

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :



**DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIE**

FILIERE : ELECTRONIQUE

**OPTION : Electronique des Systèmes
Embarqué**

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: Nabil Heraiz

Intitulé

**Modélisation et commande d'un panneau
photovoltaïque**

Soutenu devant le jury composé de :

	Université de M'sila	Président
BELLOUTI Adel	Université de M'sila	Encadreur
	Université de Msila	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciements

*Je remercie, en premier lieu, **ALLAH** qui m'a donné ce bien là
pour que je vive
ce jour, **ALLAH** qui m'a donné la patience et le courage pour
que je puisse terminer ce travail*

Tous nos remerciements et notre reconnaissance au

BELLOUTI Adel

*Et tous les professeurs de département de Génie électrique
A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie
prenante
de ce travail*



ملخص:

استغلال الطاقات المتجددة يعرف تطورات هامة بحيث نوجه هذه الدراسة في تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية بواسطة الصحيفة الكهروضوئية، بحيث هذه الأخيرة يكون انتاجها اقصى، وبهدف الحصول على أحسن مردود لنظم الطاقات المتجددة، لابد من تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، لمصدر الطاقة

بدأنا بالجزء الأكثر أهمية لتقديم مبدأ إيجاد النقطة القصوى لقد قمنا بتفصيل بعض الطرق الأكثر انتشارا لان مجال البحث يتطور باستمرار ومن الصعب العثور على حل عالمي تطرقنا لاهم طرق تتبع النقطة الاعظمية هذا العمل تم على مساحة matlab/simulink باستخدام التشويش والملاحظة P&O

كلمات مفتاحية

تتبع نقطة الاستطاعة العظمى، لغة البرمجة، الصحيفة الضوئية، التشويش والملاحظة،

Résumé :

L'exploitation des énergies renouvelables connaît des développements importants pour que nous orientons cette étude dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique au moyen de la feuille photovoltaïque, afin que cette dernière ait un rendement maximal, et afin d'obtenir le meilleur rendement pour les systèmes d'énergie renouvelable, il est nécessaire de suivre le point de potentiel maximum de la source d'énergie.

Nous avons commencé par la partie la plus importante pour introduire le principe de trouver le point maximum. Nous avons détaillé quelques-unes des méthodes les plus répandues car le domaine de la recherche est en constante évolution et il est difficile de trouver une solution globale. Nous avons traité des méthodes les plus importantes pour suivre le plus grand point. Ce travail renferme les étapes pour la simulation de ce commandes, et montre ces caractéristique et ces performances, ce travail a était effectuer dans l'environnement matlab/simulink.

Mots clés : photovoltaïque ; PV ; ppm ; espace de travail : matlab/simulink ; pso.

Sommaire

Liste des symboles

List des figures

List des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1

L'Énergie Solaire Photovoltaïques

I.1-Introduction.	(3)
1.2- Cellule photovoltaïque.	(4)
1.2.1. Effet photovoltaïque.....	(4)
1.2.2- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	(4)
1.2.3- Technologies des cellules solaires.....	(5)
a - Cellules solaires de la première génération.....	(6)
b - Cellules solaires de la deuxième génération.....	(6)
c - Cellules solaires de la troisième génération.....	(7)
1.2.4- Caractéristique courant – tension d'une cellule solaire	(8)
1.2.5- Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	(11)
a- Influence de l'éclairement E (W/m^2)	(12)
b. Influence de la température	(12)
1.3- Générateur Photovoltaïque GPV	(13)
1.3.1- Constitution D'un Générateur Photovoltaïque	(13)
a- Association en série	(14)
b- Association en parallèle	(15)
c- Association mixte (série-parallèle)	(15)

1.3.2- L'ombrage partiel	(16)
1.3.3- Protections classiques d'un GPV	(17)
1.3.4- Zone de fonctionnement d'un module photovoltaïque	(19)
1.3.5- Installation des panneaux solaires	(20)
1.3.6- Orientation et inclinaison des modules	(20)
1.4- Système photovoltaïque	(21)
1.4.1- Système photovoltaïque autonome	(21)
1.4.2- Système photovoltaïque hybride autonome	(22)
1.4.3- Système photovoltaïque raccordé au réseau	(23)
1.5- Avantages et inconvénients d'une installation PV	(23)
1.6- Conclusion	(24)

Chapitre 2

Modélisation D'un System Photovoltaïques

2.1- Introduction	(26)
2.2. Convertisseurs DC/DC (Hacheur).....	(26)
2.3. Connexion générateur photovoltaïque-.....	(26)
2.3.1. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge :.....	(26)
2.3.2. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation:.....	(27)
2.4. Définition.....	(29)
2.5. Type de convertisseurs DC-DC.....	(29)
2.5.1 Convertisseur Buck	(30)
2.5.1.1. Définition :.....	(30)
2.5.1.2. Schéma électrique du convertisseur Buck	(30)
2.5.1.3 Principe de fonctionnement	(31)

2.5.1.4Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur	(31)
2.5.2- Convertisseur Boost.....	(32)
2.5.2.1- Définition	(32)
2.5.2.2- Schéma électrique du convertisseur Boost	(33)
2.5.2.3- Principe de fonctionnement	(33)
2.5.2.4Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur	(34)
2.5.3. Convertisseur abaisseur Buck-boost	(35)
2.5.3.1. Définition	(35)
2.5.3.2- Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.....	(36)
2.5.3.3Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur.....	(36)
2.6. Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur	(37)
2.5- CONCLUSION	(39)

Chapitre 3

Poursuite du point de puissance maximale

3.1- Introduction	(40)
3.2-Principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV...	(40)
3.3- Classification Des Commandes MPPT	(41)
3.3.1- Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée	(42)
A-Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS.....	(42)
B-Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie	
Du convertisseur	(42)
3.3.2-Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	(42)
a- MPPT Indirect	(42)
b-MPPT Direct	(43)

4.4 Les Algorithmes MPPT	(43)
4.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)	(44)
4.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current).....	(46)
4.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe).....	(48)
4.4.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).....	(54)
4.4.5 La Commande Mppt Flou.....	(57)
4.4.6 Autres Méthodes.....	(59)
3.5- Conclusion	(59)

Chapitre 4

Simulation et résultat

4.1- Introduction	(61)
4.2- Simulation du système photovoltaïque	(61)
4.3 - Simulation d' un GPV	(62)
4.4 - Simulation du convertisseur Boost	(63)
4.5 - Algorithme P&O	(64)
4.6- Simulation des algorithmes MPPT	(64)
4.6.1 Résultats et discussions.....	(64)
4.6.2 influence de l'irradiance	(65)
4.6.3 Résultats et discussions.....	(66)
4.7- Conclusion	(68)

Conclusion générale

Liste des symboles

P : puissance[w]

α : Rapport cyclique.

R_s : Résistance série de la cellule PV.

I_{PH} : Courant de la cellule PV (Photo-Courant).

I_D : Courant circulant dans la diode.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

D : diode

q : charge d'électron (1.602×10^{-19} C)

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/k)

n : facteur de non idéalité de la jonction

T : température effective de la cellule en Kelvin

V_{oc} : la tension de circuit ouvert

I_{cc} : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A].

V_{co} : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].

I_{cs} : courant de cellules en série.

N_s : Nombre de cellules en série.

N_P : Nombre de cellules en parallèle.

P_{MAX} : Puissance maximale

S : le transistor de convertisseur statique

L : l'inductance de filtre de convertisseur statique

I_L : Courant moyen passant à travers l'inductance

V_{PPM} / V_{OPT} : Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

I_{PPM} / I_{OPT} : Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

k_1 : est une constante de proportionnalité

V_{ref} : tension de référence

I_{ref} : courant de référence

k_2 : constante de proportionnalité

E : L'erreur

ΔE : changement d'erreur

PV : Photovoltaïque.

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, 'Maximum Power Point Tracking'.

GPV Générateur Photovoltaïque.

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu...

CS : convertisseur statique

PPM : Point de Puissance Maximale.

FF: Facteur de Forme

P_{in}: Puissance fournie par le Soleil

η: Rendement

DC/AC : Courant Continu / Courant Alternatif

V_{OUT}=V_o : tension à la sortie du convertisseur

V_{in}=V_i : tension à l'entrée du convertisseur

Δi_L : Augmentation du courant i_L

D : diode

I_S : Courant dans le switch

I_L : Courant moyen passant à travers l'inductance

V_{mpp} : Tension au MPP

I_{mpp} : Courant au MPP

S : switch

List des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Des panneaux photovoltaïques	(3)
Figure 1.2. Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium	(5)
Figure1.3. Répartition de la production des cellules	(5)
Figure 1.4.Cellule solaire mono- cristalline	(6)
Figure 1.5. cellule poly cristalline	(6)
Figure 1.6.Cellule Amorphe	(7)
Figure1.7.panneau à couche mince	(7)
Figure 1.8. cellule CdTe	(7)
Figure1.9. Cellule Solaire multi – jonctions	(8)
Figure.1.10. Cellule Solaire organique	(8)
Figure1.11. Cellule Solaire à colorant	(8)
Figure1.12. Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement	(8)
Figure 1.13. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque avec R_s et R_{sh}	(9)
Figure 1.14. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	(10)
Figure 1.15. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^\circ\text{C}$ d'une cellule photovoltaïque	(12)
Figure 1.16 Influence de la température sur les caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $E=1000\text{ W/m}^2$ d'une cellule photovoltaïque	(13)
Figure 1.17. Module photovoltaïque	(14)
Figure 1.18. Influence de l'association des cellules en série sur un module photovoltaïque	(15)
Figure 1.19. Influence de l'association des cellules en parallèle	(15)
Figure 1.20. Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série	(16)
Figure.1.21. Défaut d'ombrage partiel	(18)
Figure .1.22. Exemples d'association sécurisée de deux modules PV.....	(18)

Figure 1.23. Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV	(19)
Figure 1.24. Caractéristiques $I(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un générateur PV	(20)
Figure 1.25. sur le toit	(21)
Figure 1.26. sur la façade	(21)
Figure 1.27. Pourcentage approximatif de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison	(22)
Figure 1.28. Installation photovoltaïque autonome	(23)
Figure 1.29. installation photovoltaïque hybride autonome	(24)
Figure 1.30. Installation photovoltaïque couplée au réseau	(25)

Chapitre 2

Figure 2.1. Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour	(26)
Figure 2.2. Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC	(27)
Figure 2.3. Principe de l'adaptation d'impédance par MPPT	(28)
Figure 2.4. Hacheur	(29)
Figure 2.5. Hacheur série (Buck)	(30)
Figure 2.6. Circuits équivalents du convertisseur Buck : (a) S fermé, (b) S ouvert	(30)
Figure 2.7. Formes d'ondes du convertisseur Buck	(31)
Figure 2.8. Schéma du convertisseur Boost	(33)
Figure 2.9 Circuits équivalents du convertisseur Boost : (a) S fermé, (b) S ouvert	(33)
Figure 2.10. Formes d'ondes du convertisseur Boost	(34)
Figure 2.11. Schéma du convertisseur Buck-boost	(36)
Figure 2.12. Circuits équivalents du convertisseur Buck-boost : (a) S fermé, (b) S ouvert	(36)
Figure 2.13. Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs	(38)

Figure 2.14. Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs	(38)
--	------

Chapitre 3

Figure 3.1. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	(41)
Figure 3.2. Principe de la commande MPPT	(41)
Figure 3.3 Algorithme de la Tension Constante	(45)
Figure 3.4 Algorithme du constant courant	(47)
Figure 3.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O)	(49)
Figure 3.6 l'algorithme de P&O classique	(50)
Figure 3.7 Divergence de la méthode P&O	(52)
Figure 3.8 algorithme du poids d'un troisième point	(53)
Figure 3.9 caractéristique de tension-puissance du panneau	(54)
Figure 3.10 l'algorithme IncCond classique	(56)
Figure 3.11 structure de base de la commande floue	(58)

Chapitre 4

Figure 4.1 Schéma bloc sous Simulink du système global	(62)
Figure 4.2 Modèle de simulation du GPV	(62)
Figure.4.3 Modèle de simulation du CS BOOST	(63)
Figure 4.4 Schéma de block de la commande MPPT : P&O	(64)
Figure.4.5 la puissance du panneau après et avant boost.....	(65)
Figure.4.6 influence de l'irradiance	(66)
Figure 4.7 Variation de la puissance de sortie panneaux 80 WATT	(67)
Figure 4.8 Puissance PV en fonction de la tension	(67)

Table des tableaux

Chapitre 1

Chapitre 2

Tableau 2.1. Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continus-continu.....(39)

Chapitre 3

Tableau 3.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.... (58)

Chapitre 4

Tableau 4.1 Paramètres du convertisseur DC-DC boost.....(63)

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire. On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par des commande classique (commande MPPT : perturbation et observation, hill climbing, incrémental conductance) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. L'objectif de ce travail est d'étude à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande MPPT lorsqu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité. Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous allons brièvement décrire les cellules solaires et le principe de la conversion photovoltaïque. Les différentes caractéristiques de celle-ci seront détaillées ainsi les différentes configurations des systèmes photovoltaïques.
- dans le deuxième chapitre, est consacré à l'étude du convertisseur DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques ainsi que le convertisseurs DC-DC à savoir : le Buck, le Boost, et le Buck-Boost. Où on a expliqué leurs et Nous avons choisi le type du convertisseur approprié
- Dans le troisième chapitre, on étudiera les différentes techniques de la recherche du point de puissance maximale MPPT
- Dans le quatrième chapitre des simulations et des tests des techniques MPPT

A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

1.1. Introduction :

Le soleil constitue une réserve d'énergie renouvelable inépuisable et gratuite. L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique qui peut être exploitée directement après un étage d'adaptation. L'énergie solaire photovoltaïque offre une réponse durable aux enjeux énergétiques actuels. Elle contribue à limiter les émissions de CO₂ dans l'atmosphère et constitue une alternative aux énergies fossiles. (2)

Dans cette partie, nous allons présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous allons brièvement décrire les cellules solaires et le principe de la conversion photovoltaïque. Les différentes caractéristiques de celle-ci seront détaillées ainsi les différentes configurations des systèmes photovoltaïques.



Figure 1.1. Des panneaux photovoltaïques

1.2. Cellule photovoltaïque :

1.2.1. Effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921), mais, il faudra attendre jusqu'au 1954 pour que les trois chercheurs américains des laboratoires Bell, Chapin, Pearson et Prince, développent la première cellule PV avec un rendement énergétique ne dépassant pas 4,5%. (3)

Le préfixe « photos » vient du grec qui signifie lumière et « voltaïque » vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta lequel a énormément contribué à la découverte de l'électricité. Son nom est donné ainsi à l'unité de tension électrique le « volt » (4).

1.2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La figure 1.2 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

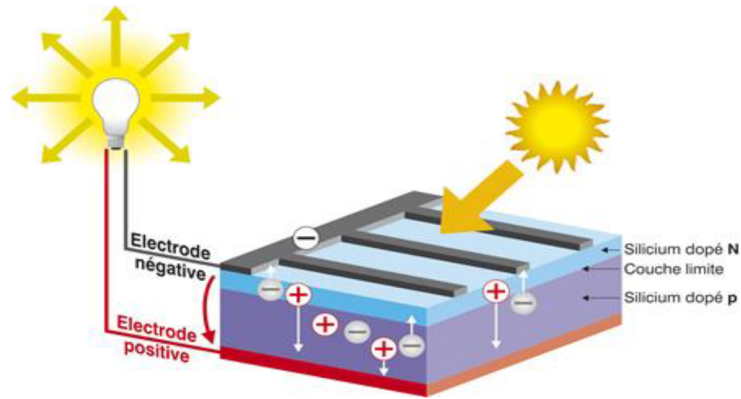


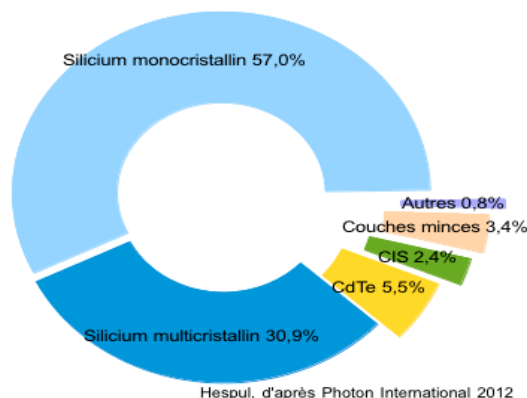
Figure 1.2. Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium

Comme pour le cas d'une diode classique, une cellule PV peut donc être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée positivement et l'autre dopée négativement. Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel (5).

1.2.3. Technologies des cellules solaires :

Le matériau de base, utilisé dans la fabrication des cellules PV, est dans la plupart des cas le silicium cristallin. Cette technologie présente plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui, dont 57.0 % pour le silicium monocristallin et 30.9 % pour le silicium multi-cristallin. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly cristalline, ou mono cristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe), Indium Gallium Phosphide (InGaP), et Cu(InGa) Se2 comme indique dans la **Figure 1.3.**

Répartition de la production des cellules 2011



Hespul, d'après Photon International 2012

Figure1.3. Répartition de la production des cellules

Le choix parmi ces différentes technologies dépend du prix et du rendement énergétique (06).

A cet effet, il appert qu'il existe une grande variété de cellules solaires qui peuvent être regroupées, en trois générations à savoir :

a - Cellules solaires de la première génération :

✚ Silicium cristallin : Le silicium cristallin (mono ou poly-cristallin) est utilisé comme matériau absorbeur. Ce matériau a pour avantage d'être très abondant dans la croûte terrestre, il offre un rendement élevé de (15 à 25 %), mais l'inconvénient de cette technologie est l'utilisation d'un silicium très pur; dont l'épaisseur est d'environ 200 μm , ce qui entraîne des coûts de matière première très élevés.

✚ Cellule de MWT : Les cellules de MWT (Metal Wrap Through) sont innovantes et parviennent à améliorer le rendement des cellules poly-cristallines (poly-Si). Ces cellules atteignent un rendement supérieur à 20 %. La technologie MWT présentera en 2020 plus de 60 % du marché mondial. L'avantage de celles-ci est l'utilisation de substrats à faible coût.



