



N° d'ordre:

N° de série:



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la

Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies Filière: Génie Électrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Filière: Génie Électrique

Spécialité: commande Électriques

Thème

**COMMANDE PAR MODE GLISSANT DES SYSTEMES
PHOTOVOLTAIQUES**

Préparé par:

Mr. Chami Ali

Mr. Ghemam Ali Faiza

Encadré par:

Mr. Serhoud Hicham

2022-2023

Remerciement

*Avant tout, nous adressons nos remerciements
à Dieu, le tout puissant, de nous avoir
donné la force et le courage pour réaliser ce
travail.*

*Nous tenons à remercier vivement notre
encadreur Dr. Hicham serhoud
Qui a proposé et dirigé ce travail.*

*Nous tenons également à remercier les
membres de jury pour l'honneur qu'ils nous
ont*

fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Résumé

Cette thèse concerne une étude sur les performances des contrôleurs robustes basés sur le mode glissant. La théorie est appliquée sur le convertisseur pour un système PV autonome avec la modélisation et la simulation d'un système PV connecté à la charge électrique avec un convertisseur DC-DC. Nous avons réalisé une étude générale du générateur photovoltaïque et son fonctionnement à sa puissance maximale à l'aide d'un convertisseur Boost DC-DC contrôlé par un algorithme de type MPPT "IC", nous avons ensuite utilisé les résultats pour comparer avec le contrôle du mode glissant, la simulation montre que le contrôle en mode glissant est très acceptable.

Mots de clés:

Générateur photovoltaïque, convertisseurs DC-DC, MPPT de type 'P&O', mode

Abstract:

This thesis concerns a study on the performance of robust controllers based on sliding mode. The theory is applied to the converter for a standalone PV system with modeling and simulation of a PV system connected to the electrical load with a DC-DC converter. We carried out a general study of the photovoltaic generator and its operation at its maximum power using a Boost DC-DC converter controlled by an MPPT 'IC' type algorithm, we then used the results to compare with sliding mode control, the simulation shows that the control in sliding mode is very acceptable.

Keywords:

PV system, boost converter, MPPT, sliding mode control.

ملخص:

تتعلق هذه الأطروحة بدراسة أداء وحدات التحكم القوية المعتمدة على الوضع المنزلق. يتم تطبيق النظرية على المحول لنظام كهر وضوئي مستقل مع نمذجة ومحاكاة نظام كهروضوئي متصل بالحمل الكهربائي باستخدام محول DC-DC. قمنا بإجراء دراسة عامة للمولد الكهروضوئي وتشغيله بأقصى طاقته باستخدام محول Boost DC-DC الذي يتم التحكم فيه بواسطة خوارزمية من النوع 'IC' MPPT، ثم استخدمنا النتائج للمقارنة مع التحكم في الوضع المنزلق، تظهر المحاكاة أن التحكم في الوضع المنزلق مقبول جدًا

الكلمات الدالة:

المولد، الكهروضوئية، محولات DC-DC، MPPT نوع « IC »، التحكم الإنزلاقي.

Sommaire

Remerciement.....	
Résumé	
Sommaire.....	I
Liste de figure	III
LISTE DE TABLEAU	IV
Liste de symboles	V
Abréviation utilisée	VI
Introduction générale.....	8

Chapitre I: Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I.1. Introduction:.....	1
I.2 Energie solaire photovoltaïque:.....	1
I.3. Rayonnement solaire:.....	1
I.4 Types de rayonnement:	2
I.4.1 Rayonnement direct:	2
I.4.2 Rayonnement diffus:	2
I.4.3 Rayonnement réfléchi:	2
I.4.4 Rayonnement global:	2
I.5 Spectre du rayonnement solaire:	3
1.6 La cellule PV:	3
1.6.1Types des cellules PV:.....	3
I.6.1.1 Cellules mono-cristallines:	4
I.6.1.2 Cellules poly-cristallines:	4
I.6.1.3 Cellules amorphes:	4
I.7l'effet Photovoltaïque:.....	4
I. 8 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV:.....	4
I.9Générateur photovoltaïque GPV:	5
I.10Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque:.....	6
I.10.1 Cas d'une cellule idéale:.....	6
I.10.2 Cas d'une cellule réelle:	7
I.11 Protections D'un Générateur:.....	9
I.12 simulation d'un module photovoltaïque:	10
I.13 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV):	11
I.13.1Association De module Photovoltaïques En Série:	11
I.13.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle:.....	12
I.14 Simulation d'hacheur boost:	14

Poursuite Du point de puissanceMaximale MPPT

2.1. Introduction:	18
2.2 .Électronique de puissances dans les systèmes PV connectés aux charges:.....	18
2.2.1 Convertisseurs DC-DC (hacheurs)	19
2.2.2. Modélisation du hacheur survolteur:	20
2.3 Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC:	22
2.4. Recherche du point de puissance maximale (MPPT):.....	25
2.4.1 Principe:	25
2.4.2. Différents types de commandes MPPT:	25
2.4.3. Premières commandes MPPT :.....	25
2.4.4. Commandes MPPT à algorithmes performants :	26
2.4.5. Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité:	27
2.4.6. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue :	27
2.4.7. Les commandes MPPT basées sur les réseaux de neurones:	27
2.5 Contrôle de MPPT:.....	28
2.5.1 PI Control (intégrale proportionnelle)	28
2.5.2 Contrôle direct	28
2.6 Commande MPPT par la méthode P&O	30
2.6.4 Commande MPPT par la méthode « Incrément des conductances »:	32
2.6.5 Avantages et inconvénients de IC:.....	34
2.7. SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par IC:	34
2.8. Conclusion:.....	37

Chapitre III:

Commande par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques

3.1.Introduction:	39
3.2.Principe de MPPT (Maximum Power Point Tracking Control):.....	39
3.3.La détermination de la loi de commande.....	40
3.3.Résultat de simulation:.....	42
3.4. Conclusion:.....	46
Conclusion générale	47
Conclusion générale	48
ANNEXE.....	55
Références bibliographiques.....	49

Liste de figure	
Figure.I.1: Types de rayonnement solaire.	2
Figure.I. 2: Distribution spectrale du rayonnement solaire.	3
Figure. I.3: Schéma block d'une cellule PV.	5
Figure I.4: Jonction PN d'un Cellule Photovoltaïque	5
Figure. I.5: Composants d'un GPV.	6
Figure. I.6:Schéma équivalent d'une cellule idéale	6
Figure.I.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	7
Figure. I.8: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode antiretour.....	9
Figure. I.9: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.	10
Figure. I.10: Schéma de simulation d'un module photovoltaïque.....	10
Figure. I.11: Paramètres du bloc Générateur photovoltaïque	10
Figure. I.12: Caractéristique I-V d'un module PV.....	11
Figure. I.13: Caractéristique P-V d'un module PV.....	11
Figure. I.14: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	12
Figure. I.15: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	12
Figure 1.16: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents éclairement et une température $T=25^{\circ}\text{C}$	13
Figure 1.17: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents température et un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$	13
La figure 1.18. Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC:	14
Figure 1.19: rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.	15
Figure 1.20: courant sortie d'un convertisseur DC-DC.....	15
Figure 1.21: tension de sortie d'un convertisseur DC-DC.	15
Figure 2.1: Symbole d'un convertisseur DC-DC.[2]	19
Figure 2.2: Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.[16].....	20
Figure 2.3: Schéma de principe d'un convertisseur Booste	20
Figure 2.4: Schémas équivalents du hacheur	21
Figure 2.5: Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC	22
Figure 2.6: Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC.....	22
Figure 2.7: Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC	23
Figure 2.8: variation du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC	23
Figure 2.9: Caractéristiques $E(t)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements	24
Figure 2.10: Caractéristiques $P(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements.....	24
Figure 2.11: Caractéristiques $I(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements	25
Figure 2.12: Schéma de principe du MPPT avec la commande directe	29
Figure 2.13: Principe de la commande P&O.....	30
Figure 2.14: Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O)	31
Figure 2.15:Illustration de la méthode IC	32
Figure 2.16:Technique de MPPT basée de la méthode IC.	33
Figure 2.17: Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par IC.	34
Figure 2.18: Caractéristiques $P(t)$ d'un système PV	35
Figure 2.19: Caractéristiques $v(t)$ d'un système PV.	35
Figure 2.20:Caractéristiques $i(v)$ d'un système PV.	36
Figure 3.1: Système photovoltaïque avec commande MPPT.....	40
Figure3.2: Représentation de la commande discontinue	41
Figure 3.3: fonction de saturation	41

Figure 3.4: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	42
Figure 3.5: Schéma de simulation de SMC MPPT	43
Figure 3.6: Variation de l'éclairement E.....	43
Figure 3.7: Variation de la température.....	44
Figure 3.8: Le courant de la sortie du générateur photovoltaïque	44
Figure 3.9: La puissance de la sortie du panneau photovoltaïque	45
Figure 3.10: la tension de sortie du panneau photovoltaïque	45

LISTE DE TABLEAU	
Tableaux (1.1): Caractéristiques électriques du module PV KC200GT en condition de test standard	11
Tableau 1: Les paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant.....	55
Tableau 2: Fiche technique de KC200GT aux conditions STC	55

