

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL OUED



Faculté de la Technologie

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Présentée par :

Lassoued Abdallah, Daoudi Khalil, Lassoued Ahmed Yacine

Option : Machine électrique

**Commande d'un système de pompage photovoltaïque à base
d'un moteur à courant continu**

Soutenue le / /, devant le jury composé de :

Maamir Madiha	MCA	Université d'El-Oued	Président
Djaafar Toumi	MCA	Université d'El-Oued	Examineur
HICHAM Serhoud	MCA	Université d'El-Oued	Rapporteur

Année Universitaire 2022/2023



Dédicace

*Au propriétaire d'une biographie parfumée et
d'une pensée éclairée.*

*Ils ont été les premiers à être crédités de notre
obtention de l'enseignement supérieur*

*(Nos chers parents), que Dieu leur donne
longue vie.*

*A celui qui nous a mis sur le chemin de la vie
et nous a apaisés,*

*Elle a pris soin de nous jusqu'à ce que nous
devenions vieux*

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

A nos frères et sœurs et à tous nos amis

*A tous nos honorables professeurs ;
Qui n'a pas hésité à nous tendre la main*

je te dédie cette recherche

Remerciement

*Nous remercions Dieu tout puissant Pour
nous accorder la volonté et le courage
réaliser ce mémoire.*

Nous tenons à exprimer mon encadreur

Dr. Hicham serhoud

Patience et précieux conseils.

*Nos remerciements à nos parents pour
leur soutien.*

*Nous tenons aussi à remercier tous mes
amis qui m'ont aidé de loin ou de près
la réalisation de ce travail*



résumé

Dans ce mémoire nous avons comme objectif : d'étudier Commande MPPT d'un système de pompage PV à base de la technique perturbation et observation (P&O) , Nous avons étudié ensuite le cas d'un système de pompage utilisant un moteur à courant continu, Nous avons effectué une étude générale avec la modélisation et simulation d'un système pompage solaire connecté d'un convertisseur DC-DC . Dans le but d'avoir la possibilité de régler le débit d'eau de la pompe centrifuge, la commande par hystérésis utilisé pour la commande de la vitesse de rotation de la DC moto-pompe.

Mots de clés:

Générateur photovoltaïque, convertisseurs DC-DC, MPPT, moteur à Courant Continue ; système de pompage, commande par hystérésis

المخلص

هدفنا في هذه الرسالة هو: دراسة التحكم في MPPT في نظام الضخ الكهروضوئي بناءً على تقنية الاضطراب والملاحظ (P&O) ، ثم درسنا حالة نظام الضخ باستخدام محرك DC ، وقمنا بإجراء دراسة عامة مع نمذجة ومحاكاة نظام ضخ بالطاقة الشمسية متصل بمحول DC-DC. من أجل الحصول على إمكانية ضبط تدفق المياه لمضخة الطرد المركزي ، يتم استخدام التحكم في التباطؤ للتحكم في سرعة دوران مضخة محرك التيار المستمر.

الكلمات المفتاحية:

المولد الكهروضوئي ، محولات DC-DC ، محرك MPPT؛ نظام الضخ

	page
Dédicace	1
Remerciements	2
Résumé	3
Sommaire	4
liste de figure	6
Introduction générale	7

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :	8
I.2 Energie solaire photovoltaïque :	8
I.3. Rayonnement solaire :	9
I.4. Types de rayonnement :	9
I.4.1 Rayonnement direct :	9
I.4.2 Rayonnement diffus :	9
I.4.3 Rayonnement réfléchi :	9
I.4.4 Rayonnement global :	9
I.5. Spectre du rayonnement solaire :	10
I.6. La cellule PV :	11
1.6.1.Types des cellules PV :	11
I.6.1.1 Cellules mono-cristallines :	11
I.6.1.2 Cellules poly-cristallines :	11
I.6.1.3 Cellules amorphes :	11
I.7. l'effet Photovoltaïque :	11
I.8 . Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV :	13
I.9. Générateur photovoltaïque GPV :	14
I.10. Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque :	15
I.10.1. Cas d'une cellule idéale :	15
I.10.2. Cas d'une cellule réelle :	16
I.11. Protections D'un Générateur :	18
I.13 . Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :	20
I.13.1. Association De Cellules Photovoltaïques En Série :	20
I.13.2. Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle :	21
I.14. simulation D'un GPV :	22
I.14.1.Influence de l'Éclairement :	23
I.14.2.Influence de la Température :	24
I.15.Facteur de forme, FF :	25
I.16. Le rendement η :	25
I.17. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	26
I.17.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :	26
I.17.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	26
I.18. Conclusion :	27

Chapitre II : Poursuite du point de puissance maximale

II.1. Introduction :	28
II.3. Convertisseurs DC/DC (Hacheur) :	29
II .4. La connexion directe source photovoltaïque charge :	30
II .5. Connexion indirecte :	31
II.6.2. Hacheur survolteur (Boost) :	32
II .7. Modélisation du hacheur survolteur :	33
II .6 puissance maximale d'un générateur PV	33
III.2. Gestion de la MPPT :	33
III.3. Méthode de perturbation et observation (P&O) :	34
III.4: Simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O) :	38
III.5. Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MP PT et convertisseur DC-DC:	38
III.10. Conclusion :	47

Chapitre III : Commande MPPT d'un système de pompage PV à base d'un moteur à courant continu

IV .1. Les systèmes de pompage photovoltaïque :	48
IV.2.Modélisation d'une MCC à excitation séparée (Indépendante):	48
IV.3.Mise en équation de la machine :	49
IV.4.Modèle de la pompe :	50
IV.5. Simulation et résultats :	51
IV.6 . Conclusion :	58
Conclusion générale	

Liste de figure

page

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Figure.I.1 : Types de rayonnement solaire	10
Figure.I.2 : Distribution spectrale du rayonnement solaire	10
Figure.I.3 : Schéma block d'une cellule PV	12
Figure.I.4 : Jonction PN d'un Cellule Photovoltaïque	12
Figure.I.5 : Composants d'un GPV	13
Figure.I. 6 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.	13
Figure.I.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	14
Figure. I.8 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode antiretour	16
Figure. I.9 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque	16
Figure. I.10 : Schéma de simulation d'un module photovoltaïque réel.	17
Figure. I.11 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.	18
Figure. I.12 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.	18
Figure. I.13 : Paramètres du bloc Générateur PV 1 .	19
Figure. I.14 : Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.	19
Figure. I.15 : Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.	20
Figure. I.16 : Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.	20
Figure. I.17 : Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement.	21
Figure. I.18 : Caractéristique P-V du module PV selon la température.	21
Figure. I.19 : La caractéristique I-V du module PV selon la température.	21
Chapitre II : Poursuite du point de puissance maximale	
Figure. II.1: Convertisseur DC/DC	25
Figure. II.2 : Principe du couplage direct.	26
Figure. II.3 : Types de charges en connexion directe .	27
Figure. II.4 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation	28
Figure. II.5 : Convertisseur survolteur (boost)	28
Figure. II.6 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost	29
Figure. II.7 : Schémas équivalents du hacheur.	29
Figure.II.8 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM .	31
Figure.II.9 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.	32
Figure.II.10 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température	33
Figure II.11: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode Perturbation-Observation .	34
Figure II.12 : Algorithme de la méthode de Perturbation et Observation .	35
Figure.II.13: schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).	36
Figure . II.14: Schéma bloc d'un photovoltaïque munis de la MPPT.	37

Figure II.15 :Variation de éclairnement	38
Figure II.16 :Variation de la température.	38
Figure II.17 : Caractéristiques P (t) d'un système PV.	39
Figure II.18 : Caractéristiques v (t) d'un système PV.	39
Figure II.19 :Caractéristiques i (t) d'un système PV.	39
Figure II.20 :Caractéristiques p (v) d'un système PV.	39
Figure II.21: Caractéristiques i (v) d'un système PV.	40
Chapitre .III : Commande MPPT d'un système de pompage PV à base d'un moteur à courant continu	
Figure . III.1: Les systèmes de pompage photovoltaïque	41
Figure . III.2: Schéma électrique d'une MCC à excitation séparée	42
Figure. III. 3 : Principe de commande par Hystérésis.	44
Figure . III.4 : Bloc Simulink du d'une groupe dc Moto-pompe .	45
Figure . III.5: Variation de éclairnement	45
Figure . III.6 : la température panneau solaire	45
Figure . III.7: La Tension de PV	46
Figure . III.8 :La Puissance du GPV pour un éclairnement variable .	46
Figure . III.9 : La Puissance du GPV en fonction de la tension	47
Figure . III.10 : La Puissance du GPV	47
Figure . III.11 : La Tension du MCC.	47
Figure . III.12 : Le courant du MCC.	48
Figure . III.13 :variation de Vitesse de rotation du moteur	48
Figure . III.14 : La couple du MCC	49

Introduction Générale :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Dans ce contexte, nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement, à l'étude et développement de la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), Incrémentation (INC) et l'approche Floue (FL).

Dans ce mémoire nous avons commencé par présenter des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, Nous avons ensuite présenté dans le deuxième chapitre le convertisseur de puissance type DC/DC avec l'algorithme de contrôle MPPT d'un système photovoltaïque et leurs classifications. Dans troisième chapitre présent la commande MPPT d'un système de pompage PV à base d'un moteur à courant continu commande en vitesse dont le but est de forcer le machine à fonctionner autour de sa vitesse de référence.

I.1. Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Pour définition le mot " photovoltaïque " vient de la grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité [1].

I.2 Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil.

Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable.

On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO2.

Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité.

Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité.

C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu .

C'est en 1839 qu'Antoine Becquerel a découvert que les matériaux semi-conducteurs étaient capables de transformer l'énergie solaire en électricité ? C'est ce que l'on nomme l'effet photovoltaïque [2].

I.3. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. [3]

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K [3] :

- Diamètre de soleil $D_s = 1.39.10^9$ m ;
- Diamètre de la terre $D_t = 1.27.10^7$ m ;
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts} = 1.5. 10^{11}$ m .

I.4. Types de rayonnement :

I.4.1 Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [3]

I.4.2 Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [3]

I.4.3 Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (neige, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo(ϵ) 0 . [3]

I.4.4 Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi. [3]

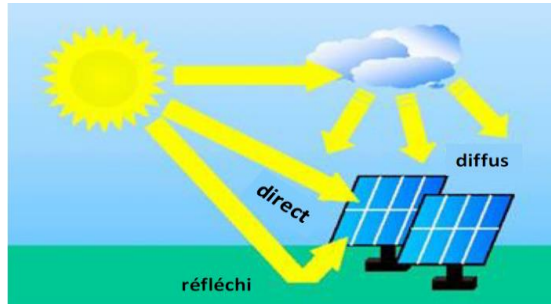


Figure.I.1 : Types de rayonnement solaire [4].

I.5. Spectre du rayonnement solaire :

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

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

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ nm}$ 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ nm}$ 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ nm}$ 45.6%

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci [5].

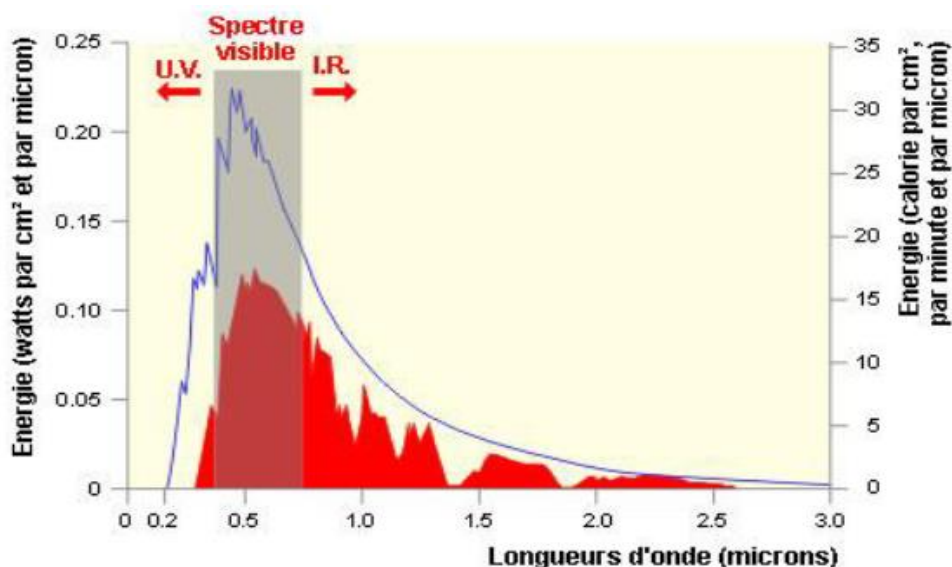


Figure.I. 2 : Distribution spectrale du rayonnement solaire.

1.6. La cellule PV :

1.6.1.Types des cellules PV :

Il existe différents types de cellules photovoltaïques avec des rendements et des coûts divers. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent . On peut citer Trois principaux types de cellules actuellement utilisées.

I.6.1.1 Cellules mono-cristallines :

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16%), mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée [6] .

I.6.1.2 Cellules poly-cristallines :

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : (11% -13%) [6] .

I.6.1.3 Cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (8% - 10%), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation telles que les calculatrices solaires ou encore les montres [6]

I.7. l'effet Photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une cellule PV pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque[7].

I. 8. Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport

dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p.

Une jonction (dite p-n) est formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [8].

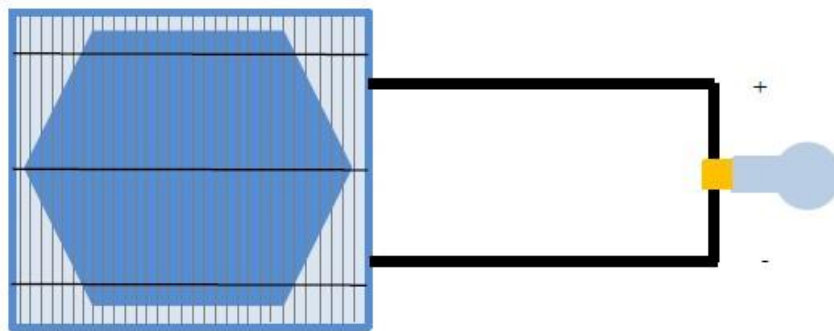


Figure. I.3 : Schéma block d'une cellule PV.

