallines :** Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.
- b. Les cellules polycristallines :** Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8% en laboratoire).
- c. Les cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire), mais nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment)

Le rendement de chaque type de cellules est précisé dans le tableau suivant :

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	théorique	en labo.	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellure de Gadmuim CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Tableau 1.3 : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïque.

1.3.1.2.5. Association des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, il faut assembler les cellules pour former un module (ou panneau), tel que :

- Pour augmenter la tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre
- Pour augmenter le courant généré, il faut assembler N_p de modules en parallèle, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant [19].

❖ **Influence de l'association série des cellules PV :**

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [3].

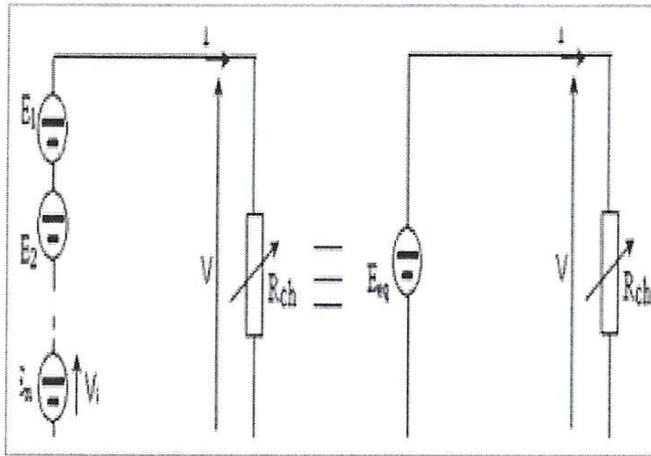


Figure 1.19 : Association de N_s cellules solaires en série.

❖ **Influence de l'association parallèle des cellules PV :**

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [3].

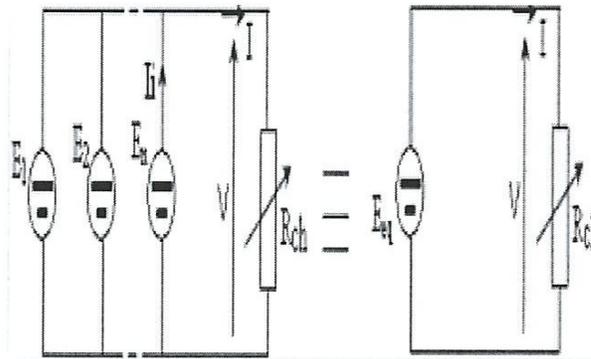


Figure 1.20 : Association de N_p cellules solaires en parallèle.

❖ Influence de l'association mixte des cellules PV:

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [3].

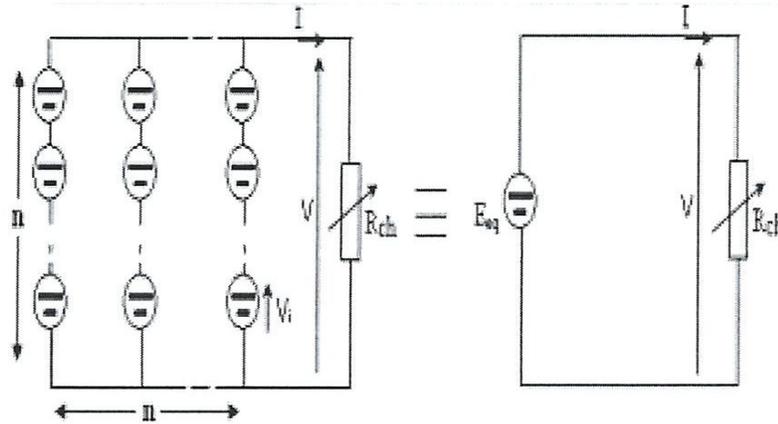


Figure 1.21 : Association mixte $N_s \times N_p$ cellules solaires.

1.3.1.3. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [6].

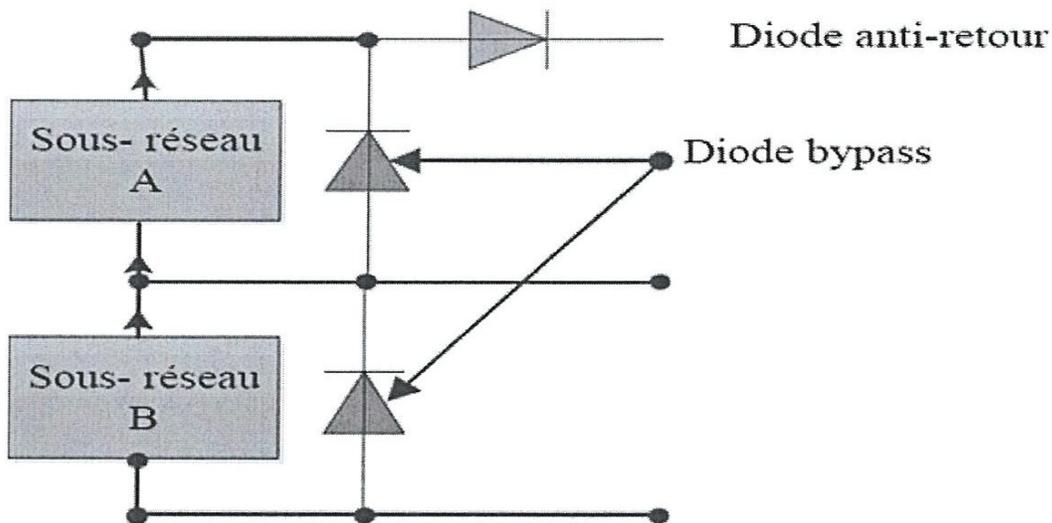


Figure 1.22 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

1.3.2. Les batteries :

Doivent être dimensionnées pour permettre une autonomie énergétique du site durant un certain nombre de jours sans soleil, généralement une semaine dans le sud et 10 à 15 jours dans le nord, pour une maison individuelle. Pour connaître le risque de non ensoleillement on utilise une carte de nombre de jours consécutifs ou la durée d'insolation est inférieure à 1 heure, fournie par la météo [2].

Leurs choix dépendent de différents paramètres :

- L'autonomie souhaitée (capacité de la batterie).
- La technologie de la batterie (batterie ouverte, fermée, gel,.....).
- Le nombre de cycles.
- La durée de vie.
- Le coût d'investissement et/ou de remplacement.



Figure 1.23 : batterie de système PV.

1.3.3. Les récepteurs (charge):

L'énergie produite alimente un ou plusieurs appareils de consommation (éclairage, réfrigération, pompage ...).

1.4. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

❖ Avantages:

- Acceptation du public.
- Adapté aux pays chauds et aux sites isolés.
- ils ont une longue durée de vie.
- La source d'énergie solaire (soleil) est une source naturelle
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques (la neige et la glace).
- il est non polluants, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas des pièces mobiles.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système [2].

❖ Inconvénients:

- Coût encore élevé
- Puissance assez faible.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (10-15 %) [20].

1.5. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque (un rappel sur les systèmes PV et leurs performances). On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres, le module PV, le générateur, les batteries.



2.1. Introduction :

Pour trouver le modèle d'un générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations [15].

Dans ce chapitre, on présentera deux modèles du GPV, le modèle à une diode et celui à deux diodes.

2.2. Modèle d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement PV connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant I figure 2.3.

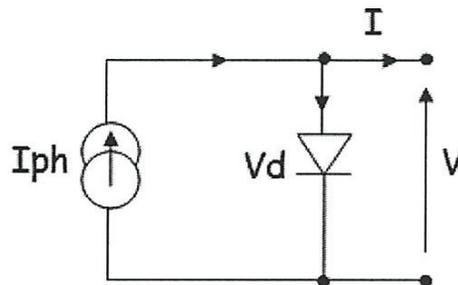


Figure 2.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale

Les équations retenues pour ce modèle sont :

$$I = I_{ph} - I_d \quad [2.1]$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V = 0$, courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$I = I_{sc} = \frac{E}{E_{réf}} \quad [2.2]$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule.

$E_{réf}$: L'éclairement de référence (1000 w/m^2).

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation:

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right] \quad [2.3]$$

I_s : Courant de saturation inverse de la diode.

V_t : la tension thermique de la jonction qui donnée par:

$$V_t = \frac{nKT}{q} \quad [2.4]$$

n : Facteur d'idéalité de la photopile.

K : Constant de Boltzmann ($1,38.10^{-23}$ J/K).

T : La température de cellule en kelvin.

q : Charge de l'électron ($1,6.10^{-19}$ C).

Remarque :

Le facteur de qualité de la diode n est inconnu et doit être estimé, généralement il prend une valeur entre 1 et 2, la valeur de $n=1$ (pour la diode idéale) est cependant employée jusqu'à ce que la valeur plus précise soit estimée plus tard par l'ajustement de courbe.

2.3. Modèle d'une cellule réelle :

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p .

2.3.1 Modèle à une diode :

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

Le schéma équivalent est constitué d'une diode caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s).

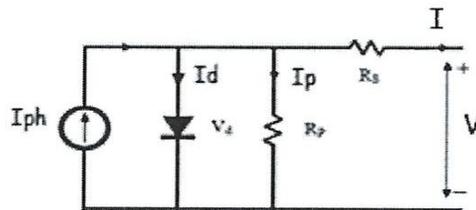


Figure 2.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad [2.5]$$

I : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_p : Le courant circulant dans la résistance parallèle R_p .

Le courant circulant dans la résistance parallèle est donné par l'expression:

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad [2.6]$$

Le courant circulant dans la diode:

$$I_d = N_{pp} I_s \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{\frac{N_{ps}}{V_t} \frac{N_{ss}}{N_{ss}}} \right)} - 1 \right] \quad [2.7]$$

Le photo-courant I_{ph} varie avec l'éclairement et la température, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence:

$$I_{ph} = [I_{scn} + Ki \cdot \Delta T] \frac{G}{G_n} \quad [2.8]$$

Avec :

$$\Delta T = T - T_n \quad [2.9]$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression:

$$I_s = I_{sn} \left(\frac{T}{T_n} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left[\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_n} \right) * \left(- \frac{qE_g}{nK} \right) \right] \quad [2.10]$$

T : Température de la jonction des cellules PV [°K].

T_n : Température de référence des cellules PV [°K].

E_g : Énergie de gap de la cellule (Silicium cristallin $E_g=1,12$ eV, Silicium amorphe $E_g=1,12$ eV, CIS=1,03 eV, CdTe=1,5 eV) .

Il peut être aussi déterminé par l'expression:

$$I_s = \frac{I_{sn} + Ki \Delta T}{e^{\left[\frac{V_{oc} + Kv \Delta T}{aV_t} \right]} - 1} \quad [2.11]$$

ki : le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

kv : le coefficient de variation du tension en fonction de la température [15].

Le courant de saturation à la température de référence est donné par:

$$I_{sn} = \frac{I_{scn}}{e \left[\frac{V_{ocn}}{V_{tn}} \right]^{-1} \frac{N_{ss}}{N_{ss}}} \quad [2.12]$$

Telle que :

N_{ss} : Nombre de cellules connectées en série.

N_{pp} : Nombre de modules connectés en parallèle.

N_{ps} : Nombre de modules connectés en série.

Les conditions de référence sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (V_{co} , I_{co} , V_{max} , I_{max}), se sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test conditions, 1000 W/m², 25°C, spectre AM1,5), soit des valeurs issues d'une mesure du module.

2.3.2 Modèle à deux diodes :

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma équivalent ci-dessous figure. On considère le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèles. La source de courant I_{ph} modélise la courante photo générée. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}), et le courant de génération-recombinaison (I_{d2}) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE) [13].

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

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

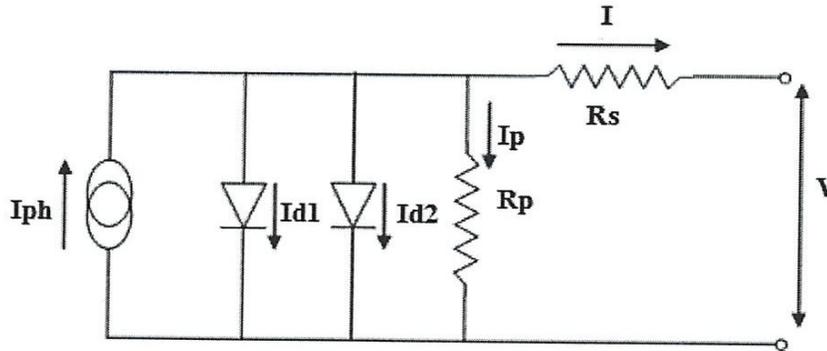


Figure 2.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV à deux diodes.

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_p \quad [2.13]$$

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation suivant :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_p} + I_{s1} \left[e^{\frac{q(V - R_s I)}{AKT}} - 1 \right] + I_{s2} \left[e^{\frac{q(V - R_s I)}{2AKT}} - 1 \right] \quad [2.14]$$

2.4 Paramètre photovoltaïque :

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV :

2.4.1. Courant de court-circuit I_{CC} :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V donc on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\left(\exp \frac{q(I_{cc} \cdot R_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_p} \quad [2.15]$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(I.R_s)}{nKT} - 1\right) \right]$ devant I_{ph}

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)} \quad [2.16]$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

2.4.2. Tension en circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul. (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [17].

$$\left[I_{cc} - I_{sat} \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_p} = 0 \quad [2.17]$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_t \cdot \ln \left[\frac{I}{I_{sat}} + 1 \right] \quad [2.18]$$

2.4.3. Point de puissance maximale P_m :

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m .