Liste de symboles

S	Surface du module photovoltaïque (m^2).
I_{ph}	Le photo-courant (A).
R_p	Résistances parallèle shunt (Ω).
R_s	Résistance série (Ω).
E	L'éclairement de référence ($1000W/m^2$).
T_{ref}	La température de référence ($298K^\circ$).
α	Le coefficient de courant en fonction de température ($A/^\circ C$).
I_{cc}	Le courant de court-circuit (A).
V_{co}	La tension de circuit ouvert (V).
N_s	Nombre de modules dans le panneau en série.
N_p	Nombre de modules dans le panneau en parallèle.
P_{max}	La puissance maximale produite PV (W).
V_{op}	Tension optimal (V).
I_{op}	Courant optimum (A).
V_{co}	Tension à circuit ouvert (V).
I_{cc}	Courant de court-circuit (A).
K	coefficient de Boltzmann ($1.38.10^{-23} J/K$).
$q=$	$1.6*10^{-19}$.
$g(x)$	Le vecteur de command
$h(x)$	Le vecteur de sortie
$p(x)$	Le vecteur de perturbation
$e(x)$	L'écart
$S(x, t)$	Surface de glissement
$U(x, t)$	Loi de commande
$V(x)$	Fonction de lyapunov
$sign(.)$	La fonction signe
$Sat(.)$	La fonction saturation
$U(v)$	Tension
U_{eq}	Grandeur de commande équivalente
U_n	Commande non linéaire
U	Command globale

I	Courant
P	Puissance
L	Inductance
R	Résistance de la charge
C	Capacité
E	Tension d'entre
V_o	Tension aux borne de la charge
I_l	Courant dans l'inductance
U	Représente l'état du l'interrupteur
I_{ph}	Le photo-courant (A).
I_{sat}	Courant de saturation (A)
R_p	Résistances parallèle shunt. (Ω)
R_S	Résistance série (Ω).
I_{cc}	Le courant de court-circuit (A)
V_{co}	La tension de circuit ouvert (V)

Abréviation utilisée

PV: Panneau Photovoltaïque

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

GPV: Générateur photovoltaïque

SMC:Sliding Mode Command

FSMC: Commande par mode glissant-floue

Inc: Incrément de conductance

PPM: Le point de puissance maximale

PI: Intégrale proportionnelle

MC: Le mode de convergence

MG: Le mode de glissement

MRP: Le mode du régime permanent

DC-DC: Convertisseur continu/continu

Introduction générale

Introduction générale

Le soleil, principale source d'énergie de la terre, nous fournit une ressource précieuse soit sous forme d'énergie solaire thermique, soit sous forme d'énergie photovoltaïque (conversion directe de la lumière solaire en énergie électrique), qui est au centre de cette thèse. La solution est de penser aux énergies renouvelables qui offrent la possibilité de générer électricité tout en respectant les règles de l'environnement, et cela pose un vrai défi en termes de charges économiques qui sont traduites par un coût très élevé et un rendement insatisfaisant. Le photovoltaïque (PV) appartient à ces énergies [1].

Dans ce mémoire, on analyse une modélisation et une commande du fonctionnement d'un système photovoltaïque [2].

L'objectif de ce travail commande par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques autonome [3].

Ce mémoire est présenté en trois chapitres:

- Dans le premier chapitre, on offre une définition de l'effet PV permettant la production d'électricité à partir d'un rayon lumineux frappant une pastille de silicium, des caractéristiques de la cellule PV ont été tracées pour différents paramètres internes et externes influant sur la conversion d'énergie PV.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé de commande robuste avec l'algorithme IC pour poursuite du point de puissance maximale *MPPT* entre panneau photovoltaïque et le convertisseur DC-DC.
- Dans le troisième chapitre, nous définissons ce qu'est le système à structure variable' mode glissant pour la régulation des convertisseurs DC/DC. Les résultats de simulation obtenus par avec *MPPT* pour réguler la tension et courant de sortie. Est très satisfaisants, surtout en termes d'oscillations et de dépassement.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

Chapitre I:

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction:

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique [4].

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 [5].

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 [6].

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 [7].

I.3. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50fois celui de la terre. Il est composé à 80%d'hydrogène, 19%d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est

aujourd'hui admis que le soleil est une bombe 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.

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 présenté 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:

- Diamètre de soleil $DS = 1.39.10^9\text{m}$;
- Diamètre de la terre $DT = 1.27.10^7\text{m}$;
- Distance moyenne soleil_ terre $DST = 1.5. 10^{11}\text{m}$.

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 [8] [9].

I.4.2 Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [8] [10].

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 (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo(ϵ).

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 [8] [11]

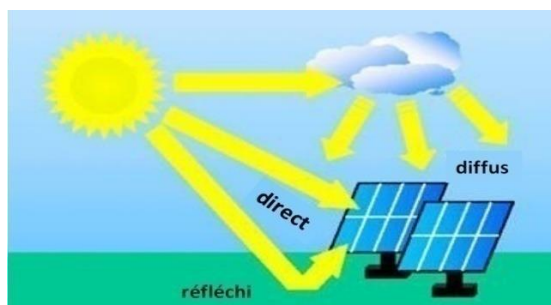


Figure I.1: Types de rayonnement solaire [4].

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 AM 0. Sa distribution en énergie est répartie en :

- Ultraviolet **UV** $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ **6.4%**
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ **48.0%**
- Infrarouge **IR** $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ **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 [12].

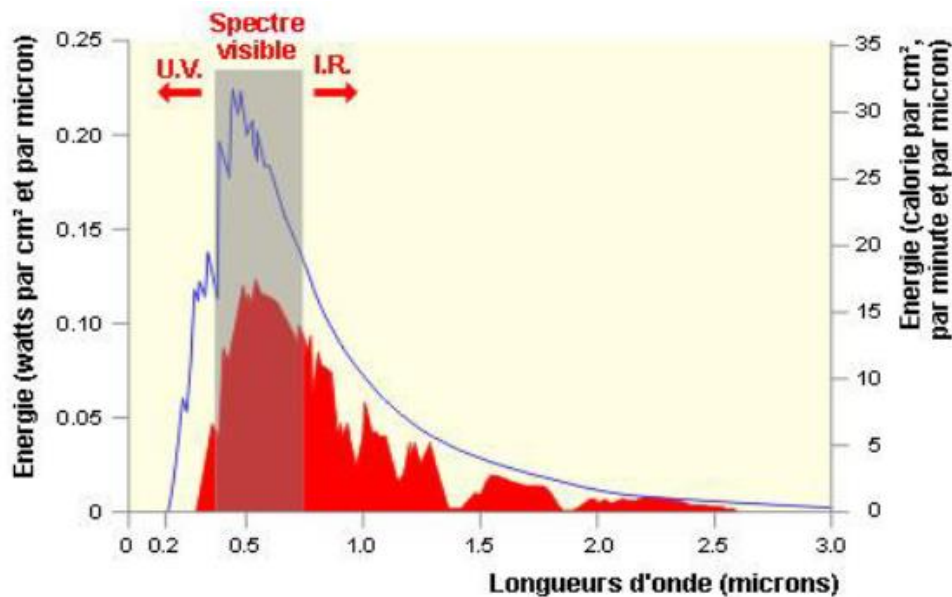


Figure I.2: Distribution spectrale du rayonnement solaire.

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 [13][14].

I.6.1.1 Cellules monocristallines :

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 [13][15].

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%)[13][16].

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 [13][17].

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 [18].

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

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement 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, 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 [19].

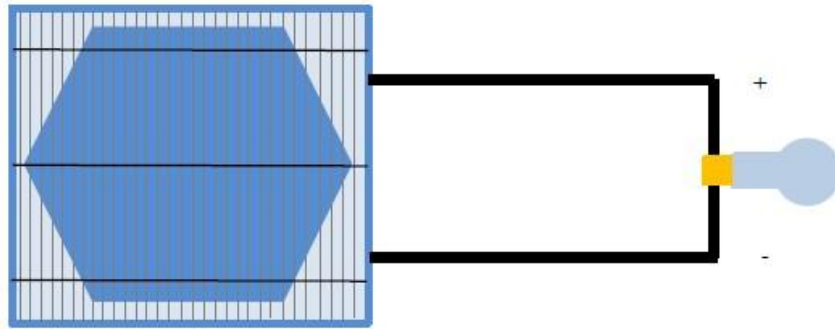


Figure I.3: Schéma block d'une cellule PV.

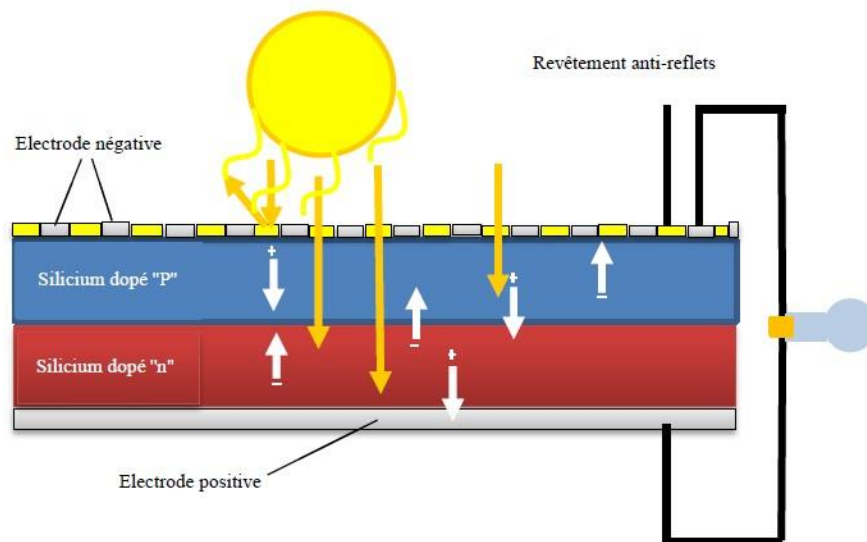


Figure I.4: Jonction PN d'un Cellule Photovoltaïque.