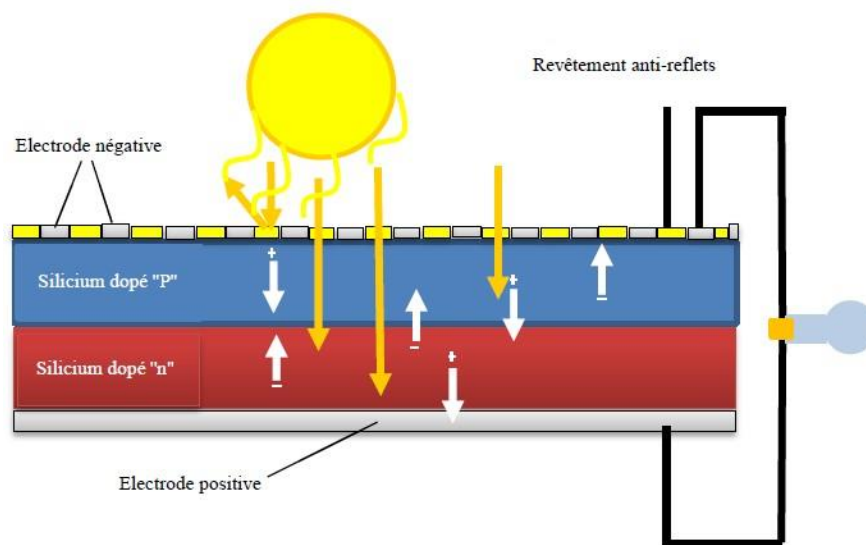


Figure I.4 : Jonction PN d'un Cellule Photovoltaïque .

I.9. Générateur photovoltaïque GPV :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (**figure 1.3**). Les modules PV sont habituellement branchés en série parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [9].

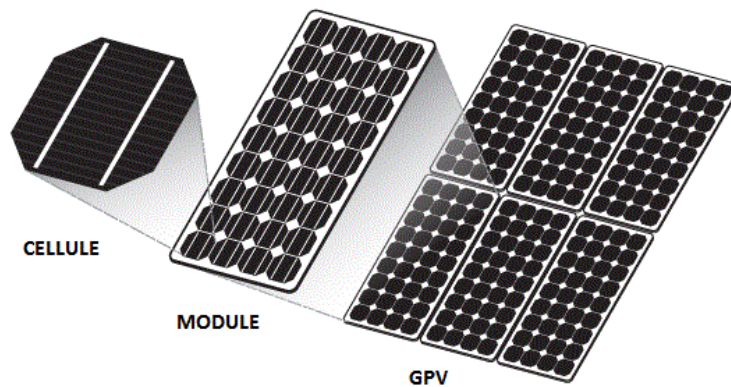


Figure. I.5 : Composants d'un GPV.

I.10. Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque :

I.10.1. Cas d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode. Ce générateur est délivrer un courant I_{ph} selon la Figure (I.6), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [10].

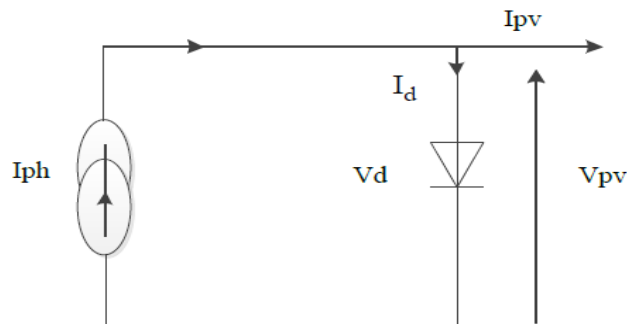


Figure. I .6: Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- Les équations retenues de ce modèle sont :

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

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

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{réf}} \quad (I.2)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule ;

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

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.3)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode ;

$$V_t = \frac{NKT}{q}$$

V_t : Tension thermique ;

N : Facteur d'idéalité de la photopile ; K : Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) ;

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

I.10.2. Cas d'une cellule réelle :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la Figure(I.7).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [11].

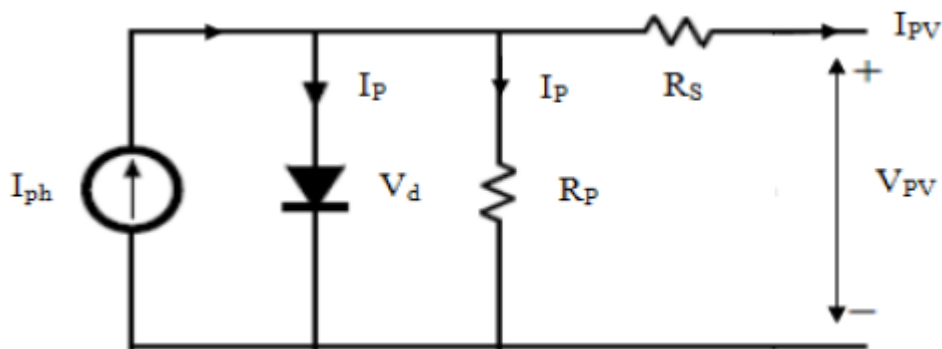


Figure.I.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.4)$$

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

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

I_d : Le courant circulant dans la diode, équation (I.3).

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.5)$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{Eg}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (I.6)$$

I_{0r} : est le courant de court circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence $E_{réf}$;

T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}K$] ;

T_n : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}K$] ;

B : facteur d'idéalité de la jonction ;

Eg : Énergie de gap [ev] ;

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (I.7)$$

R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

V_{pv} : La tension de sortie ;

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p ;

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de la cellule.

En substituant les équations (I.5; I.6) dans l'équation (I.4) le courant I_{pv} devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (I.8)$$

Donc :

$$I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} - I_{pv} = 0 \quad (I.9)$$

I.11. Protections D'un Générateur :

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. (I.8) :

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène 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. (I.9) , par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [12].

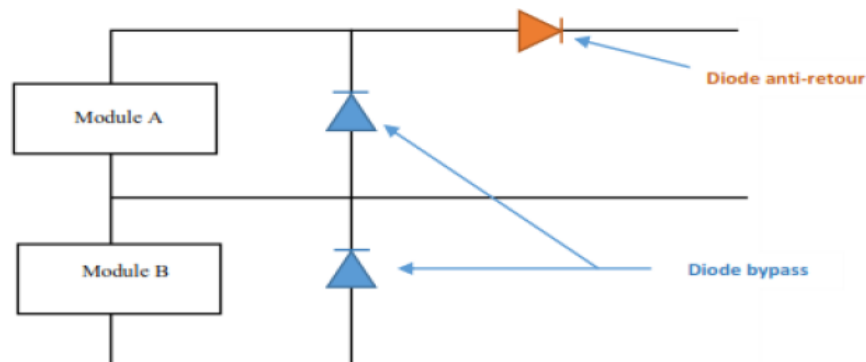


Figure. I.8 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode antiretour.

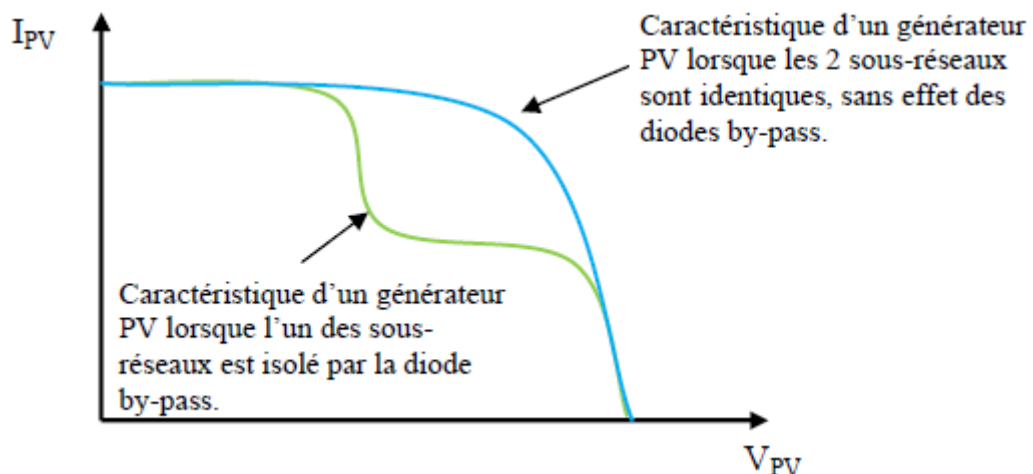


Figure. I.9 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

I.12 . Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

L'association de plusieurs modules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle , c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures suivantes [13].

I.12.1. Association De module Photovoltaïques En Série :

lorsqu'on associe des cellules en série Figure (I.14) , la tension s'ajoute et le même courant les traverse.

$$I_{sc} = I_{cc} \quad (I.10)$$

Et

$$V_{cs} = N_s \cdot V_c \quad (I.11)$$

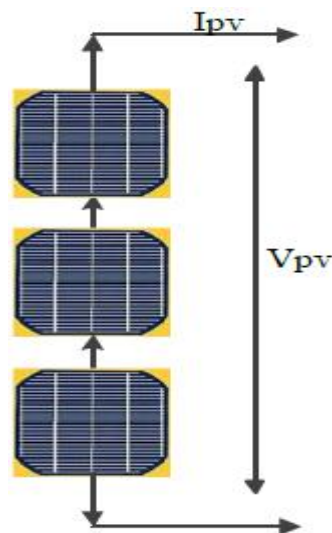


Figure. I.10 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

I.12.2. Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle :

lorsqu'on les associe en parallèle Figure (I.15) , le courant résultant correspond à l'addition des courants générés par chaque cellule

$$I_{pcc} = N_p \times I_{cc} \quad (I.12)$$

Et

$$V_{pco} = V_{co} \quad (I.13)$$

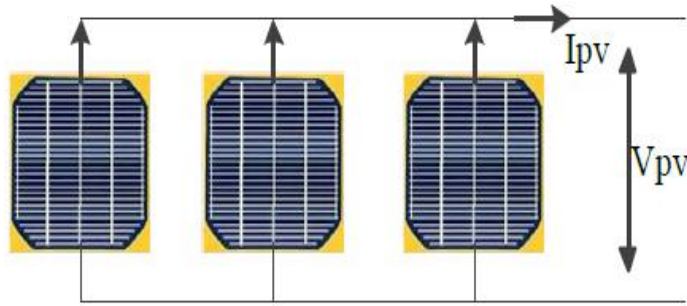


Figure. I.11 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

On associe ainsi les modules en série pour augmenter la tension, et en parallèle pour augmenter le courant, mais il est également commun de faire des combinaisons en série et parallèle pour augmenter la puissance maximale . On peut ainsi extrapoler ce raisonnement à l'association de modules de panneaux solaires, eux-mêmes constitués de plusieurs cellules avec une association définie par le constructeur [14].

I.13. simulation D'un GPV :

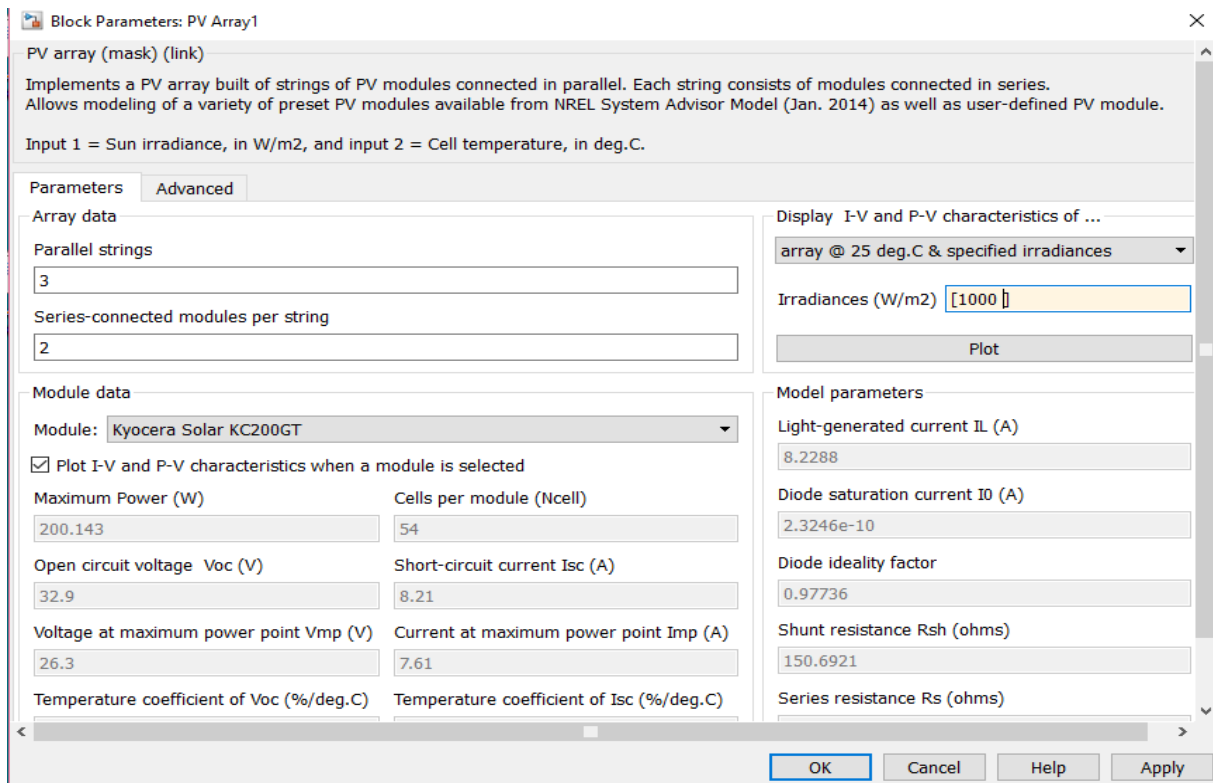


Figure. I.12 : Paramètres du bloc Générateur Photovoltaïques

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque donnée par le produit entre la tension V_{op} et le courant I_{op} comme représente la formule suivante :

$$P_{\max} = V_{op} \cdot I_{op} \quad (I.14)$$

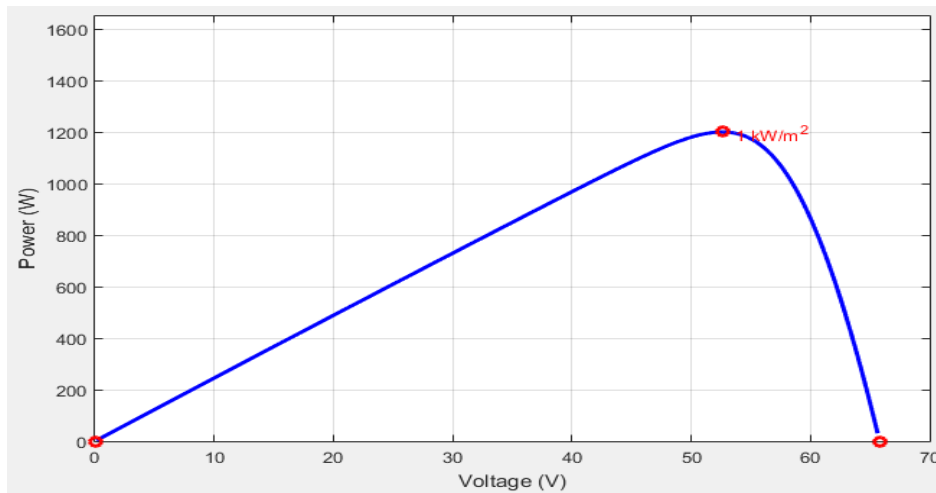


Figure. I.13 : Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque.