Figure 1.4.Cellule solaire mono- cristalline

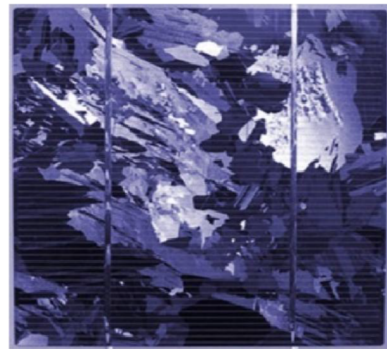


Figure 1.5. cellule poly cristalline

b - Cellules solaires de la deuxième génération :

La seconde génération de cellules est basée sur les matériaux en couches minces. Elle permet d'utiliser des couches semi - conductrices absorbeurs beaucoup plus fins d'environ 2 μm d'épaisseur, au lieu de 200 μm nécessaires pour les cellules au silicium monocristallin. Les principaux matériaux utilisés comme absorbeurs en couches minces sont :

✚ Silicium amorphe (a-Si) : Les cellules PV à base de silicium amorphe (Figure 1.9) sont les cellules les moins chères du marché mais le rendement de conversion théorique est faible d'environ 25 %. Actuellement, le rendement record est de 10,7 %.

✚ Cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) : Un rendement record d'environ 21,5 % a été obtenu par la société First Solar en février 2015.

✚ Cellules à base de di-séléniure de cuivre et d'indium (CIS) : Le rendement record obtenu avec le matériau CIGS est de 20,4 %.

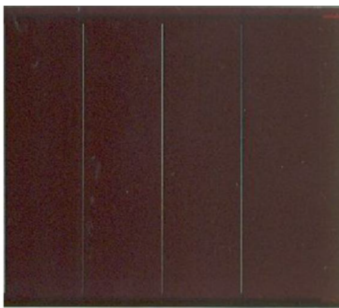


Figure 1.6.Cellule Amorphe

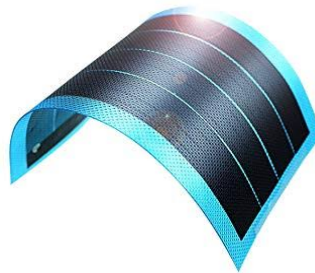


Figure1.7.panneau à couche mince

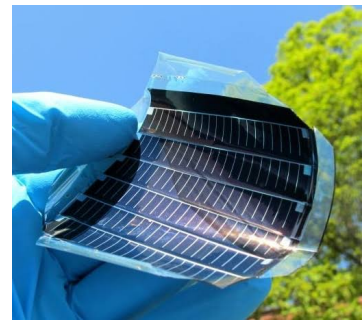


Figure 1.8. cellule CdTe

c - Cellules solaires de la troisième génération :

Cette génération est encore au stade de la recherche. Leur développement est très actif, pour minimiser les inconvénients et les obstacles rencontrés dans les générations précédentes. Les principales cellules de cette génération sont :

✚ Cellules multi jonctions : Elles sont conçues à partir de plusieurs cellules superposées (GaInP/GaInAs/Ge) et utilisées pour des applications spatiales à cause du coût de fabrication très élevé.

✚ Cellules photovoltaïques à concentration (CPV) : Les cellules CPV utilisent des dispositifs optiques tels que : les miroirs paraboliques ou les lentilles, la société Solar Junction a récemment obtenu des rendements record d'environ 43,5%.

✚ Cellules solaires à colorant (Gratzel) : Elles sont développées dans le début des années 90 par le Pr Graëtzl et son équipe de recherche, s'inspirant du phénomène de la photo - synthèse, ce genre de cellules représente un rendement de 10,4 % en laboratoire obtenu par la société Sharp.

✚ Cellules solaires organiques : Ce genre de cellules se compose d'une couche active, constituée à son tour de plusieurs couches de polymère. Elles sont encore à l'état de recherche avec des rendements ne dépassant pas 5 %. (7)

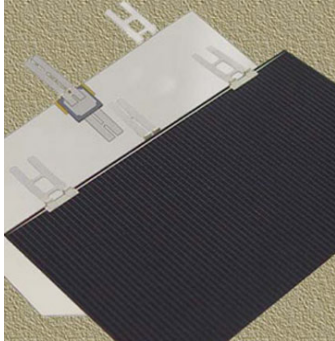


Figure1.9. Cellule Solaire multi - jonctions



Figure.1.10. Cellule Solaire organique



Figure1.11. Cellule Solaire à colorant

1.2.4. Caractéristique courant – tension d'une cellule solaire :

La caractéristique I-V, sous éclairement et sous obscurité est montrée sur la **figure 1.12**. I_{cc} ; est le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert V_{co} : est la tension aux bornes de la cellule pour un courant nul, son expression dans le cas d'une cellule solaire idéale est :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$$

Et P_m : est la puissance maximale.

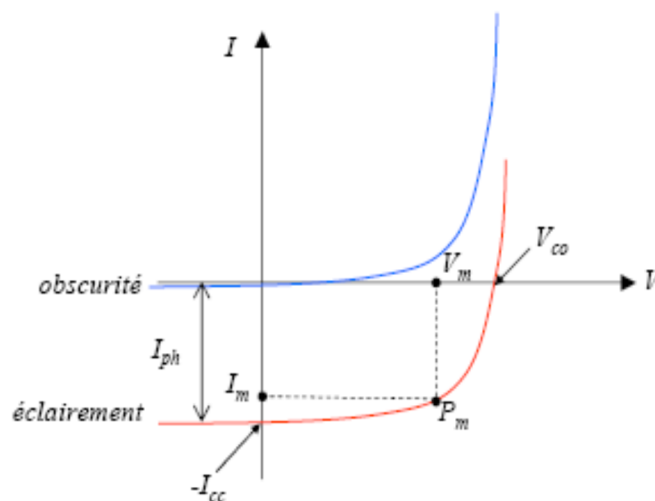


Figure1.12. Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement

Dans les faits, il existe plusieurs facteurs de perte de la conversion photovoltaïque au sein d'une cellule solaire. Ces pertes sont généralement dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée pour la réalisation de la cellule. On peut entre autres citer les pertes par effet Joule dues à la résistivité des différents contacts et celles des couches. Cette résistivité est modélisée par une résistance série (R_s). Cette dernière doit être idéalement la plus faible possible afin de limiter son influence sur les performances de la cellule solaire (dans le cas idéal, $R_s = 0$). La présence de tout courant de fuite causé par les recombinaisons et les défauts dans la structure est traduite par une résistance parallèle ou shunt (R_{sh}). Celle-ci doit être idéalement la plus élevée possible (dans le cas idéal, $R_{sh} = \infty$). Enfin les recombinaisons des porteurs dans la zone de charges d'espace sont traduites par un coefficient d'idéalité n supérieur à l'unité. En tenant compte de tous ces paramètres, on obtient alors le circuit électrique de la **figure 1.13**.

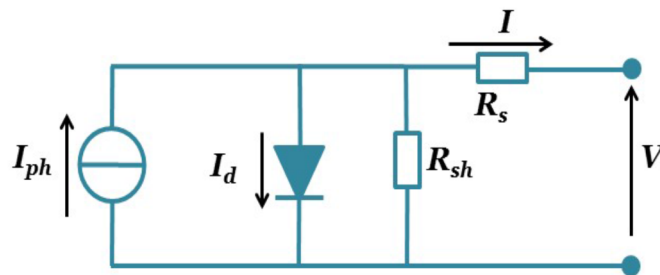


Figure 1.13. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque avec R_s et R_{sh}

D'autres facteurs peuvent également engendrer des pertes non négligeables du rendement de conversion d'une cellule photovoltaïque. Citons par exemple :

- ✚ L'absorption partielle des photons incidents : les photons incidents d'énergie inférieure au gap du semi-conducteur ($h\nu < E_g$) ne peuvent générer de paires électron trou et sont donc perdus.

- ✚ Les pertes par thermalisation : un photon incident d'énergie supérieure au gap ($h\nu > E_g$) ne génère qu'une seule paire électron-trou; l'excès d'énergie est transféré sous forme de chaleur dans le matériau.

- ✚ Les pertes dues à la réflexion des rayonnements lumineux incidents à la surface : seule une partie du rayonnement solaire est absorbée, l'autre partie étant réfléchi.

✚ Les pertes dues à la couverture partielle de la surface de la cellule par les contacts métalliques de la face avant.

D'après la **figure 1.13**, Le courant I issu de la cellule peut être exprimé en fonction de la tension appliquée V , de manière générale, avec l'expression suivante :

$$I(V) = I_{Ph} - I_0 \cdot \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n(k_B T)}\right) - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}}$$

Où : I_0 est le courant de saturation, n est le coefficient d'idéalité de la diode, K_B est le constant de Boltzmann, T représente la température de la cellule et q la charge électronique élémentaire.

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension $I(V)$. Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe $I-V$ vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie (**figure1.14**).

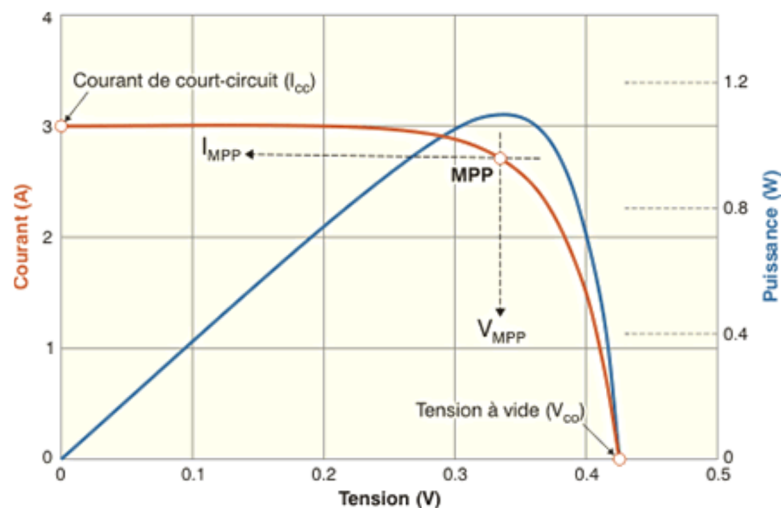


Figure 1.14. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Donc d'après la **figure**, on peut définir les paramètres suivants :

✚ La tension de circuit-ouvert, notée V_{CO} : tension maximale aux bornes de la cellule à courant nul ($I = 0$), elle dépend essentiellement de la température de la cellule et du spectre de l'éclairement.

✚ Le courant de court-circuit, noté I_{CC} : est le courant circulant dans la cellule à tension nulle ($V = 0$) ; il dépend principalement de l'intensité de la lumière et de la surface de la cellule.

✚ Point de puissance maximale (PPM) : La partie intéressante de la caractéristique $I(V)$, pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie. Donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert (ou la tension à vide), ni au point de court-circuit, qui ne génèrent aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension ($P = V.I$). Le point de puissance maximale est le point de fonctionnement M (V_{PPM} , I_{PPM}) pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale.

✚ Le facteur de remplissage (Facteur de Forme) : noté FF, désigne le rapport entre puissance maximale fournie (P_m) sur le produit $I_{CC} V_{CO}$. Il est toujours inférieur à 1.

✚ Le rendement de conversion (η) de la cellule : est défini par le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance du rayonnement solaire incident (P_{in}) sur la cellule photovoltaïque **(09)** :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF.I_{CC}.V_{CO}}{P_{in}}$$

Avec :

$$V_{CO} = \frac{n.K_B.T}{q} \times \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right)$$

1.2.5. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

L'éclairement et la température sont les deux principaux paramètres qui vont modifier les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, et en particulier la puissance fournie par la cellule photovoltaïque. Pour mieux comprendre le

fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, on trace ses caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ pour plusieurs valeurs d'ensoleillement et de températures.

a- Influence de l'éclairement E (W/m^2) :

Au cours d'une journée, le niveau d'éclairement d'une cellule va varier entre $E=0 \text{ W/m}^2$ et $E=1000 \text{ W/m}^2$. Il est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant-tension en fonction du niveau d'éclairement. D'après la **Figure 1.15**, les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque varient avec l'éclairement solaire (irradiation). On a remarqué que quand l'éclairement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît. La valeur de courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement. Quant à la tension, elle est peu sensible aux variations des niveaux d'éclairement. Les courbes $I(V)$ se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante. La puissance optimale de la cellule photovoltaïque est pratiquement proportionnelle à l'ensoleillement. Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

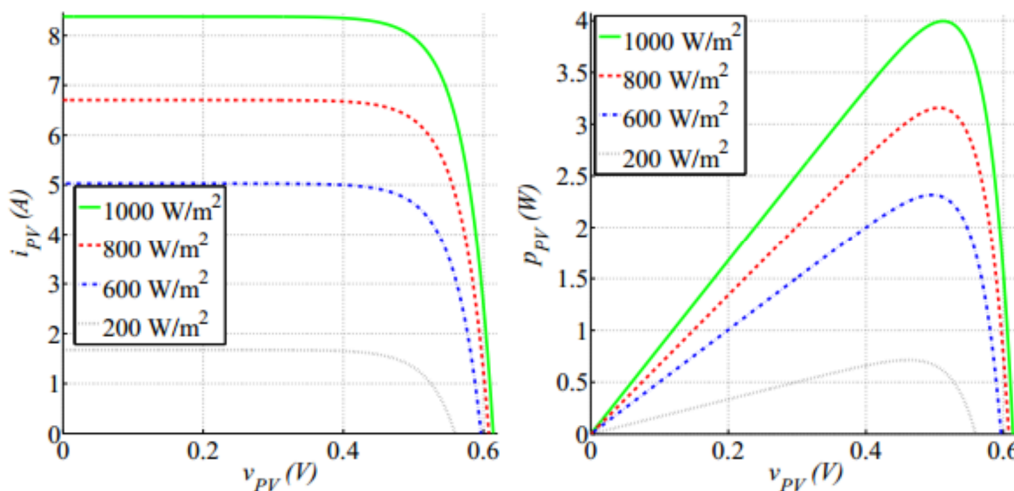


Figure 1.15. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^\circ\text{C}$ d'une cellule photovoltaïque

b. Influence de la température :

La température est aussi un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont sensibles à la température (10).

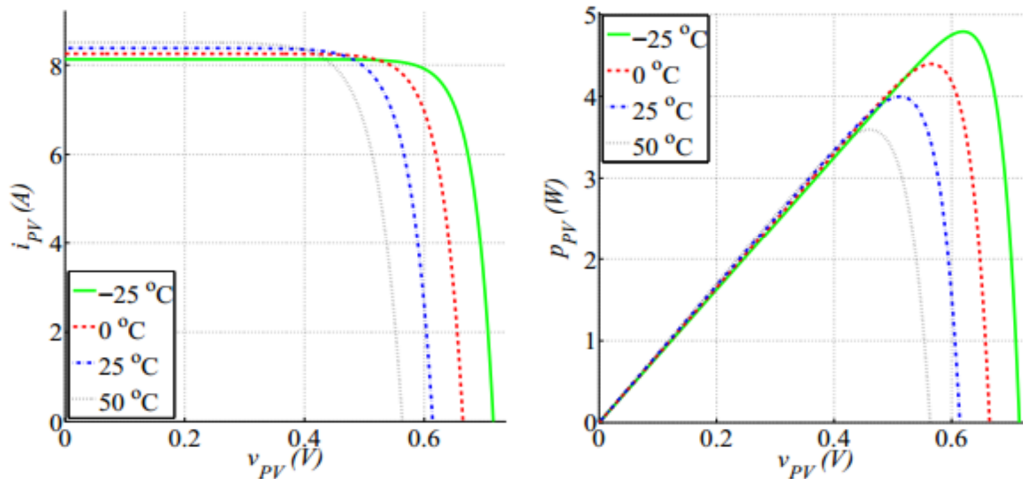


Figure 1.16 Influence de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ à $E=1000$ W/m^2 d'une cellule photovoltaïque

La Figure 1.16 ci-dessous montre clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur de la cellule. La tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. L'ordre de grandeur des pertes est de 2.3 mV / par degré Celsius / par cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05 % par degré Celsius). On peut remarquer sur la Figure 1.16 que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible (11).

1.3. Générateur Photovoltaïque GPV :

1.3.1. Constitution D'un Générateur Photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. Ces cellules

sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et d'une bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'un polyéthylène. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées (12).