2.4.4. Facteur de forme FF :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad [2.19]$$

2.4.5. Rendement énergétique η :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{\Phi \cdot S} \quad [2.21]$$

S : Surface de la cellule solaire.

Φ : Flux incident.

2.5. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation de différentes caractéristiques du générateur photovoltaïque. Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système. Il fera l'objet de l'étude menée au 3^{ème} chapitre.



3.1. Introduction :

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Le point de fonctionnement dans ce cas se situe à l'intersection de la droite de charge et de la caractéristique I-V du générateur. Ce point ne peut pas coïncider avec le point de puissance maximale, il s'ensuit une perte de puissance maximale du système.

Ce problème peut être résolu soit par le changement de configuration du générateur photovoltaïque, soit par l'adjonction d'un dispositif de recherche de point de puissance maximale placé entre le générateur et la charge pour assurer l'adaptation d'impédance.

L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. Il existe plusieurs techniques pour satisfaire ce but.

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation des convertisseurs DC-DC, et la commande MPPT, on citer et expliquer différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale (directes et indirectes) pour optimiser la puissance en travail par la méthode d'observation et optimisation et on terminera par une conclusion.

3.2. Modélisation des hacheurs :

3.2.1. Hacheur buck (dévolteur) :

C'est un convertisseur direct DC-DC, appeler « buck » peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

L'interrupteur K figure 3.1 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) [4].

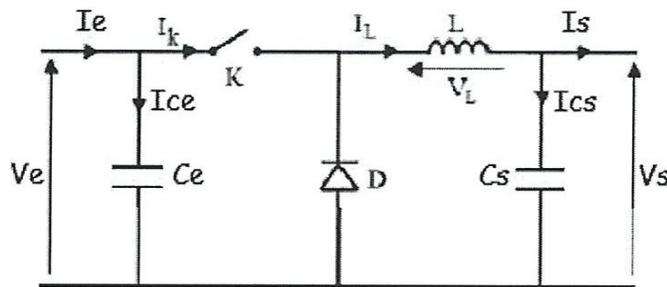


Figure 3.1 : Schéma électrique d'un hacheur buck.

a)-Fonctionnement

On note α le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur et T_e la période des impulsions et on commande l'interrupteur à la fréquence de découpage $f = \frac{1}{T_e}$.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension d'entrée est appliquée aux bornes de la diode. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t_e[\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [3].

Pour une tension moyenne aux bornes de l'inductance nulle, la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, sera:

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad [3.1]$$

b) Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie.

La figure 3.2 montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure 3.3 représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha)T_e$.

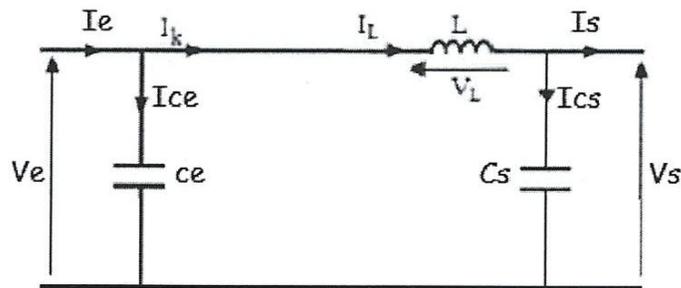


Figure 3.2 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$i_{ce}(t) = C_e \frac{dv_e(t)}{dt} = i_e(t) - i_L(t) \quad [3.2]$$

$$i_{cs}(t) = C_s \frac{dv_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \quad [3.3]$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_e(t) - v_s(t) \quad [3.4]$$

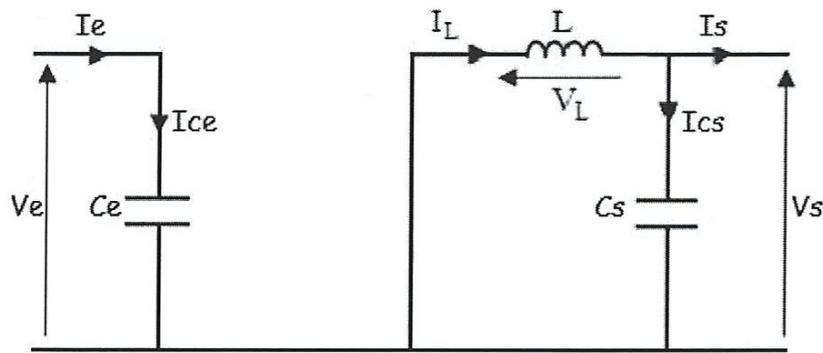


Figure 3.3 : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$i_{ce}(t) = C_e \frac{dv_e(t)}{dt} = i_e(t) \quad [3.5]$$

$$i_{cs}(t) = C_s \frac{dv_s}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \quad [3.6]$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_s(t) \quad [3.7]$$

3.2.2. Hacheur boost (survolteur):

C'est un convertisseur direct DC-DC. Il est caractérisé par son rapport cyclique α ($0 < \alpha < 1$), la source d'entrée parallèle insérée entre le générateur photovoltaïque GPV et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

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 [3].

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure 3.4.

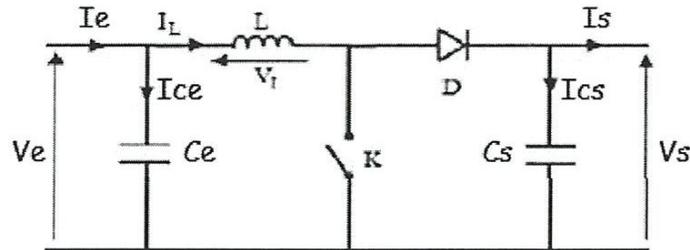


Figure 3.4 : Schéma électrique d'un hacheur survolteur.

a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D [22].

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure 3.5 présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre $[0, \alpha T_e]$.

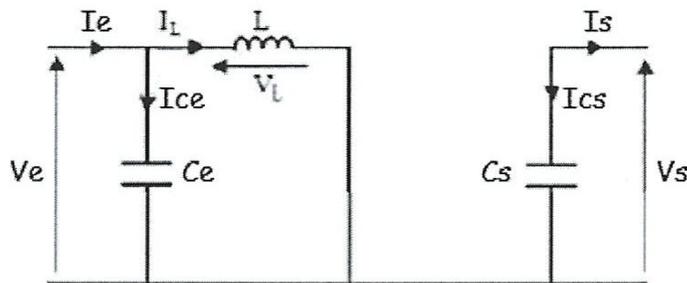


Figure 3.5 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calculs suivants :

Pour l'état fermé de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

$$i_{C_e}(t) = C_e \frac{dv_e(t)}{dt} = i_e(t) - i_L(t) \quad [3.8]$$

$$i_{C_s}(t) = C_s \frac{dv_s(t)}{dt} = -i_s(t) \quad [3.9]$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_e(t) \quad [3.10]$$

Pour l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

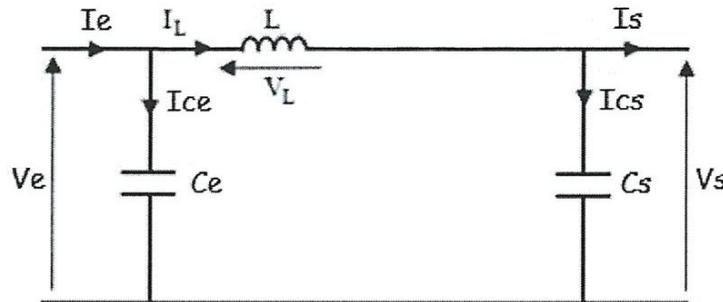


Figure 3.6 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$i_{C_e}(t) = C_e \frac{dv_e(t)}{dt} = i_e(t) - i_L(t) \quad [3.11]$$

$$i_{C_s}(t) = C_s \frac{dv_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \quad [3.12]$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_e(t) - v_s(t) \quad [3.13]$$

En régime établi, et pour une tension moyenne aux bornes de l'inductance nulle, on a:

$$V_s(1 - \alpha) = V_e \quad [3.14]$$

Cette équation montre que la tension V_o est en fonction du rapport cyclique α et supérieur à celle d'entrée V_i .

$$I_s = (1 - \alpha) \cdot I_e \quad [3.15]$$

Cette dernière équation montre que le courant de sortie I_o est en fonction du rapport cyclique et il inférieur à celui d'entrée.

L'adaptation optimale est alors réalisée lorsque I et V valent respectivement I_{opt} et V_{pot} . Ceci correspond alors à une résistance optimale R_{opt} du générateur répondant à l'équation suivante :

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = (1 - \alpha)^2 \frac{V_s}{I_s} = (1 - \alpha)^2 R_{ch} \quad [3.16]$$

3.2.3. Détermination des composants du convertisseur de puissance :

Déterminer les caractéristiques du convertisseur de puissance est une étape critique dans la construction du MPPT. Certes, tout composant inadapté peut logiquement empêcher un fonctionnement optimal de cette carte de puissance [14].

Le convertisseur doit remplir les conditions suivantes:

- Il doit fournir une tension réglable à la valeur souhaitée à partir du GPV, avec une ondulation résiduelle en tension de sortie et en entrée ne dépassant pas une certaine valeur (par exemple 10 mV en sortie et 100 mV en entrée).

- Il fonctionne en conduction continue pour un courant de charge I_{ch} qui varie de 0.23A à 3.8A (soit de 6% à 100% de sa valeur maximale). En dessous de 0.23A, l'utilisation du convertisseur n'est pas intéressante puisque son rendement est trop faible. Donc, la valeur maximale de la résistance de charge R_{ch} admissible

$$\text{est : } R_{max} = \frac{V}{I_{min}}$$

- La charge R_{ch} doit être supérieur à la résistance interne optimale R_{opt} , puisque à un éclairement donné pour que le convertisseur effectue correctement son rôle.

Dans tous les calculs qui vont suivre, le cas extrême sera envisagé. Nous supposons que la conduction est continue (le courant dans l'inductance ne s'annule jamais) et que le convertisseur est toujours efficace à 100% :

$$P_{entrée} = P_{sortie} \quad [3.17]$$

Donc :

$$V_e I_e = V_s I_s \quad [3.18]$$

3.3. La modélisation de MPPT :

La Figure 3.11 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.

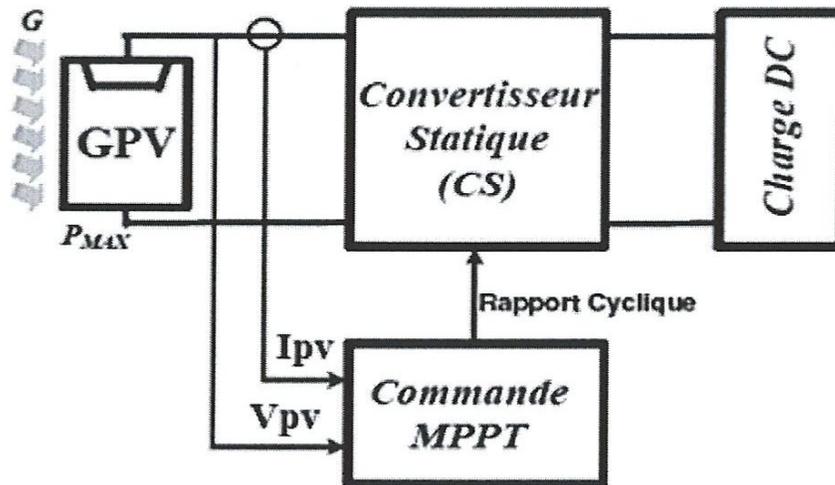


Figure 3.7 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé pour assurer le fonctionnement d'un GPV à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont utilisés, ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques baser sur des méthode optimale.

3.3.1. Point de puissance maximale (MPP) :

On peut visualiser le point de puissance maximale par 2 méthodes différentes.

Méthode 1 :

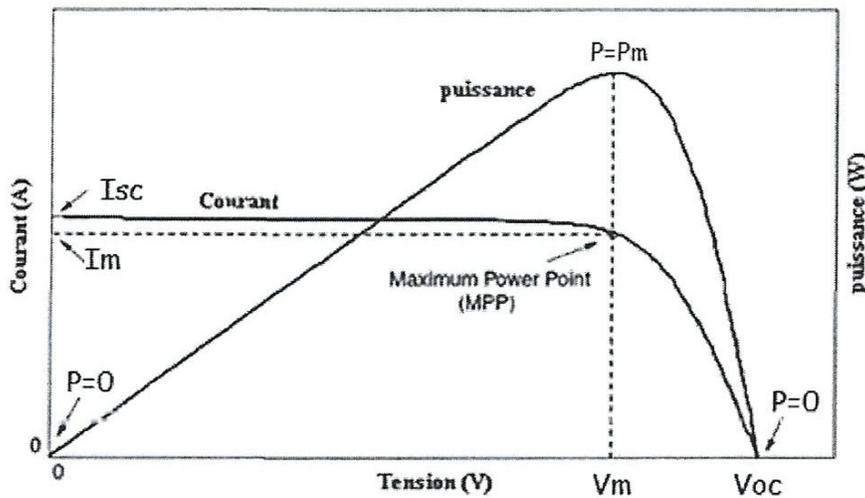


Figure 3.8 : Courbe de I, V et de puissance de sortie par un module photovoltaïque.