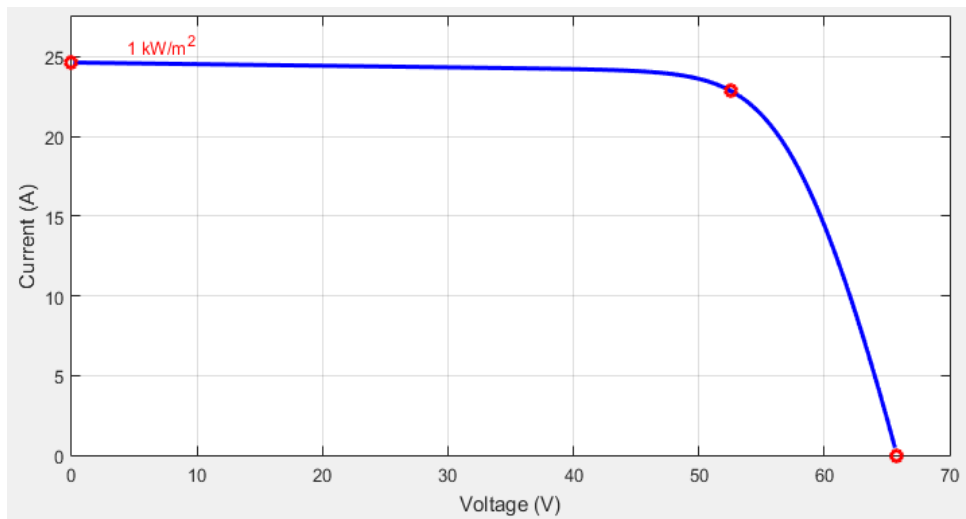


Figure. I.14 : Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.

I.13.1. Influence de l'Éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 200 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (I. (15,16)). On remarque que la valeur du courant de court circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. [15]

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25 °C.

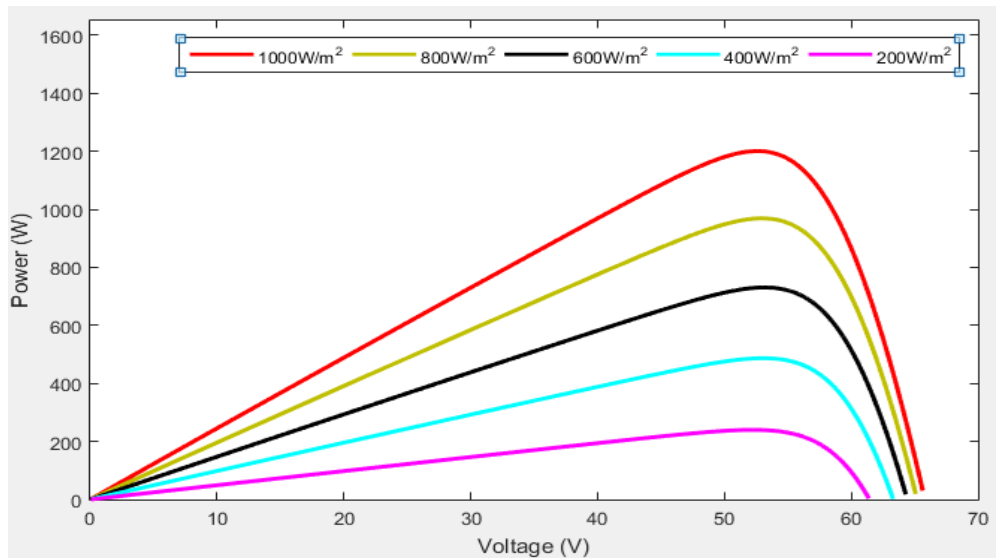


Figure. I.15 : Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.

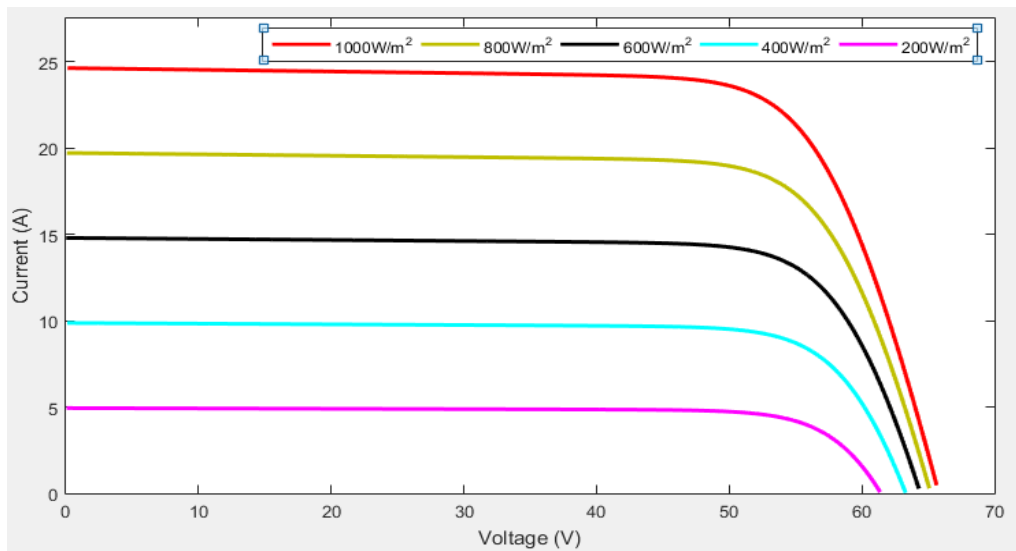


Figure. I.16 : Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement.

I.13.2. Influence de la Température :

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 50°C, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (2. (21,22)). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement pris en compte [15] .

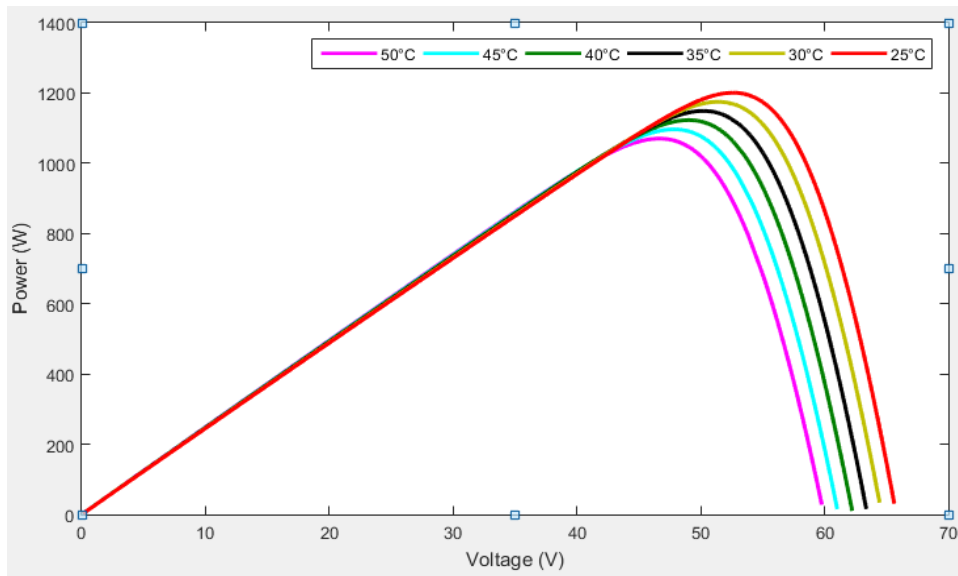


Figure. I.17 : Caractéristique P-V du module PV selon la température.

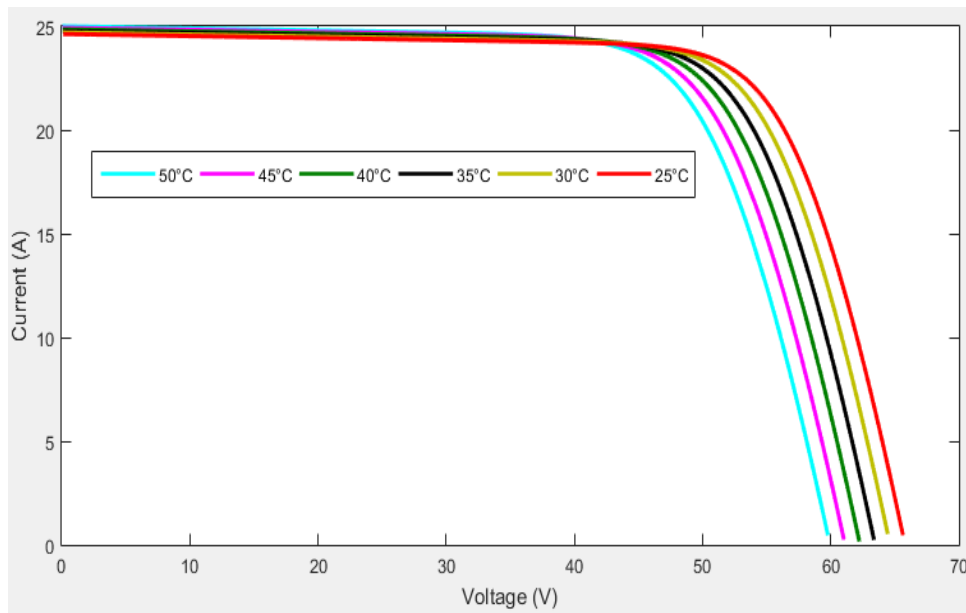


Figure. I.18 : La caractéristique I-V du module PV selon la température.

I.14. Facteur de forme, FF :

Le facteur de forme ou le facteur de remplissage ou Fill Factor FF(%) est utilisé pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule (P_{max}) et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.15)$$

Le FF traduit les pertes provoquées par les résistances série R_s et parallèle R_p de la cellule [16]. Dans le cas limite $FF=1$, la puissance extraite de la cellule est maximale [17].

I.15. Le rendement η :

Le rendement η (%) des cellules solaires indique le rendement de conversion en puissance. C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{FF.V_{co} I_{cc}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (I.16)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [18]

I.16. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.16.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

I.16.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

I.17. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques comme la cellule solaire, le module photovoltaïque et le panneau solaire.

Nous avons expliqué le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ces types. Ensuite nous avons présenté la structure des panneaux photovoltaïques plus les différents types de systèmes photovoltaïques pour l'habitat[19].

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les convertisseurs statiques DC/DC qui sont les Hacheurs ainsi que la commande MPPT avec la méthode de perturbation et observation (P&O).

II.1. Introduction

L'électronique de puissance, ou plus correctement « électronique de conversion d'énergie », à moins de 50 ans. Elle a connu un tel essor qu'aujourd'hui près de 15 % de l'énergie électrique produite est convertie sous une forme ou une autre. Au cours de ces années, la taille, le poids et le coût des convertisseurs n'ont fait que diminuer, en grande partie grâce aux progrès faits dans le domaine des interrupteurs électroniques [20].

Le nombre croissant de sources d'énergies renouvelables exige de nouvelles stratégies pour le fonctionnement et la gestion du réseau électrique afin de maintenir, voire améliorer la fiabilité du réseau et la qualité de l'énergie. En outre, de nouvelles structures de gestion de l'énergie deviennent de plus en plus importantes.

L'électronique de puissance est encore une technologie émergente et ses applications tendent à se multiplier. Sa fonction principale est de convertir l'énergie électrique à partir d'une étape à une autre. Elle joue un rôle important dans la production d'énergie électrique et l'intégration des sources d'énergies renouvelables dans le réseau électrique. Par ailleurs l'électronique de puissance est largement utilisée car ses applications deviennent plus intégrées dans les systèmes connectés au réseau électrique, comme les systèmes photovoltaïques (PV).

Au cours des dernières années, l'électronique de puissance a subi une évolution rapide due principalement à deux facteurs. Le premier est le développement rapide des semi-conducteurs et les progrès de la technologie des transistors, qui sont capables de commuter rapidement et de manipuler des puissances élevées. Les thyristors ont été substitués par des MOSFETs et des IGBTs alors que les onduleurs commutés à base de thyristors ont été remplacés par des onduleurs auto commutés à base de transistors MOSFETs et des IGBTs. Les onduleurs auto commutés utilisent, généralement, la commande PWM (Modulation à largeur d'impulsion) et une fréquence de commutation élevée (de 1 kHz à 20 kHz), ce qui permet de générer un signal de sortie pouvant être par faitement sinusoïdal. Cette conception est robuste, efficace, permettant de garantir une fiabilité élevée [20,21].

Le deuxième facteur est l'introduction des régulateurs capables d'implémenter des algorithmes de contrôle et de régulation puissants et complexes. Un intérêt très important pour le contrôle digital, dû à sa faible consommation en puissance et une immunité au bruit en utilisant les nouveaux processeurs, microcontrôleurs de nouvelle génération DSPs et les plateformes de base en FPGA (Field Programmable Gate Array)

II.2. Convertisseurs DC/DC (Hacheur) :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance. La figure I.1 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [22]

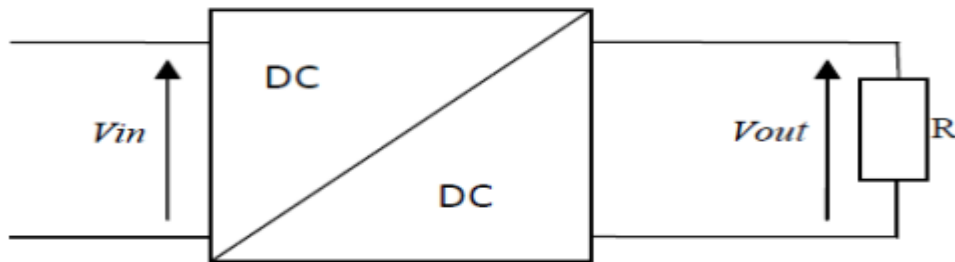


Figure. II.1: Convertisseur DC/DC [22].

II .3. La connexion directe source photovoltaïque charge[23] :

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque GPV et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du GPV.

Cette énergie est dépendante fortement de l'éclairement, de la nature de la charge et de la température. La connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en oeuvre, son coût minimal dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La figure 1 montre ce cas. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de 'réglage' de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. La connexion directe du générateur photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu. Il faut s'assurer, auparavant, que la charge accepte bien la connexion directe au générateur photovoltaïque: c'est le problème de dimensionnement.

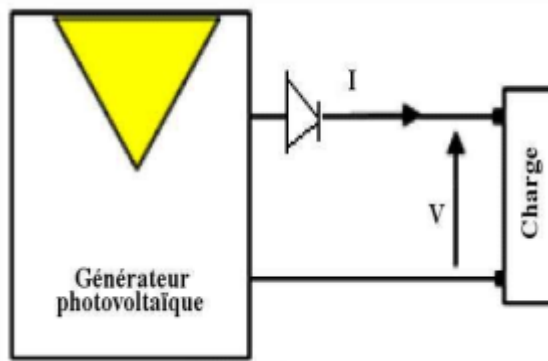


Figure. II.2 : Principe du couplage direct.