Figure 1.17. Module photovoltaïque

a. Association en série

Une association de N_s modules en série permet d'augmenter la tension du module Photovoltaïque. Les modules sont alors traversés par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque module.

$$V_{oc, ns} = N_s \cdot V_{oc}$$

Avec

$$I_{cc, ns} = I_{cc}$$

V_{oc-ns} : Tension en circuit ouvert pour l'association série

I_{cc-ns} : Courant de court-circuit pour l'association série

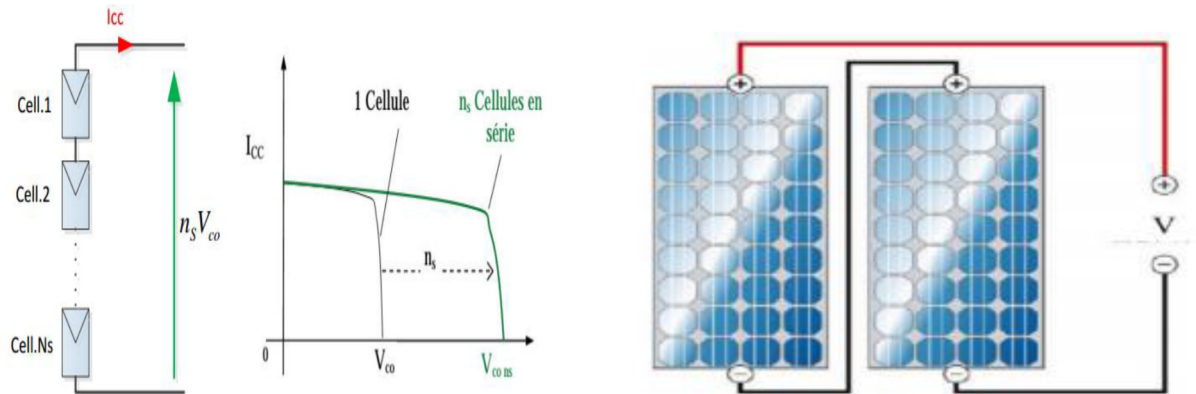


Figure 1.18. Influence de l'association des cellules en série sur un module photovoltaïque

b. Association en parallèle :

Une association de N_P modules en parallèle est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de modules identiques connectés en parallèle, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (13).

$$I_{cc, np} = N_p \cdot I_{cc}$$

Avec

$$V_{oc, np} = V_{oc}$$

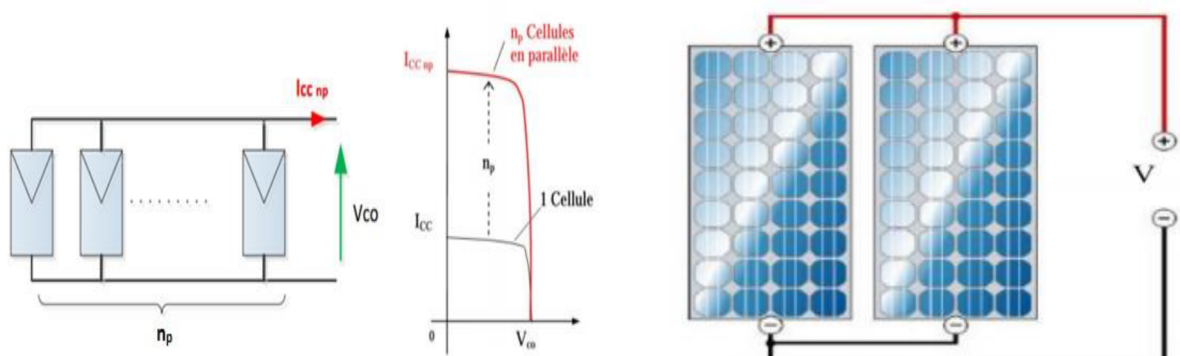


Figure 1.19. Influence de l'association des cellules en parallèle

c. Association mixte (série-parallèle) :

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s \times n_p$ (cellules x cellules). La caractéristique d'un générateur constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule et que l'ensoleillement et la température soient uniformes. **La Figure1.19** présente la caractéristique d'un module et d'un générateur composé de n_p modules en parallèle et de n_s modules en série. Comme pour la cellule élémentaire, les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque dépendent de la température et de l'ensoleillement. Les équations (1-5) et (1-6) résument les caractéristiques électriques d'une association $n_s \times n_p$ (cellules x cellules) :

$$I_{cc} = \sum_{np} I_{cci}$$

Avec :

$$V_{oc} = \sum_{ns} V_{coi}$$

Les modules commercialisés sont généralement composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications produisant une tension de 12V.

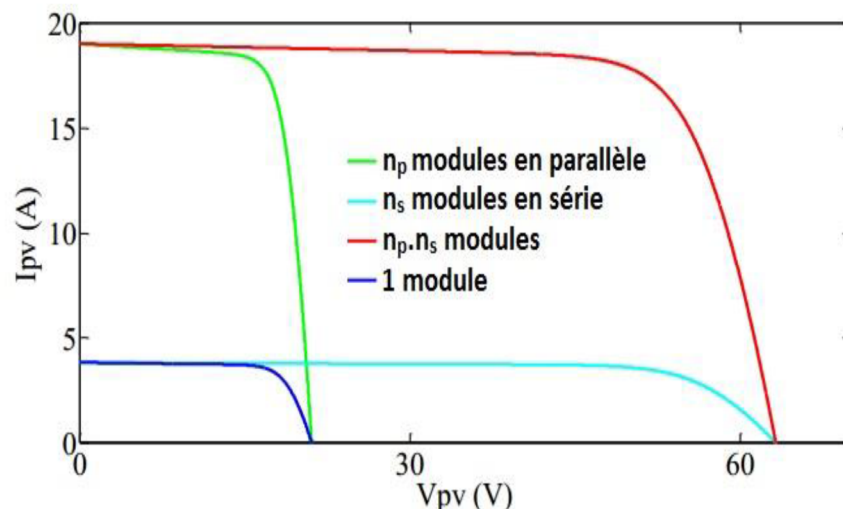


Figure 1.20. Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série (10).

1.3.2. L'ombrage partiel :

L'ombrage partiel est souvent inévitable en milieu urbain car dans certaines conditions, on ne peut pas garantir une irradiation homogène sur la totalité du générateur PV (ombres partielles sur le générateur PV, liées par exemple à des feuilles d'arbre tombées à l'automne, ombres d'infrastructures de bâtiments, des poussières sur l'ensemble des cellules..).

Il est considéré comme le défaut le plus couramment rencontré dans un générateur PV, ce défaut minimise fortement la puissance de sortie et rend parfois la commande des convertisseurs inefficace, Car la puissance délivrée par le générateur peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protections (diodes by-pass) des cellules PV se mettent en conduction.

Ainsi, lorsqu'une ou plusieurs cellules d'un générateur PV sont éclairées différemment par rapport à ses proches voisines, un comportement dégradé apparaît pour le générateur PV, les cellules recevant moins d'énergie doivent dissiper le surplus de courant délivré par celles qui sont les plus éclairées, créant ainsi des échauffements (haut spot) si le module n'est pas protégé de manière adéquate. Et Pour éviter la surchauffe de la cellule et les points chauds, les diodes de dérivation sont placées dans des boîtes de connexion, ce qui limite la tension inverse de la cellule ombrée, et ce qui limite la température. Néanmoins, si la distribution des diodes de dérivation n'est pas appropriée ou il y a un mauvais fonctionnement de ces diodes, la cellule ombrée peut surchauffer, pouvant aller jusqu'à la destruction d'une partie du générateur PV si le défaut persiste. Ces phénomènes ont une incidence directe sur la production d'énergie et la puissance délivrée par le générateur peut alors fortement chuter par rapport à la puissance produite sous un éclairage homogène. En résumé, ce défaut doit être évité le plus possible sous peine de détériorer rapidement un générateur PV. Jusqu'à présent, pour éviter des détériorations définitives, des diodes de protection sont placées sur les générateurs PV de forte puissance (diode by-pass). Cependant, ces protections sont coûteuses en perte du rendement(14).

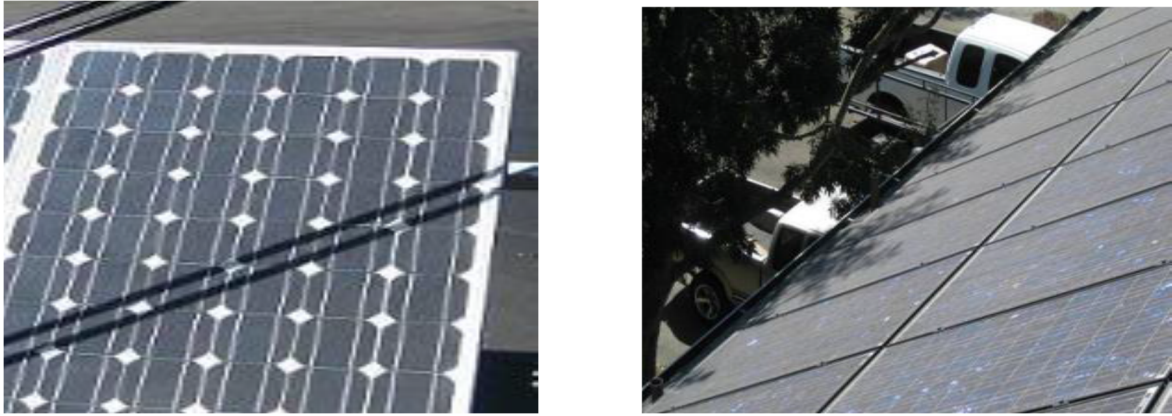


Figure.1.21. Défaut d'ombrage partiel.

1.3.3. Protections classiques d'un GPV :

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (**figure 1.22**) :

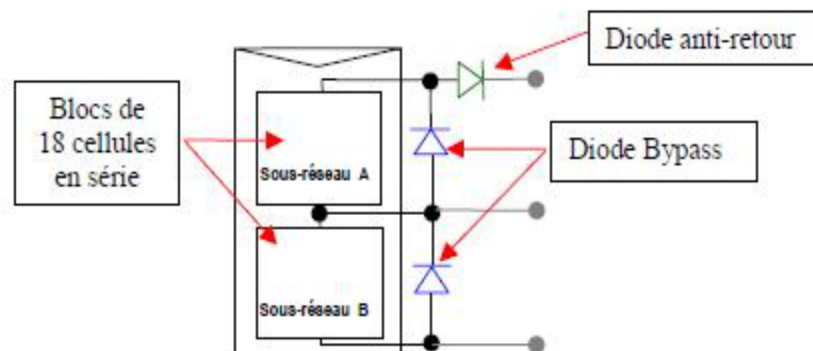


Figure .1.22. Exemples d'association sécurisée de deux modules PV

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

de sortie du générateur, comme illustré sur la figure 2.6, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance (15).

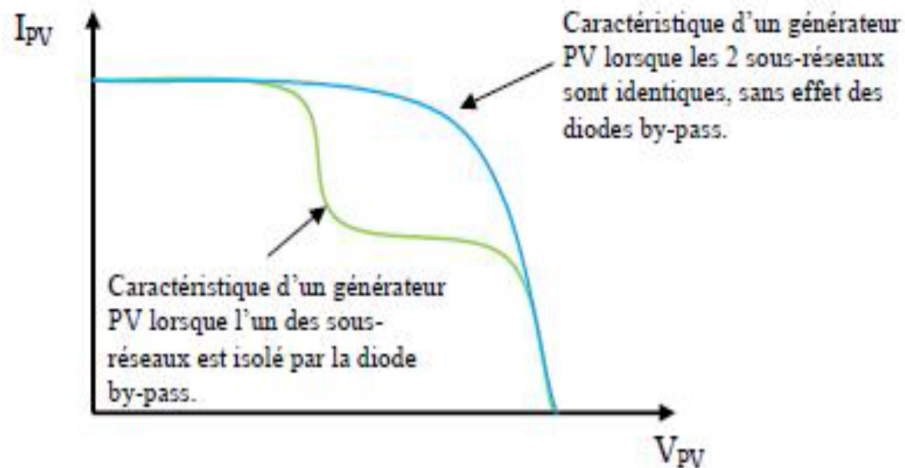


Figure1.23. Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV

1.3.4. Zone de fonctionnement d'un module photovoltaïque :

Nous pouvons décomposer la **figure1.24** suivant l'axe de la tension photovoltaïque V_{pv} en trois zones :

- **Zone 1** : elle est assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.
- **Zone 2** : elle est assimilable à un générateur de tension V_{co} , le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées.
- **Zone 3** : elle correspond au coude de cette caractéristique, le fonctionnement du générateur dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées. Un point optimal de puissance "MPP" (maximum power point) peut être identifié au point (I_{opt}, V_{opt}) . Par conséquent, ce point de fonctionnement permet d'exploiter au mieux le gisement solaire (16).

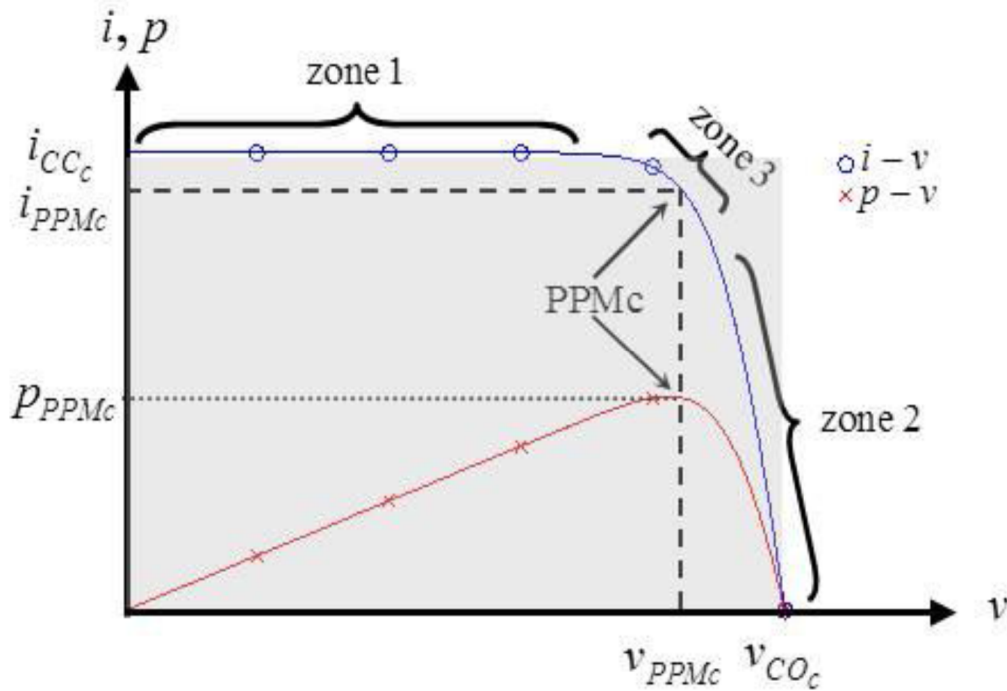


Figure 1.24. Caractéristiques (V_{pv}) et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un générateur PV

1.3.5. Installation des panneaux solaires

L'installation des panneaux solaires PV, peut être sur des supports fixes au sol ou sur des systèmes mobiles de poursuite du soleil appelés : trackers. Dans ce dernier cas, la production électrique augmente d'environ 30 % par rapport à une installation fixe. En dehors de centrales solaires, les installations fixes se font actuellement plutôt sur les toits des logements ou des bâtiments (Figure 1.25), soit en intégration de toiture, soit en façade d'immeuble (Figure 1.26). L'endroit de la pose doit être bien dégagé, aéré et protégé. Il est conseillé de laisser environ 10 cm sous les modules et de les poser avec une inclinaison d'au-moins de 10° pour assurer un auto-nettoyage lors des pluies(06).



Figure 1.25. sur le toit



Figure 1.26. sur la façade

1.3.6. Orientation et inclinaison des modules :

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leurs possibilités. Quand il est possible de choisir, l'orientation idéale d'un module photovoltaïque est très simple à déterminer : on le place vers l'équateur. Si on est dans l'hémisphère Nord, le module sera donc orienté vers le Sud, et si l'on est dans l'hémisphère Sud, il sera orienté vers le Nord. Le tableau ci-dessous donne le pourcentage approximatif de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison. L'orientation idéale est plein sud, à 30 degrés d'inclinaison. Avec la même inclinaison mais avec un capteur orienté plein est, la puissance reçue est seulement 10% moins bonne ce qui n'est pas rédhibitoire (17).

INCLINAISON ORIENTATION		0°	30°	60°	90°
EST		93 %	90 %	78 %	55 %
SUD-EST		93 %	96 %	88 %	66 %
SUD		93 %	100 %	91 %	68 %
SUD-OUEST		93 %	96 %	88 %	66 %
OUEST		93 %	90 %	78 %	55 %

Figure 1.27. Pourcentage approximatif de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison.

1.4. Système photovoltaïque :

En générale, un système photovoltaïque comporte un ensemble de sous systèmes distincts en relation entre eux, représentant un processus énergétique complexe. A savoir la structure porteuse rigide des composants du champ PV, qui est fixe ou mobile, le câblage, boîte de jonction, les éléments de protection, la batterie en cas nécessitant un stockage d'énergie et son régulateur, des convertisseurs DC/DC (hacheurs) et des convertisseurs DC/AC (l'onduleur) dans la majorité des cas les systèmes photovoltaïques ne contiennent aucune pièce mobile. Ils sont fiables, nécessitent peu d'entretien, silencieux, ne produisent aucune émission de polluants et ce sont des systèmes modulaires. Il existe plusieurs types de systèmes photovoltaïques :

1.4.1. Système photovoltaïque autonome :

Ce système fournit de l'électricité pour des régions non reliés au réseau. Il possède plusieurs domaines d'applications telles-que le pompage d'eau, les stations industrielles pour alimenter le système de protection, de surveillance et de comptage. Il est très utilisé dans les stations spatiales et les relais de communications. Ce

système, produit l'énergie électrique qui est utilisée directement ou stockée dans des batteries, comme est indiqué sur la **figure 1.28**

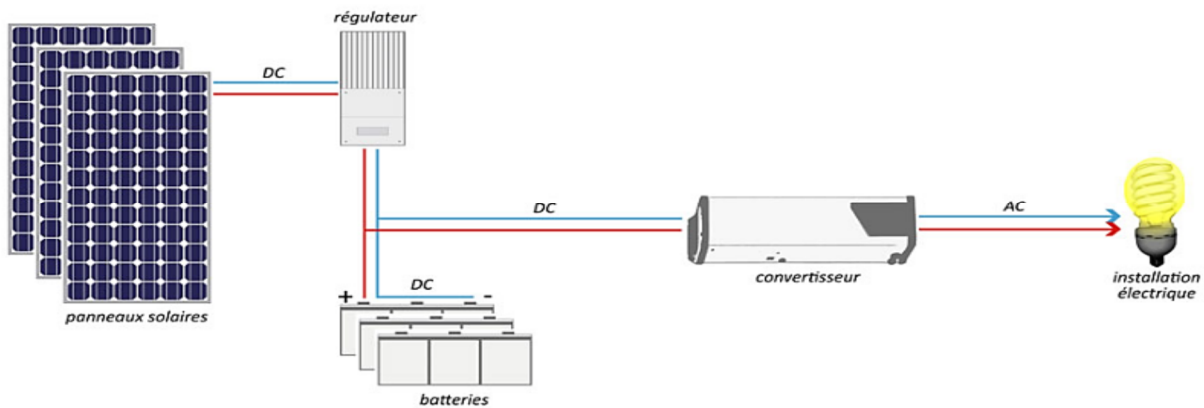


Figure.1.28. Installation photovoltaïque autonome

Malgré sa puissance limitée est variable selon la saison (conditions météorologiques), entraînant des perturbations qui risque de détruire la batterie par la décharge profonde. Par rapport au coût d'une extension de réseau centrale, cette industrie offre des résolutions économiques très importantes par leur conversion directe d'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.