La figure 3.8 montre plusieurs paramètres notamment la tension en circuit ouvert V_{oc} et le courant en court circuit I_{sc} . La courbe 'puissance' représente le produit de la tension et du courant. Aux deux extrémités de la courbe $I-V$, la puissance de sortie est zéro puisque soit le courant ou la tension est nulle à ces points.

Le point de puissance maximum est le point sur la courbe où le produit du courant et de la tension atteint son maximum. La tension et le courant à la MPP sont souvent désignés comme V_m et I_m dans le cas général. Ces valeurs sont désignées aussi comme V_R et I_R (pour la tension nominal et courant nominal) dans des circonstances particulières qui correspondent aux conditions d'essai idéal [8].

Méthode 2 :

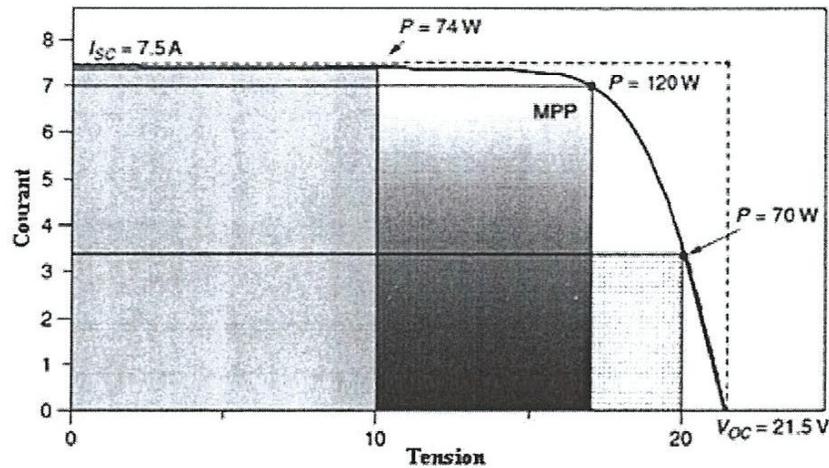


Figure 3.9 : le point de puissance max (MPP) par la méthode des rectangles.

La deuxième méthode pour visualiser la location du point de puissance maximale (MPP) et de trouver le plus grand rectangle qui peut passer sous la courbe I-V, comme le montre la Figure 3.8.

Les côtés du rectangle correspondent au courant et à la tension dont le produit représente la puissance $P=V.I$, d'après la figure on peut définir une caractéristique du module qui est le facteur forme:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad [3.19]$$

Où $V_m \cdot I_m$: Puissance au point puissance maximum.

Remarque :

Le facteur de forme est aux alentours de 70-75% pour les modules solaires en silicium cristallin tandis qu'il est proche de 50-60% pour les modules en silicium multi-jonction [8].

3.3.2. Suivi de la puissance maximale du générateur PV :

Un MPPT, en anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire.

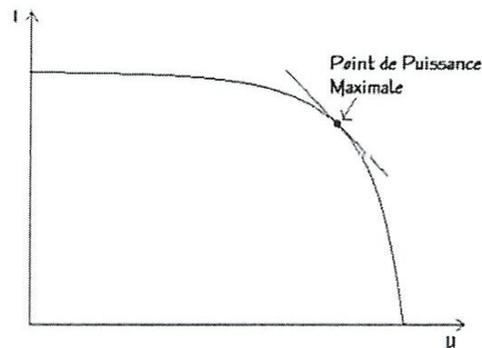


Figure 3.10: Caractéristique aux bornes d'un panneau solaire
Situation du Point de Puissance Maximale

En conséquence, pour un même éclaircissement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure 3.10 représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur. [7].

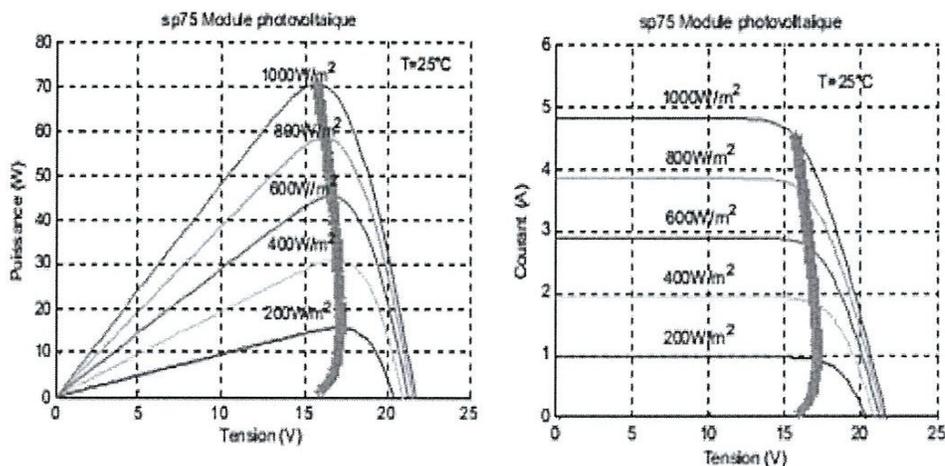


Figure 3.11 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM

3.3.3. Principe de la recherche du point de puissance maximal (MPPT) :

3.3.3.1. Gestion de la MPPT :

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure suivant illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- Pour une variation de charge (cas b).On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.
- Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [4].

En résumé, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (α) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV.

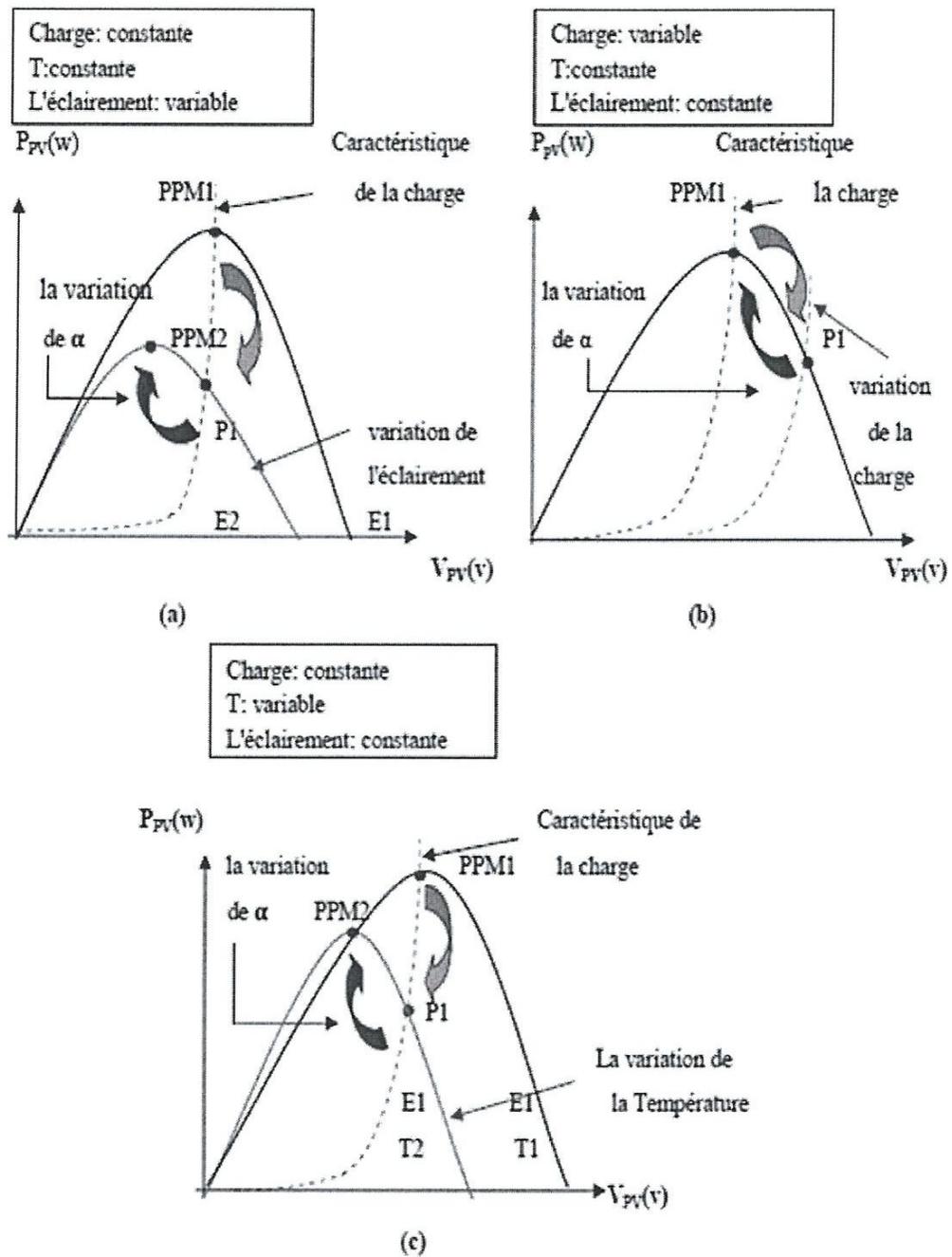


Figure 3.12 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale suite à une variation:
 a) de l'éclairement, b) de charge, c) de température.

3.3.3.2. Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max (MPPT) :

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [11].

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs :

$$P = I.V \quad [3.20]$$

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée [3].

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

3.3.3.2.1. Les méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode «look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit [7].

3.3.3.2.1.1. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur :

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V_{oc} . La constante proportionnelle k_1 , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{oc}} \cong Cte < 1 \quad [3.21]$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation :

$$Vs = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad [3.22]$$

Et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de k_1 .

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

3.3.3.2.1.2. La méthode de court-circuit :

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale (équation 3.3) :

$$K_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} \cong Cte < 1 \quad [3.23]$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

3.3.3.2.2. Les méthodes directes :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV [7].

Donc Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs

$$P = I.V \quad [3.24]$$

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables.

- Méthodes à contre réaction de tension,
- Méthodes à contre réaction de courant.
- Méthodes à contre réaction de puissance : cette méthode est basée sur deux algorithmes : Algorithme perturbation et observation et Algorithme incrémentation de l'inductance.

3.3.3.2.2.1. La méthode Perturbation & Observation (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure 3.13, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance PPV , 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 [13]

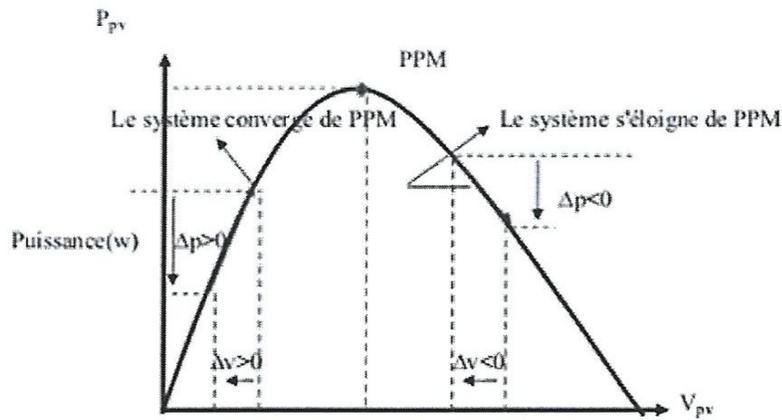


Figure 3.13 : Schéma de convergence vers le PPM par P & O.

La figure 3.14 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

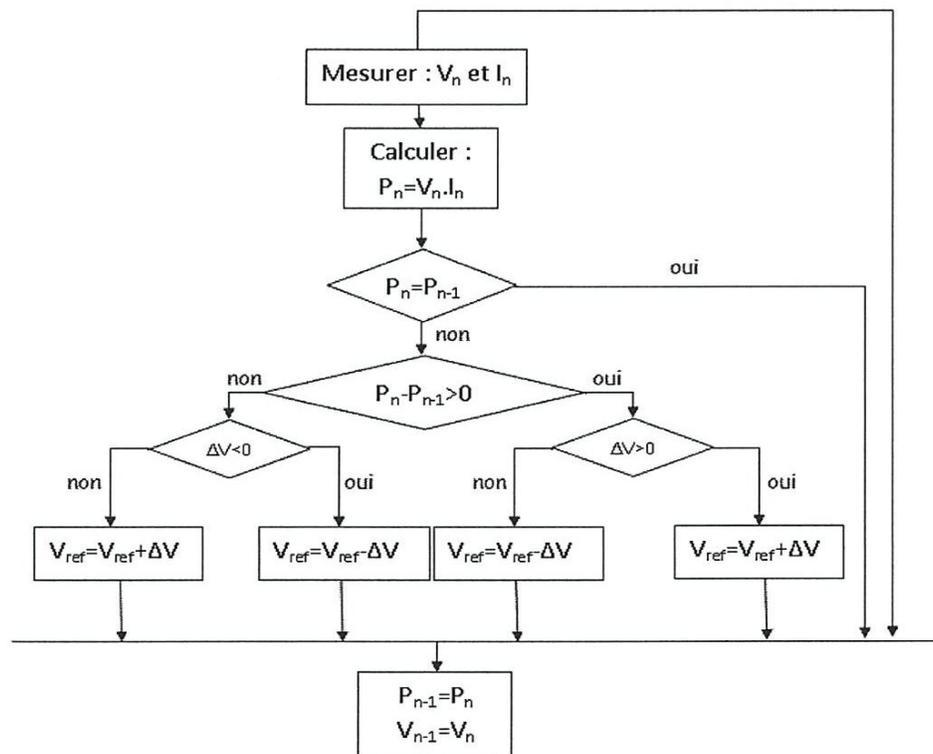


Figure 3.14 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

Telle que :

P_n : la nouvelle puissance.