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 module sinter connectés 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.

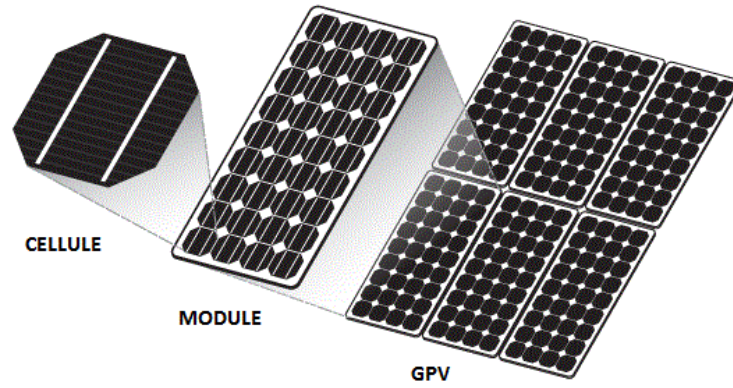


Figure I.5: Composants d'un GPV.

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 délivre un courant I_{ph} selon la Figure (I.6) , qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [20].

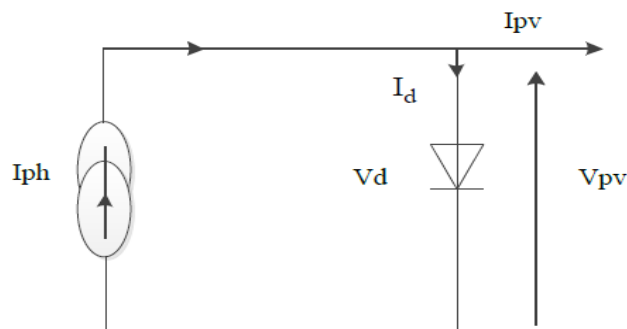


Figure I.6: Schéma équivalent d'une cellule idéale

- 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_s avec $V_{PC} = 0$, 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 ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) ;

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ 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)[21].

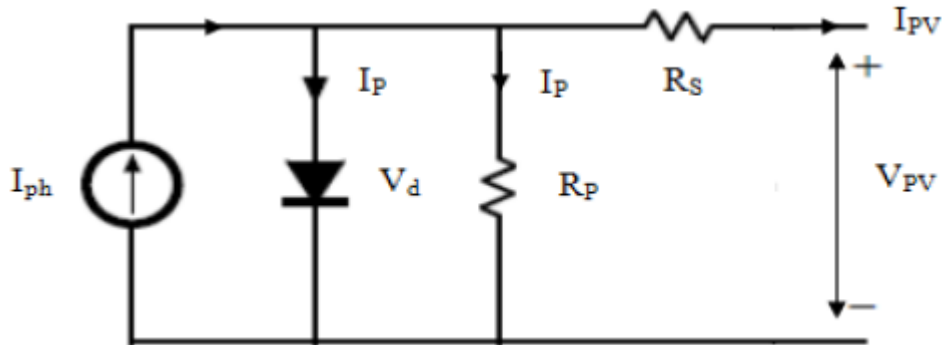


Figure. I. 7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

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).

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

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

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 [°K] ;

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

B: facteur d'idéalité de la jonction ;

E_g: 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 cellule 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 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 [22].

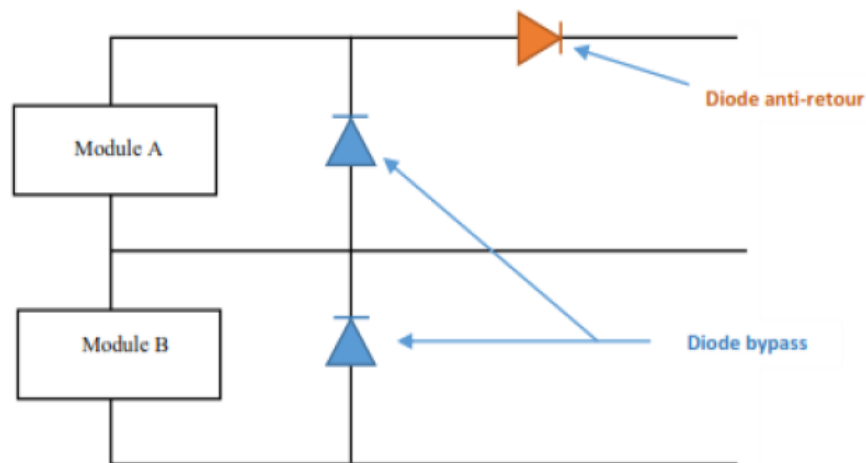


Figure I.8: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti retour.

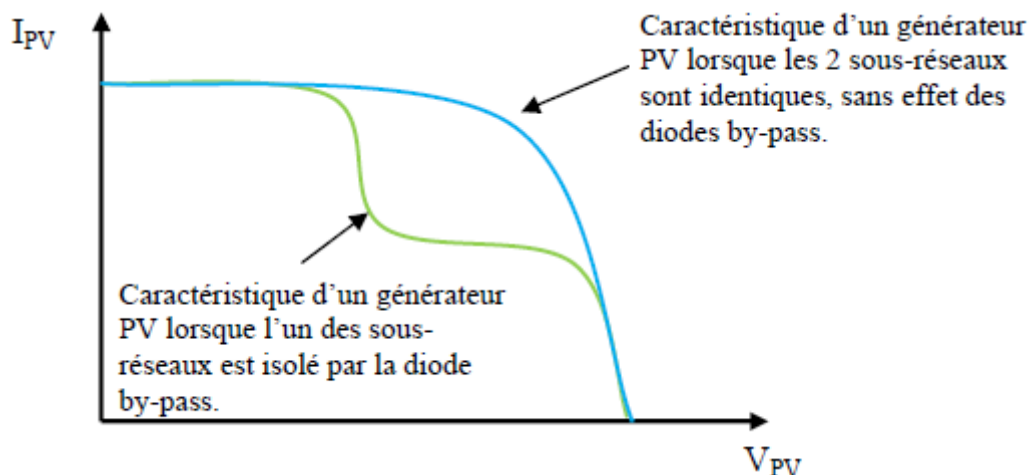


Figure I.9: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

I.12 simulation d'un module photovoltaïque:

Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé dans l'outil MATLAB/ **Sim Power System**. Le bloc schématique de SIMULINK est montré sur la Figure (1.10).

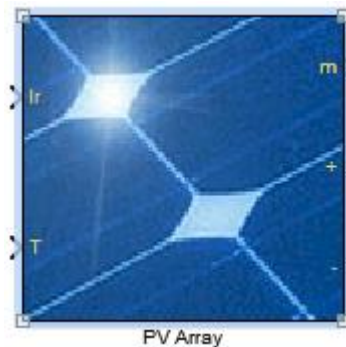


Figure I.10: Schéma de simulation d'un module photovoltaïque

Block Parameters: PV Array1

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters Advanced

Array data

Parallel strings: 1

Series-connected modules per string: 1

Module data

Module: Kyocera Solar KC200GT

☒ Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected

Maximum Power (W)	200.143	Cells per module (Ncell)	54
Open circuit voltage Voc (V)	32.9	Short-circuit current Isc (A)	8.21
Voltage at maximum power point Vmp (V)	26.3	Current at maximum power point Imp (A)	7.61
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.35502	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.06

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 25 deg.C & specified irradiances

Irradiances (W/m2) [1000]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)	8.2288
Diode saturation current IO (A)	2.3246e-10
Diode ideality factor	0.97736
Shunt resistance Rsh (ohms)	150.6921
Series resistance Rs (ohms)	0.34483

Figure I.11: Paramètres du bloc Générateur photovoltaïque.

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

Tableaux (1.1): Caractéristiques électriques du module PV KC200GT en condition de test standard [16].

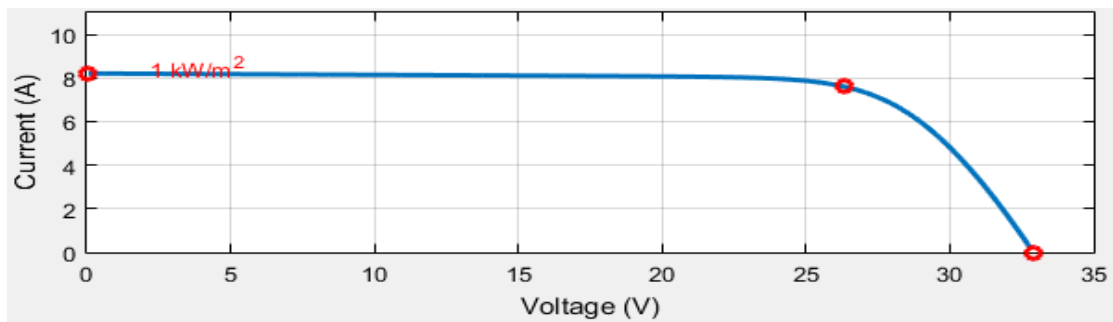


Figure I.12: Caractéristique I-V d'un module PV.