1.4.2. Système photovoltaïque hybride autonome :

Les systèmes hybrides sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une ou plusieurs sources d'énergies renouvelables ou à un groupe électrogène, ou aux deux à la fois. Ces systèmes peuvent posséder des batteries qui peuvent aussi être rechargées par l'autre source en cas de décharge comme le montre la **figure 1.29**.

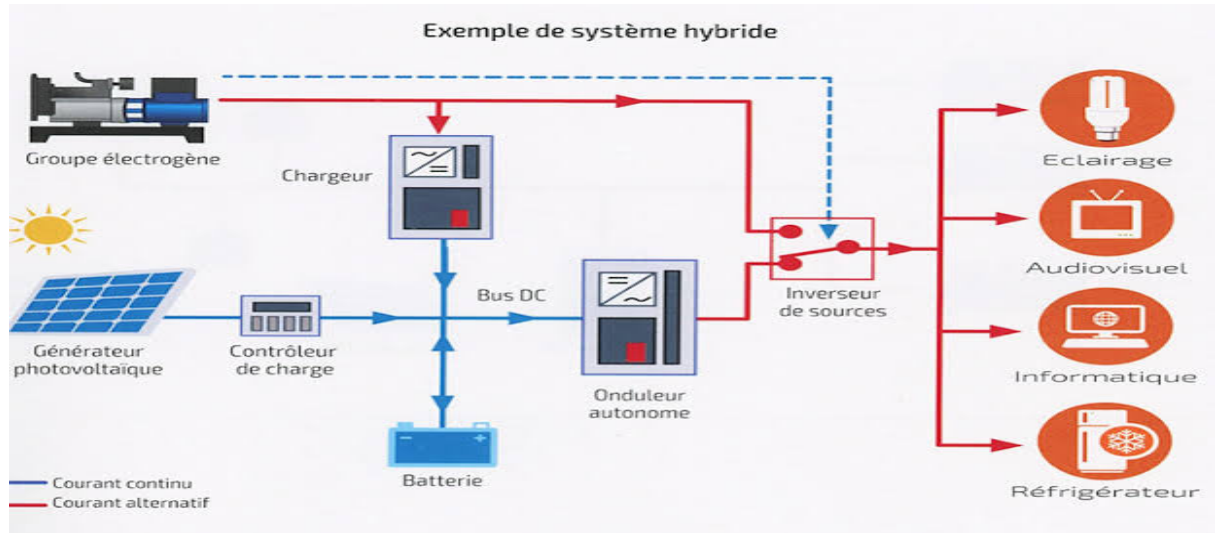


Figure.1.29. installation photovoltaïque hybride autonome

Les principaux avantages de l'hybridation sont l'amélioration de la qualité du service, l'extension de la durée du service, la réduction de la consommation de carburant (groupe électrogène) et assure une alimentation sans interruption pour la charge. Ces types d'installation concernent des applications comme des centres de sante, des écoles, banques et des ensembles résidentiels dans les pays en voie de développement.

1.4.3. Système photovoltaïque raccordé au réseau :

Dans ce système l'ensemble de l'installation est connectée au réseau de distribution après une adaptation des paramètres. L'énergie produite est soit consommée sur place par l'utilisateur et le surplus est injecté sur le réseau, où bien injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite. Ces dernières centrales peuvent être conçu avec ou sans stockage (18).

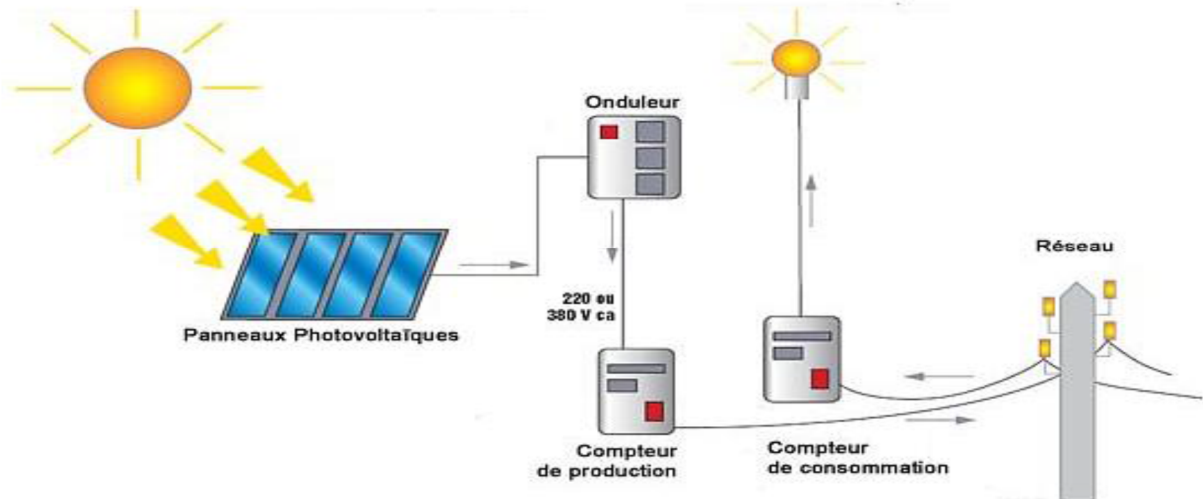


Figure1.30.Installation photovoltaïque couplée au réseau

1.5. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Inconvénients (20) :

- La fabrication du module photovoltaïque requiert un coût d'investissements élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 5-25 % avec une limite au laboratoire pour une cellule de 40% selon GuidEnR Photovoltaïque(<http://photovoltaique.guidenr.fr>) ;

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs comparativement aux générateurs diesel, mais ils deviennent plus rentables surtout dans des régions isolées où le transport du carburant coûte une fortune ;
- Le système de stockage de l'énergie est plus cher ;
- Tributaire des conditions météorologiques qui causent la diminution du rendement.

1.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude sur la production directe d'électricité à partir d'une irradiation solaire est présentée. Commenant par la définition de l'effet PV, en passant par la composition, la protection et l'installation des GPV. Différentes structures et applications des systèmes PV ont été exposées. On a tracé les caractéristiques de la cellule PV pour les différents paramètres influant. La caractéristique courant-tension est fortement non linéaire et présente un seul point de fonctionnement optimal. L'insertion de convertisseurs statiques avec une commande appropriée, entre le générateur et sa charge, permet d'optimiser le transfert de l'énergie. A cet effet, Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché et ou cours de développement, et malgré la fin du silicium annoncée depuis de nombreuses années, ce dernier garde une grande longueur d'avance sur les autres technologies. Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules.

2.1. Introduction :

Les systèmes utilisés en électrotechnique permettent de transformer la nature de l'énergie électrique et de convertir l'énergie électrique en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique, chimique, lumineuse...etc.). L'électronique, l'automatique et l'informatique s'intéressent essentiellement au traitement du signal (ou de l'information). Les systèmes de l'électrotechnique traditionnelle (machines tournantes, éclairage, chauffage, climatisation,...) permettant la conversion de l'énergie électrique, ne peuvent pas toujours être reliés directement à une source électrique. Il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter (de transformer) les caractéristiques de la source afin d'assurer le bon fonctionnement (et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie).

2.2. Convertisseurs DC/DC (Hacheur)

2.3. Connexion générateur photovoltaïque-charge

Il existe deux types:

2.3.1. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge :

Actuellement, beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge existent encore. Cette connexion en l'absence d'électronique est simple, fiable et de faible coût. Mais, elle ne garantit pas un transfert optimal de l'énergie du GPV vers la charge. Un autre inconvénient c'est que la connexion directe du GPV n'est pas valable sur une charge AC car le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, un étage d'adaptation de type onduleur est nécessaire (21). Cette configuration est illustrée à la figure 2.1, la diode anti-retour placée entre le GPV et la charge sert de protection. En effet, si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur. La batterie pourrait donc se décharger sur le GPV et en plus l'endommager.

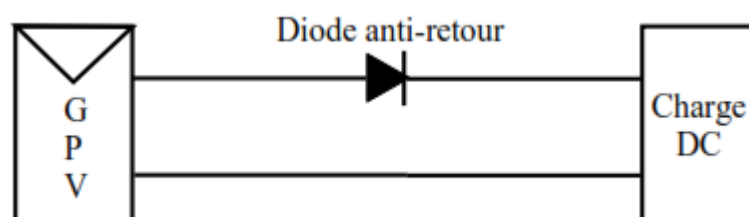


Figure 2.1. Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour

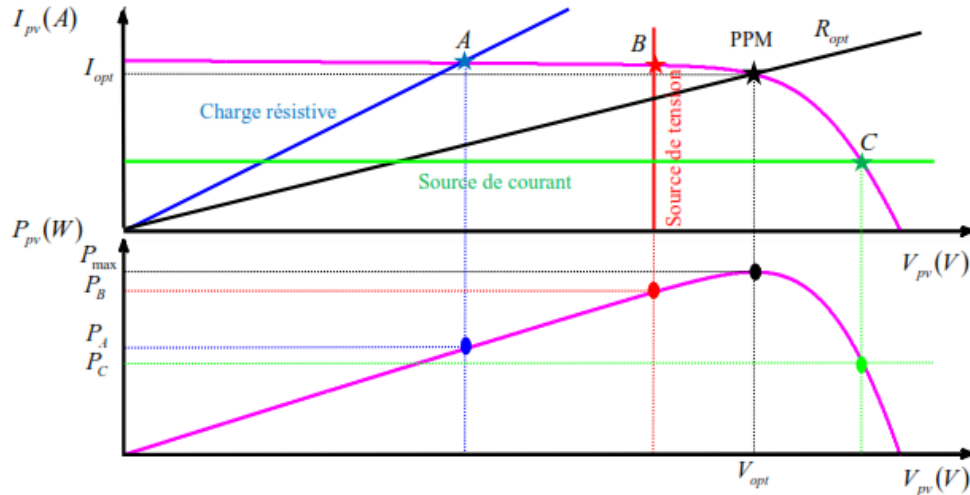


Figure 2.2. Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC

La charge DC peut être : une charge purement résistive, une charge de type source de tension ou une charge de type source de courant. Sur la figure 2.2, les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV sont représentées ainsi que les caractéristiques I-V des trois types de charges. Les points de fonctionnement A, B, C sont les points d'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et celles des trois types de charge. Le fonctionnement optimal s'obtient pour le PPM qui correspond à la tension optimale V_{opt} et au courant optimal I_{opt} . Pour ces trois points, les puissances fournies par le générateur sont respectivement P_A , P_B , P_C . Ces puissances sont toutes des valeurs de puissances inférieures à la puissance maximale disponible P_{max} . Donc, il faut remédier à ce problème par l'ajout d'un étage d'adaptation.

2.3.2. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation:

Lors de la construction d'un système PV, l'une des préoccupations majeures de conception est de trouver l'adaptation optimale entre les caractéristiques électriques des modules solaires, batteries et charge électrique. Une telle adaptation peut être aisément obtenue si la courbe de charge pouvait suivre les points du réseau de caractéristiques I-V des modules PV pour lesquels la puissance délivrée par ces modules devient maximum. La puissance maximale produite par les modules PV varie en fonction des fluctuations du rayonnement solaire. Par conséquent, la charge devra être reliée aux modules PV par le biais d'un convertisseur MPPT qui puisse suivre les PPM.

On constate que la pente en tout point de la caractéristique I-V du générateur est négative $Z_d = \frac{dv}{di}$ du GPV est toujours négative de part et d'autre du PPM. En ce dernier point de fonctionnement optimal, où la pente de la caractéristique P-V devient nulle, cette impédance vaut :

$$Z_{d\ opt} = \frac{dv}{di} = -\frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (2.1)$$

Alors, seule une charge dont la caractéristique passe par le point (I_{opt}, V_{opt}) permet d'extraire la puissance optimale. La valeur de cette charge vaut alors :

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = f(G, T) \quad (2.2)$$

L'utilisation optimale consiste alors à ce que la charge conserve à chaque instant sa valeur optimale R_{opt} lorsque les conditions varient. Dans le cas général, il y a peu de chance pour que la charge réelle suive naturellement ces variations. Il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire en insérant, entre le générateur et la charge électrique, un dispositif adaptateur d'impédance comme illustré dans **la figure 2.3**. Il est présenté deux cas de **figures (a) et (b)**, dans la première, la commande MPPT utilise les paramètres d'entrées **(22)**, et dans la seconde, la poursuite du PPM est basée sur les paramètres de sorties. La dernière structure est généralement conçue pour des systèmes ayant comme charge une batterie.

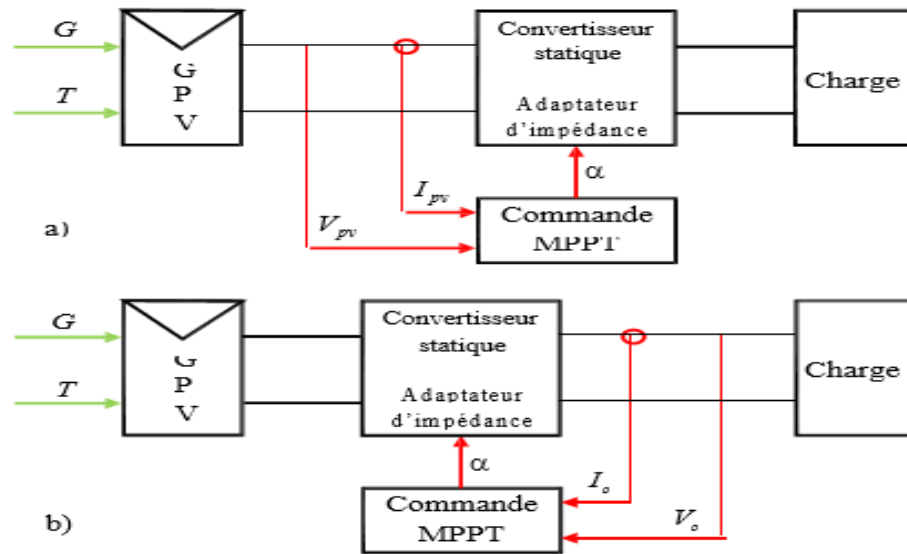


Figure 2.3. Principe de l'adaptation d'impédance par MPPT
 a) En utilisant les paramètres d'entrés
 b) En utilisant les paramètres de sorties

Ces adaptateurs d'impédance sont des convertisseurs DC-DC avec les différentes topologies possibles. On s'intéresse juste aux hacheurs sans isolation galvanique qui sont dépourvus de transformateur tels que : hacheur dévolteur ou abaisseur de tension, hacheur survolteur ou élévateur de tension, hacheur abaisseur élévateur de tension

2.4. Définition

Un convertisseur est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge

(21) Les convertisseurs sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

On distingue deux types de sources de tension :

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.
- Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace V et de la fréquence f .

Ce fonctionnement de convertisseur est réalisé par des moyens purement électroniques (semi-conducteurs), et permet :

Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique.

Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique Une réduction des masses et des volumes, mais aussi du bruit.

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu. Ils contrôlant la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé Comme la montre la figure **Figure.2.4**

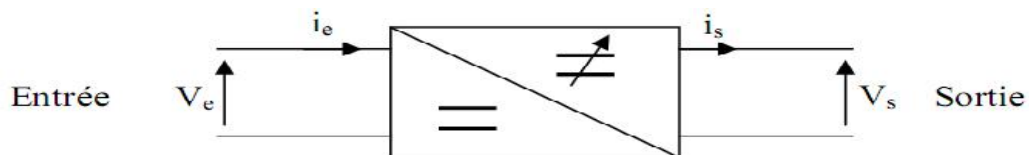


Figure. 2.4. Hacheur

2.5. Type de convertisseurs DC-DC

On distingue trois types de convertisseurs DC-DC: Les élévateurs (BOOST) dans

lesquels $V_{out} > V_{in}$. Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$.

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique le FLYBACK. SEPIC, ĆUK,

2.5.1 Convertisseur Buck

2.5.1.1. Définition :

Le hacheur série (Buck) est un convertisseur statique abaisseur qui permet de transformer une tension continue fixe a une tension plus faible réglable par l'utilisateur, il est constitué d'un interrupteur bicommandable de puissance, d'une diode, d'une inductance et d'un condensateur. Le hacheur série peut servir comme variateur de vitesse pour les moteurs à courant continu (23).

2.5.1.2. Schéma électrique du convertisseur Buck

Le schéma du hacheur (Buck) est présenté dans la figure (2.5).

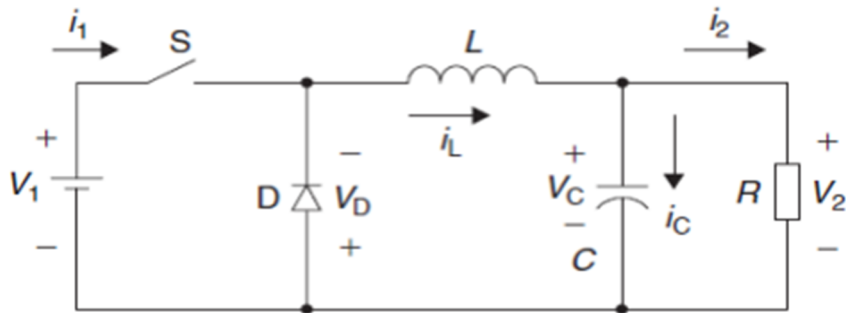


Figure 2.5. Hacheur série (Buck).

Les circuits équivalents du convertisseur sont montrés sur la figure (2.6).