P_{n-1} : l'enceint puissance dans le temps (t-1) .

$$\Delta V = V_n - V_{n-1}$$

$$\Delta P = P_n - P_{n-1}$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part 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 peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [3].

3.3.3.2.2. Méthode par incrémentation de conductance :

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI. Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite [4,8].

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P=V.I \quad [3.29]$$

La dérivé partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad [3.30]$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad [3.31]$$

On définit la conductance de la source $G = \frac{I}{V}$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$.

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, les relations explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source G égale l'incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentale conductance ΔG et vice-versa, comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & \text{si } \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \text{si } \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{si } \frac{I}{V} < -\frac{dI}{dV} \end{cases}$$

La figure 3.15 suivant présente le signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement.

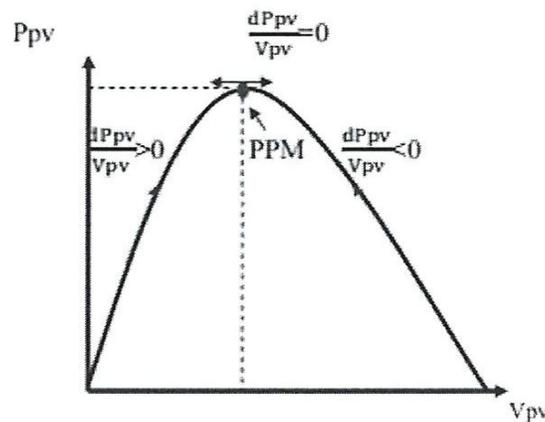


Figure 3. 15 : Signe de $\frac{dP}{dV}$ pour différentes zones de fonctionnement

Les tensions et courants du panneau sont monitoires, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement. Cet algorithme implique un nombre important de calculs de dérivées.

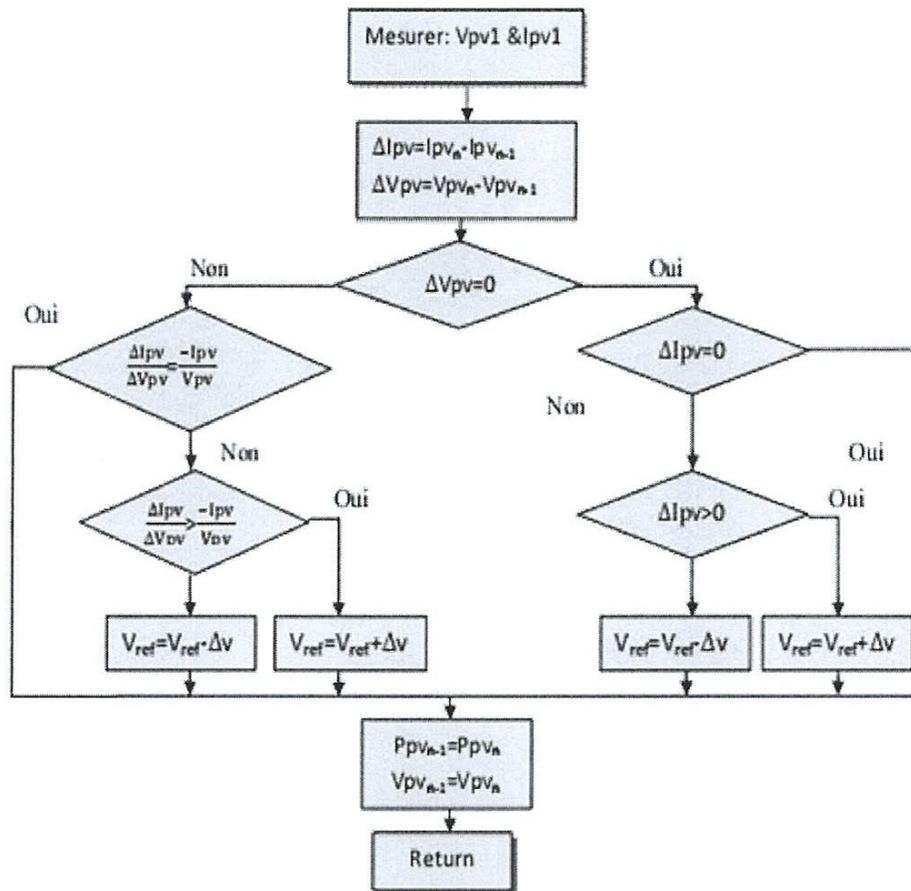


Figure 3.16 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P = I.V$

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée [3].

3.3.3.2.2.3. Méthode à contre réaction de la tension :

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure 3.17.

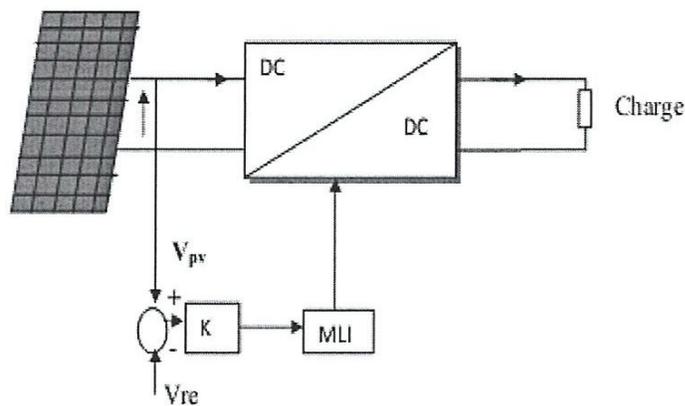


Figure 3.17: Méthode contre réaction de la tension.

Les inconvénients de cette configuration sont les mêmes que pour la méthode de connexion directe (générateur PV + charge de profil).

C'est-à-dire, le système ne peut pas s'adapter aux conditions variables d'environnement, telles que l'irradiance et la température. Les avantages de cette technique c'est une technique simple, économique et emploie seulement une commande de boucle de retour.

3.3.3.2.4. Méthode contre réaction de courants :

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de I et V a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système figure 3.18.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment.

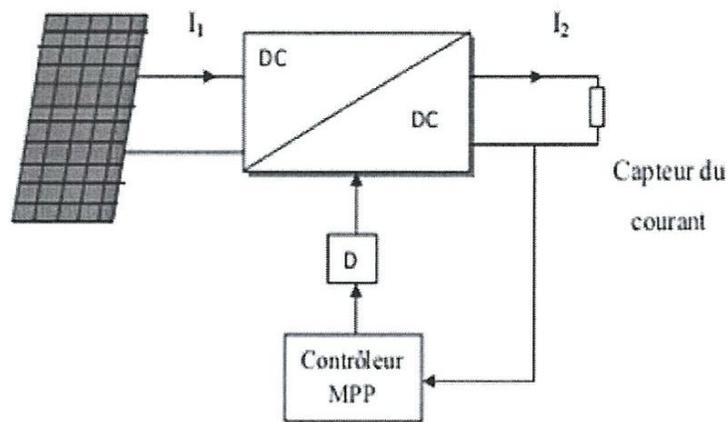


Figure 3.18 : Méthode contre réaction de courants.

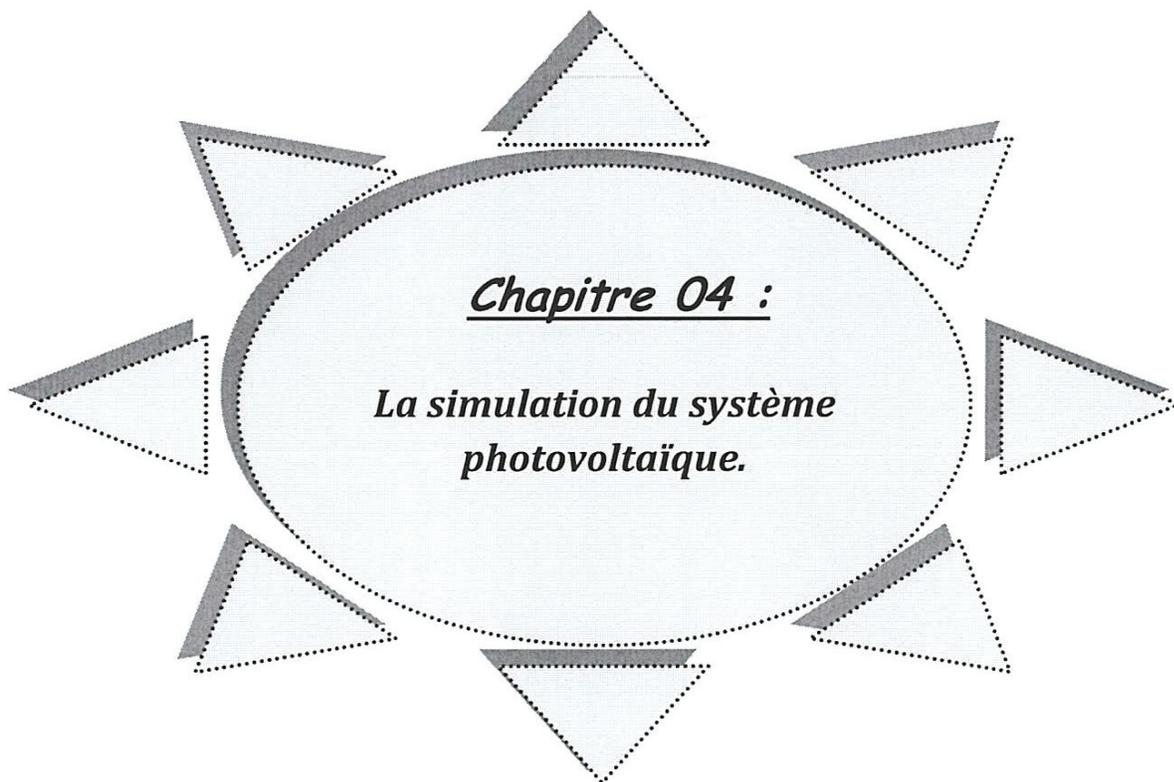
3.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les convertisseurs DC-DC (hacheur survolteur et dévolteur) et la commande MPPT.

Nous avons vu également les algorithmes MPPT ont été couverts en détail. Comme ont été faits connaître, il y a beaucoup de manières à distinguer et de grouper les techniques directes et indirectes en baser sur la méthode de l'observation et d'optimisation (P&O) pour suivre le MPP au générateur PV.

Les techniques indirectes ont le dispositif particulier de l'obtention de la puissance maximale soit l'ensoleillement, soit la température. Ils doivent mesurer une partie de la tension, du courant du générateur PV, ou employer des données empiriques par des expressions mathématiques d'approximation numérique pour estimer le MPP du générateur spécifique de PV installé dans le système. Bien que, dans beaucoup de cas, ils puissent être simples et peu coûteux, ils ne sont pas totalement souples.

D'autre part, la technique directe offre les avantages suivants : ni une grande base de données, ni une grande mémoire nécessaire pour calculer le MPP; elle est totalement souple en ce qui concerne le profil de charge, le suiveur de MPP est indépendant de la variation des paramètres du générateur PV.



4.1. Introduction:

Dans ce chapitre nous avons étudié la simulation globale du système photovoltaïque (générateur photovoltaïque, hacheur, la commande MPPT, la charge) en utilisons l'outil Matlab/Simulink.

4.2. L'outil Matlab/Simulink:

4.2.1. MATLAB:

- ✓ Est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple.
- ✓ Peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées.
- ✓ Est un interpréteur, car ses instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne.
- ✓ Possède des bonnes capacités graphiques pour présenter des résultats ou pour créer des applications.
- ✓ Peut être intégré avec du code C ou FORTRAN.
- ✓ Fonctionne dans plusieurs environnements tels que UNIX/X-Windows, Windows, Macintosh [13].