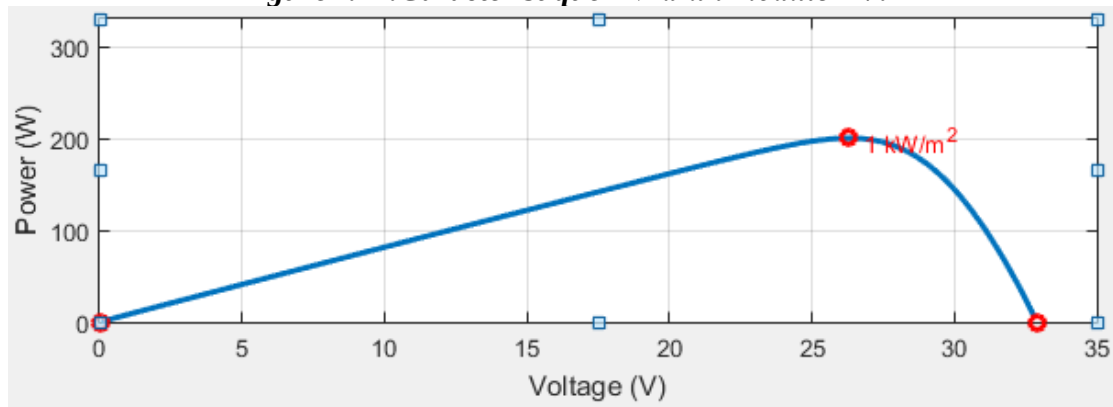


Figure I.13: Caractéristique P-V d'un module PV.

I.13 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 [23].

I.13.1 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 [24].

$$I_{SC} = I_{CC} \quad (I.10)$$

Et

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

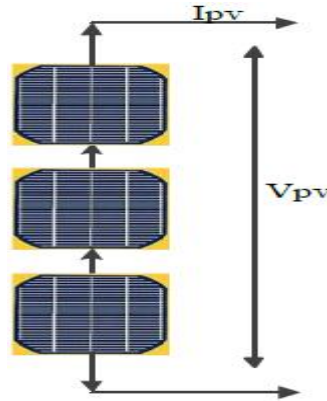


Figure I.14: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

I.13.2 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 [25].

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

Et

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

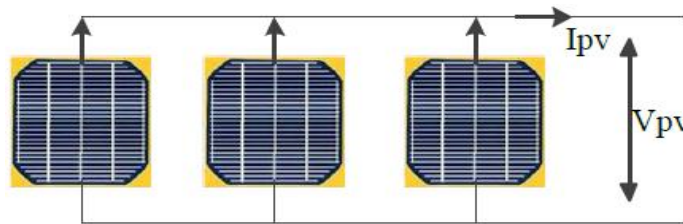


Figure I.15: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

Pour augmenter la puissance de sortie, les modules PV sont associés dans le panneau. Dans cette structure, les modules peuvent être connectés en série, en parallèle ou les deux, dans notre cas ($N_s=5$, $N_p=4$).

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ($T = 25^\circ\text{C}$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

D'après la figure (1.16), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (E) et une faible diminution de la tension du circuit ouvert.

C'est qui prouve que le courant de court-circuit de la cellule dépend au éclairement, par

contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation quand l'éclairement varie de 200 W/m^2 à 1000 W/m^2 .

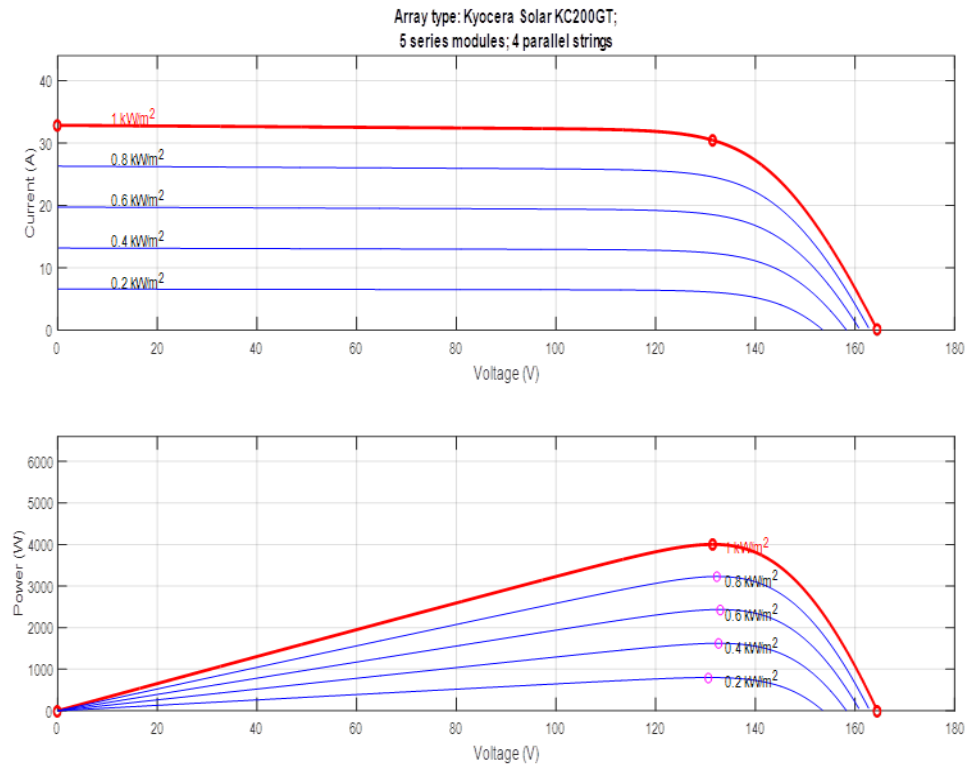


Figure 1.16: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents éclairement et une température $T=25^\circ\text{C}$.

On remarque aussi sur la figure (1.16) que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

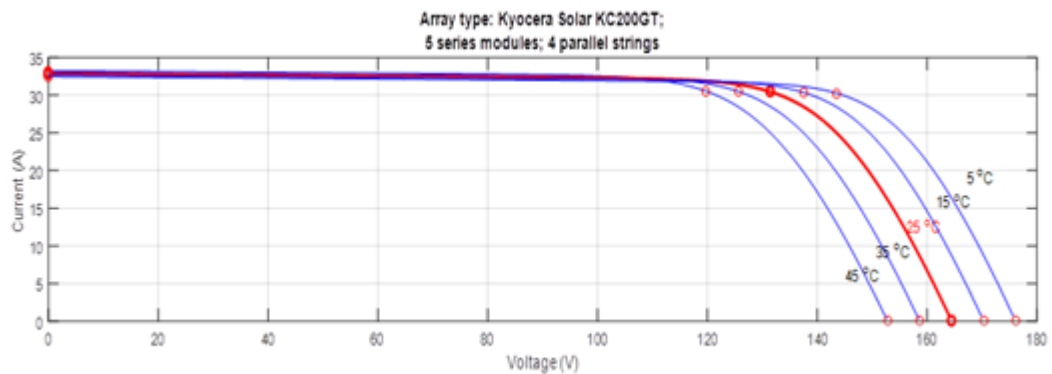


Figure 1.17: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents température et un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$.

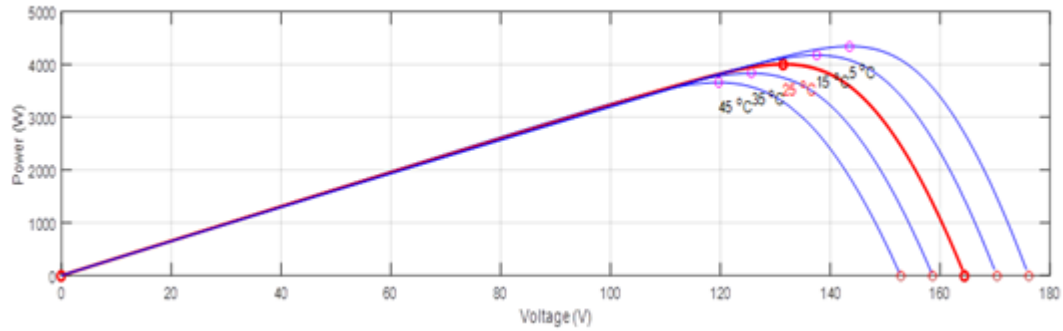


Figure 1.18. Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC:

On constate d'après la figure (1.17) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

Le modèle choisi a donné des résultats concordant avec ceux obtenus la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

I.14 Simulation d'hacheur boosta:

Pour montrer le rôle des convertisseurs boost nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation et nous prenons ($E=100V$, $L=1e-3 H$, $R=200$, $D=variable$).

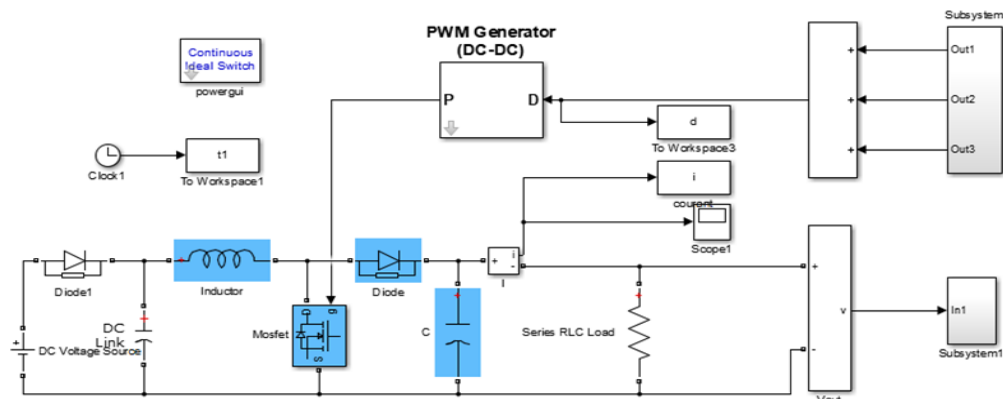


Figure 1.18: Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC.