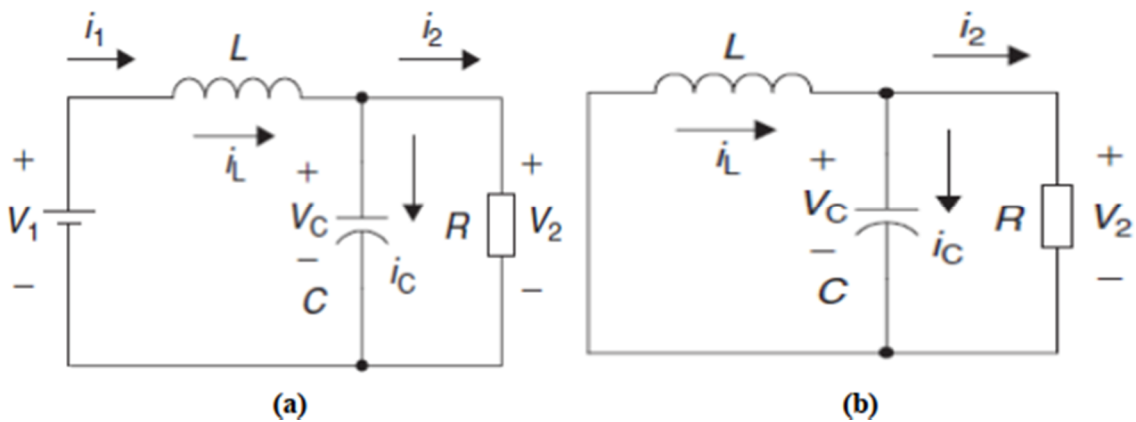


Figure 2.6. Circuits équivalents du convertisseur Buck : (a) S fermé, (b) S ouvert

2.5.1.3 Principe de fonctionnement

L'interrupteur **S** est fermé pendant la fraction du temps **dT** de la période de découpage **T**. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge **R** à travers l'inductance **L**. Lors du blocage du **S**, la diode **D** assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance sera déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées sur la **figure (2.7)**.

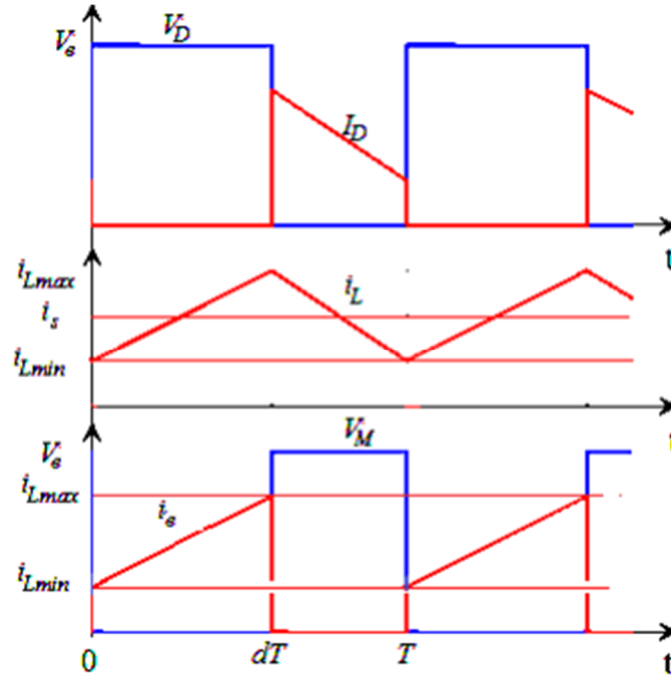


Figure 2.7. Formes d'ondes du convertisseur Buck

2.5.1.4 Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur **S** à l'état fermé sont données ci-dessous **(23)** :

$$V_L = V_1 - V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (2.4)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (2.5)$$

Δi_L Pour le commutateur fermé :

$$\Delta i_{lon} = \frac{(V_1 - V_2)dT}{L} \quad (2.6)$$

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur **S** à l'état ouvert sont données Ci-dessous :

$$V_L = -V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.7)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_2}{L} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-d)T} = \frac{-V_2}{L} \quad (2.9)$$

Δi_L Pour le commutateur ouvert :

$$\Delta i_{Loff} = -\left(\frac{V_2}{L}\right)(1-d)T \quad (2.10)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Par conséquent, le courant i_L traversant l'inductance sera le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = 0 \quad (2.11)$$

En substituant les **équations (2.6) et (2.10)** dans **(2.11)**, on obtient :

$$\left(\frac{V_1 - V_2}{L}\right)(dT) - \left(\frac{V_2}{L}\right)(1-d)T = 0 \quad (2.12)$$

Il résulte que :

$$V_2 = dV_1 \quad (2.13)$$

2.5.2- Convertisseur Boost

2.5.2.1- Définition

Le hacheur parallèle est un convertisseur statique permettant de convertir une tension continue constante à une autre tension continue réglable de valeur moyenne

plus grande. Il est constitué d'un interrupteur en parallèle avec le générateur, d'une diode, d'une inductance pour lissage de courant et d'un condensateur pour le filtrage de la tension (23).

2.5.2.2- Schéma électrique du convertisseur Boost

Soit le hacheur (Boost) présenté dans la figure (2.8)

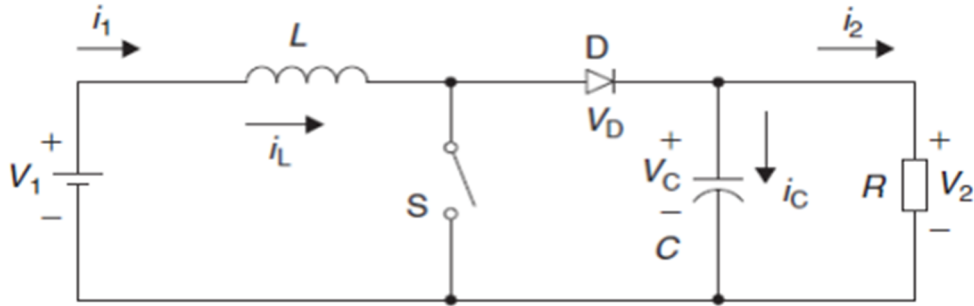


Figure 2.8. Schéma du convertisseur Boost

Les circuits équivalents du convertisseur sont montrés sur la figure (2.9)

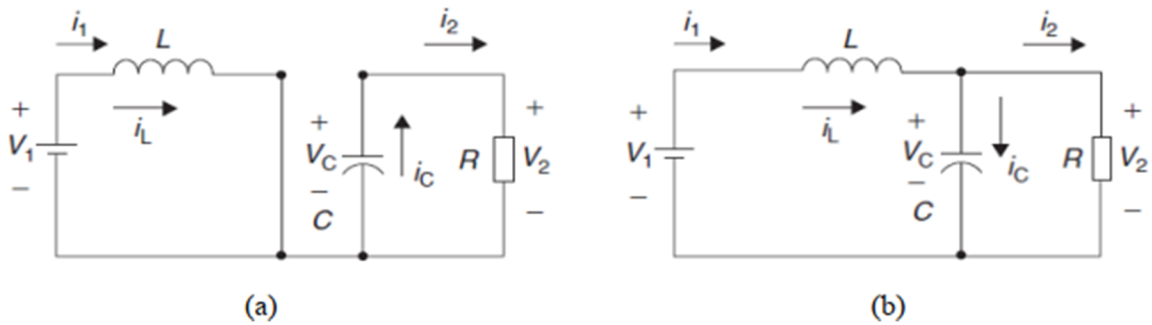


Figure 2.9 Circuits équivalents du convertisseur Boost : (a) S fermé, (b) S ouvert

2.5.2.3- Principe de fonctionnement

L'interrupteur est fermé pendant la fraction du temps dT de la période de découpage T . Le courant dans l'inductance croît progressivement, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Lors du blocage du transistor, la diode assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

Les formes d'ondes en CCM (mode de conduction continu) sont représentées sur la figure (2.10).

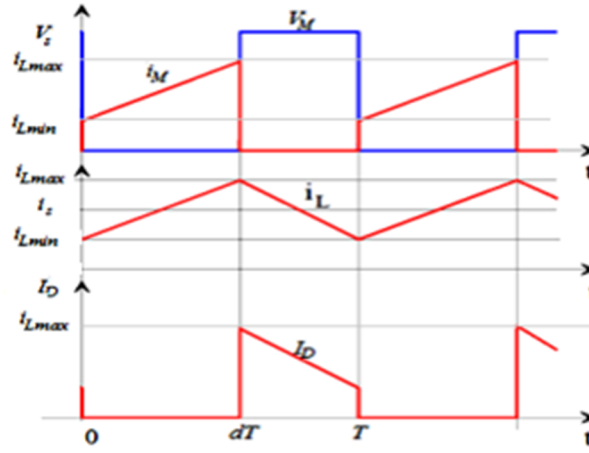


Figure 2.10. Formes d'ondes du convertisseur Boost

2.5.2.4 Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur **S** a l'état fermé sont données ci-dessous :

$$V_L = V_1 = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.14)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1}{L} \quad (2.15)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{dT} = \frac{V_1}{L} \quad (2.16)$$

Δi_L Pour le commutateur fermé :

$$\Delta i_{lon} = \frac{\Delta i_L}{dT} = \frac{V_1 dT}{L} \quad (2.17)$$

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur **S** a l'état ouvert sont données Ci-dessous :

A l'instant $t = dT$, La diode **D** devient conductrice, ce qui donne :

$$V_L = V_1 - V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.18)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (2.19)$$

Soit Δi_L l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-d)T} = \frac{V_1 - V_2}{L} \quad (2.20)$$

Δi_L Pour le commutateur ouvert :

$$\Delta i_{Loff} = - \left(\frac{(V_1 - V_2)(1-d)T}{L} \right) \quad (2.21)$$

Donc :

$$\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = 0 \quad (2.22)$$

$$\left(\frac{V_1 d T}{L} \right) + \frac{(V_1 - V_2)(1-d)T}{L} = 0 \quad (2.23)$$

Il résulte que :

$$V_2 = \frac{V_1}{1-d} \quad (2.24)$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique d . et comme ce dernier étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension. On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge. Dans la pratique, la boucle de régulation ne devra donc compenser que les variations de la tension d'entrée et les imperfections des composants réels **(23)**.

2.5.3. Convertisseur abaisseur Buck-boost

2.5.3.1. Définition

Le hacheur série parallèle ou inverseur est un convertisseur indirect DC–DC. Son rôle principal est de convertir la tension constante d'entrée à une tension supérieure ou inférieure mais de polarité inverse. La source d'entrée est de type tension continue montée en parallèle avec un condensateur et une charge résistive **(figure 2.11)**.

2.5.3.2- Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.

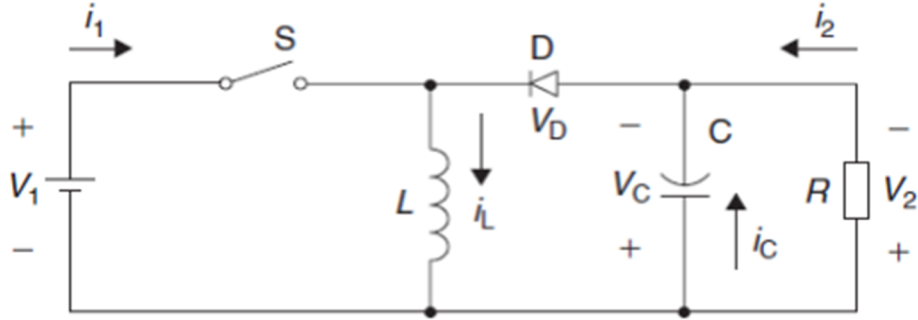


Figure 2.11. Schéma du convertisseur Buck-boost

Les circuits équivalents du convertisseur Buck-boost sont montrés sur **la figure (2.12)**

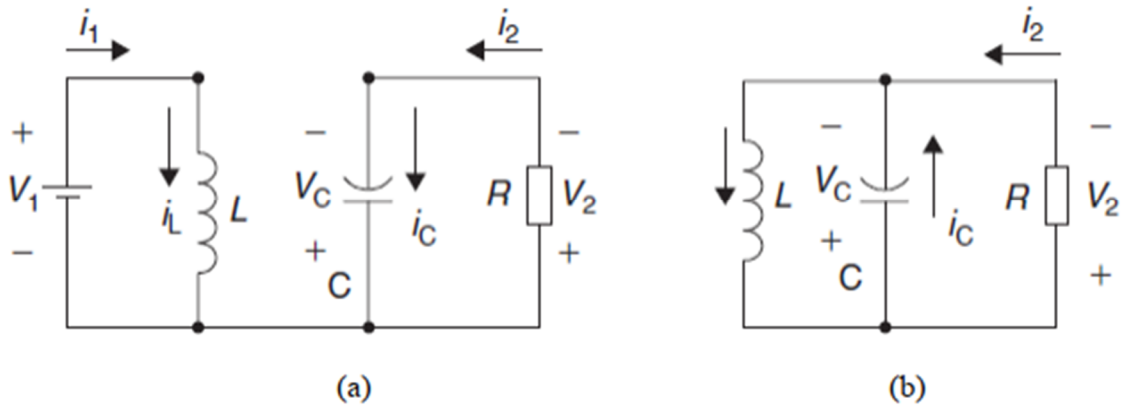


Figure 2.12. Circuits équivalents du convertisseur Buck-boost : (a) S fermé, (b) S ouvert.

2.5.3.3 Analyse du circuit pendant les positions ON et OFF de l'interrupteur

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur S a l'état fermé sont données Ci-dessous **(23)** :

$$V_1 = V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.25)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_1}{L} \quad (2.26)$$

Soit Δi_L l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{V_1}{L} \quad (2.27)$$

Δi_L Pour le commutateur fermé :

$$\Delta i_{lon} = \frac{V_1 dT}{L} \quad (2.28)$$

Les équations régissant le fonctionnement de l'interrupteur **S** à l'état ouvert sont données ci-dessous :

A l'instant **t = dT**. La diode **D** devient conductrice. Ce qui donne :

$$V_L = V_2 = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.30)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_2}{L} \quad (2.31)$$

Soit Δi_L l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-d)T} = \frac{V_2}{L} \quad (2.32)$$

Δi_L Pour le commutateur ouvert :

$$\Delta i_{Loff} = \frac{V_2(1-d)T}{L} \quad (2.33)$$

Donc :

$$\Delta i_{Lon} + \Delta i_{Loff} = 0 \quad (2.34)$$

$$\frac{V_1 dT}{L} + \frac{V_2(1-d)T}{L} = 0 \quad (2.35)$$

Il résulte que :

$$V_2 = -V_1 \left(\frac{d}{1-d} \right) \quad (2.36)$$

2.6. Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur :

Un panneau solaire PV est un générateur d'électricité continu basse tension. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur d'impédance entre la source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment

excepté le Buck, peuvent jouer ce rôle d'élévateur de tension. D'ailleurs, les structures Buck-Boost, Cuk et Sepic sont élévatrices pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le Boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices.

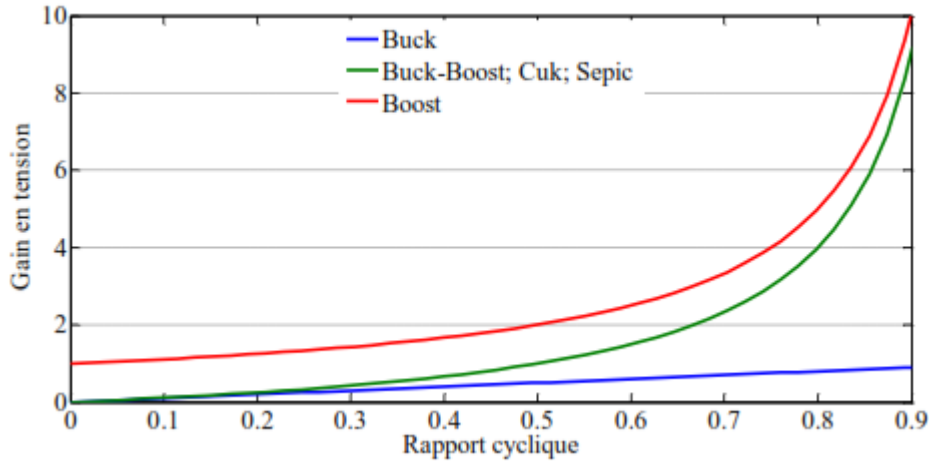


Figure 2.13. Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.