Une précaution doit être prise pour éviter de détériorer le générateur par un retour de courant sur ce dernier. Ainsi, une diode anti-retour est placée entre la source et la charge. Le principe du couplage direct GPV-Charge repose sur le transfert de la puissance de sortie de la source photovoltaïque vers l'équipement à alimenter, sans aucun système intermédiaire. Ce fonctionnement est reconnu sous la nomination 'fonctionnement au fil du soleil'. Le point de fonctionnement est particulièrement dominé par plusieurs facteurs à savoir [22-23]:

- _ la charge,
- _ les conditions de fonctionnement: éclairement, température,
- _ les types de connexions établies des modules photovoltaïques (parallèle, série, mixte).

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique courant-tension $I - V$ du GPV et celle de la charge. Les caractéristiques électriques d'un GPV peuvent changer rapidement en fonction de l'éclairage solaire, de la température et à plus long terme du vieillissement des cellules. La présente étude vise à analyser et ces pour diverses charges, les résultats obtenus pour une connexion directe. Etant donnée une charge résistive couplée directement au générateur photovoltaïque, le point de fonctionnement est donné par l'intersection de la caractéristique électrique de la charge à celle du GPV. Pour s'assurer que les cellules travaillent à leur puissance maximale, il faut veiller à ce que la charge impose ce point de fonctionnement optimal. Dans le cas du branchement d'une charge résistive, il faut que l'impédance de la charge évolue pour que les modules restent tout le temps à leur point de fonctionnement optimal afin d'assurer une bonne exploitation des cellules photovoltaïques. Ceci n'est pas toujours le cas. Nous supposons que la nature de la charge est de type continu (DC). En effet, une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion

directe, car le GPV fournit un courant continu. Trois types de charges DC typiques existent: une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la figure 3, nous avons représenté les caractéristiques courant-tension $I - V$ d'un GPV, ainsi que les caractéristiques $I - V$ des trois types de charges.

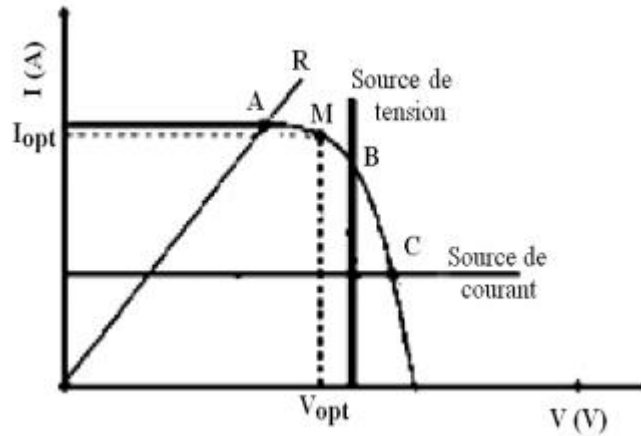


Figure. II.3 : Types de charges en connexion directe .

Nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale: point M pour un courant optimal (I_{opt}) et une tension optimale (V_{opt}). Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques $I - V$ du générateur et celles des trois types de charges: - Point A pour une charge résistive, - Point B pour une charge de type source de tension et - Point C pour une charge en source de courant, correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible P_{opt} . Donc, une perte d'une partie de la puissance dé livrable aux bornes du générateur PV peut se produire, ce qui implique à la longue des pertes de production énergétiques importantes. Ceci n'est pas observé, dans tous les cas de connexion directe GPVCharge, comme peut le montrer, ce présent travail.[24]

II .4. Connexion indirecte :

Comme nous l'avons vu précédemment, un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximale. Ces caractéristiques dépendent aussi du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. En plus, d'après la figure (3), la valeur de la puissance nominale délivrée par le GPV diffère beaucoup de celle réellement transférée à la charge . Il est donc nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (4) pour extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de le transférer à la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant le transfert du maximum de puissance fournie par le

générateur à l'aide d'un système de contrôle utilisé à cet effet. Dans notre cas l'étage d'adaptation qui nous concerne est le convertisseur DC-DC

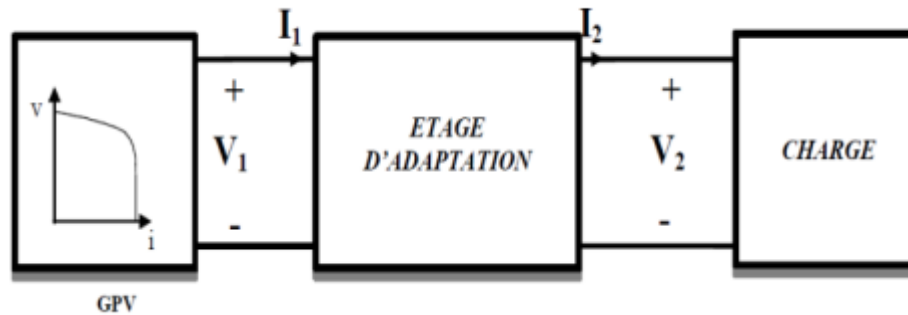


Figure. II.4 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

. II.5. Hacheur survolteur (Boost) :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure 6 Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [25].

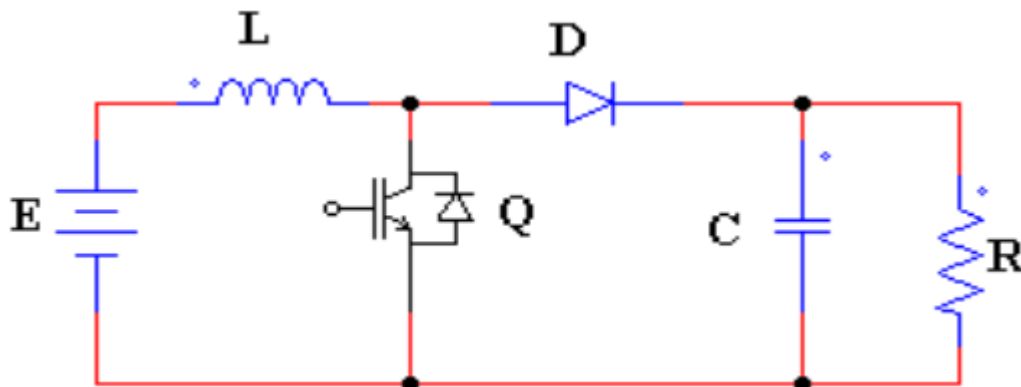


Figure. II.5 : Convertisseur survolteur (boost) [25].

II .5.1. Modélisation du hacheur survolteur :

Le convertisseur survolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur booste ou hacheur parallèle. La figure.II.8 représente le convertisseur survolteur. Ce convertisseur se compose d'une source d'entrée de type continu : inductance en série avec une source de tension, et une sortie de type continu (la charge) : condensateur en parallèle avec la charge résistive. Puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage), l'interrupteur K peut être remplacé par un transistor [26].

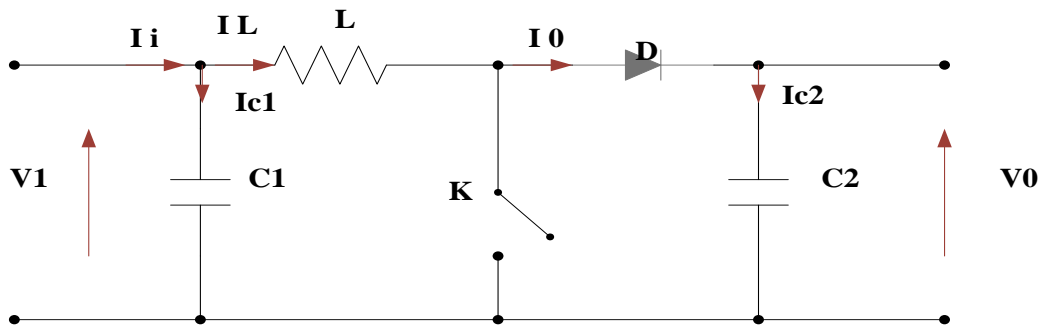


Figure. II.6 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost [29]

Pendant la durée αT , l'interrupteur est fermé et le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $[\alpha T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_K = V_0$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [27] :

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \quad (\text{II.1})$$

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La Figure.II.9 montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur survolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant dits et l'interrupteur ouvert pendant $(1-d)$ TS. [28]

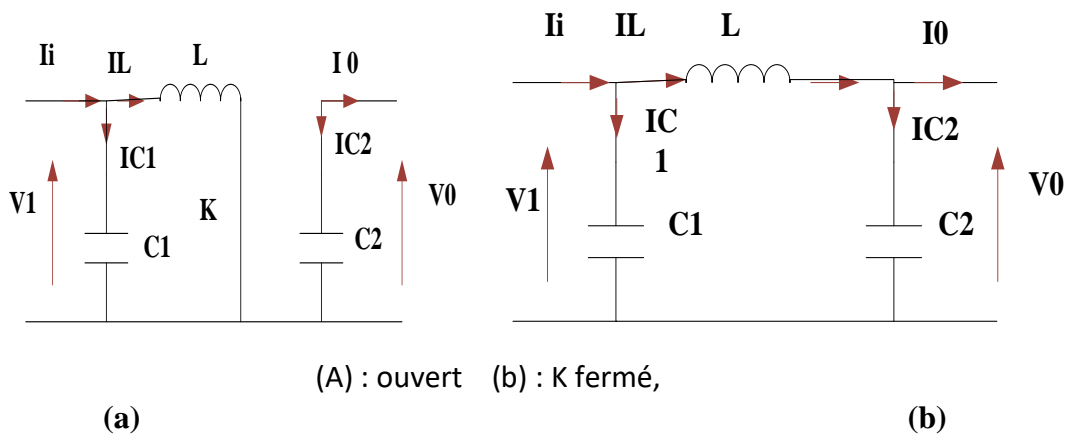


Figure. II.7 : Schémas équivalents du hacheur.[29]

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement, on a les systèmes d'équations suivants :

- Pour la première période $T \in [0, \alpha T]$:

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = +V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

- Pour la deuxième période $T \in [T, \alpha T]$:

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T , on utilise généralement l'expression suivante [29] :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt} \Delta T_s + \frac{dx}{dt(1-D)T_s} (1-d)T_s \quad (\text{II.4})$$

En appliquant la relation (II.5) sur les systèmes d'équations (II.3) et (II.4), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur : [30]

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

II .6 puissance maximale d'un générateur PV

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge instant. La (figure III.1) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

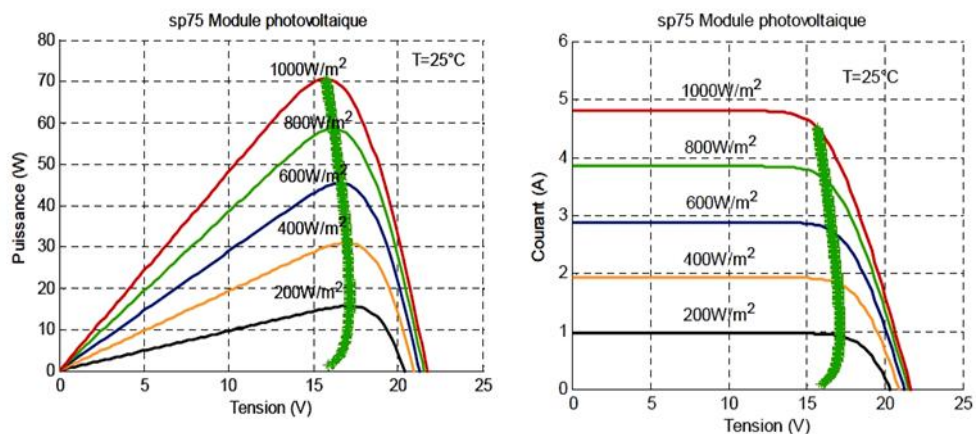


Figure. II.8 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM .

La figure III.2 présentée le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome .Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé[29].

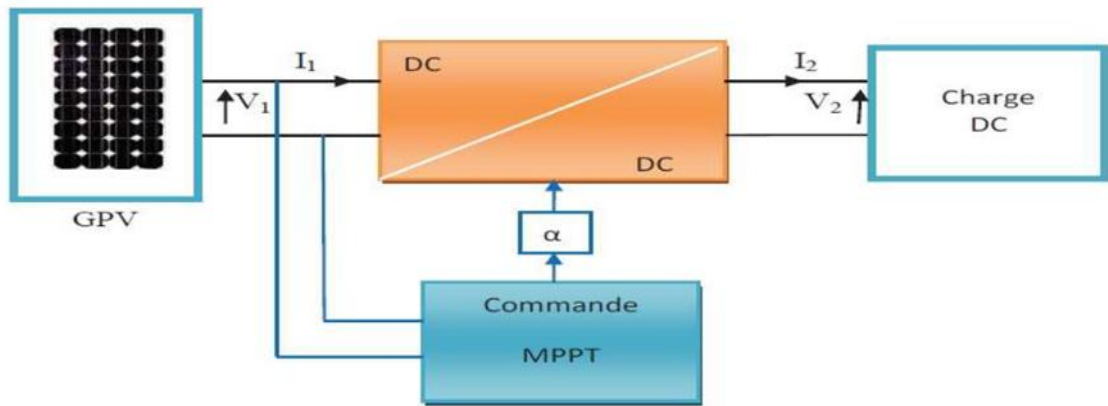


Figure. II.9: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont utilisées, ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques basées sur des méthodes optimales [31].

II.7. Gestion de la MPPT :

La figure III. 3 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [32] .