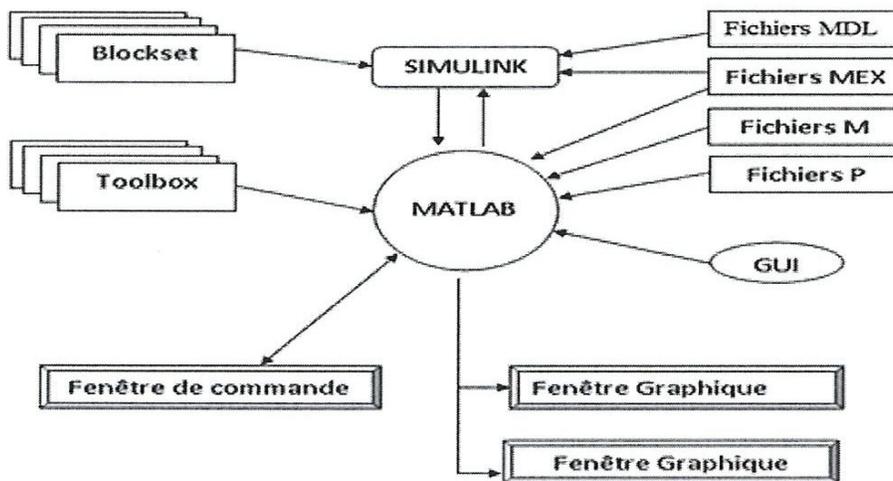


Figure 4.1 : Schéma représente le logiciel MATLAB.

- ❖ **Fenêtre de commande** : dans cette fenêtre, l'utilisateur donne les instructions et MATLAB retourne les résultats.
- ❖ **Fenêtre Graphiques** : MATLAB trace les graphes dans ces fenêtres.
- ❖ **Fichiers M** : ce sont des programmes en langage MATLAB (écrits par l'utilisateur).
- ❖ **Fichiers P** : version pré-interprétée des fichiers M.
- ❖ **Toolboxes** : (boîtes à outils) ce sont des collections de fichiers M développés pour des domaines d'application spécifiques.
- ❖ **Simulink** : c'est l'extension graphique de MATLAB permettant de travailler avec des schémas en blocs, pour modéliser et simuler des systèmes.
- ❖ **Blocksets** : ce sont des collections de blocs SIMULINK développés pour des domaines d'application spécifiques.
- ❖ **Fichiers MEX** : modules exécutables créés à partir de source en C ou FORTRAN.
- ❖ **Fichiers MDL** : ce sont des fichiers représentant des modèles SIMULINK.
- ❖ **GUI** : interface graphique utilisateur pour créer des applications basées sur MATLAB.

En MATLAB, il existe deux modes de fonctionnement :

- 1- mode interactif : MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.
- 2- mode exécutif : MATLAB exécute ligne par ligne un programme en langage écrit dans un fichier M, P, ou un fichier exécutable MEX.

4.2.2. SIMULINK :

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [21].

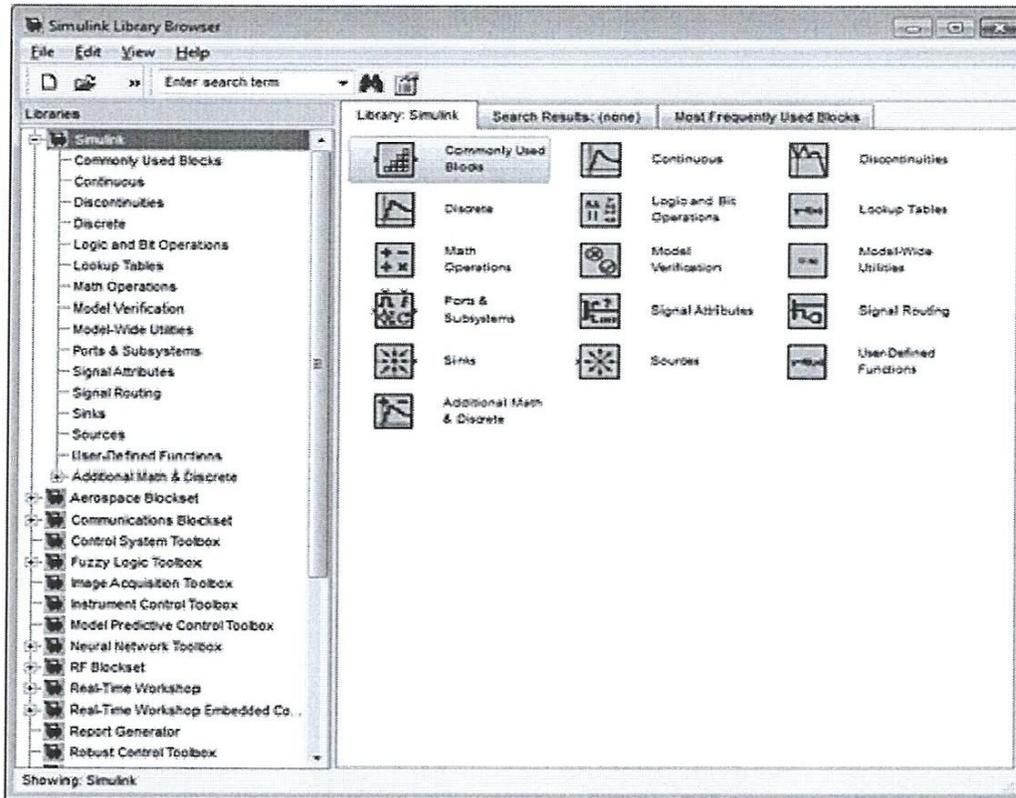


Figure 4.2 : Bibliothèque SIMULINK.

4.3. Simulation du système photovoltaïque :

Le schéma d'implantation du système photovoltaïque sur l'environnement MATLAB/SIMULINK est représenté sur la figure 4.3. On y trouve cinq blocs:

- 1- bloc des données.
- 2- bloc de générateur photovoltaïque (GPV).
- 3- bloc de commande (MPPT).
- 4- bloc du hacheur survolteur (boost).
- 5- La charge (résistive).

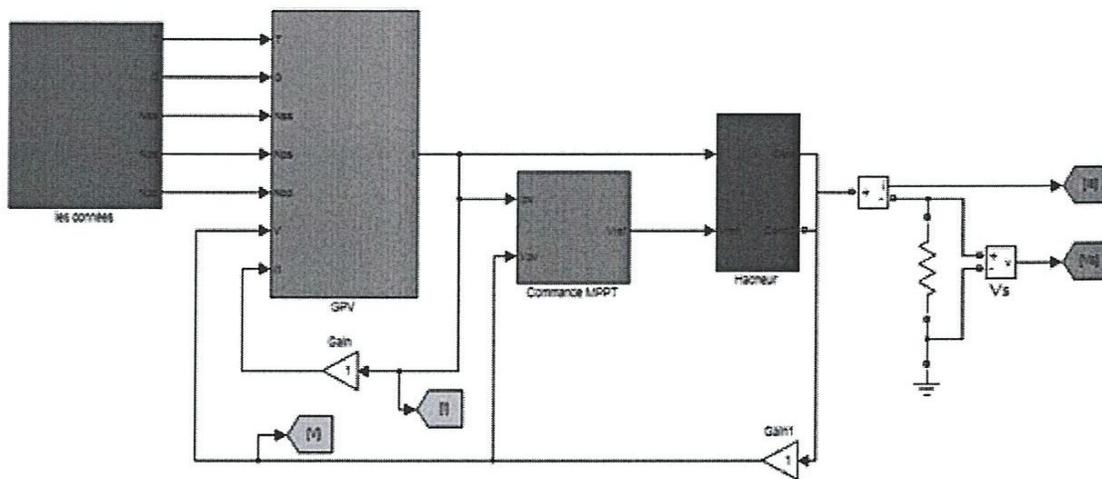


Figure 4.3 : Modèle de simulation du système PV globale.

4.3.1. Simulation du GPV :

4.3.1.1 Caractéristique du panneau solaire utilisé:

Le panneau solaire utilisé est le MSX60, il est en silicium monocristallin et constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60 W, un courant optimal de 3.5A sous une tension optimale de 17.1V. Les autres paramètres électriques sont définis dans le tableau 4.1:

Les paramètres	Leur valeur
La température standard (T)	25°C
L'éclairement standard (G)	1000W/m ²
La puissance maximale (Pmax)	60 W
Le courant de court-circuit (Iscn)	3.8 A
La tension de circuit ouvert (Vocn)	21.1 V
L'énergie de gap (Eg)	1.2 ev
Le nombre des cellules en séries (Nss)	36
Facteur de qualité de la diode (n)	1.36
Le coefficient de variation du courant en fonction de la température (Ki)	2.2.10 ⁻³
Le coefficient de variation de la tension en fonction de la température (Kv)	73.10 ⁻³

Tableau 4.1 : caractéristique du module photovoltaïque utilisé.

4.3.1.2 Modèle de simulation:

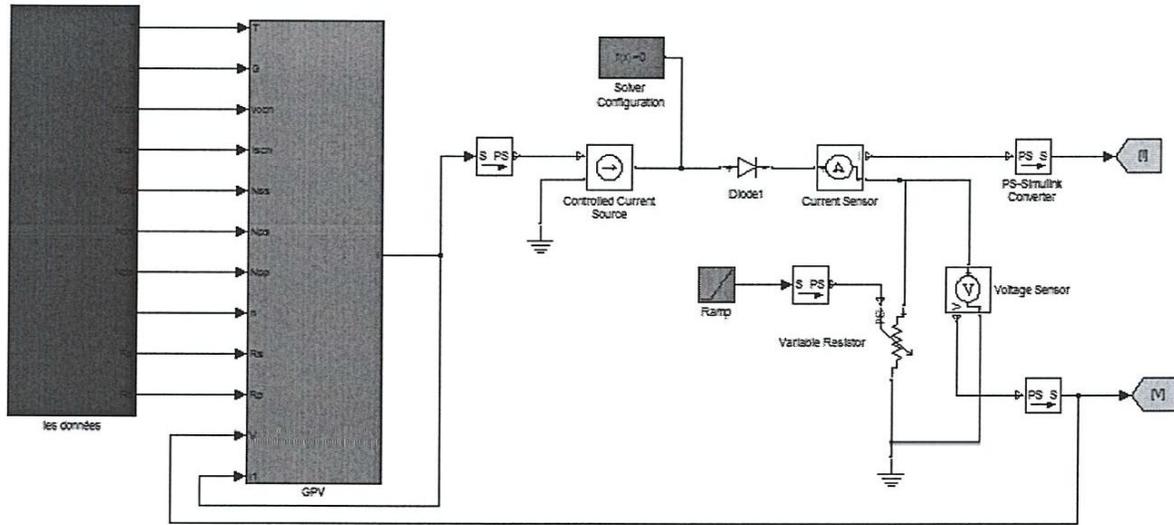


Figure 4.4 : Modèle de simulation du GPV.

Le schéma bloc du GPV est donné à la figure 4.5

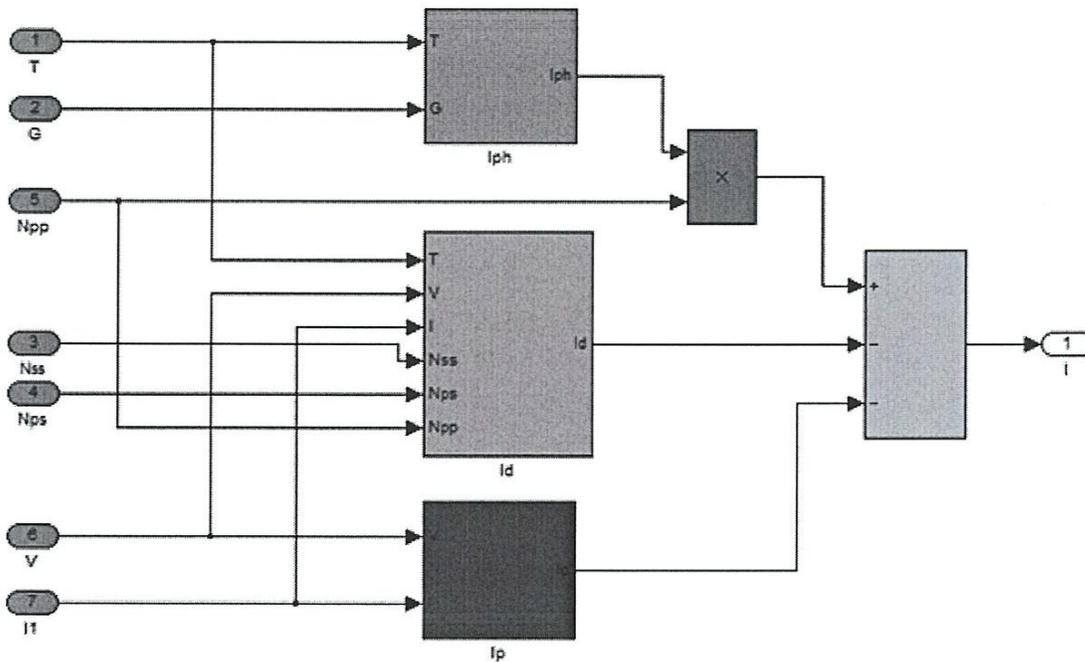


Figure 4.5 : Modèle du G PV.

Le courant " I " de la GPV est composé de trois courants (l'équation 2.5 du 2ème chapitre) qui sont définie dans le 2^{ème} chapitre qui sont :

* courant I_{ph} : c'est le photo-courant crée par la cellule PV (l'équation 2.8 du 2^{ème} chapitre).