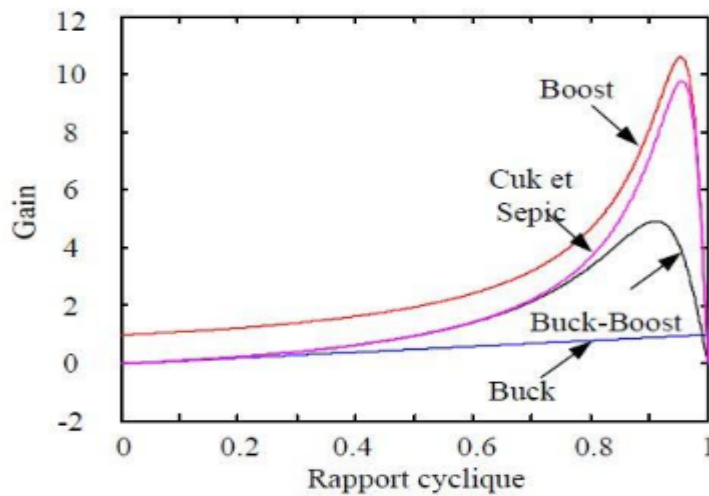


Figure 2.14. Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la figure 2.14 qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique. Enfin, une comparaison de ces convertisseurs est donnée par le Tableau 2.1 qui récapitule l'analyse faite auparavant sur les différents convertisseurs. On peut remarquer aussi que la diode **D** présente dans les convertisseurs Sepic et Boost peut jouer le rôle de protection du GPV ce qui permet de dispenser de la diode anti-retour et de faire des économies par rapport aux autres

topologies. Pour mieux différencier entre les convertisseurs, HUANG a tracé le gain en tension en fonction du rapport cyclique (**Figure 2.13**) en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs (**24**).

paramètres convertisseurs	Gain en Tension $\frac{V_s}{V_e}$	Contraintes en Tension $V_{k,max} = V_{d,max} $	Contraintes en Courant $i_{k,max} = i_{d,max}$
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$
cuk	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{e'}}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta I_L + \Delta I_{L'}}{2}$
sepic	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{e'} + \Delta V_s}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta I_L + \Delta I_{L'}}{2}$
Buck-boost	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$
buck	α	V_e	$I_L + \frac{\Delta I_L}{2}$

Tableau 2.1. Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les Type et les caractéristiques électriques des convertisseurs (convertisseur DC-DC). nous avons montré par simulation que la valeur moyenne de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique. Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost) pour le but d'utiliser la simulation dans le chapitre 4.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les commandes MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

3.1. Introduction

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques. Le développement du MPPT a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que finalement, un grand nombre de procédures et techniques ont été développés. Elles varient en complexité capteurs nécessaires, vitesse de convergence, coût, efficacité, matériel pour la réalisation, etc. (24)

3.2-Principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV

La figure 3.1 représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT classique. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont disponibles. (25)

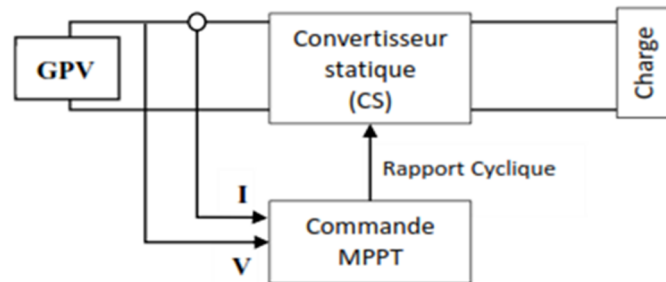


Figure 3.1. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

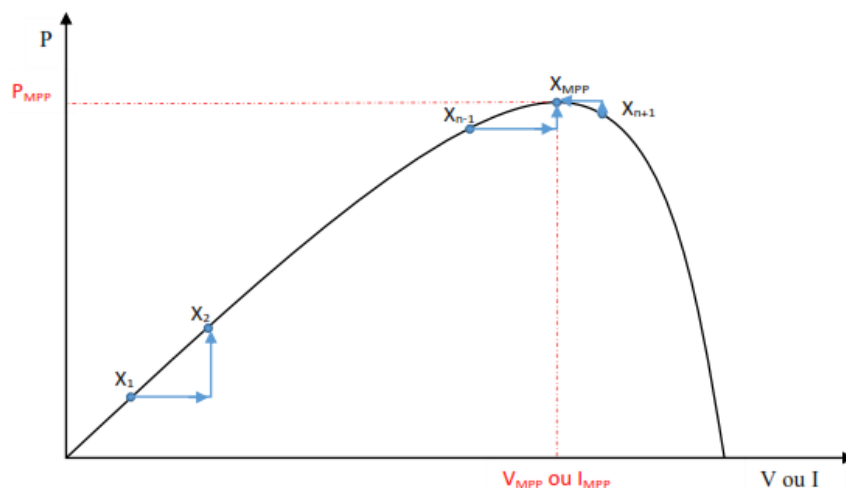


Figure 3.2. Principe de la commande MPPT

3.3 Classification Des Commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte.

Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT (26).

3.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.

A-Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb & Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction .

B-Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

3.3.2-Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

a- MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP.

Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques.

b-MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction.

4.4 Les Algorithmes MPPT

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont:

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Algorithme du Courant constant (Constant Current)
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe)
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)
- Les algorithmes P&O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de pente). (27)

4.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert V_{OC} et la relation linéaire approximative (3.1) liant cette tension avec la tension de point maximal V_{MPP} du GPV (28) (29) :

$$V_{MPP} = K_1 \times V_{OC} \quad (3.1)$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité. Il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que k_1 est déterminé, le V_{MPP} peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (3.1) avec V_{OC} mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension V_{MPP} est alors prise comme tension de référence.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle V_{PV} et la tension de référence V_{ref} (V_{MPP}).

Le signal d'erreur est traité pour rendre

$$V = V_{ref} \quad (\text{figure 3 – 3})$$

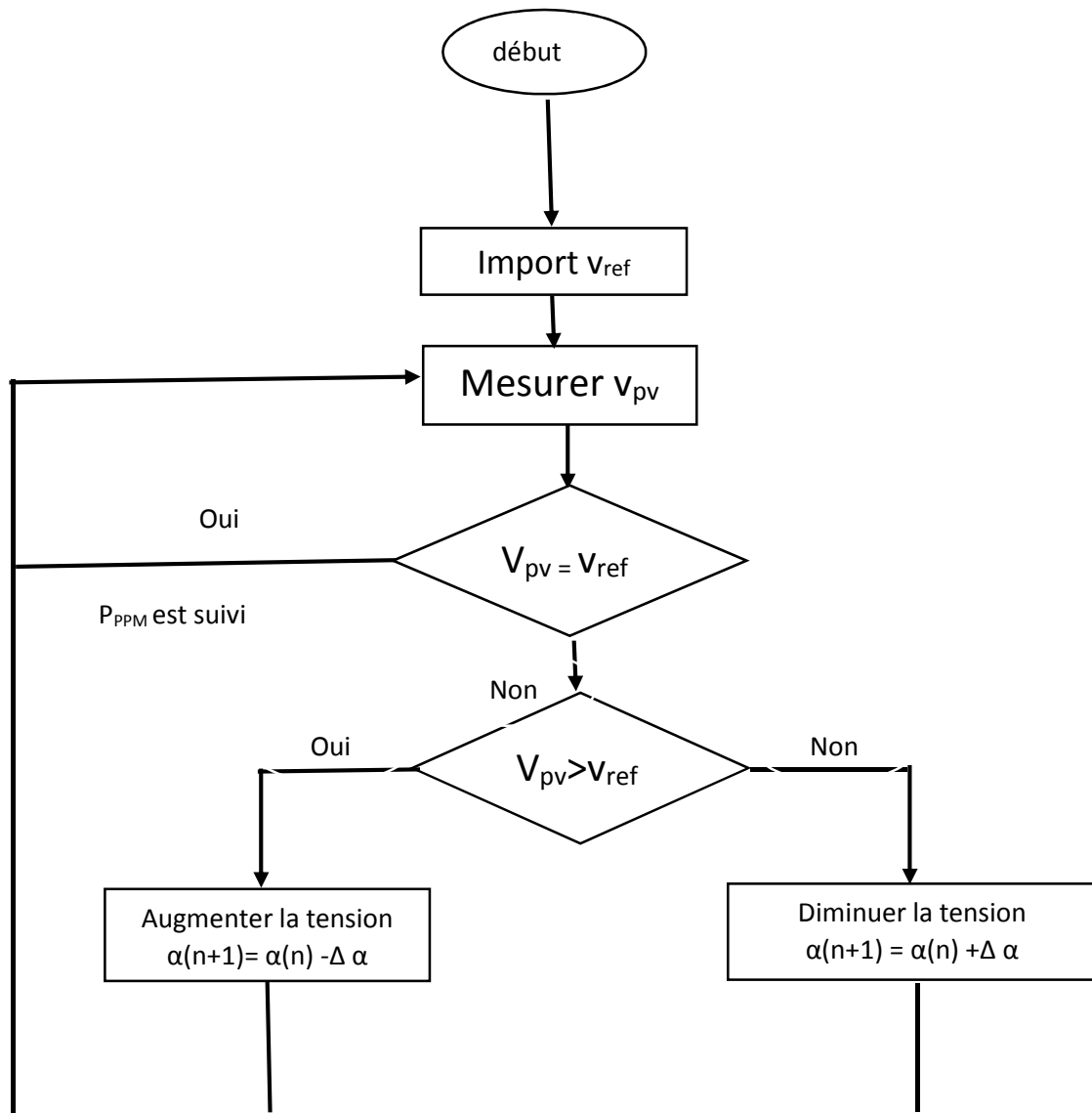


Figure 3.3 Algorithme de la Tension Constante

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire. (30) Cependant , ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension V_{oc} .et ne oublier pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV .

4.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current)

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{SC} (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (3.2) liant cette courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV (30).

$$I_{MPP} = K_2 \times I_{SC} \quad (3.2)$$

Avec k_2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k_2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k_2 est généralement comprise entre **0.78** et **0.92**. La mesure du courant I_{SC} durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant I_{SC} à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrétementé en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (I_{MPP}) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance. **Figure 3.4**

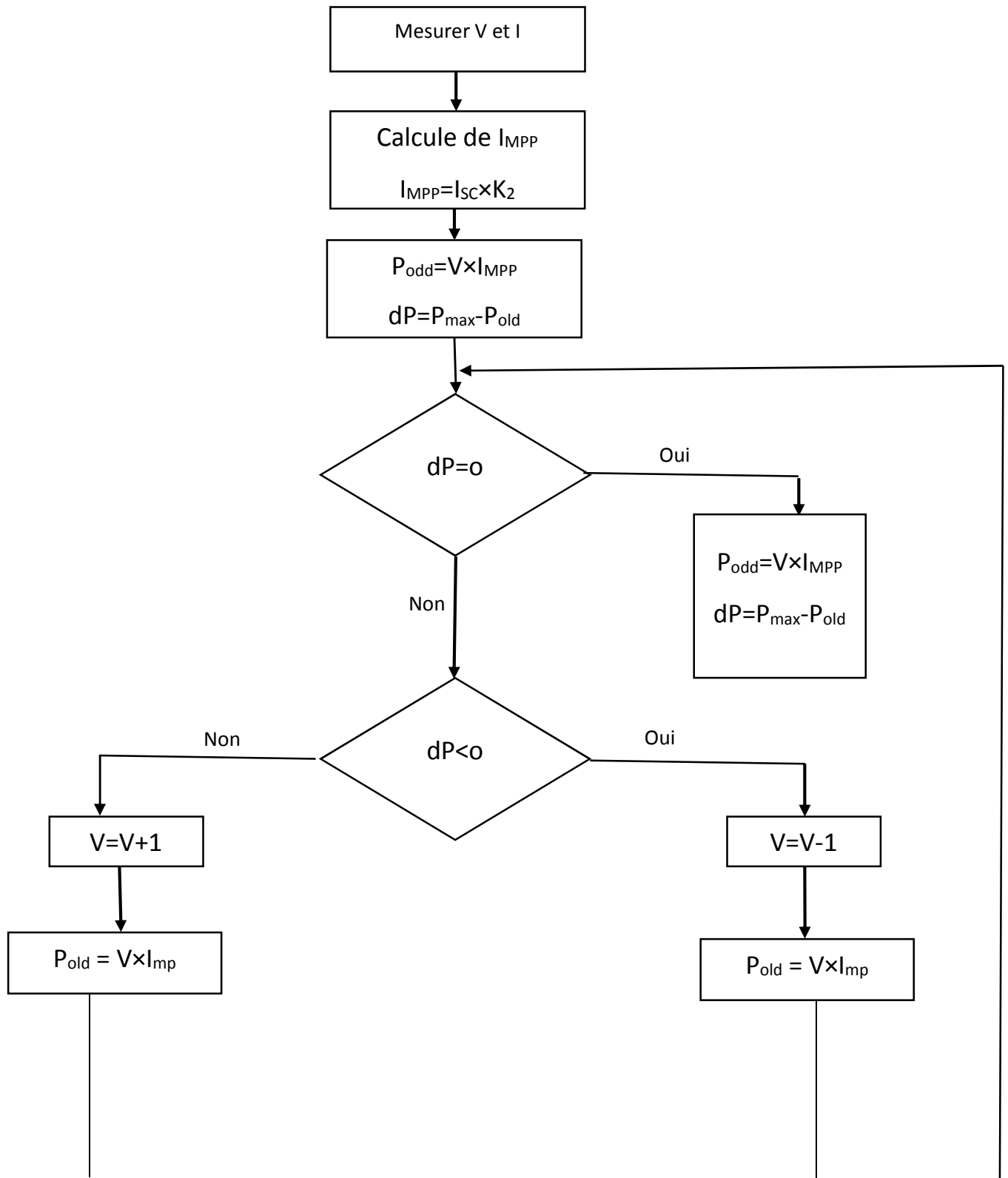


Figure 3.4 Algorithme du constant courant

4.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=V \times I$) **(31)**.

Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique.

La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. **(32)**

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance. **(33) Figure 3.5** montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié

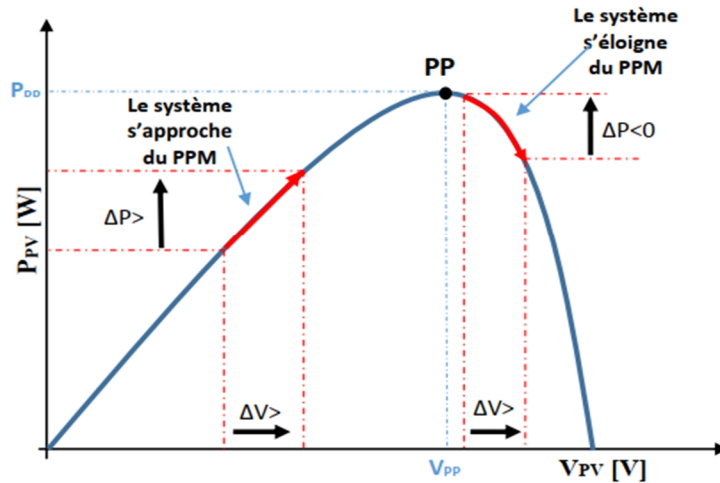


Figure 3.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés. (34)

La Figure 3.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension

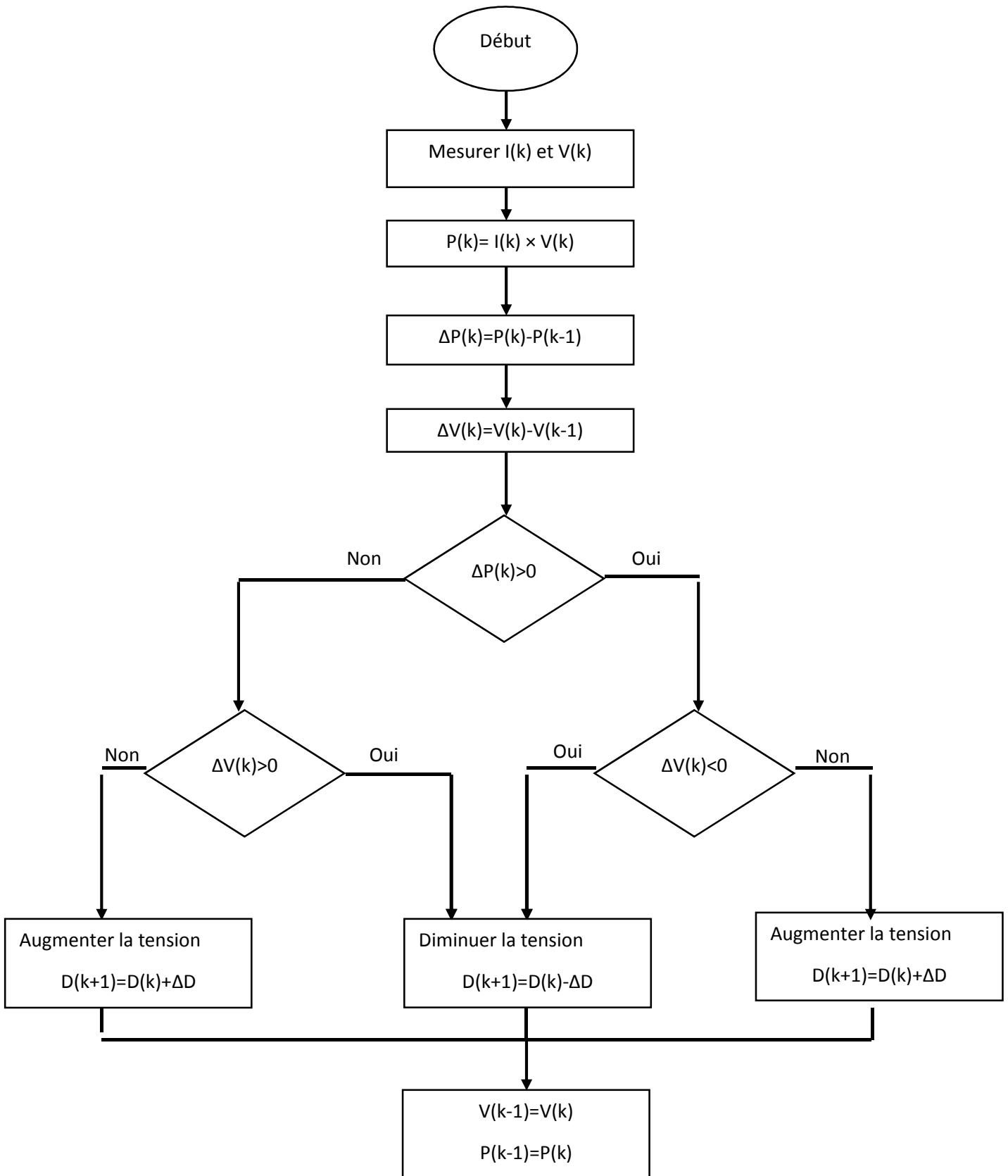


Figure 3.6 l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint .

Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation :

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. **Figure 3.7** Commenant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P_1 à P_2 , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance **(34)**

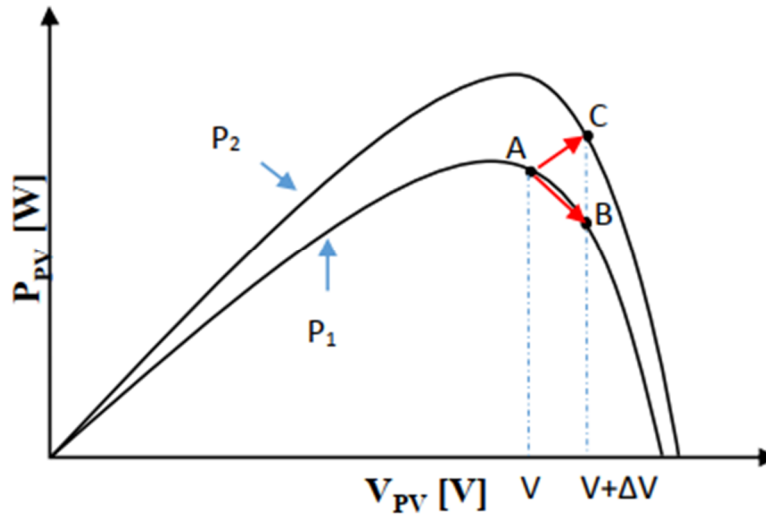


Figure 3.7 Divergence de la méthode P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées de l'algorithme P&O sont proposées :

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans **la Figure 3.8** avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B.

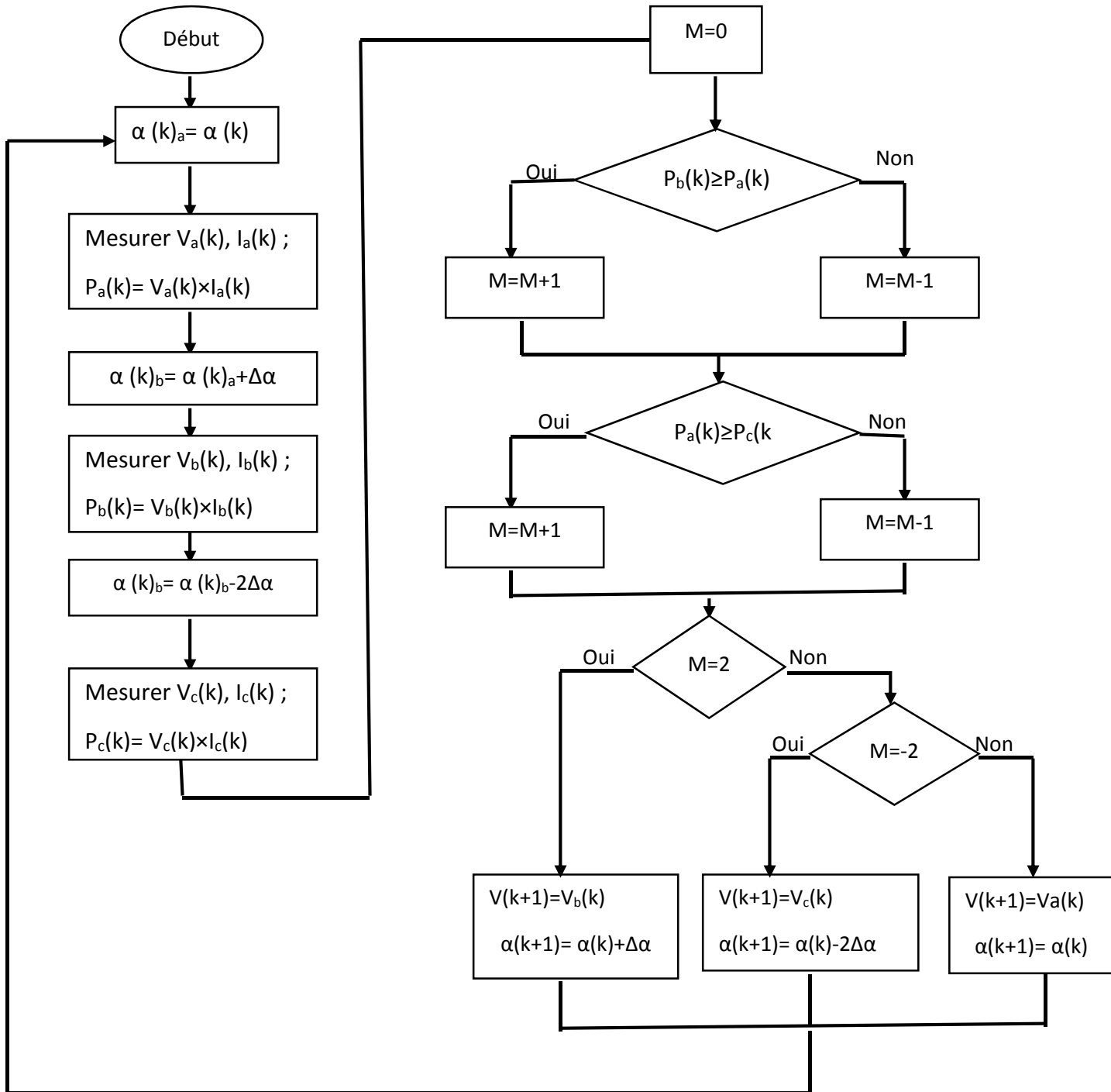


Figure 3.8 algorithme du poids d'un troisième point

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode p&o classique sauf que le pas de perturbation est variable .où plusieurs échantillons de puissance P_{pv} est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manier qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. (35) Certain études propose que le pas soit:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \right| \quad (3.3)$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

4.4.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. **Figure 3.9**

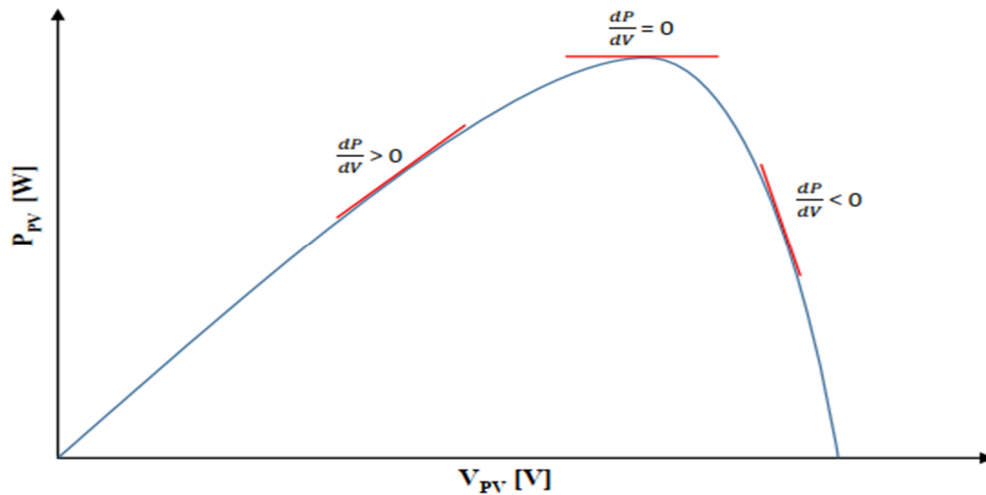


Figure 3.9 caractéristique de tension-puissance du panneau

On observer que :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 & \text{au PPM} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \text{à gauche du PPM} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{à droite du PPM} \end{cases} \quad (3.4)$$

Puisque :

$$\text{La puissance du panneau solaire est donnée par : } P = V \times I \quad (3.5)$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \cong I + V \times \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3.6)$$

Donc, l'équation (3.4) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur le PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est à gauche du le PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur la droite du PPM} \end{cases} \quad (3.7)$$

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (I_{PV}/V_{PV}) avec celle de l'incrément de conductance (dI_{PV}/dV_{PV}). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM. La Figure 3.10 montre l'algorithme de cette méthode. Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition $dP/dv = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert V_{OC} sur le courant de court-circuit I_{SC} . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur (34)

$$e = \frac{1}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (3.8)$$

D'après l'équation (3.8), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la

commande par DSP ou microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

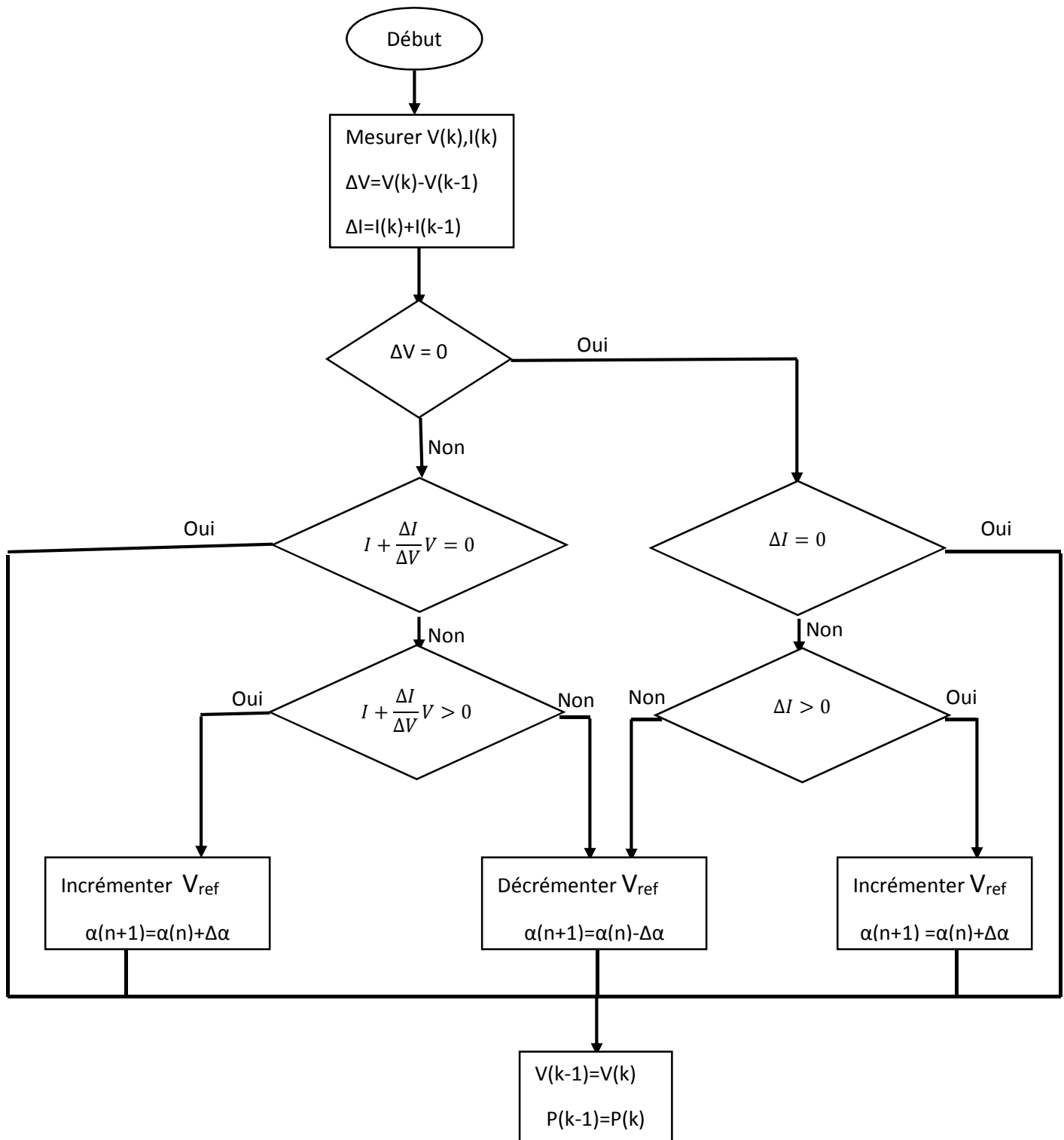


Figure 3.10 l'algorithme IncCond classique

Une autre solution est possible encore comme la méthode de p&o .c'est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas propose est **(36)**:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \mp N \times \left| \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \right| \quad (3.9)$$

4.4.5 La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs(37) L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie Δa (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature.

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité,
- la defuzzification.

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

NB: Negative Big,

NS: Negative Small,

ZE: Zero,

PS: Positive Small,

PB : Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en **Figure 3.11**

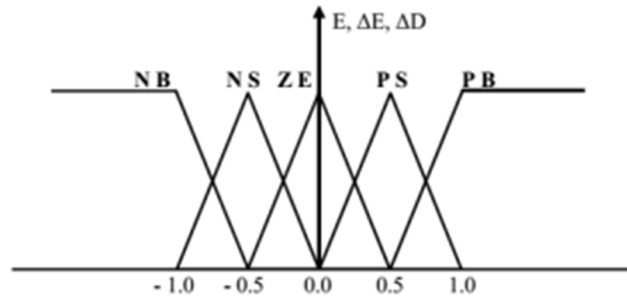


Figure 3.11 structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (3.10)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (3.11)$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta\alpha$.

Tableau 3.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

$E \backslash \Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

La variable linguistique assignée à $\Delta\alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné

du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta\alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta\alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta\alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût

4.4.6 Autres Méthodes

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

- les algorithmes à base de réseau de neurones
- méthode de look-up table
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de β
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de

commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. Ce chapitre nous servira de support de comparaison avec l'approche de MPPT qu'on va développer dans ce qui suit

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT « perturbation et observation ».

Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur survolteur DC/DC Boost, d'une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge. Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement. Afin d'aboutir à une solution optimale Matlab /Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

4.2 Simulation du système photovoltaïque

La **Figure 4.1** donne le schéma block de notre système photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés : GPV, DC-DC et MPPT.

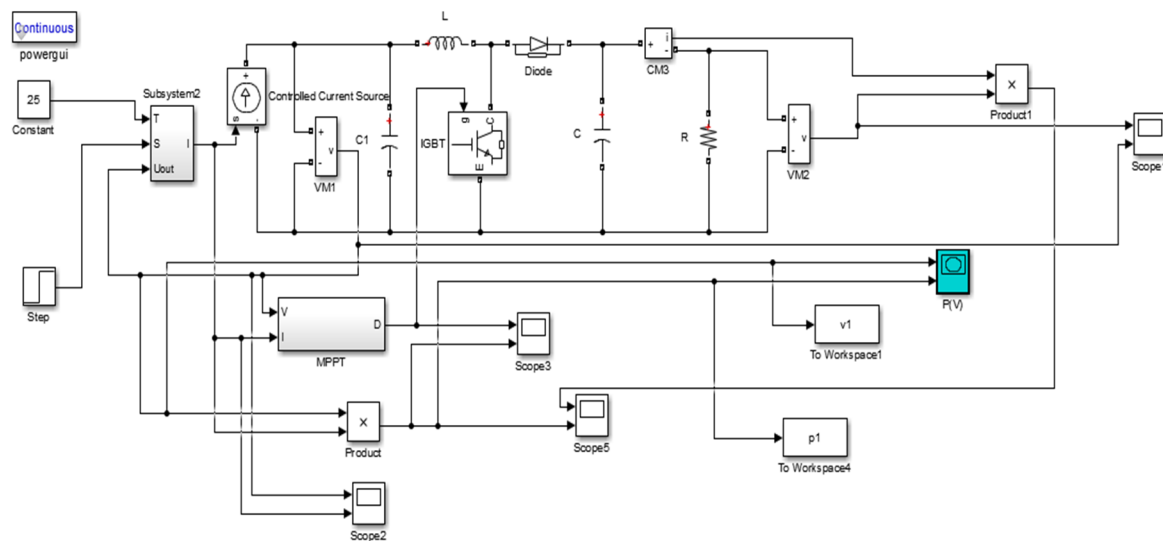


Figure 4.1 Schéma bloc sous Simulink du système global

4.3 Simulation d'un GPV

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre 2. L'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée sur la Figure 4.2.

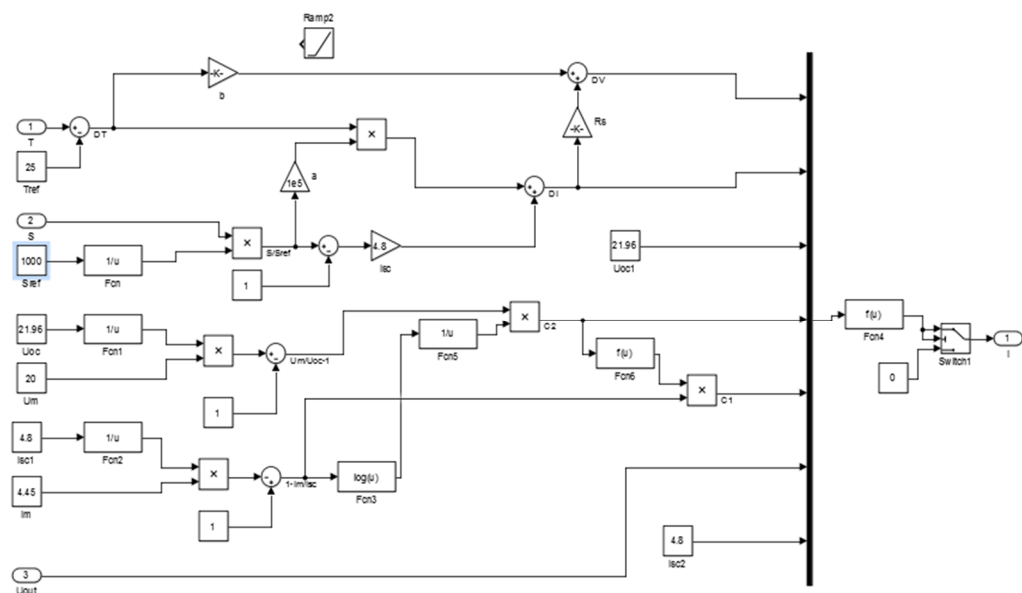


Figure 4.2 Modèle de simulation du GPV

La puissance délivrée par une cellule ne suffit pas pour alimenter une charge DC de la taille grand Il va falloir interconnecter plusieurs cellules en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque et atteindre la puissance désirée. A leur tour, l'interconnexion de modules entre eux en série et en parallèle, pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque (GPV). Pour chaque module, le constructeur, le constructeur donne le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension de circuit ouvert (V_{co}) aux conditions standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $E_s=1000\text{W/m}^2$).

4.4 Simulation du convertisseur Boost

De la même manière et utilisant le modèle mathématique décrit dans le chapitre 2, nous avons modélisé le convertisseur DC-DC boost sous l'environnement Matlab/Simulink est illustrée sur la Figure 4.3.