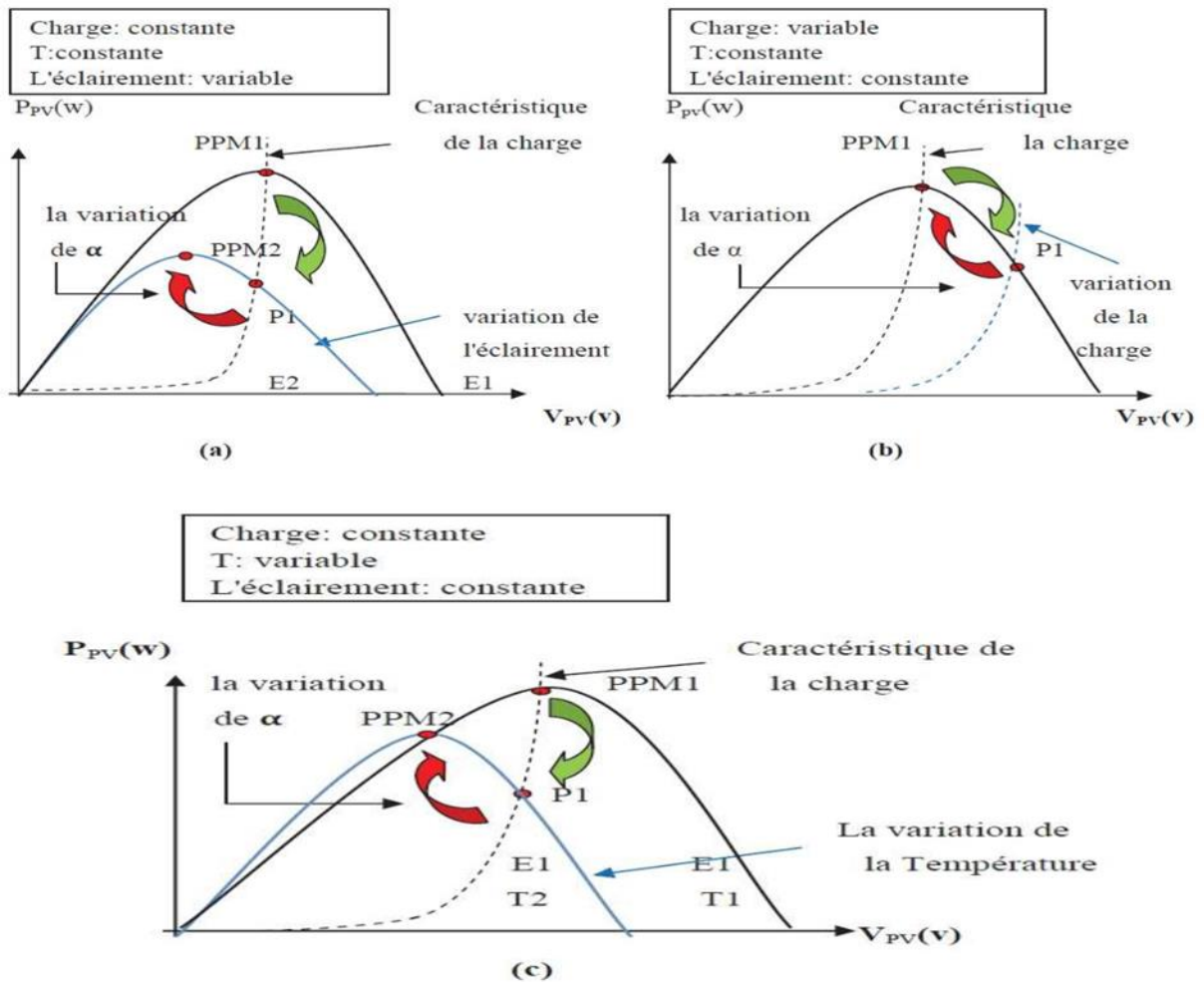


Figure . II.10 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température .

II.8. Méthode de perturbation et observation (P&O) :

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique, il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P_{Gpv}(n)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P_{Gpv}(n-1)$ alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La Figure III.3 donne l'organigramme de cet algorithme.

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme 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.

L'inconvénient de la méthode P&O est lorsqu'une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale.

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau VPV avec un ΔV et on observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

Si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP [33].

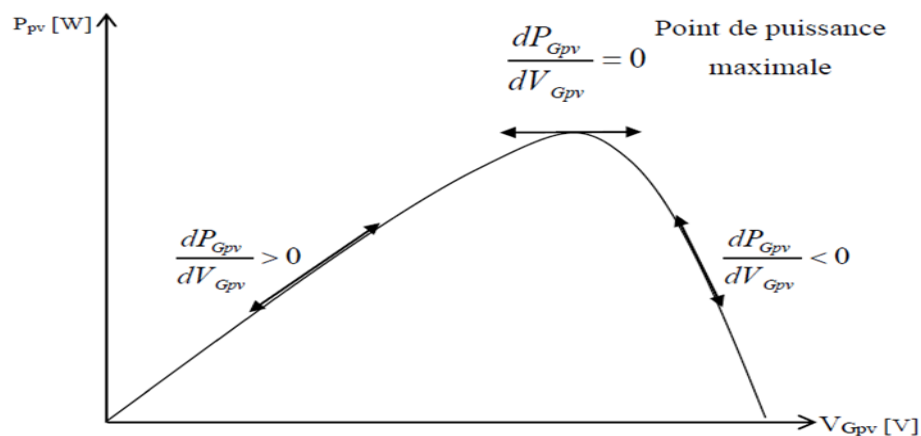


Figure II.11: Caractéristiques de fonctionnement de la méthode Perturbation-Observation

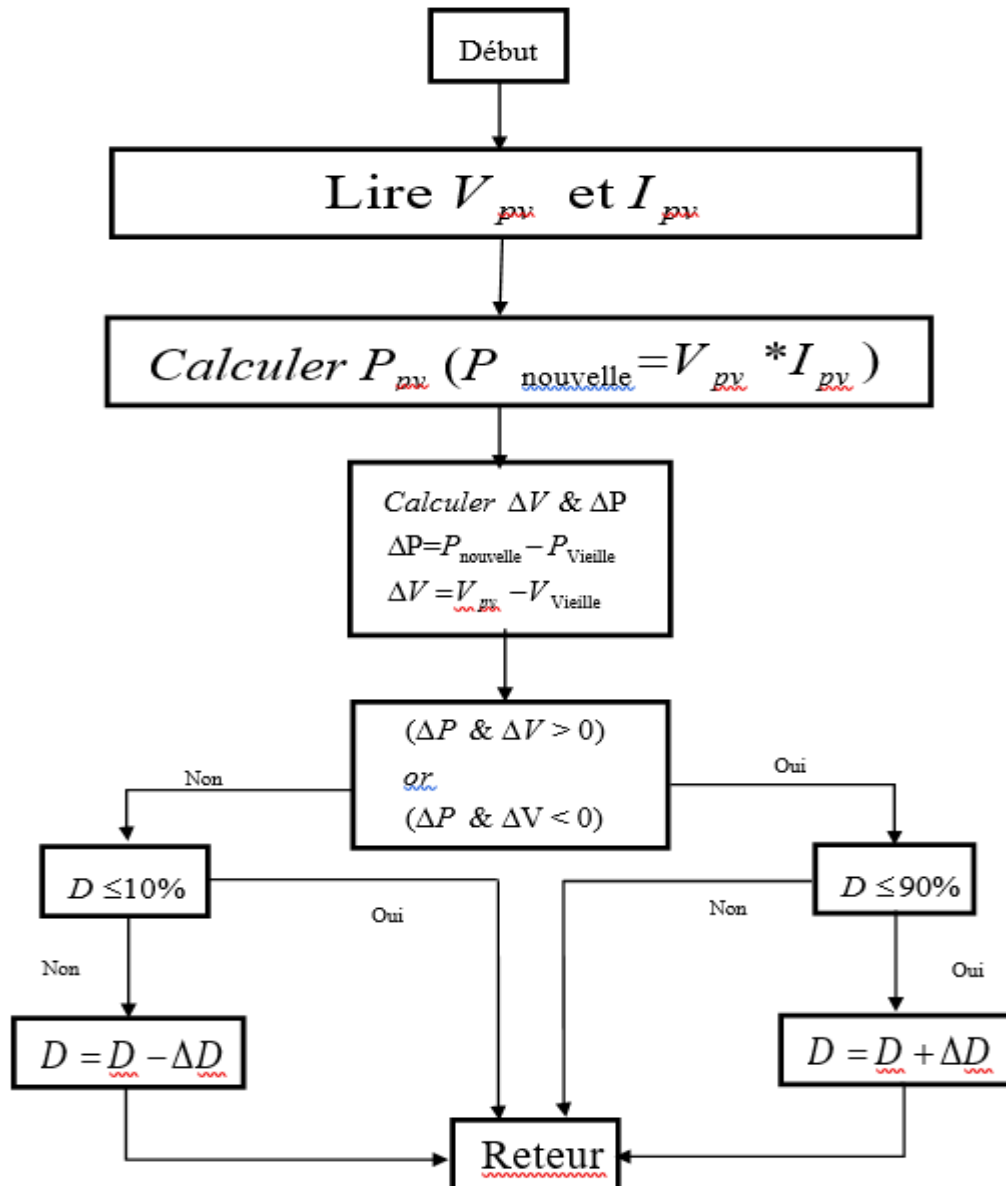


Figure II.12 : Algorithme de la méthode de Perturbation et Observation [36].

L'algorithme Perturbation-Observation "P&O" est souvent le plus utilisé dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Pour cette méthode, à partir de la caractéristique PV, on considère que le générateur photovoltaïque fonctionne à un point qui n'est pas forcément le MPP.

On perturbe la tension de fonctionnement avec (ΔV_{Gpv}) et on observe la variation (ΔP_{Gpv}) de la puissance électrique. Si (ΔP_{Gpv}) est positif, alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP. D'autres perturbations successives de la tension dans la même direction (c'est-à-dire avec le même signe algébrique) devraient déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP. Dans le cas où (ΔP_{Gpv}) est négatif, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP, et donc le signe algébrique

de la perturbation de la tension devrait être inversé pour déplacer de nouveau le point de fonctionnement vers le MPP [34].

Sur la Figure III.4 on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP, du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe P(V) du panneau se déplace vers la courbe alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce si nous emmène à $\Delta P > 0$ avec $[\Delta P = P(i) - P(i-1)]$ le MPPT continu à perturber les tensions dans la même direction c-à-d vers le point B2.

Si l'éclairement augmente toujours le point de fonctionnement se déplace vers le point C1 de la courbe (3) au lieu du point B2 sur la courbe (2) alors le MPPT a toujours $\Delta P > 0$ et il déplace le point de fonctionnement vers le point C2.

A partir des points A \rightarrow B1 \rightarrow C1 \rightarrow C2 l'algorithme P&O continu à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminue [37], [38].

II .9: Le bloc de Simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O) :

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O figure (III. 6), en nous basant sur l'organigramme illustré sur la figure.

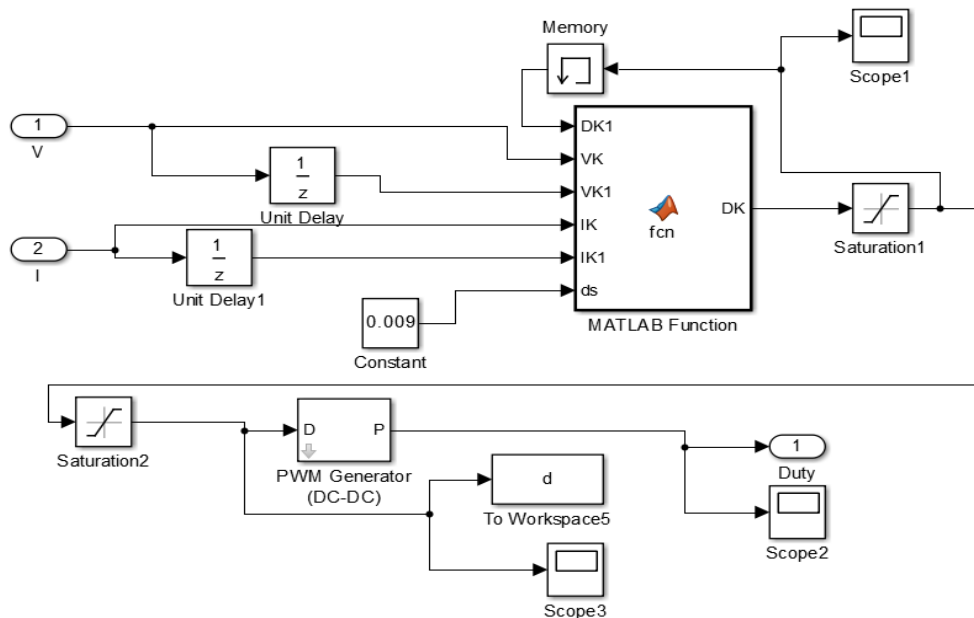


Figure. II.13: schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).

II .10.Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC :

- Schéma bloc :

La figure II.14 illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT .

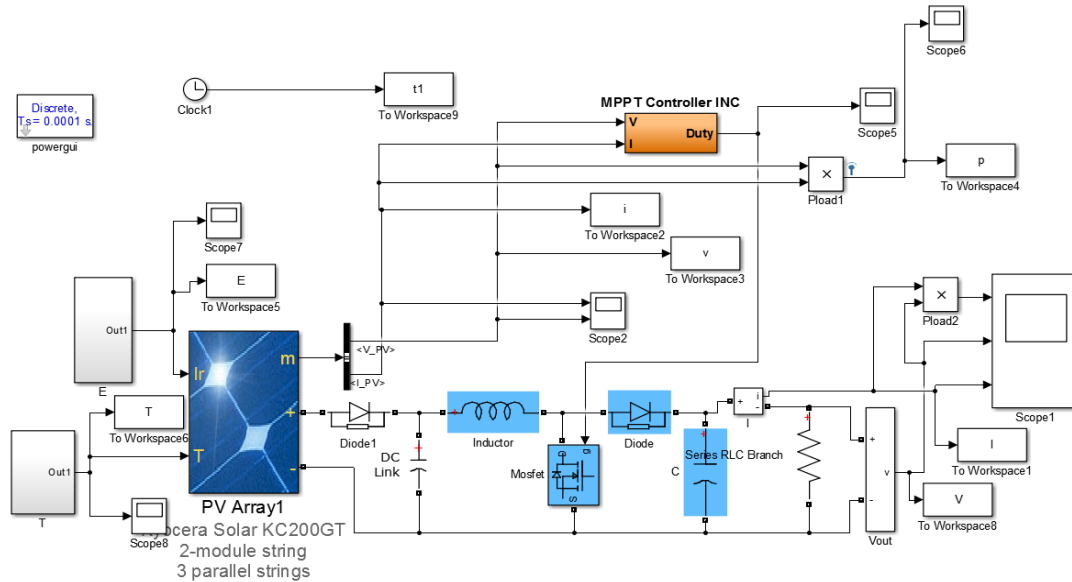


Figure II.14: Schéma bloc d'un photovoltaïque muni de la MPPT.

- Les caractéristiques utilisées pour le module PV sont données par le Tableau II.1

Nombre de cellule en série par panneau (Ns)	54
Puissance maximale (P_max)	200.143 W
Courant de court-circuit (I_cc)	8.21 A
Tension de circuit ouvert (v_co)	32.9 V
Courant au point de MPP (I_op)	7.61 A
Tension au point de MPP (v_op)	26.3 V
Nombre de panneau en série (Nps)	2
Nombre de panneau en parallèle (Npp)	3

Tableau II.1 :Fiche technique de KC200GT aux conditions STC .

Les paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant :

Paramètre	Nom	Valeur
L_i	Inductance du convertisseur	4 mH
C_i	Capacité d'entrée	4700 uF
C_o	Capacité de sortie	470 UF
R	Resistance de charge	200Ω

Tableau II.2 :Les paramètres du convertisseur.

➤ **Commentaire :**

La figure suivante présente allure de puissance en fonction de tension d'un système photovoltaïque (panneau 200w) commandé par un contrôleur **PO** dans une température et éclairements variable.