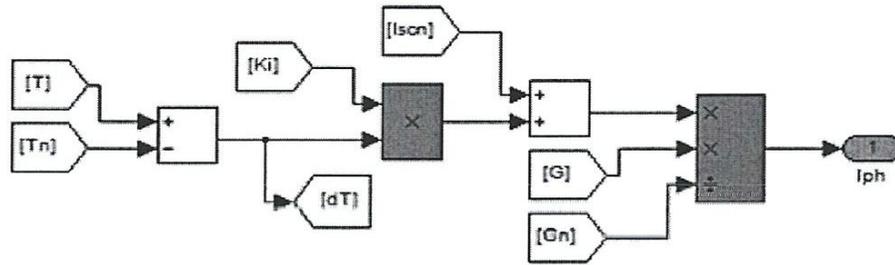


Figure 4.6 : Schéma bloc du photo-courant.

* courant I_p : Le courant circulant dans la résistance parallèle (R_p), (l'équation 2.6 du 2^{ème} chapitre).

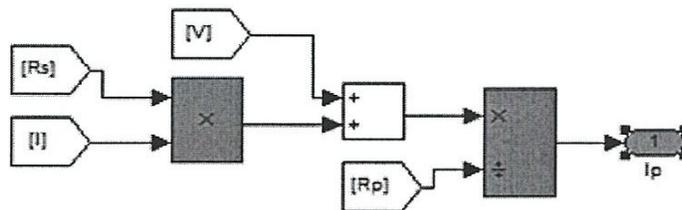


Figure 4.7 : Schéma bloc du courant circulant dans la résistance parallèle.

* courant I_d : Le courant circulant dans la diode qui a une relation avec :

- I_{sn} : le courant de saturation nominal de la diode (l'équation 2.12 du 2^{ème} chapitre).

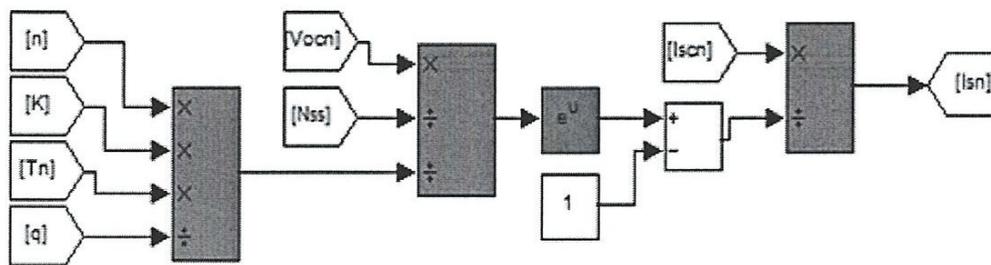


Figure 4.8 : Schéma bloc du courant de saturation nominal de la diode.

- I_s : le courant de saturation de la diode.

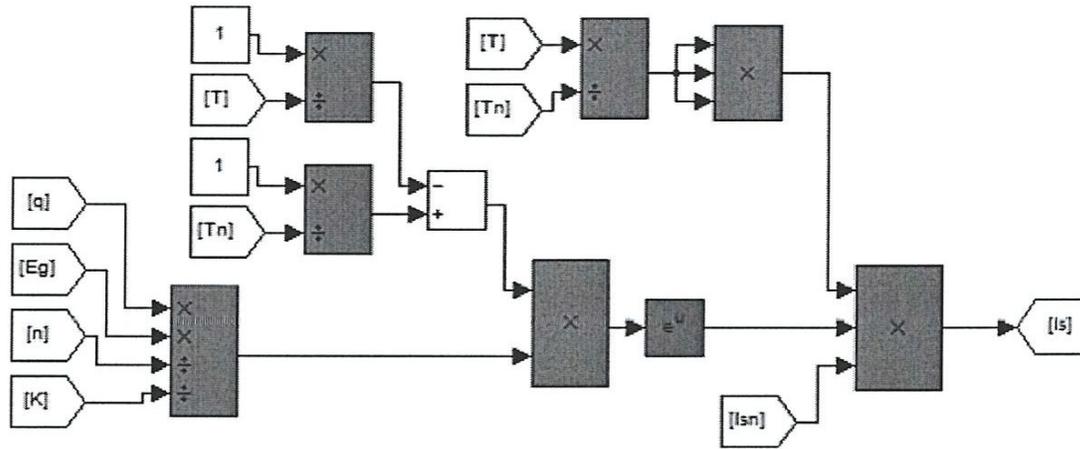


Figure 4.9 : Schéma bloc du courant de saturation.

I_d : le courant de la diode.

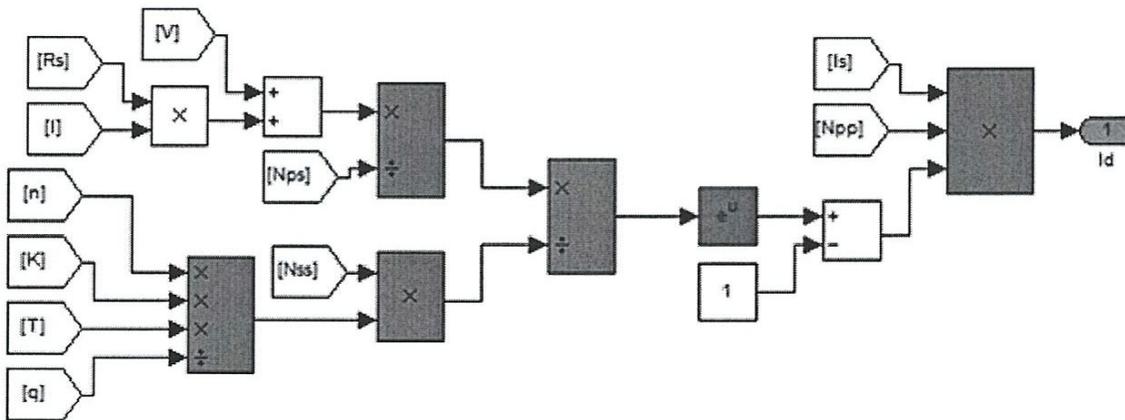


Figure 4.10 : Schéma bloc du courant de la diode.

4.3.1.3. Résultats de simulation:

4.3.1.3.1. La caractéristique I(V) et P(V) de générateur PV :

Dans les conditions standard avec une température de $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'éclairement $G=1000\text{W/m}^2$ en obtient les caractéristique I(V) de la GPV qui sont définie dans la figure 4.11 et P(V) dans la figure 4.13 :

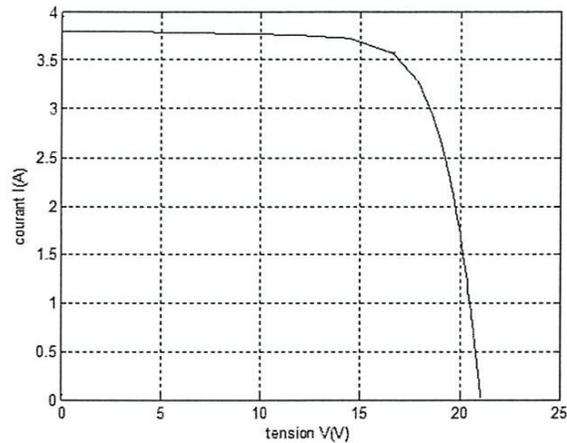


Figure 4.11 : la caractéristique I(V) de générateur PV.

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 $I = f(V)$ 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 4.12 représente trois zones essentielles :

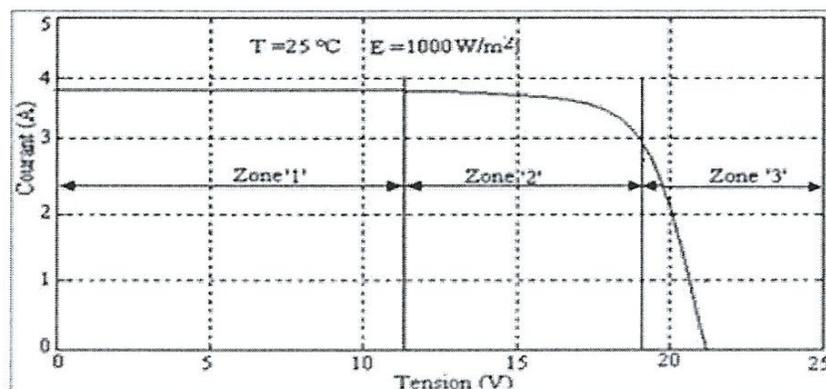


Figure 4.12 : Les différentes zones de caractéristique I(V) d'un générateur PV.

a) **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.

b) **La zone (2)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) **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.

La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C représenté dans la figure 4.13 :

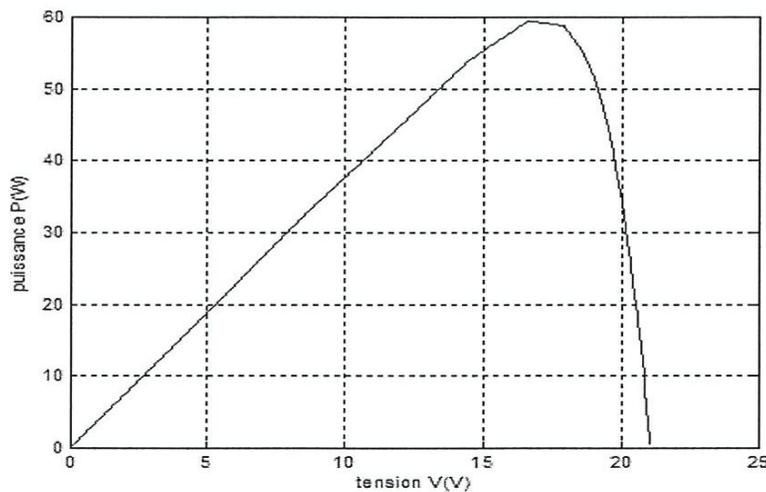


Figure 4.13 : la caractéristique $P(V)$ de générateur PV.

4.3.1.3.2. Influence de la température :

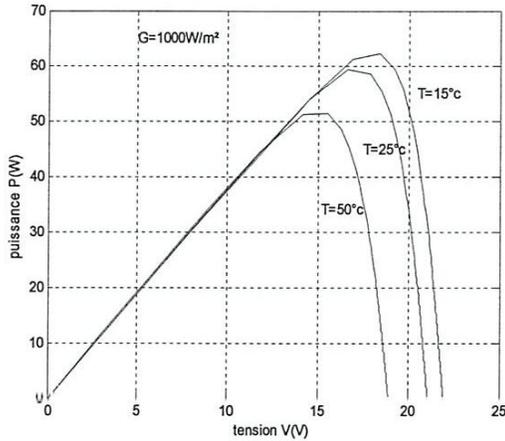


Figure 4.14 : Caractéristique $I(V)$ d'un module PV pour différentes température.

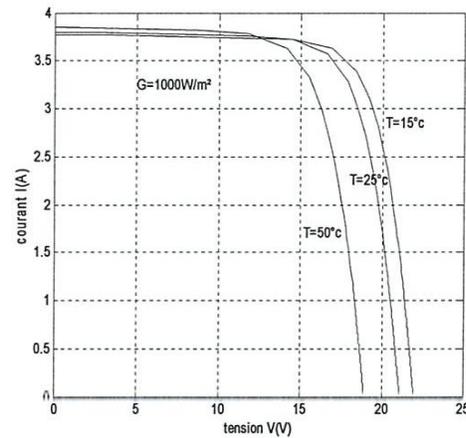


Figure 4.15: Caractéristique $P(V)$ d'un module PV pour différentes température.

En faisant varier la température de 15°C jusqu'à 50°C, la caractéristique $I=f(V)$ est donnée par la figure 4.14. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

La figure 4.15 suivante montre que si la température augmente implique une augmentation de la puissance maximale du générateur.

4.3.1.3.3. Influence de l'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 500 w/m² et 1000 w/m², la caractéristique $I=f(V)$ est représenté par les figures 4.16. On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

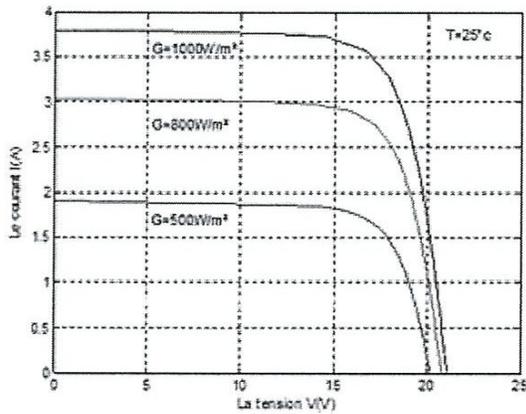


Figure 4.16 : Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes éclairément solaire.

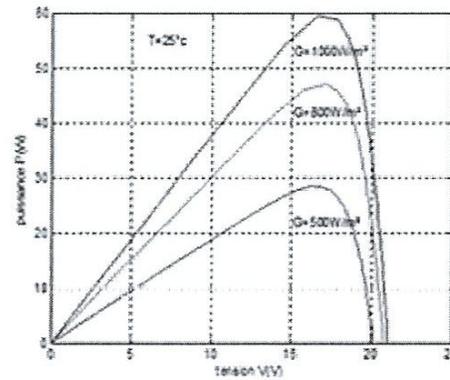


Figure 4.17 : Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes éclairément solaire.