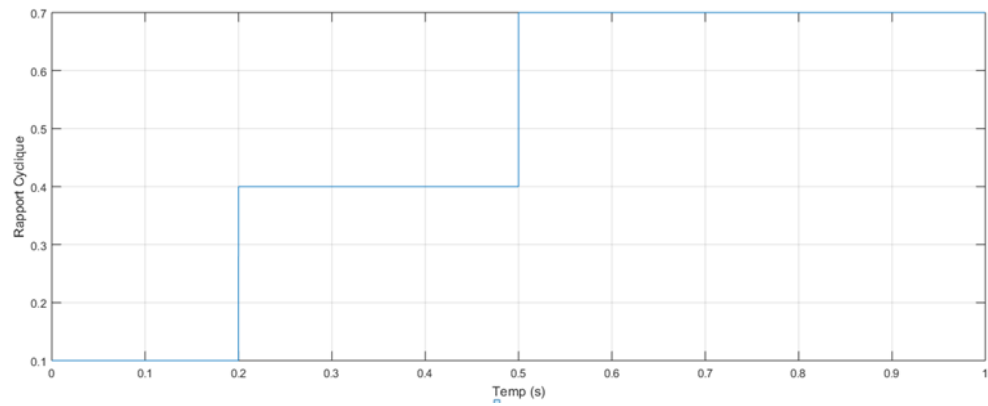


Figure 1.19: rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.

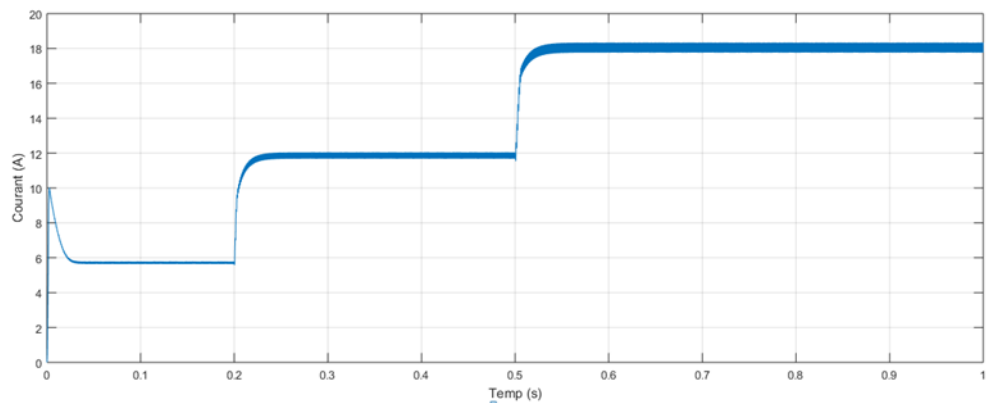


Figure 1.20: courant sorte d'un convertisseur DC-DC.

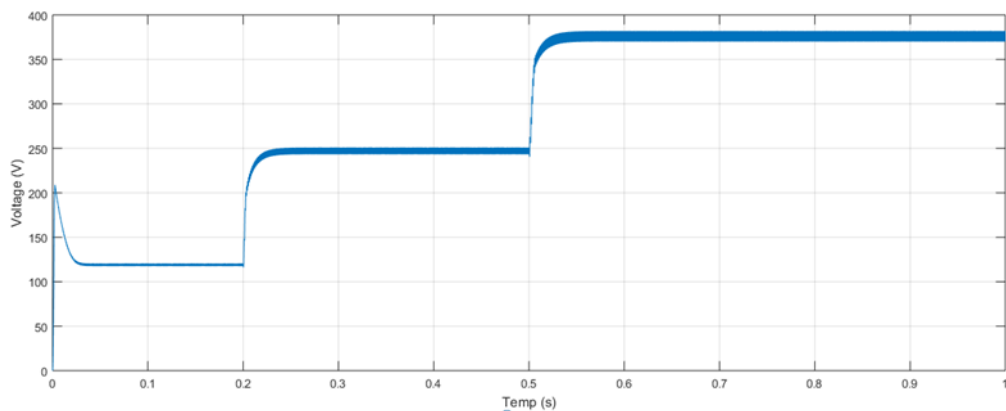


Figure 1.21: tension de sorte d'un convertisseur DC-DC.

Les figures (1.20 et 1.21) représenté des résultats de simulation de convertisseurs boost par une variation paramétrique de rapport cyclique comme le montre la Figure (1.19).

Où l'on remarque une légère oscillation au décollage d'environ 0,01 seconde pour revenir à sa valeur et se fixer à une certaine valeur. Il montre également la relation directe entre les changements du rapport cyclique, car son augmentation s'accompagne d'une augmentation du niveau de courant et de tension qui sort.

Donc les résultats du hacheur boost effectué correctement sans rôle puisque la tension de sortie d'hacheur boost est supérieur à celle l'entrée [26].

I. 15 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques comme la cellule solaire, le module photovoltaïque et le panneau solaire [27].

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 .la simulation des convertisseurs statiques DC/DC réalise pour que la commande MPPT [28].

Chapitre II :
Poursuite Du point de puissance
Maximale MPPT

2.1. Introduction :

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température [29].

La modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de la chaîne PV ainsi les paramètres constitutants, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite [30].

Dans ce chapitre nous représentons les convertisseurs DC-DC (hacheurs), modélisant aussi les commandes des convertisseurs commandés par PI d'un onduleur triphasé.

Dans le but d'atteindre la valeur optimale du GPV, l'étage d'adaptation doit être muni d'une commande MPPT, qui va agir sur son rapport cyclique en fonction des variations des conditions météorologiques ou de la charge pouvant survenir. Dans ce sens, nous présenterons dans ce chapitre le fonctionnement à puissance maximale et les différents types de commandes de la recherche du point de puissance maximale. Par la suite, nous donnerons les résultats de simulation pour la recherche du point de puissance maximale pour différentes valeurs de températures ou d'ensoleillement en utilisant les deux algorithmes « Perturba and Observe » et « Incrément de conductance » [31].

Dans la deuxième partie, nous allons présenter les résultats de simulation du système photovoltaïque pour des variations climatiques. Pour cela, différents cas de simulation seront présentés pour différentes valeurs de la température ou/et de l'ensoleillement ; ensuite pour le cas où ces variations sont brusques [32].

2.2. Électronique de puissances dans les systèmes PV connectés aux charges:

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 [33].

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 [34].

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 pratiquement sinusoïdal. Cette conception est robuste, efficace, permettant de garantir une fiabilité élevée [35].

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) [36].

2.2.1 Convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. La figure (2.1) représente le symbole d'un convertisseur DC-DC.

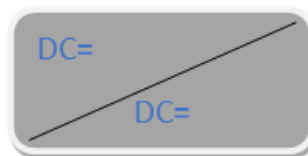


Figure 2.1: Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. La technique découpage apporte une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations série. Dans une alimentation à découpage figure (2.2), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [37].

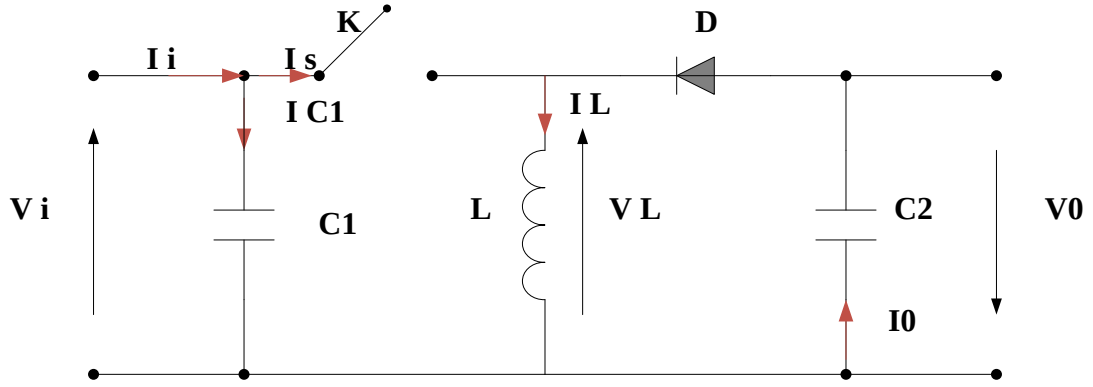


Figure 2.2: Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC utilisés fréquemment dans les systèmes PV pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges. Parmi les quels, on présente le principe du convertisseur survolteur utilisé dans notre travail [38].

2.2.2. Modélisation du hacheur survolteur :

Le convertisseur survolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom d'hacheur booste ou hacheur parallèle. La figure (2.3) 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 continue (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 [39].

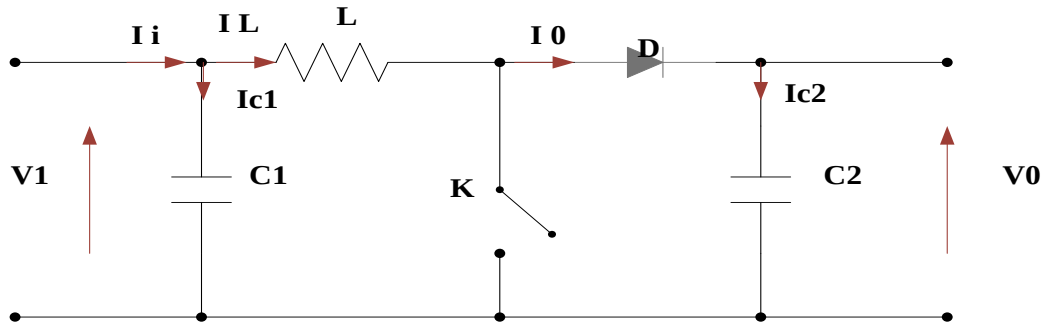


Figure 2.3: Schéma de principe d'un convertisseur Booste [40]

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 [41]:

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \quad (2.1)$$

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 (2.4) 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 [42].