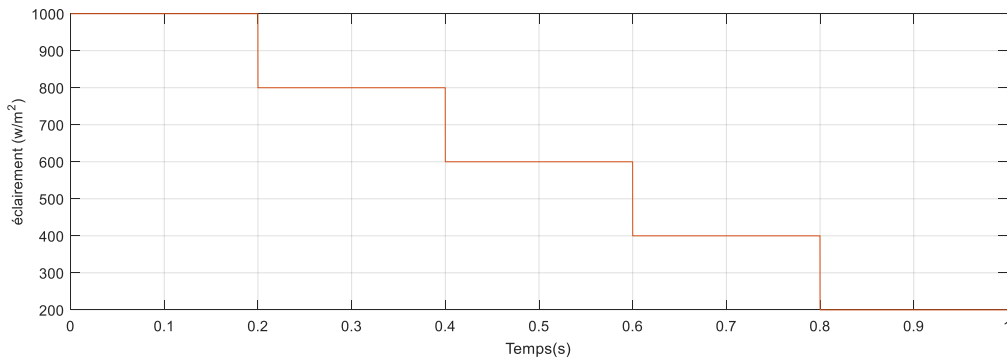


Figure II.15 :Variation de éclairement .

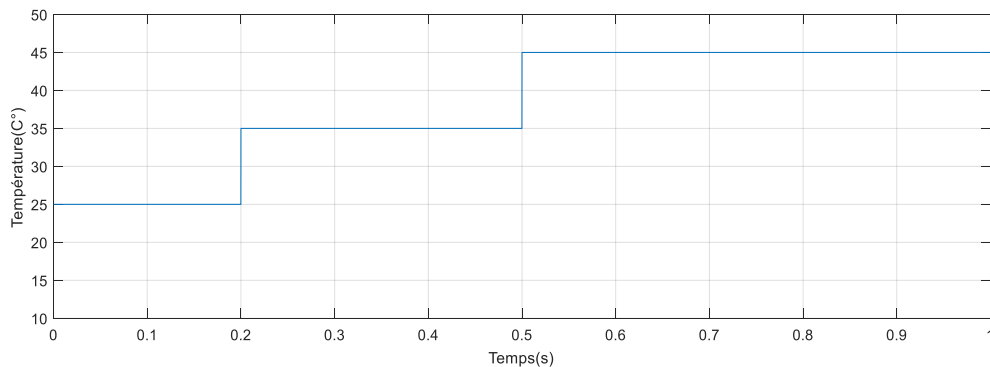


Figure II.16 :Variation de la température.

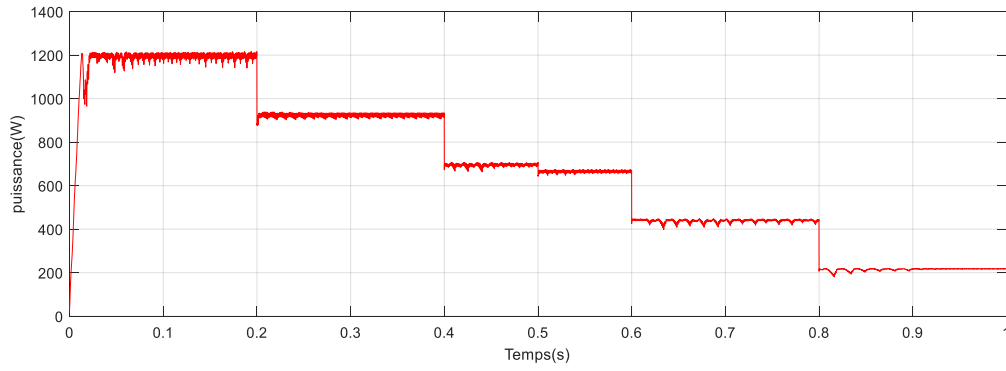


Figure II.17 : Caractéristiques $P(t)$ d'un système PV.

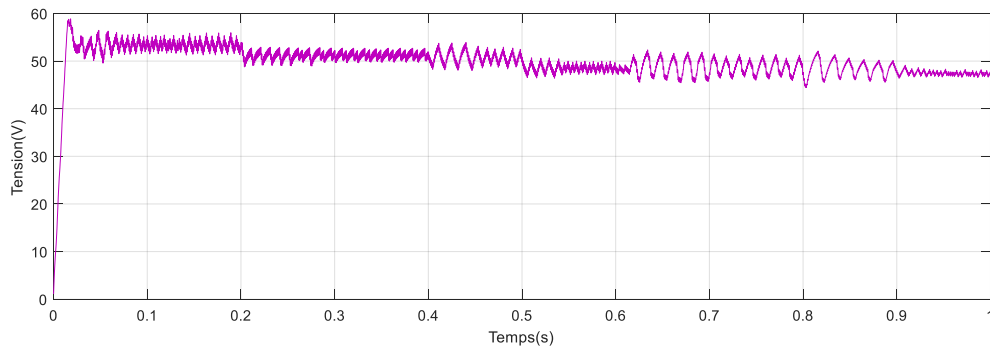


Figure II.18 : Caractéristiques $v(t)$ d'un système PV.

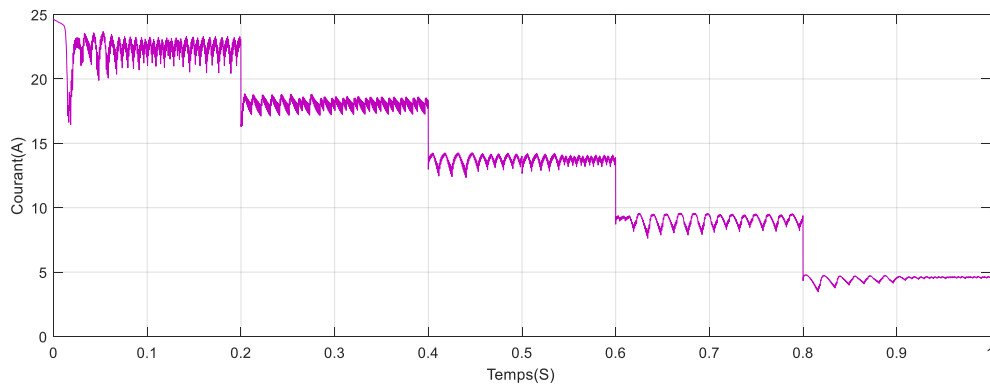


Figure II.19 : Caractéristiques $i(t)$ d'un système PV.

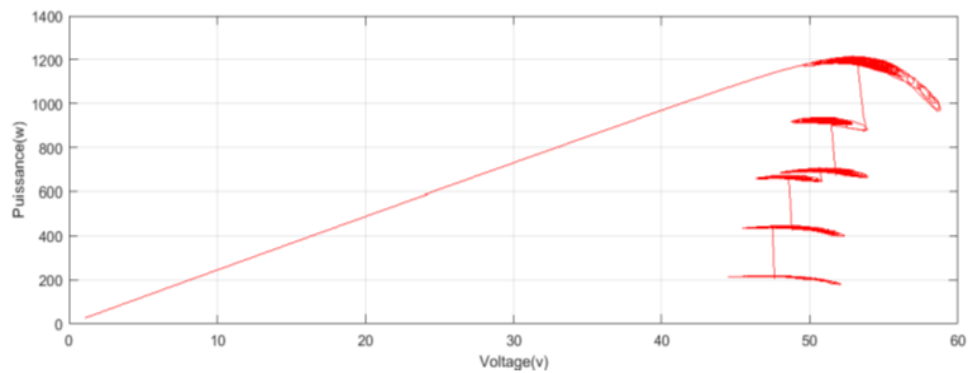


Figure II.20 : Caractéristiques $p(v)$ d'un système PV.

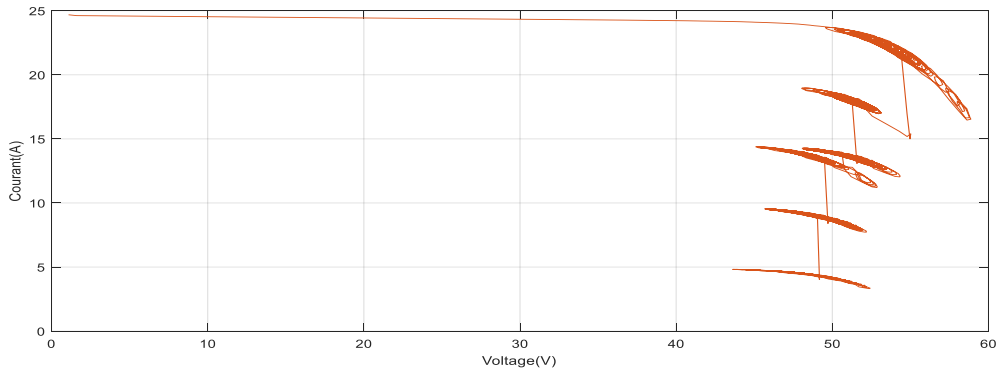


Figure II.21: Caractéristiques $i (v)$ d'un système PV.

Comment sur les figures:

La figure (2.20) présente allure de puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur de perturbation et observation (P&O).

- ✓ dans une température et éclairements variable, on remarque que la puissance met un temps d'oscillation de (0.01s) pour se stabiliser à la valeur maximale de la puissance (1200W) .
- ✓ Les figures (2.20), (2,21),(2,22) présentent allure de puissance et la tension en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur IC dans une température Variable et différentes éclairements :
- ✓ Dans un premier temps, nous avons soumis le système à une variation de luminosité $E=200, 400, 600, 800,1000 \text{ W/m}^2$. À l'instant $t=0.2s$ avec une température variable(25,35,45°C). Par conséquent, nous constatons dans les figures (2.20, 2.21), une augmentation de la tension qui induit une diminution de la puissance, le point de fonctionnement du système s'éloigne du MPP, après 0.01s. La commande remonte le Point de fonctionnement est le stabilise au tour du MPP avec une certaine oscillation qui est causée par l'algorithme de commande [39].

II .10 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude par simulation MPPT par méthode la méthode (P&O) .qui basées sur contrôlé la réaction de puissance, Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Finalement les résultats de simulation pour l'algorithme P&O du système global sont construits sous Matlab-Simulink .

III .1. Les systèmes de pompage photovoltaïque :

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. [40]

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. La technologie sans batteries a quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui dépend de l'ensoleillement au cours de la journée. Nous allons faire une étude avec l'ajout de batteries dans le système de pompage photovoltaïque.

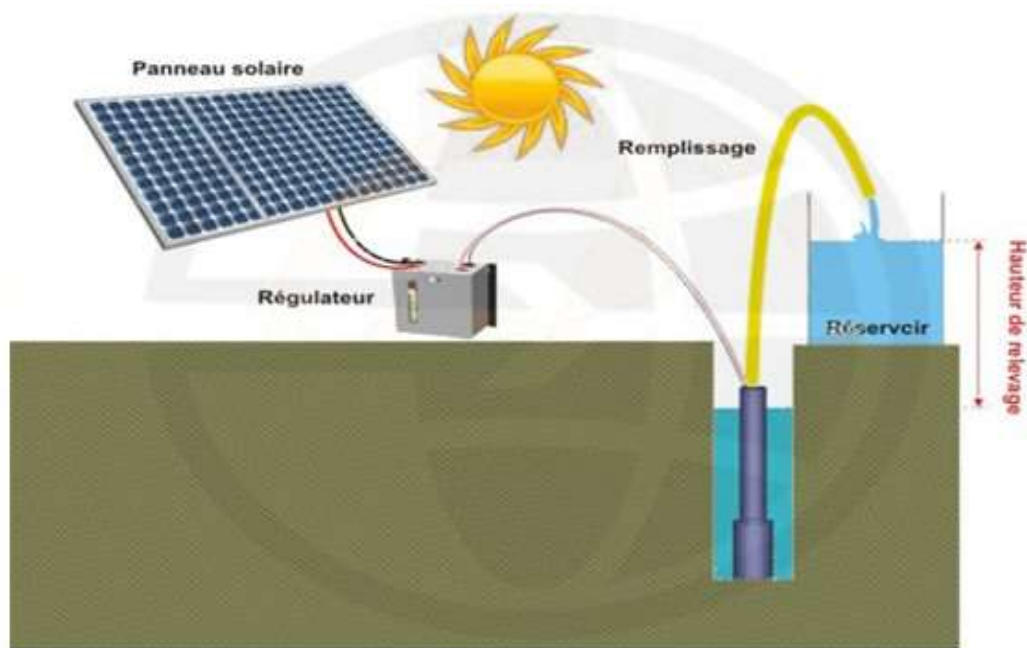


Figure. III.1: Les systèmes de pompage photovoltaïque.

III.2.Modélisation d'une MCC à excitation séparée (Indépendante):

La modélisation de la machine à courant continu en régime transitoire permet notamment de mettre en évidence certains phénomènes qui apparaissent lors du fonctionnement de la machine tels que : le démarrage, le freinage, la réaction d'induit, la commutation, la variation de la vitesse, etc.

Considérons un moteur à courant continu à flux constant obtenu par excitation séparée. Ce type d'excitation nous permet d'obtenir une commande en vitesse relativement simple qui s'opère par action sur la tension de l'induit.

III.3.Mise en équation de la machine :

La modélisation de l'ensemble moteur + charge est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu et de la relation fondamentale de la dynamique. Le schéma électrique d'une MCC à excitation indépendante est le suivant :

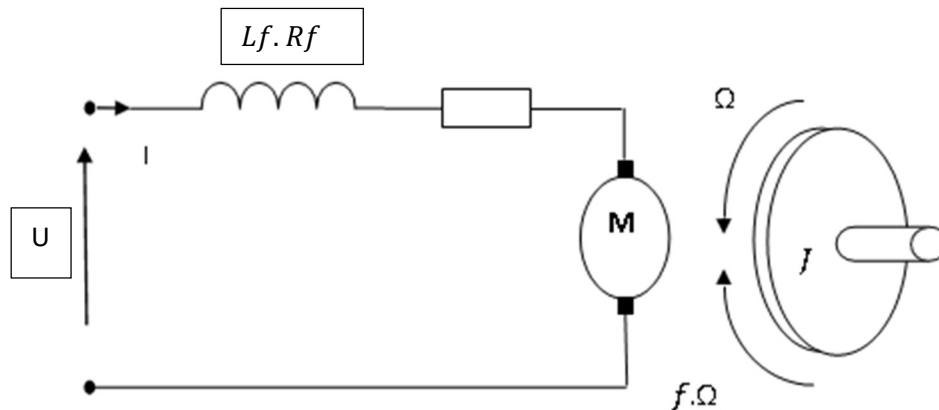


Figure . III.2 Schéma électrique d'une MCC à excitation séparée.

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

- Equation de l'inducteur :

$$U_e = R_e \times I_e + \frac{dI_e}{dt} \quad (\text{III. 1})$$

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

- Equation de l'inducteur :

$$U_a = R_a \times I_a + L_a \times \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{III.2})$$

Avec Ω vitesse de rotation en radians/seconde.

- Equation du flux :

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

$$\Phi_e = Mea \times I_e \quad (\text{III. 3})$$

- Equation du couple :

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique :

$$Pe = Ia \cdot E = Ia \cdot K\Omega\Phi = Ce\Omega \quad (\text{III.4})$$

Ce qui donne :

$$Ce = K \cdot Ia \cdot \Phi \quad (\text{III.5})$$

- Equation mécanique :

$$Ce - Cr = \sum j \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{III.6})$$

Où c'est le couple électromagnétique, Cr le couple résistant imposé par la charge, $\sum j$ le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et f le frottement proportionnel à la vitesse de rotation.