En remarque que d'après la figure 4.17 si en augmente l'éclairément, la puissance augment aussi.

2.3.1.3.4. Influence de l'association des panneaux Photovoltaïques en Série :

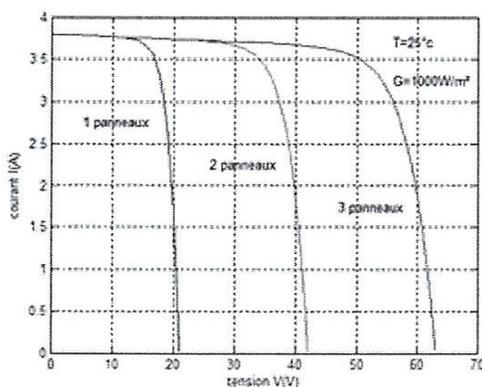


Figure 4.18 : Caractéristique $I(V)$ des panneaux PV associer en série.

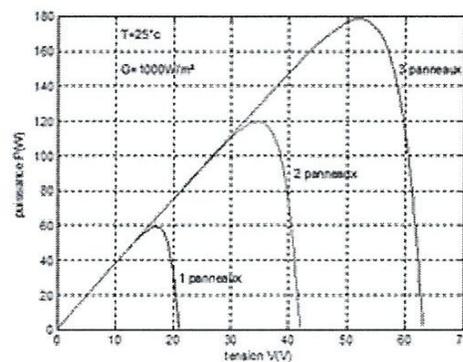


Figure 4.19 : Caractéristique $P(V)$ des panneaux PV associer en série.

On remarque que l'association des panneaux PV en série montée sur la figure 4.18 dans l'état standard avec une température $T=25^{\circ}\text{C}$ et l'éclairement $G=100\text{W}/\text{m}^2$, implique une élévation de la tension égale à la somme des tensions individuelles mais aucune variation sur le courant.

La figure 4.19 montre que l'augmentation de l'association des panneaux en série fait une augmentation de deux paramètres qui sont : la tension et la puissance.

Puisque la puissance $P=I.V$ donc la puissance varie selon la tension.

4.3.1.3.5. Influence de l'association des panneaux photovoltaïques en parallèle :

L'association des panneaux en parallèle c'est l'inverse de l'association en série donc le courant augmente dans les conditions standard de la température et l'éclairement mais aucune n'influence selon la tension, la figure 4.20 montre cette différence, et la figure 4.21 montre que l'augmentation de la puissance existe aussi dans l'association des panneaux en parallèle.

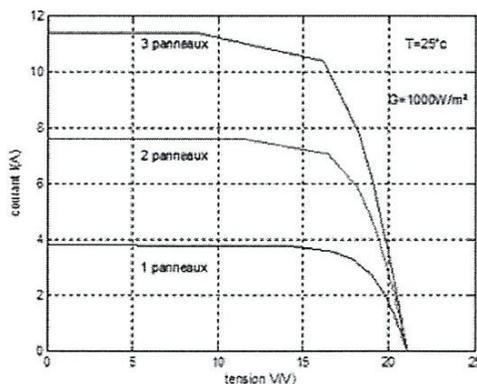


Figure 5.20: Caractéristique $I(V)$ des panneaux PV en parallèle.

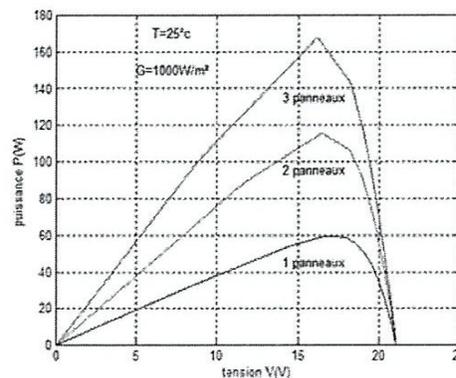


Figure 4.21 : Caractéristique $P(V)$ des panneaux PV associés en parallèle.

4.3.1.3.6. Influence de l'association des panneaux Photovoltaïques mixte:

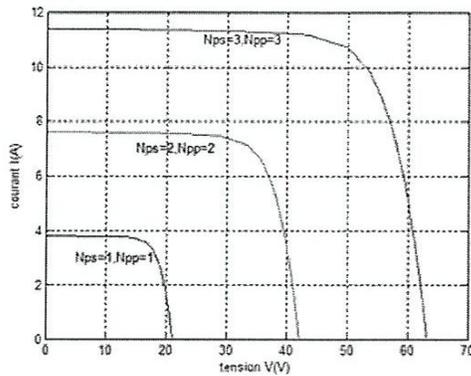


Figure 4.22 : La caractéristique $I(V)$ des panneaux PV mixte.

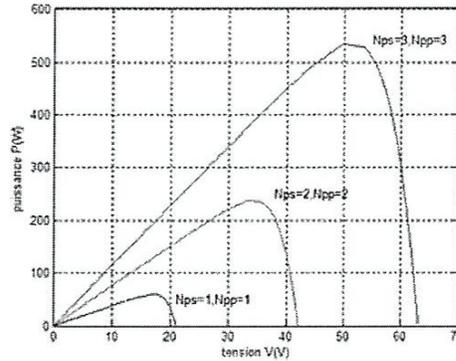


Figure 4.23 : La caractéristique $P(V)$ des panneaux PV mixte.

La figure 4.22 montre que l'augmentation de la tension et du courant dans l'association mixte des panneaux PV. Car l'association des panneaux en série délivre une tension égale à la somme des tensions et l'association des panneaux en parallèles délivre un courant égal à la somme des courants. Et la figure 4.23 montre aussi l'augmentation de la puissance à cause de l'augmentation de la tension ($P=V.I$)

4.3.1.3.7. Influence de la résistance série :

La figure suivante montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V de la cellule qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance $P-V$ dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension constante.

Les performances d'une cellule sont d'autant plus dégradées que R_s est grande, la figure 4.24 montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V. cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I=f(V)$ dans la zone où le module fonctionne comme une source de tension, à droite du point de puissance maximum, la chute de tension est liée au courant généré par le module.

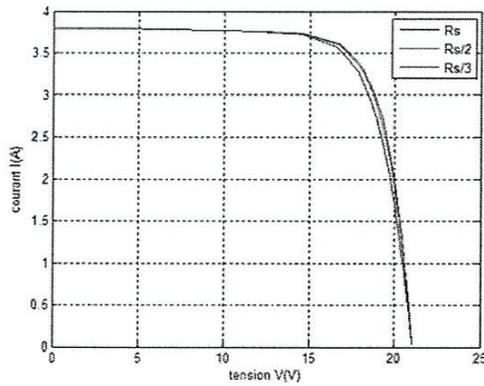


Figure 4.24: Caractéristique $I(V)$ des différentes valeurs de la résistance R_s .

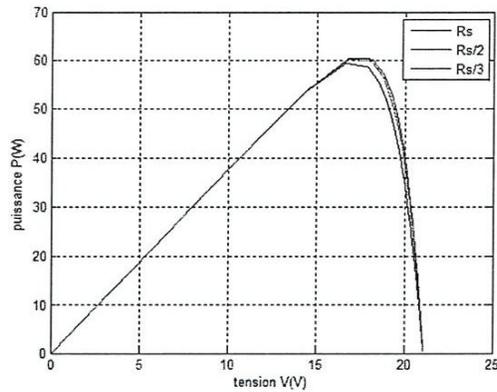


Figure 4.25 : Caractéristique $P(V)$ des différentes valeurs de la résistance R_s .

4.3.1.3.8. Influence de l'éclairement et de la température sur les grandeurs maximales:

Au tableau 4.2 sont données les valeurs de la tension maximale, le courant maximal ainsi que la puissance maximale pour différent valeurs de l'éclairement et de la température :

L'éclairement (W/m^2)	Température ($^{\circ}C$)	Tension max (V)	Courant max (A)	Puissance max (W)
1000	50	21.9158	3.5225	77.1988
	25	16.6465	3.5675	59.3858
	15	15.6541	3.3548	52.5160
800	50	21.7780	2.8003	60.9852
	25	17.1207	2.7518	47.1128
	15	15.0601	2.7664	41.6623
500	50	20.7430	1.7782	36.8842
	25	16.2959	1.7462	28.4554
	15	14.6714	1.7150	25.1616

Tableau 4.2 : effet de l'éclairement et de la température sur les grandeurs maximales du GPV

4.3.2. Simulation de l'hacheur :

4.3.2.1. Modèle de simulation:

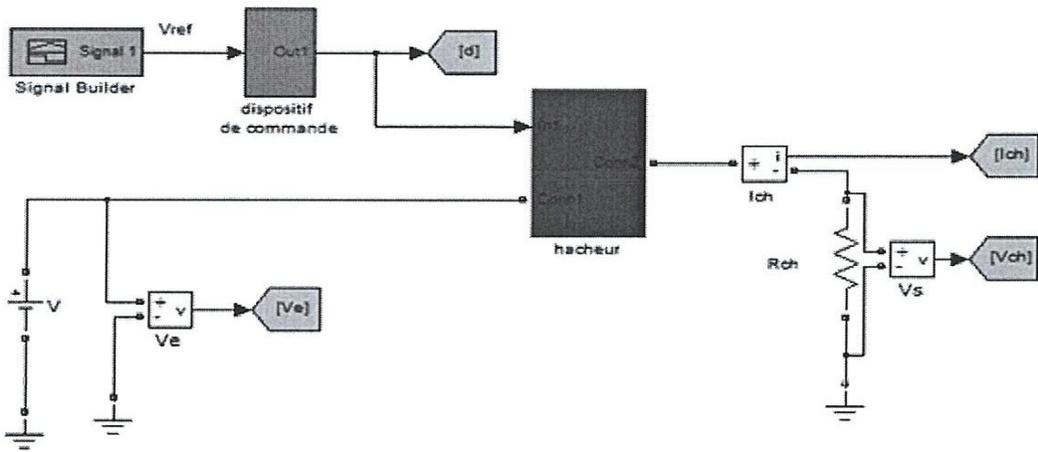


Figure 4.26 : Simulation global d'un hacheur survolteur.

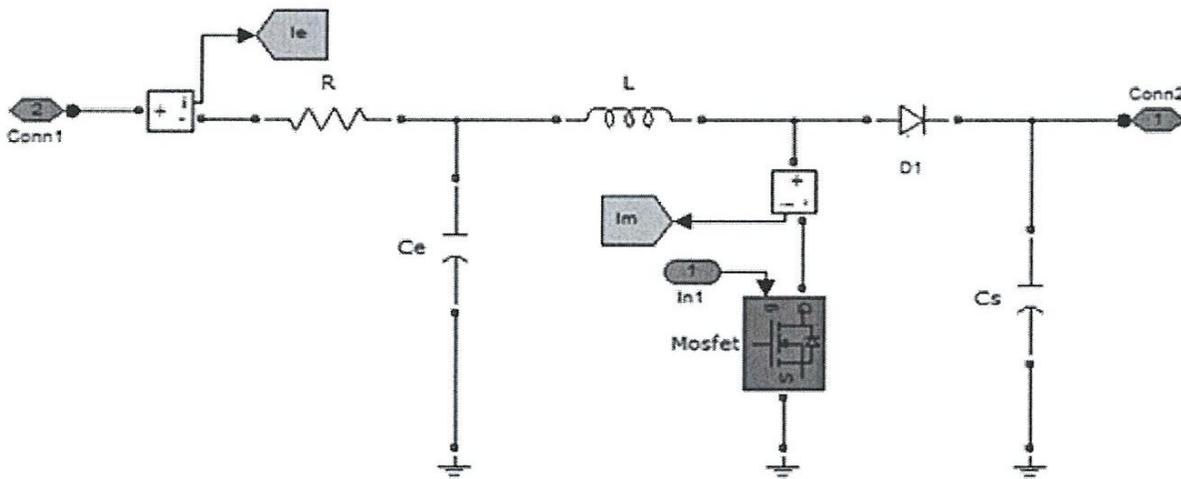


Figure 4.27 : Modèle du hacheur survolteur.

4.3.2.2. Paramètres de simulation:

f	L	Ce	Cs	Rch
10 KHZ	1 mH	2200 mF	200 μ F	5 Ω

Tableau 4.3 : les paramètres de la simulation du hacheur.