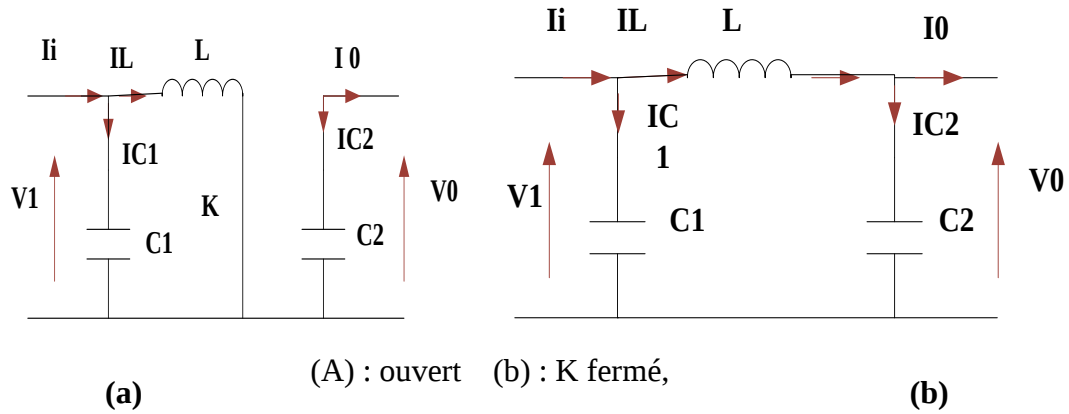


Figure 2.4 : Schémas équivalents d'hacheur.

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 $T \in [0, \alpha.T]$:

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = +V_i(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

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

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

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

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt \Delta T_s} d T_s + \frac{dx}{dt (1-d) T_s} (1-d) T_s \quad (2.4)$$

En appliquant la relation (2.4) sur les systèmes d'équations (2.2) et (2.3), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [43] :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} \\ i_0 = (1 - d)i_L - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - d)V_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

2.3 Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC:

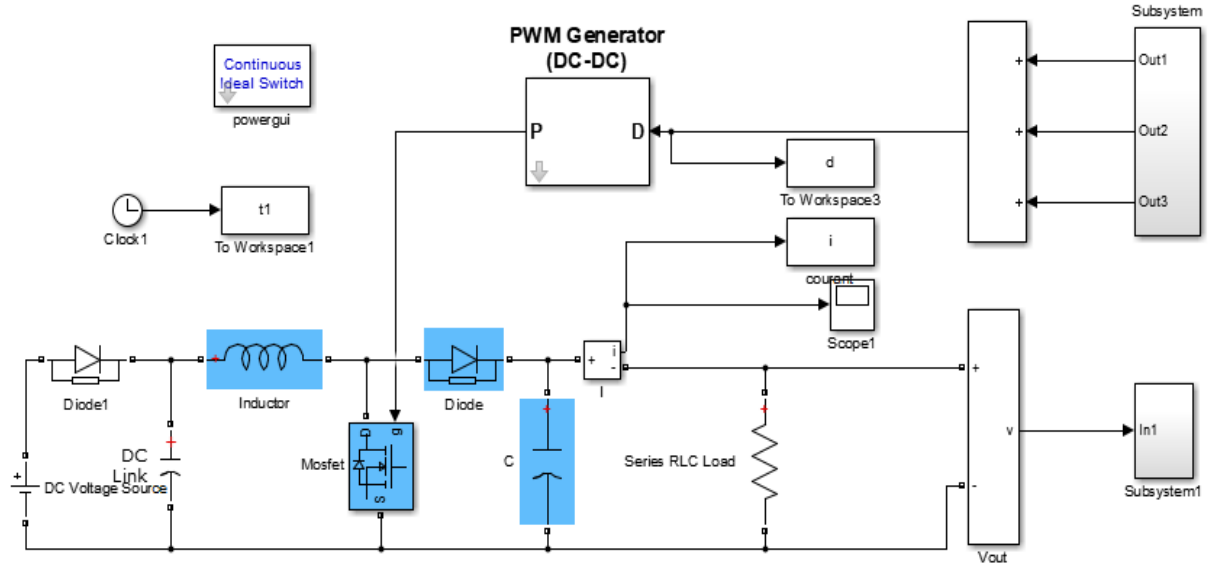


Figure 2.5: Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC

Les valeurs des paramètres du convertisseur DC-DC : Résistance (R_h) = 1 Ω , Inductance (L_h) = 4 e-4H , Capacitance (C_h) = 1200 e-6F , Diode: Résistance (R_{on}) = 0.001 Ω , Tension directe (V_D) = 0.8 V, Résistance d'amortissement (R_a) = 500 Ω , Capacité d'amortissement (C_A) = 250e-9 F, Mosfet: FET Résistance (R_{on}) = 0.1 Ω , Interne diode résistance (R_d) = 0.01 Ω , RLC: Résistance (R) = 120 Ω , Tension nominale V_n = 50 Vrms