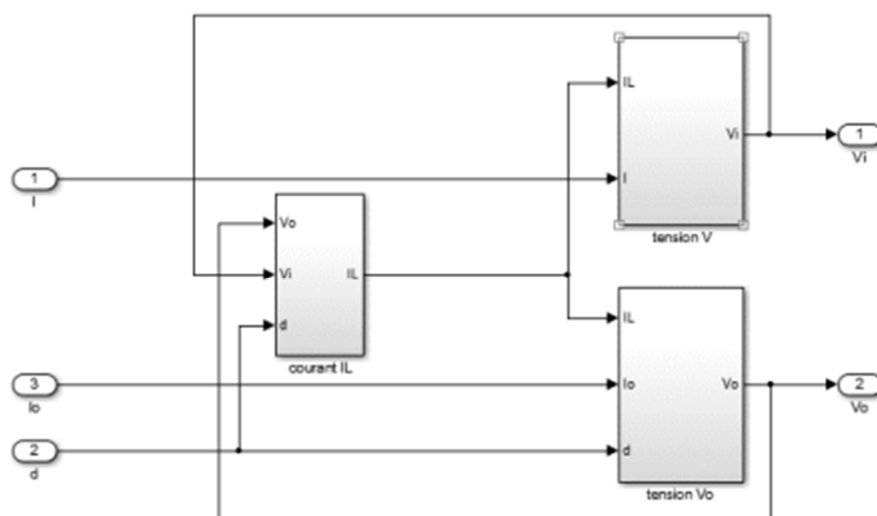


Figure.4.3 Modèle de simulation du CS BOOST

Tableau 4.1 Paramètres du convertisseur DC-DC boost

C1	C2	L
560e-6 F	560e-6 F	350e-6 H

4.5 Algorithme P&O

Pour valider l'algorithme P&O, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de l'irradiation et de la température en fonction du pas de perturbation. La donne une comparaison des courbes de la puissance de sortie en fonction du pas de perturbation pour une température constante à 25°C et irradiation variable [1000 500]W/m².

4.6 Simulation des algorithmes MPPT

Nous avons réalisé les modèles de simulation des algorithmes P&O, en nous basant sur les études illustrées dans le chapitre 3. La Figure 4.4 donne le bloc Simulink.

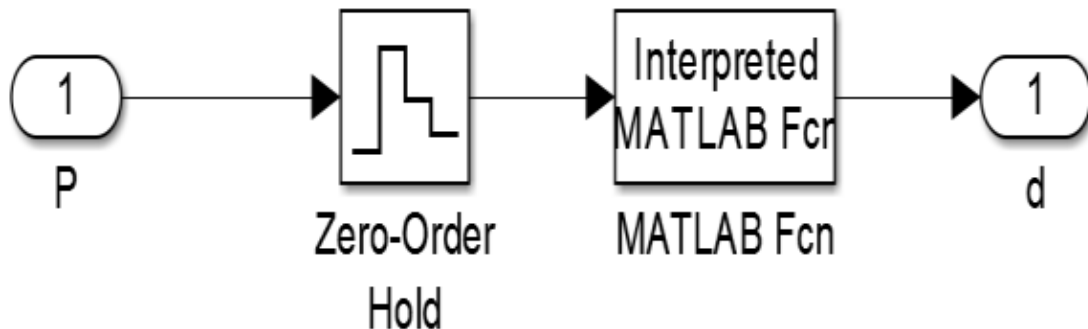


Figure 4.4 Schéma de block de la commande MPPT : P&O

4.6.1 Résultats et discussions

Pour valider l'algorithme P&O, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de l'irradiation et de la température en fonction du pas de perturbation le début comparaison des courbes de la puissance du panneau après et avant boost est illustré sur la Figure 4.5.

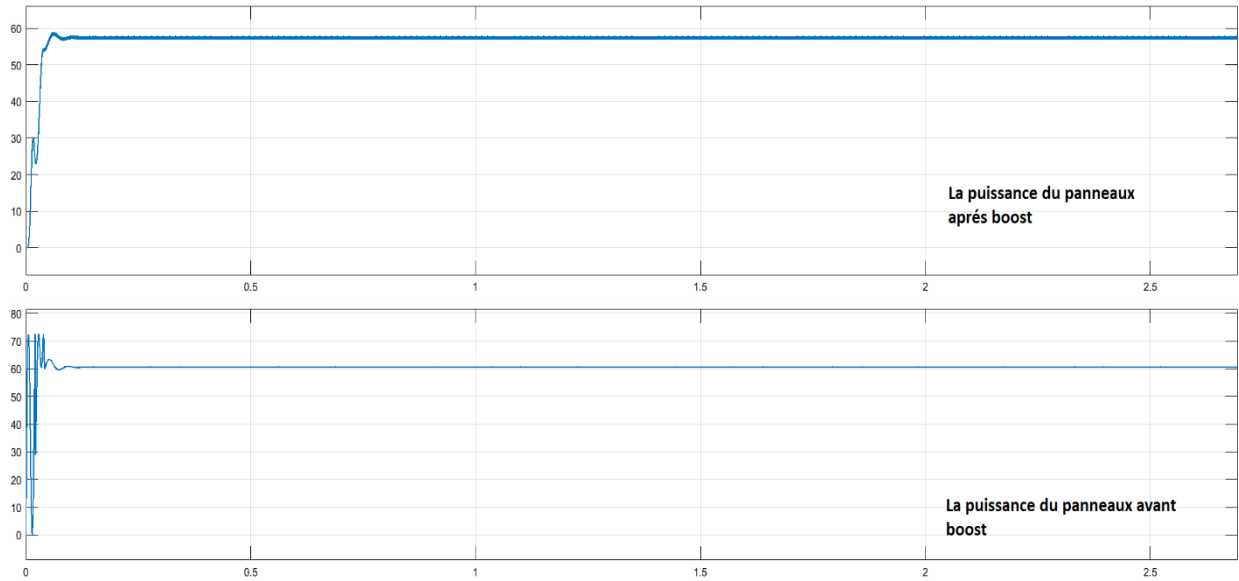


Figure.4.5 la puissance du panneau après et avant boost

Son principe peut être expliqué de la manière suivante :

Quand l'interrupteur est en position 1, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie. Dans les conditions idéales, c'est à dire : interrupteur idéal, capacité idéale et inductance idéale. On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique d . et comme ce dernier étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension. On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge. Dans la pratique, la boucle de régulation ne devra donc compenser que les variations de la tension d'entrée et les imperfections des composants réels

4.6.2 influence de l'irradiance

Au cours d'une journée, le niveau d'éclairement d'une cellule va varier entre $E=0 \text{ W/m}^2$ et $E=1000 \text{ W/m}^2$. Il est donc important de connaître l'évolution des caractéristiques courant-tension en fonction du niveau d'éclairement. D'après la Figure 1.25, les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque varient avec l'éclairement solaire (irradiation). On a remarqué que quand l'éclairement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît. La valeur de courant de court-circuit est

directement proportionnelle à l'éclairement. Quant à la tension, elle est peu sensible aux variations des niveaux d'éclairement

La figure 4.6 représente la tension d'entrée et le PWM et la tension desortie représente ci-dessous

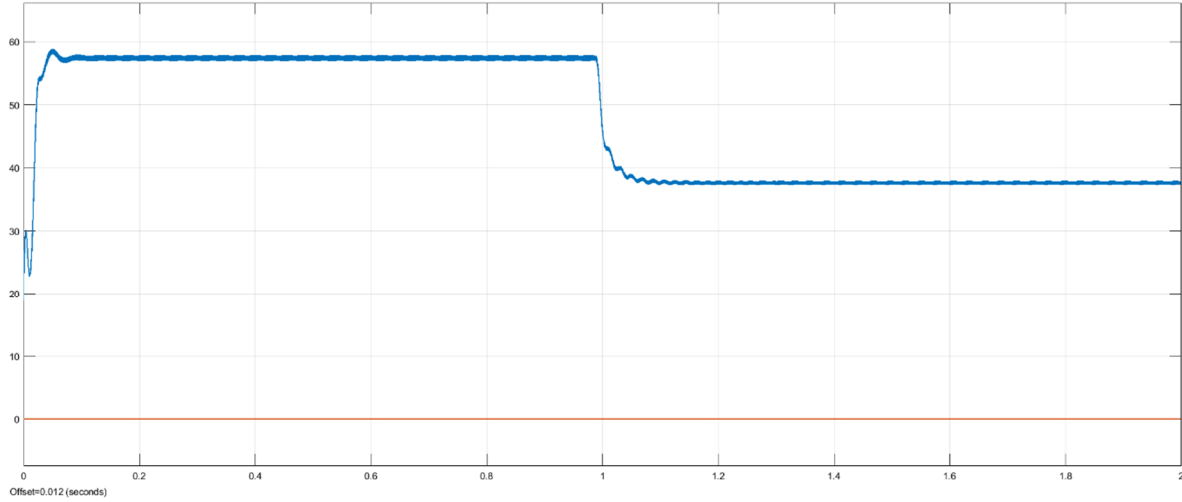


Figure.4.6 influence de l'irradiance

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont disponibles. Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT

Nous avons réalisé les modèles de simulation d'algorithme MPPT, en nous basant sur les études illustrées dans le chapitre 3.

4.6.3 Résultats et discussions

La figure 4.7 montre la relation entre la puissance de sortie du convertisseur et son rapport cyclique. Nous avons la puissance maximale

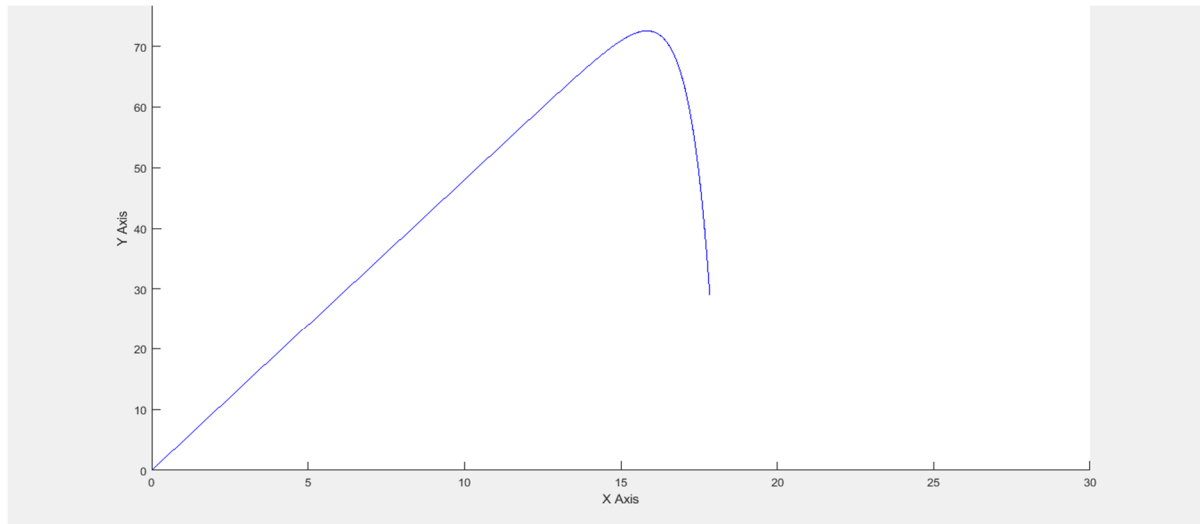


Figure 4.7 Variation de la puissance de sortie panneaux 80 WATT

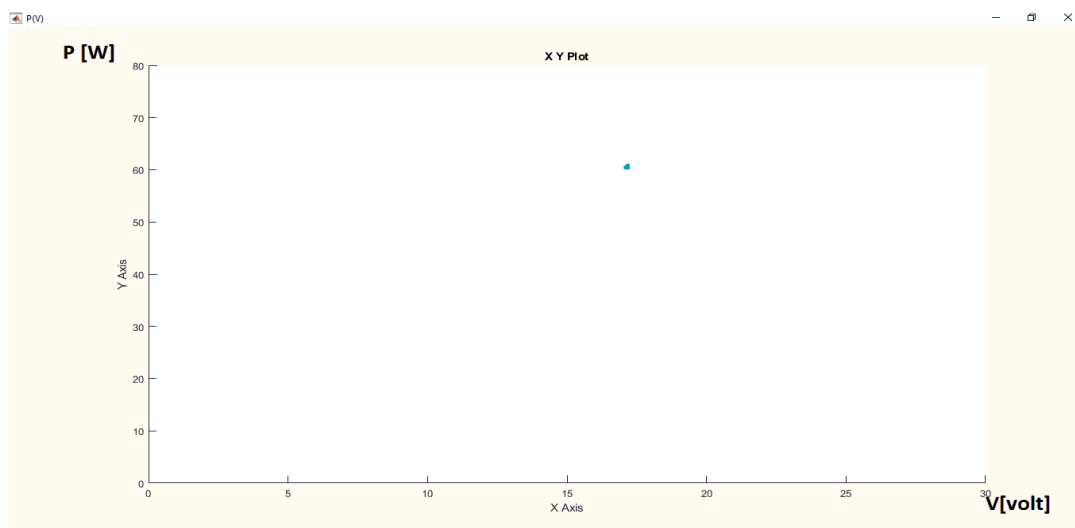


Figure 4.8 Puissance PV en fonction de la tension

Les résultats des Figures 4.7 et 4.8 montrent l'efficacité de notre algorithme dans la poursuite du point de puissance maximale, nous remarquons que si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Par contre, si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=V \times I$). Cependant la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

4.7 Conclusion

Ce chapitre englobe l'ensemble des simulations développées sous

L'environnement Matlab/Simulink dans un premier pour la mise en place du système photovoltaïque et dans un deuxième pour tester à valider les commandes MPPT faisant l'objet de cette étude. Nous avons commencé par la présentation de la conception de system Ce système est segmenté en détail Avec les résultats de la simulation affichés et L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système pour des cas d'applications.

Conclusion Générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut honorer la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. Cela explique pourquoi son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. Avant d'aborder la problématique de conversion, nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque. Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab permettant de tracer la caractéristique I-V pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante. Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque, nous avons analysé dans le simulateur Matlab le fonctionnement optimal d'un système PV, de moyennes puissances dont la régulation de la puissance est effectuée par une commande MPPT, suites aux variations des conditions météorologiques (éclairagements,...) et de la charge. Les résultats obtenus montrent l'oscillation instantanée du point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du PPM indépendamment à des variations de l'éclairage et la charge. Le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC Boost et les faibles pertes de puissances fournies par ce module nous ont permis de conclure le bon fonctionnement et les performances satisfaisantes du système PV réalisé au cours de ce travail. En perspective, ce travail sera poursuivi par une réalisation pratique de commande MPPT à fin de valider les résultats obtenus.

BEBILIOGRAPHIE

1. Rafika khezar « Optimisation de chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque en énergie électrique » Thèse de doctorat, 2017.
2. MAASOUM sara « Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat, 2018.
3. le photovoltaïque –module 3- fonctionnement et technologie institue bruxelle pour la gestion de l'environnement.
4. Livre Algérie énergie solaire et Hydrogène développement durable
(Page 69).
5. ABOUDA Salim « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques Application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, 2015.
6. Mr : BELKAID ABDELHAKIM « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome » thèse doctorat, 2015.
7. Rafiaa KIHALL « Préparation par électrodéposition de semi-conducteurs en couche minces à base d'étain pour des cellules photovoltaïques » Thèse de doctorat ,2018.
8. Belarbi Miloud « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts inter-digités » Thèse de doctorat, 2016.
9. Abdoulwahab Adaine « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN » Thèse de doctorat, 2018 université de lorraine.
10. CUONG HUNG TRAN «Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement » Thèse de doctorat, 2019.
11. ZAGHBA Layachi « Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques » Thèse de doctorat, 2017.

12. Cédric CABAL « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque » Thèse de doctorat, 2008.
13. M. MUSTAPHA BELARBI « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome » Thèse de doctorat, 2015.
14. KHENFAR Riyad « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » Thèse de doctorat, 2015.
15. Amrouayache Mohamed « Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque » Thèse de doctorat, 2014.
16. HOUARI Azeddine « contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques » Thèse de doctorat, 2020.
17. JBILOU Mokhtaria « Etude, simulation et réalisation d'un onduleur pour système photovoltaïque » Thèse de doctorat, 2019.
18. BOUTLILIS Fatima « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique » Thèse de doctorat, 2018.
19. BELHADJ Mohamed « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome » Mémoire de Magistère, 2012.
20. Seghir BENHALIMA « Modélisation et Contrôle des Systèmes Éoliens-Solaire Intégrés au Réseau VSC-HVDC » Thèse de doctorat, 2019.
21. BENADEL Faiza « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV » Mémoire DE MASTER 2 ,2015 /2016.
22. TOUAMA Tariq et HAFIDI Nouh « Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque » Mémoire DE MASTER 2, 2018 /2019.
23. SAIDI FATIHA et HAMOUCHE KHAWLA, « Implémentation d'un régulateur de type trois pour convertisseur DC-DC sur DSP » Mémoire de Master Académique, 2016 /2017.
24. Yassine LASMI « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. » Mémoire de Magistère ,2013.

25. Bensmail wafa et abdallah fatmazohra «etude et simulation de la command mppt basée sur l'approche hill-climbing flou» mémoire de projet de fin d'étude, 2015/2016.
26. DJELLAL LEILA IMEMNE et DIB YASMINA «Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque» Mémoire DE MASTER 2, 2016/2017.
27. <http://energie28.blogspot.com/2016/11/definition-et-explications-sur-le-mppt.html>.
28. Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output" ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012.
29. Ahmad Zbeeb, "a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications" for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada, 2009.
30. Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output" ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012.
31. Hajar Bagheri "advances in electric power engineering" publisher: lulu (usa), 2015.
32. Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi "active power control for a single-phase grid connected pv system", international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
33. Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, elharrach, algérie, 2012.
34. Akihiro Oi, "design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of california polytechnic state university, 2005.
35. M. Angel Cid Pastor « conception et realisation de modules photovoltaïques electroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006.