III.4.Modèle de la pompe :

La pompe est un élément essentiel des systèmes de pompage. Dans notre travail on a utilisé une pompe centrifuge. Son couple de résistance Cr est donné par l'équation suivante :

$$Cr = k \cdot \omega c^2 \quad (\text{III.7})$$

Où kr est le coefficient de proportionnalité (Nms² / rad²).

- L'équation mécanique du système est :

$$Cm - Cr = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{III.8})$$

- Où J est le moment d'inertie du groupe moteur pompe (kg/m²).

Commande en courant par hystérésis

La réalisation de cette technique, régulation par tout ou rien, consiste à accomplir les deux étapes suivantes :

- Comparer le courant mesuré avec le courant de référence ce qui produit un signal de commande qui sera le signal d'entrée appliqué au comparateur à hystérésis.
- Fixer une bande dans laquelle le courant peut évoluer. L'atteinte du courant à l'une des limites provoque le changement du fonctionnement des interrupteurs de telle manière que le courant ne dépasse pas cette limite et se dirige vers l'autre.

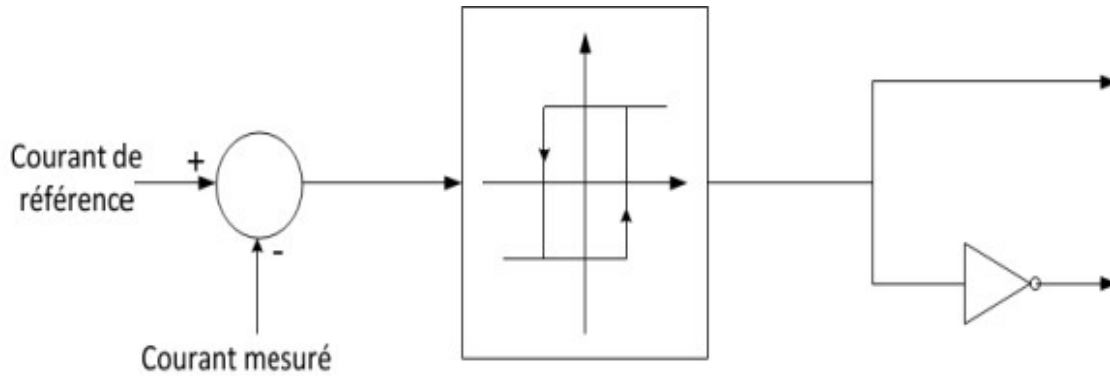


Figure III. 3 : Principe de commande par Hystérésis.

Régulateur de vitesse

le régulateur de vitesse ici est action par une douzième hacheur de type série muni d'une commande de la machine. il doit permettre de transformer la tension fixe fournie par le première hacheur à une tension continuellement variable

la commande en vitesse d'une machine à courant continu via un régulateur pi qui générè la courant de référence est la dernier réglé par une régulateur a hystérisis .

III.5. Simulation et résultats :

La simulation est réalisée en utilisant des blocs MATLAB / SimPowerSystem comme indiqué dans Fig.III-9.

Fondamentalement, les composants électriques (panneau, convertisseur, moteur) sont connectés entre eux par des ports électriques représentant les bornes négatives et positives.

Les deux entrées du système, et donc du panneau PV, sont la température et l'irradiation Solaire et la sortie principale du système se trouve être la vitesse du moteur qui rejoint

ensuite l'entrée de la pompe. les paramètres du modèle sont disponibles en annexe.

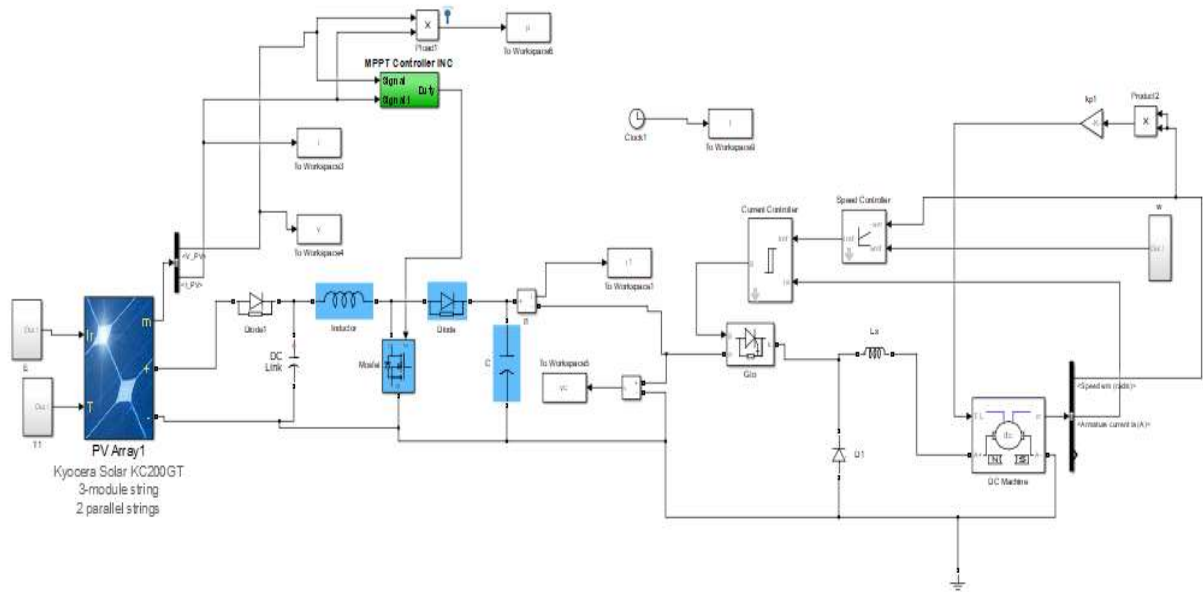


Figure. III.4 : Bloc Simulink du d'une groupe DC Motor-pompe avec PV

Pour montrer l'efficacité de la stratégie de commande étudiée, on fait varier la température ambiante et l'ensoleillement solaire comme illustré par la figure (III.5-6).

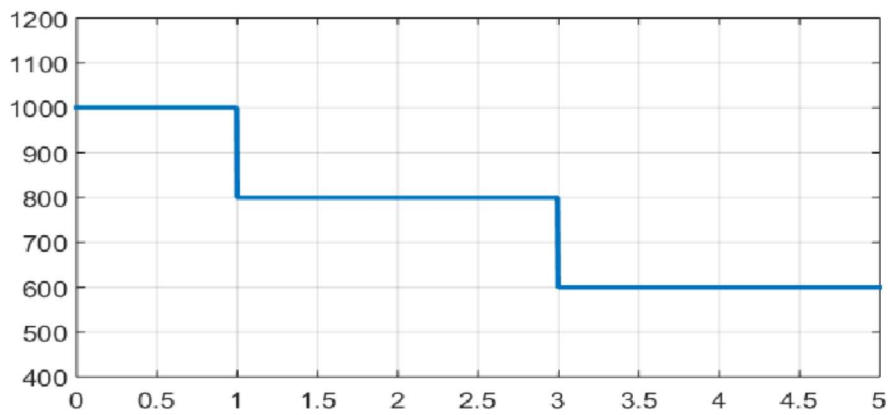


Figure . III.5: Variation de éclairement

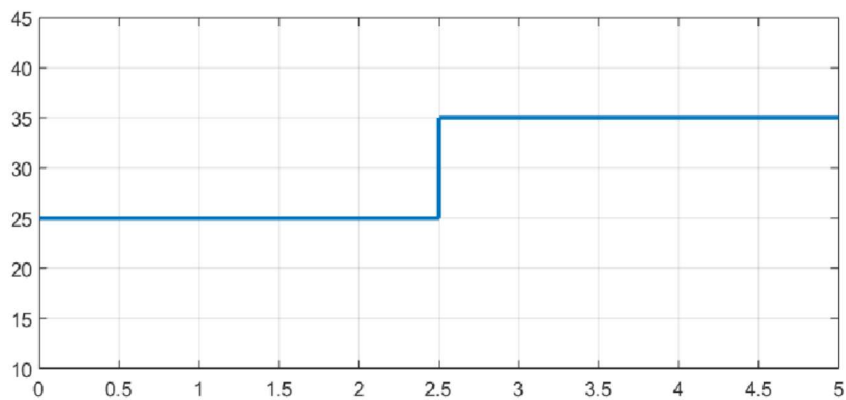


Figure . III.6 : la température panneau solaire

Les résultats de simulations sont montrés par les figures suivantes:

Malgré une irradiation solaire très fluctuante, le stratégie est capables de produire le maximum de puissance (un graphique de puissance du panneau PV est disponible en chapitre 2)

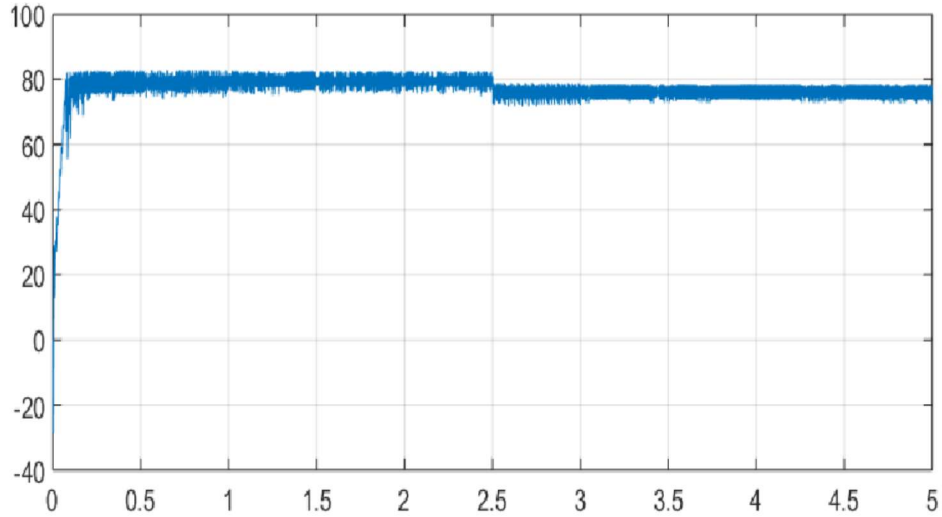


Figure . III.7: La Tension de PV

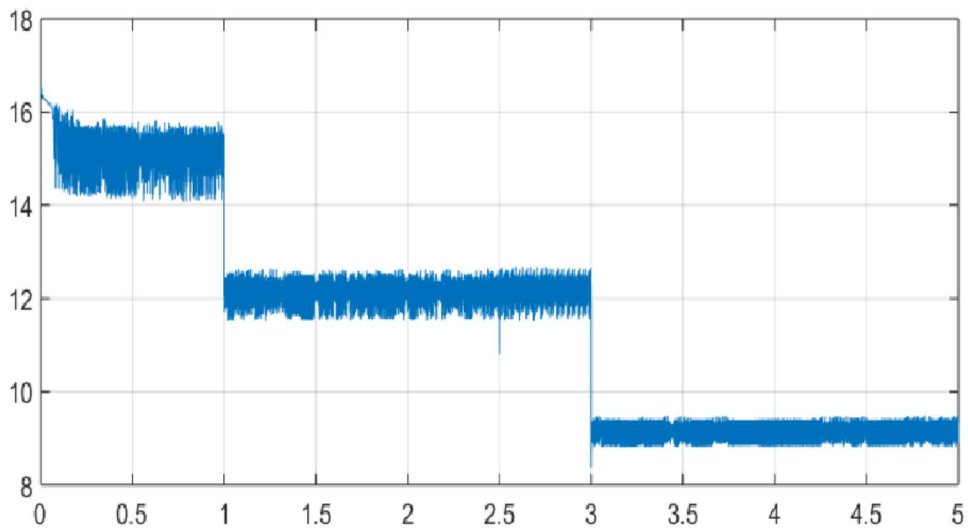


Figure . III.8 :La Puissance du GPV pour un éclairement variable .

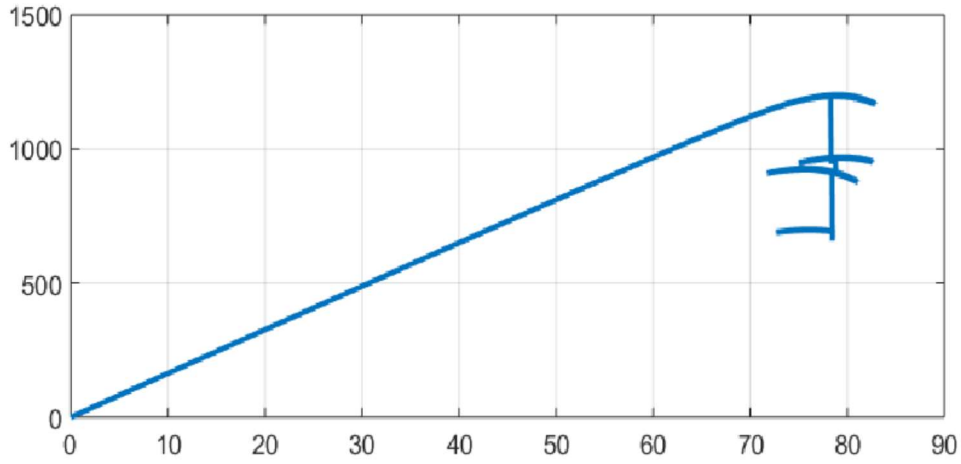


Figure . III.9 : La Puissance du GPV en fonction de la tension

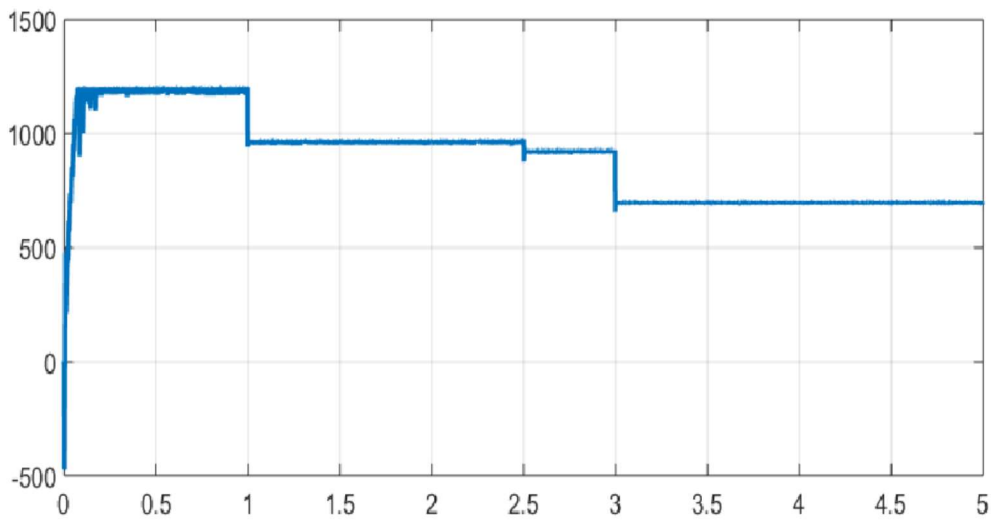


Figure . III.10 : La Puissance du GPV

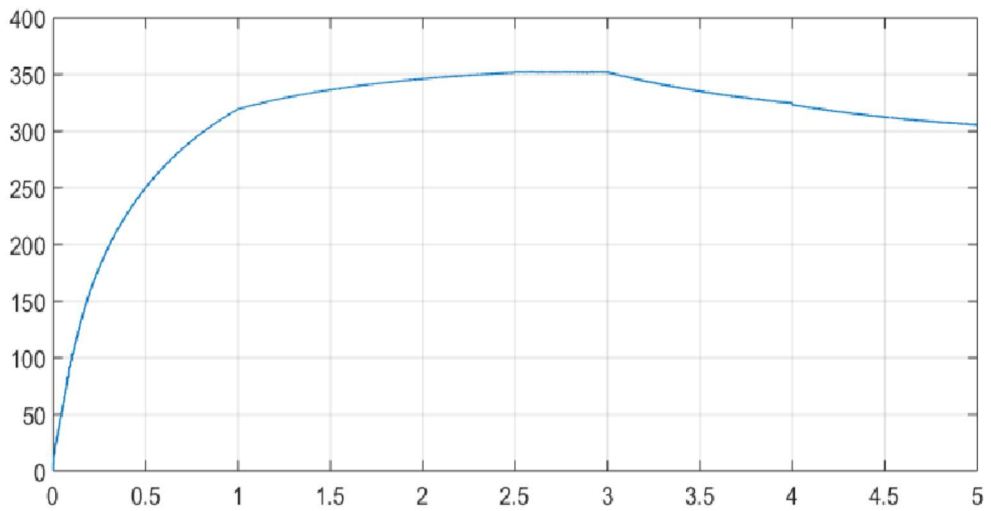


Figure. III.11 : La Tension du MCC.