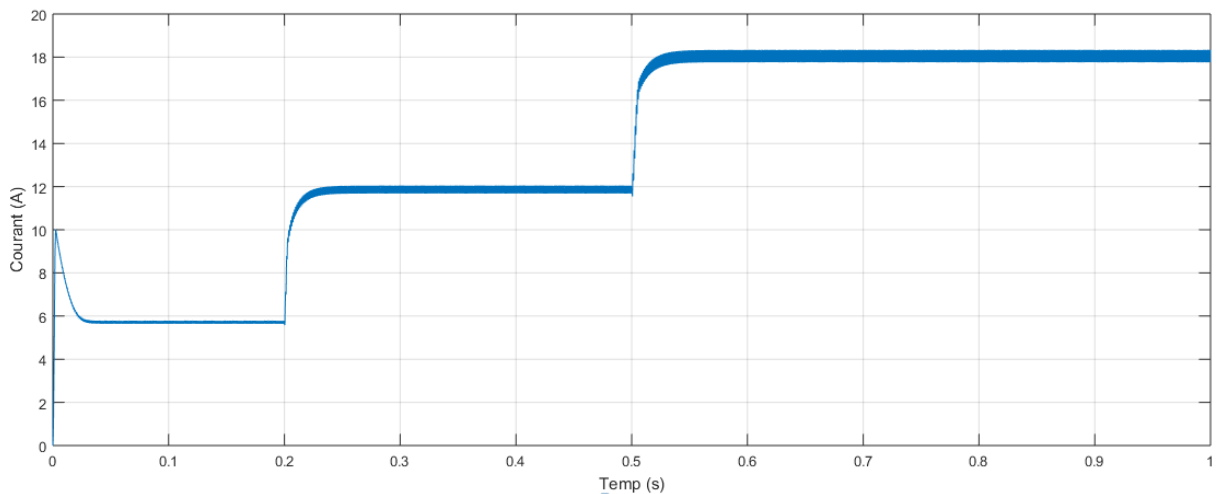


Figure 2.6: Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC

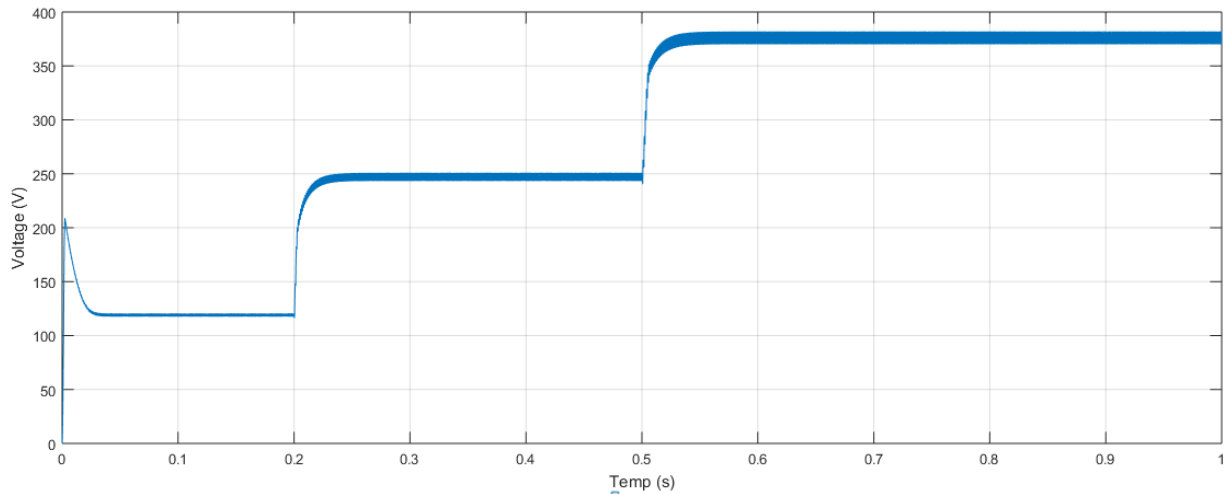


Figure 2.7: Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC

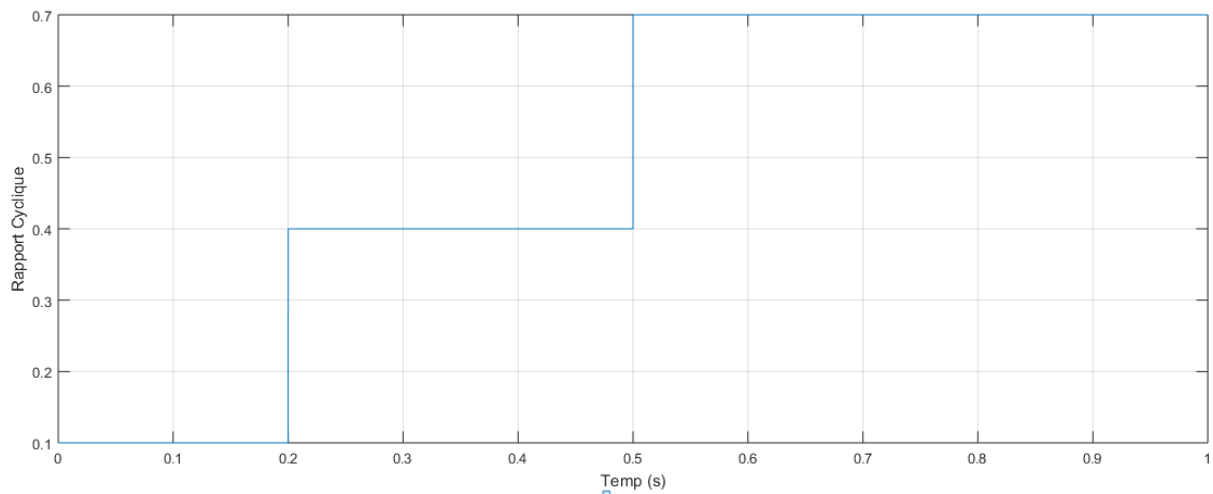


Figure 2.8: variation du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC

Les figures (2.6 et 2.7) représentent des Résultats expérimentaux de convertisseurs boostés par une variation paramétrique de rapport cyclique comme le montre la Figure (2.8).

Où l'on remarque une légère oscillation au décollage d'environ 0,01 seconde pour revenir à sa valeur et se fixer à une certaine valeur. Il montre également la relation directe entre les changements du rapport cyclique, car son augmentation s'accompagne d'une augmentation du niveau de courant et de tension qui sort [44].

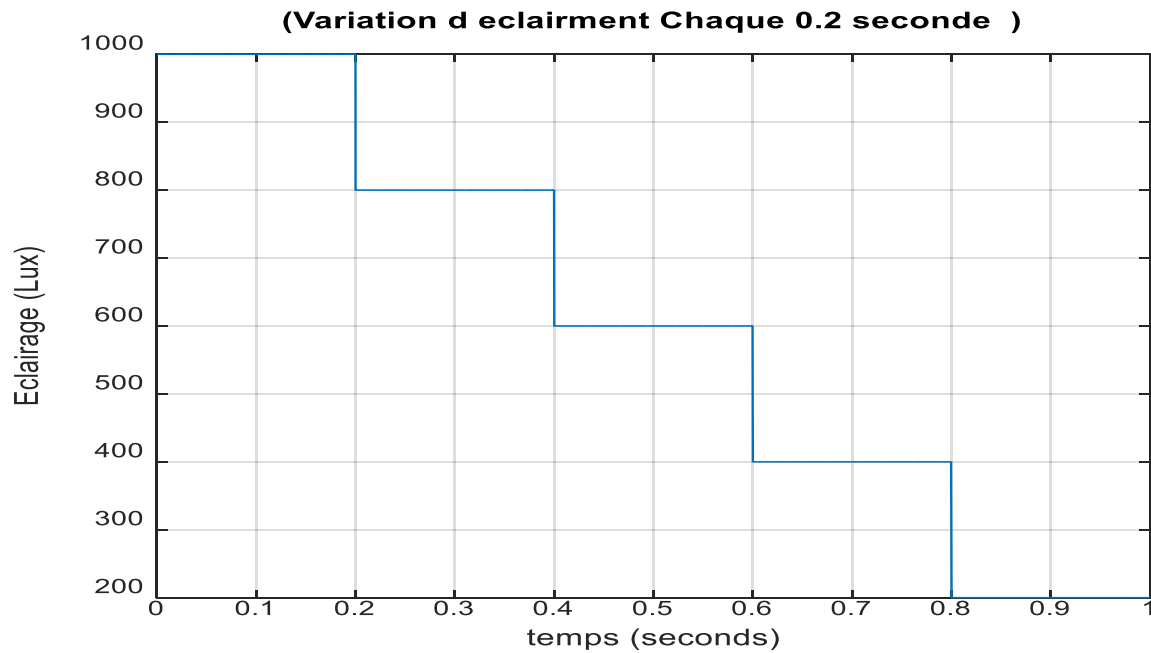


Figure 2.15: Caractéristiques $E(t)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements

Les figures suivantes (2.16), (2.17) présentent allure de tension et la puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairements ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000, 800, 600, 400, 200 \text{ W/m}^2$)

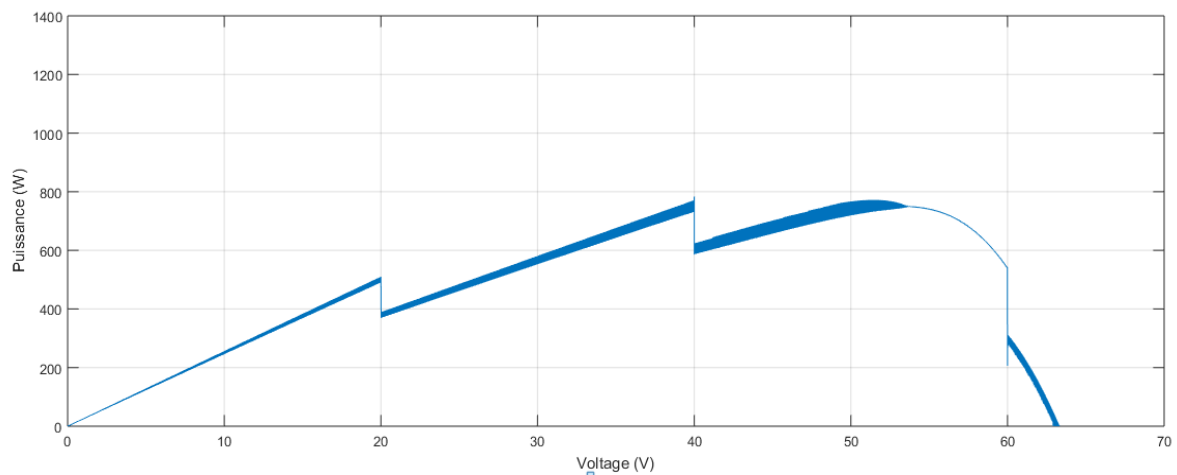


Figure 2.16: Caractéristiques $P(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements

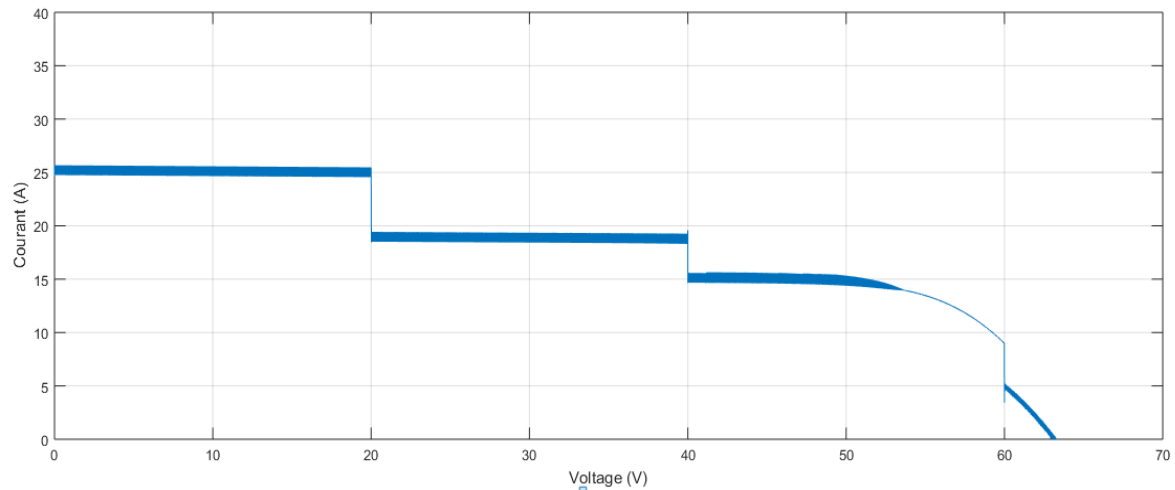


Figure 2.17: Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire pour différents éclairagements

2.4. Recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

2.4.1 Principe :

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée corresponde à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge.

La technique de contrôle consiste donc à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le point de fonctionnement du générateur à sa valeur optimale quelque soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de la charge. [45]

2.4.2. Différents types de commandes MPPT [46] :

Plusieurs publications sur les commandes de la recherche du point de puissance maximale apparaissent dans la littérature, et ce depuis les années 1970. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche. Dans ce qui suit, nous allons citer les principales commandes rencontrées dans la littérature (Cabal, 2008).

2.4.3. Premières commandes MPPT [47] :

En Janvier 1968, A.F. Bohringer a publié la première loi de commande MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. La commande, basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement du système à son point de

puissance maximale. A partir des mesures du courant délivré par le panneau photovoltaïque I_{ph} et de la tension V_{ph} , la méthode consiste à calculer la puissance à l'instant t_i et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant t_{i-1} . Par la suite, un nouveau rapport cyclique est calculé et est appliqué au convertisseur statique.

Ce principe de commande est toujours valable, il est appliqué maintenant sur des algorithmes numériques plus performants, avec un temps de réaction et une précision de la recherche du PPM améliorés.