4.3.2.3. Résultats de simulation:

La tension à l'entrée et à la sortie du hacheur [($V_e(t)$ et $V_{ch}(t)$)] :

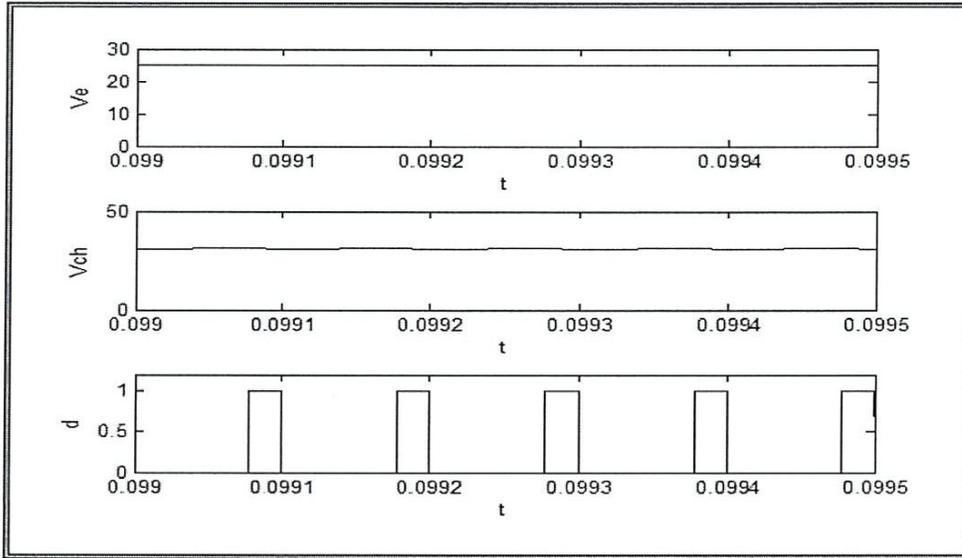


Figure 4.28 : la tension à l'entrée et à la sortie du hacheur (V_e, V_{ch}, d) = $f(t)$.

La figure 4.28 montre que la tension à l'entrée de l'hacheur est une tension continue et la tension à la sortie de l'hacheur est presque continue avec des ondulations de commande d .

La tension moyenne à l'entrée et à la sortie du hacheur [($V_{em}(t)$ et $V_{chm}(t)$)] :

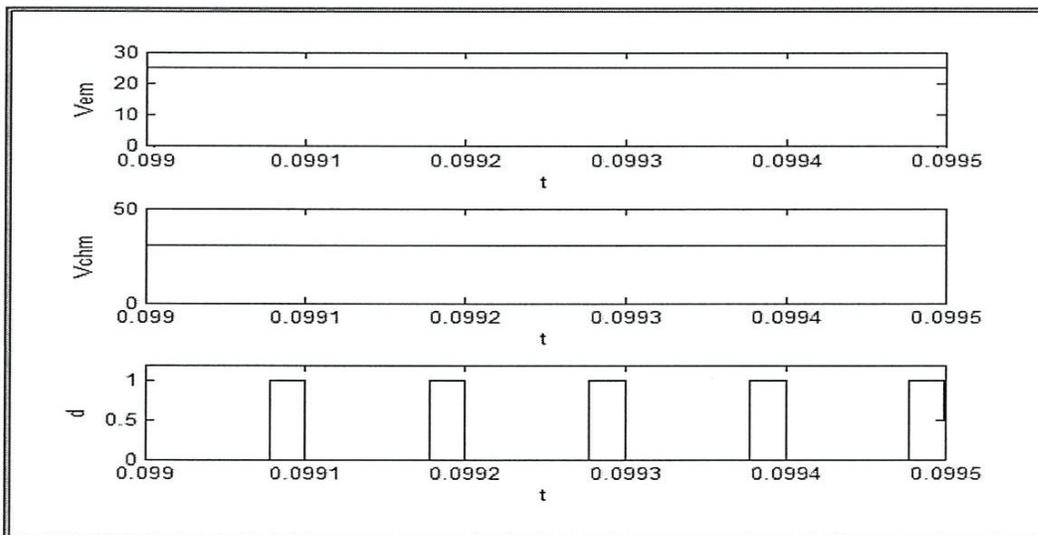


Figure 4.29 : la tension moyenne à l'entrée et la sortie du hacheur (V_{em}, V_{chm}, d) = $f(t)$.

Le courant à l'entrée et à la sortie du hacheur [($V_e(t)$ et $V_{ch}(t)$) :

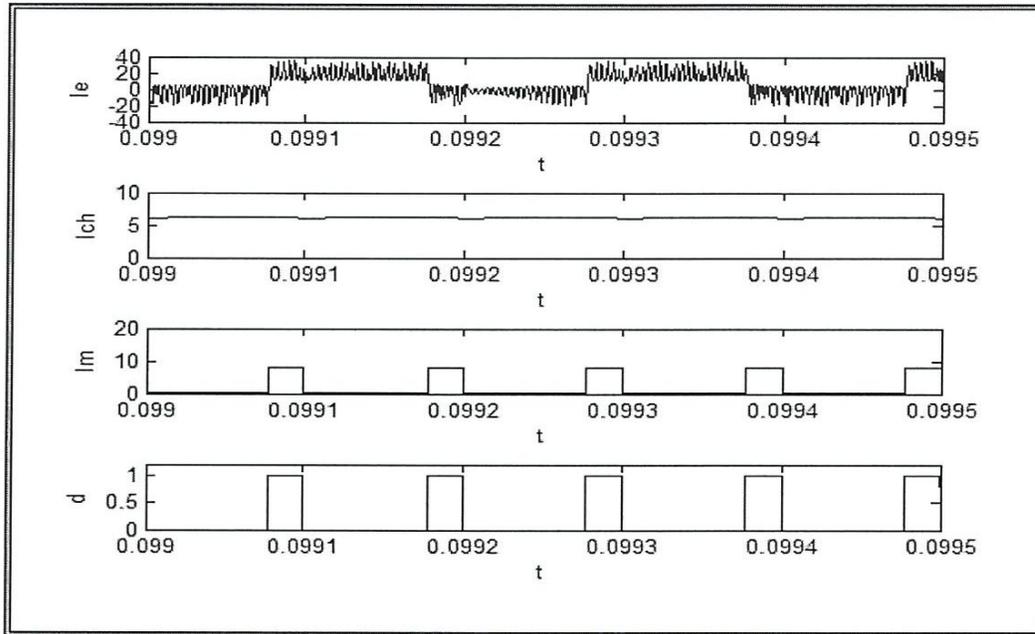


Figure 4.30 : le courant à l'entrée et à la sortie du hacheur (I_e, I_{ch}, I_m, d) = $f(t)$.

4.3.3. Simulation de la commande MPPT :

4.3.3.1. Modèle de simulation :

L'implantation de l'algorithme P&O défini dans le chapitre 3 sur l'environnement MATLAB/SIMULINK est représentée sur la figure 4.31 :

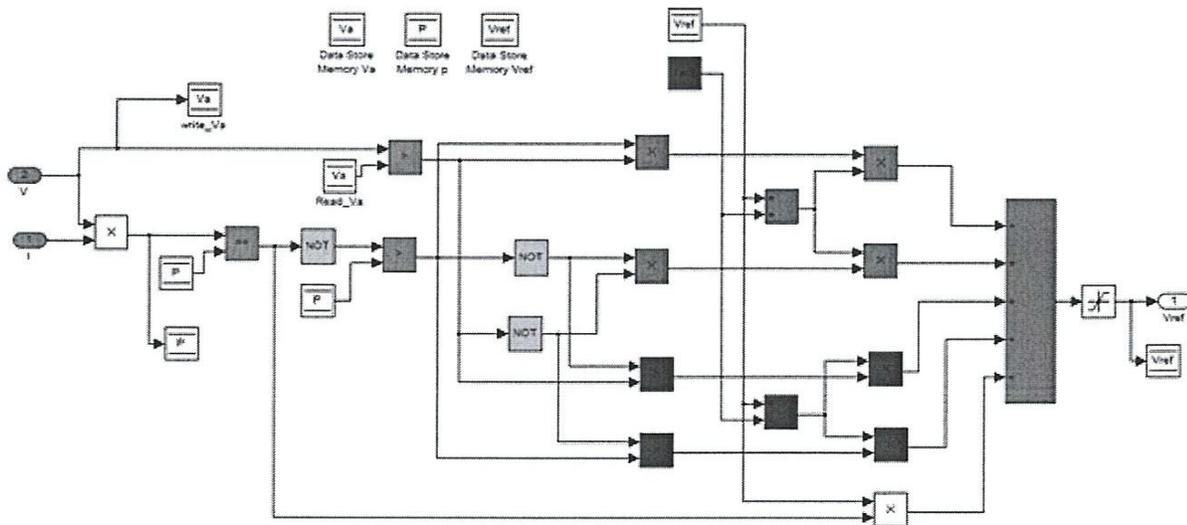


Figure 5.31 : Modèle de simulation pour l'algorithme P & O

4.3.3.2 Résultats de simulation :

Cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètres de mesure. Il opère en perturbant périodiquement la tension du panneau, et en comparant l'énergie précédemment délivrée avec la nouvelle après perturbation, en suivant l'organigramme figure (4.5), les résultats de simulation sont les suivants:

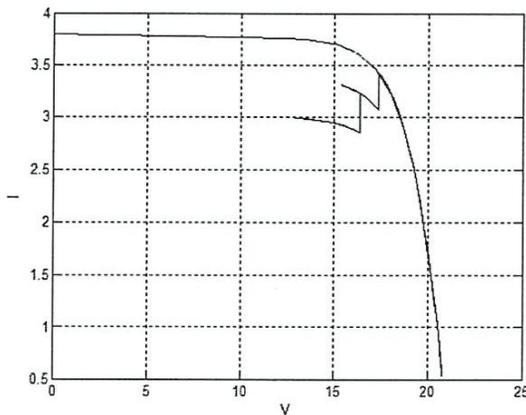


Figure 4.32 : la caractéristique $I(V)$

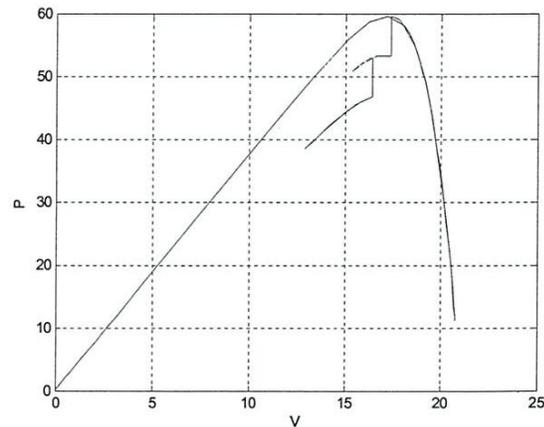


Figure 4.33. : la caractéristique $P(V)$

On constate que l'algorithme P&O rattrape le point optimal pour différentes valeurs d'éclairement avec une oscillation autour du point de puissance maximale.

4.4. Conclusion:

Dans ce chapitre, un modèle de simulation sous SIMULINK de système PV composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation », la charge a été réalisé et testé.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge.
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT 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.

Conclusion générale :

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse **d'une modélisation et simulation d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (MPPT)** assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur, puis, on a représenté la structure de la commande MPPT « perturbation et observation » qui utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Pour la simulation PV on a démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

D'après les résultats de la simulation obtenue, on peut dire que les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité d'éclairement et les variations de la charge.

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

Reference bibliographique

- [1] Abdelkader Morsli « Etude d'un système solaire photovoltaïque », édition universitaires européennes.
- [2] Anne Labouret / Michel Villos « Energie solaire photovoltaïque : le manuel du professionnel ».
- [3] Bensaci Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla.
- [4] Hanaou Fatiha /Rouabah Aicha « Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla.
- [5] Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, Université abou-bakr belkaid -tlemcen-2011/2012.
- [6] SLAMA Fateh «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », universite ferhat abbas - setif- 2011.
- [7] Benseddik Othmane /Djaloud Fathi « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque »,mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla. 2012.
- [8] Abada Sofiane « Etude et optimisation D'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Faculté des sciences et de genie, Université laval- Quebec-2011.
- [9] Khoudrane Ismail « Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2014.
- [10] Helali Kamilia « Modélisation d'une cellule pv , Etude comparative » mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.25/06/2012.

- [11] Boukhers Djamil « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [12] Boukli Hacem Omar « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2010/2011.
- [13] Bendjellouli Zakaria « contribution a la modélisation d'un cellule solaire », mémoire de magister, Université De Bechar, 2009.
- [14] Merah Reda « Modélisation d'un dipositif Mppt pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques » mémoire de magister, Université badji mokhtar annaba, 2010.
- [15] Aoufi Saliha « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas- Setif. 2014.
- [16] Abbassen Lyes « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri – TiziOuzou. 2010/2011.
- [17] Brihmat Fouzia « Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale Hybride PV/éolien » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri- Tizi Ouzo. 2011/2012.
- [18] Gori brahim « modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT analogique », Mémoire d'Ingéniorat, université Ouargla, 2011
- [19] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005
- [20] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

- [21] Djarallah mohammed « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [22] Makhoulouf mahdi « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, Algérie, 2006
- [23] HEROGUEL farysel "les cellules photovoltaïques," Ecole Normale Supérieure, Lyon, Epreuve de projet, 2007
- [24] les sites internet :

http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2011_Master18.pdf

<http://glloq69.free.fr/TPE/synteses.php>

http://www.iufmrese.cict.fr/contrib/2008/PM/PSim_MPPT.shtml

<http://www.grenoble-isere.com/etudes>

<http://glloq69.free.fr/TPE/synteses.php>

www.creea.u-bordeaux.fr

www.creea.u-bordeaux.fr

www.creea.u-bordeaux.fr/