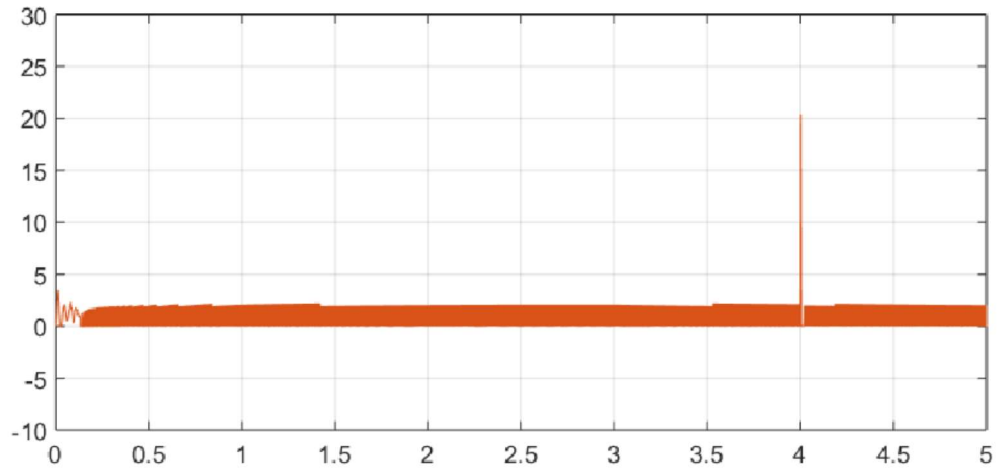


Figure . III.12 : Le courant du MCC.

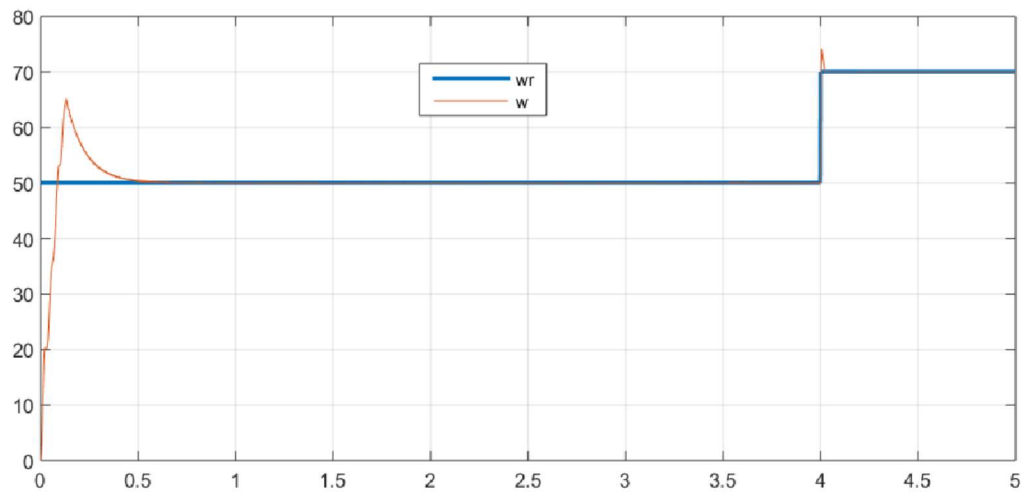


Figure. III.13 : variation de la vitesse de rotation du moteur

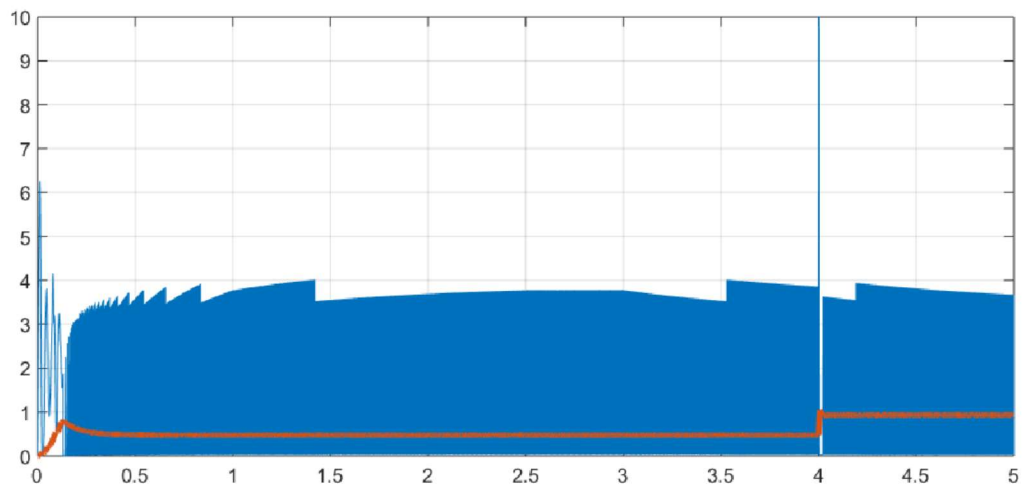


Figure . III.14 : La couple du MCC

Interprétation :

La variation de l'éclairement et la température en fonction du temps n'influe pas sur la vitesse du moteur qui dépend à sa valeur de référence

Pour la vitesse on a une excellente convergence vers la valeur de référence La figure (II.14) représente la réponse en vitesse de la MCC avec correction d'erreur

Une augmentation de la température au-delà de la température optimale entraîne une diminution de la puissance et la tension du panneau photovoltaïque.

on constate que la tension et la vitesse du moteur variant autour leurs valeurs acceptable, respectivement. En conséquence, on peut conclure que l'approche présentée garantit un bon fonctionnement du système de pompage PV.

nous remarquons que pour des faibles valeurs d'éclairement et grand valeur de température , les points de fonctionnement s'éloignent de la puissance optimale. et le système fonctionne alors bine.et le moteur fonctionne en mode normale .

L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque et la courant statorique du moteur sont représentés dans la figure (III.14), le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant.

Les résultats de simulation obtenus ont montré sa robustesse que ce soit en régime transitoire ou en régime établi. Pour une variation brusque de l'éclairement un meilleur temps de réponse et de faible oscillation ont été obtenu. En ce qui concerne le régime permanent, finalement cette approche a donnée des résultats acceptables.

III. 6: Conclusion

Le but de ce travail est l'étude de la commande on vitesse d'un moteur à courant continu dans un système de pompage d'eau avec de l'énergie solaire.

Dans ce dernier chapitre, nous avons validé par simulation la chaîne de pompage complète. Composé d'un moteur à courant continu et pompe centrifuge, via un convertisseur DC/DC de type Boost. Ce qui nous a permis de conclure que :

la puissance maximale est obtenue annule les effets des perturbations causées par les variations des conditions environnemental et le réguler la vitesse du moteur à courant continu aimant permanent alimenté par des panneaux solaires photovoltaïques peut être contrôlée .

Conclusion générale :

L'objectif de ce mémoire été de faire la modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque pour pompage d'eau. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale, un convertisseur statique et un groupe DC motopompe.

Dans ce contexte, les principes de base de la conversion photovoltaïque suivie d'une modélisation et d'une simulation d'un panneau photovoltaïque sous l'environnement MATLAB/Simulink est présente. Avec la technique MPPT le système fonctionne à sa puissance maximale.

Le comportement du système de pompage solaire sera analysé avec des simulations. Le système de pompage Agricole complet construit à l'aide de **Matlab/Simulink - SimPowerSystems** et testé dans diverses conditions de fonctionnement. La simulation présente la simplicité, le coût faible et la possibilité de bonnes performances. Les résultats sont très satisfaisants. Même pour de faibles valeurs l'éclairement et grand valeur de température le moteur fonctionne en mode nominal.

Références bibliographiques :

- [1] **B . Abdelbacet , S . Benyoucef**, «étude technico économique d'un système photovoltaïque en site isolé», Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018.
- [2] <https://opera-energie.com/energie-solaire>
- [3] **Z . Asma** «Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT» , Université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen 2016
- [4] **B . Houssam eddine A.Walid** «Commande floue pour l'optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque»; Mémoire de Magister , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2019 .
- [5] **Mr BAILEK Nadiem** « Étude et Modélisation du Flux Solaire globale sur surface inclinée dans la région de Touat » Thèse de Doctorat , UNIVERSITE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES 2018 .
- [6] **Ben Khaled Abdallah , Ayad Mustapha Fawzi** « Commande robuste du système PV par les algorithmes MPPT » , Mémoire de Magister , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2021.
- [7] **J. Royer ; T .Djiako ;E. Schiller ; B . Sada Sy** « LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE» livre »;Université d'Ottawa TJ912.P65 1998
- [8] **Ben Khaled Abdallah ; Ayad Mustapha Fawzi** «Commande robuste du système PV par les algorithmes MPPT» Mémoire de Magister , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2021 .
- [9] **A. Ould Mohamed Yahya¹, A. Ould Mahmoud¹ et I. Youm^{2,3}** «Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque», revue des energies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [10] **M. Z. F.Z. Zerhouni**, «Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique» Revue des Energies Renouvelables, vol. 11 , no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [11] **M. SLAMA Fateh**, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique» Mémoire de Magister , UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF, 2012 .
- [12] **Cedric Cabal** , «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque » Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2008. Français.
- [13] **Angel Cid Pastor** , « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » INSA de Toulouse, 2006. Français

- [14] **Daniel Depernet, Julian Vernier, Pierre-Alexis Gril** , « Caractérisation de panneaux photovoltaïques par mesure d'impédance » Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France
- [15] **M. SLAMA Fateh**, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique» Mémoire de Magister , UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF, 2012
- [16] **Y.VESCHETTI**. «Modélisation caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïque sur substrat de silicium mince». Thèse de Doctorat Louis Pasteur Strasbourg, 2005
- [17] **S.GUITOUNI**, «Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des Applications Photovoltaïques», Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri–constantine1, 2017.
- [18] **BENDJEBBAR Kamel Eddine**, «Amélioration des rendements des cellules photovoltaïques à filière silicium», Thèse de Doctorat ; Université des Sciences et Techniques d'Oran Mohamed Boudiaf
- [19] **A. Azi**, «Contribution au développement d'un outil d'aide aux performances diagnostic des MPPT dans la chaîne de conversion photovoltaïque », Mémoire magister, Université de M'sila, 2014.
- [20] **M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V. G. Agelidis**, « Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—An overview », in Proc. IEEE PESC'02, vol. 2, pp. 1995–2000, 2002.
- [21] **H.Haeberlin**, « Evolution of inverters for grid connected PV-systems from 1989 to 2000 », in Proc. 17th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. ,pp. 426–430. Munich, Germany, Oct. 22–26, 2001.
- [22] **FERRAH FATEH**, «Etude et simulation d'un étage mppt pour un système à énergie renouvelable », Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013
- [23] **N. Nobuyoshi and I. Takayoshi**, «A Control Method to Charge Series-Connected Ultraelectric Double-Layer Capacitors Suitable for Photovoltaic Generation Systems Combining MPPT Control Method», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, N°1, pp. 374 - 383, 2007
- [24] **K. Khouzam**, «Optimum Load Matching in Direct-Coupled Photovoltaic Power Systems Application to Resistive Loads», PES 1990 WM215-4, IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-5, N°2, pp. 265 – 271, 1990.

- [25] **P. Izzo**, «Etude d'un Circuit Electronique et Algorithmique Destiné à la Gestion de Systèmes Autonomes de Production d'Énergie Photovoltaïque», Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Décembre 2002
- [26] **J. Appelbaum and M.S. Sarma**, «The Operation of Permanent Magnet DC Motors Powered by a Common Source of Solar Cells», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, N°4, pp. 635 - 642, 1989
- [27] **AHMADI ISMAIL**, «Etude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque», Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013.
- [28] **YAAKOUB BENYAHIA**, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt », Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013
- [29] **A.Bouden**, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [30] **G.MedYacine, D.belkacem, D.akram**, « modélisation et commande d'un système PV connecte au réseau électrique utilisant DSTATCOM. » , Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla,2020
- [31] **Z. Bendjellouli** «Contribution a la modélisation d'une cellule solaire», Mémoire de magister université de bachar, 2009.
- [32] **C. CABAL** «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.
- [33] **MLLE BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA** «La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite» Thèse de master université tlemcen 2013/2014.
- [34] **Abedelmalik Zorig**, «Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé », Mémoire de master, Université de Msila, 2011.
- [35] **Cédric Cabal**, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque», université Toulouse III-Paul Sabatier, Thèse de doctorat, 2008.

- [36] **B. Boudjelel, T. Benslimane**, «Open-Switch Fault-Tolerant Control of Power Converter in a Grid-Connected Photovoltaic System», International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 7, No. 4, pp. 1294-1308, December 2016.
- [37] **Hamidouche Macylia**, «Etude d'un System Photovoltaïque», Mémoire de master, Université A.MIRA de Bejaïa, 2016.
- [38] **Belarbi M.Mustapha**, «Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome», Thèse de Doctorat, Université Oran Mohammed Boudiaf, 2015.
- [39] **A. HADJ ARAB, M. BENGHANEM et A. GHARBI**« Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables. Vol.8, pp (19 – 26), 2005.
- [40] **A.Bouden**, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2011.