2.4.4. Commandes MPPT à algorithmes performants [48] :

Différents types d'algorithmes MPPT sont rencontrés dans la littérature. Les trois méthodes les plus rencontrées sont *Hill Climbing*, *Perturba&Observe (P&O)* et *l'incrément de conductance (IncCond)*. Nous présentons leurs différents Principes dans les parties suivantes.

- **Principe des commandes « *Perturba and Observe* » (P&O) :**

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. La figure 2.20 montre que si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite. De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM.

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée bien qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM. [49]

- **Principe des commandes « *Incrément des conductances* » (IncCond):**

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par:

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.1)$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.2)$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes:

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement est à droite du PPM

En utilisant la relation (3.2), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.3)$$

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, 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. [50]

2.4.5. Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité :

Ces commandes sont basées sur des relations de proportionnalité entre les valeurs optimales du point de puissance maximale (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres à vide et en court-circuit du module PV (V_{oc} et I_{cc}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension. [51]

2.4.6. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue [52] :

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus utilisées suite à l'évolution des microcontrôleurs. Dans notre cas, le principe est basé sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur e et le changement d'erreur Δe et une variable de sortie ΔD qui représente la variation du rapport cyclique servant à piloter le convertisseur statique pour chercher le PPM. La valeur de ΔD est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. Cette méthode est performante surtout pendant le changement des conditions climatiques (Cabal, 2008), cependant sa précision en statique est liée à la complexité de la table de vérité employée, d'où la nécessité de choisir un microcontrôleur performant qui tient compte des différents paramètres électriques du panneau.

2.4.7. Les commandes MPPT basées sur les réseaux de neurones [53] :

Ces dernières années, la technique de réseaux de neurones est de plus en plus utilisée dans divers domaines d'application, permettant de résoudre des problèmes complexes. Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches peut varier selon le degré de précision souhaitée

de la commande. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées sont les paramètres caractéristiques d'un GPV associées à des données atmosphériques, la sortie est un signal représentant la valeur du rapport cyclique permettant de commander le convertisseur statique pour fonctionner au PPM.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un entretien et une maintenance régulière. En effet, pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau, l'apprentissage doit être révisé régulièrement.

2.5 Contrôle de MPPT :

L'algorithme MPPT indique à un contrôleur MPPT comment déplacer la tension de fonctionnement. Ensuite, c'est la tâche d'un contrôleur MPPT d'apporter la tension à un niveau souhaité et maintenez-le. Il existe plusieurs méthodes souvent utilisées pour MPPT [54]

2.5.1 PI Control (intégrale proportionnelle) [55] :

Le MPPT prend la mesure de la tension et du courant PV, puis l'algorithme de suivi (P&O, IncCond ou variations de deux) calcule la référence tension (V_{ref}) où la tension de fonctionnement PV doit se déplacer ensuite. La tâche du MPPT l'algorithme consiste à définir V_{ref} uniquement, et il est répété périodiquement avec un taux plus lent (généralement 1 ~ 10 échantillons par seconde). Ensuite, il y a une autre boucle de contrôle que le proportionnel et l'intégrale Le contrôleur (PI) régule la tension d'entrée du convertisseur. Sa tâche est de minimiser les erreurs entre V_{ref} et la tension mesurée en ajustant le rapport cyclique. La boucle PI fonctionne avec beaucoup vitesse plus rapide et fournit une réponse rapide et une stabilité globale du système. Le contrôleur PI lui-même peut être implémenté avec des composants analogiques, mais il est souvent fait avec DSP contrôleur car le DSP peut gérer d'autres tâches telles que le suivi MPP, réduisant ainsi les pièces comptent.

2.5.2 Contrôle direct :

Comme le montre la figure (2.18), cette méthode de contrôle est plus simple et n'utilise qu'un seul contrôle boucle, et il effectue l'ajustement du cycle de service dans l'algorithme de suivi MPP. La façon dont la façon d'ajuster le cycle de service est totalement basée sur la théorie de l'adaptation de charge expliquée dans Section 3.4 [56].

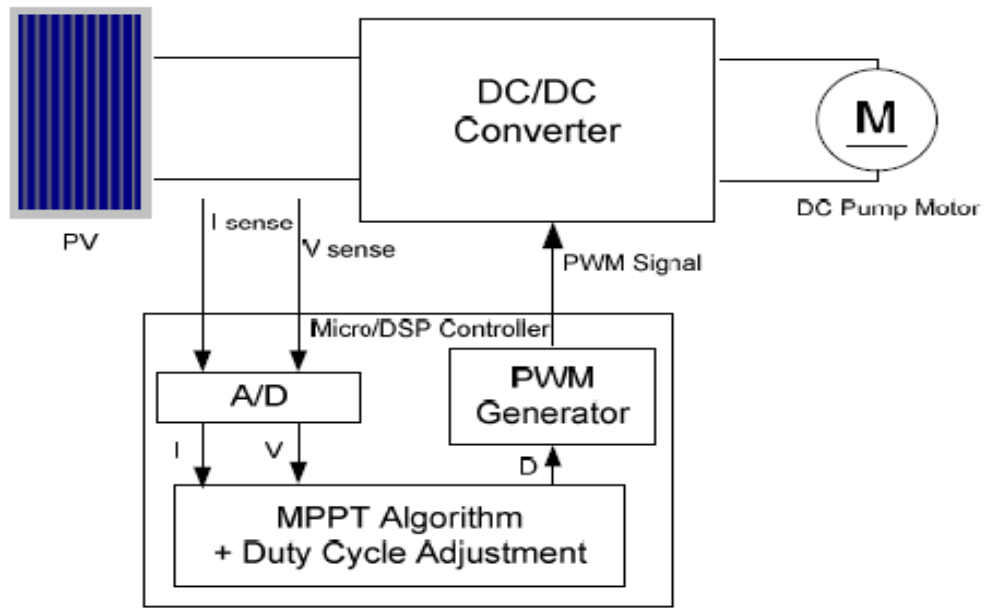


Figure (2.18): Schéma de principe du MPPT avec la commande directe

L'impédance vue par PV est l'impédance d'entrée du convertisseur. En utilisant l'exemple du Convertisseur Cúk dans la section 3.4, la relation avec la charge est :

$$R_{in} = \frac{V_s}{I_s} = \frac{(1-D)^2}{D^2} \cdot R_{load} \quad (3.4)$$

Où : (D) est le rapport cyclique du convertisseur Cúk. Augmenter D entraînera diminuer l'impédance d'entrée (R_{in}), ainsi la tension de fonctionnement PV se déplace vers la gauche. De même, la diminution de D augmentera R_{in} , ainsi la tension de fonctionnement se déplace vers la droite. L'algorithme de suivi (P&O, IncCond, ou des variantes de deux) prend la décision sur la façon de déplacer la tension de fonctionnement.

La réponse temporelle de l'étage de puissance et de la source PV est relativement lente (10 ~ 50msec selon le type de charge). L'algorithme MPPT modifie le cycle de service, puis le prochain échantillonnage de la tension et du courant PV doit être effectué une fois que le système atteint l'état stationnaire périodique pour éviter de mesurer le comportement transitoire. Le taux d'échantillonnage typique est de 10 ~ 100 échantillons par seconde. Le taux d'échantillonnage du contrôleur PI est beaucoup plus rapide, il assure la robustesse contre les changements brusques de charge. La réponse du système est cependant lente en général. La méthode de contrôle direct peut fonctionner de manière stable pour des applications telles que la batterie systèmes équipés et systèmes de pompage d'eau. Les taux d'échantillonnage étant lents, il est possible à mettre en œuvre avec des microcontrôleurs peu coûteux [57].

2.6 Commande MPPT par la méthode P&O :

Le coût élevé du générateur PV nous impose une utilisation optimale et rationnelle de ce dernier pour aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous devons utiliser le générateur PV dans la région où il délivre sa puissance maximale [58].

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stable. Le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D d'un convertisseur DC-DC à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.

Il existe plusieurs types de commande MPPT du convertisseur DC-DC. Parmi lesquelles, On aura expliqué la méthode perturbation et observation P&O qui est utilisée dans notre travail. Cette méthode est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau PV respectivement.

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} ou le courant I_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. La Figure (2.20) montre le principe de la commande P&O.

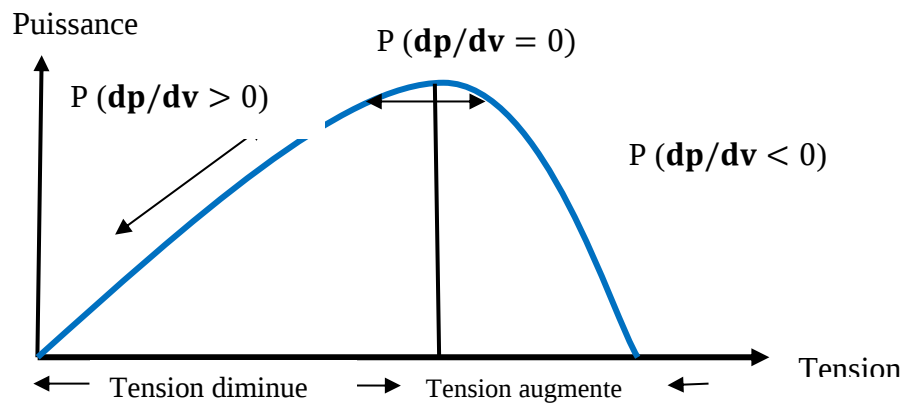


Figure (2.20): Principe de la commande P&O.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O) est donné par la Figure (2.21)

- D : rapport cyclique

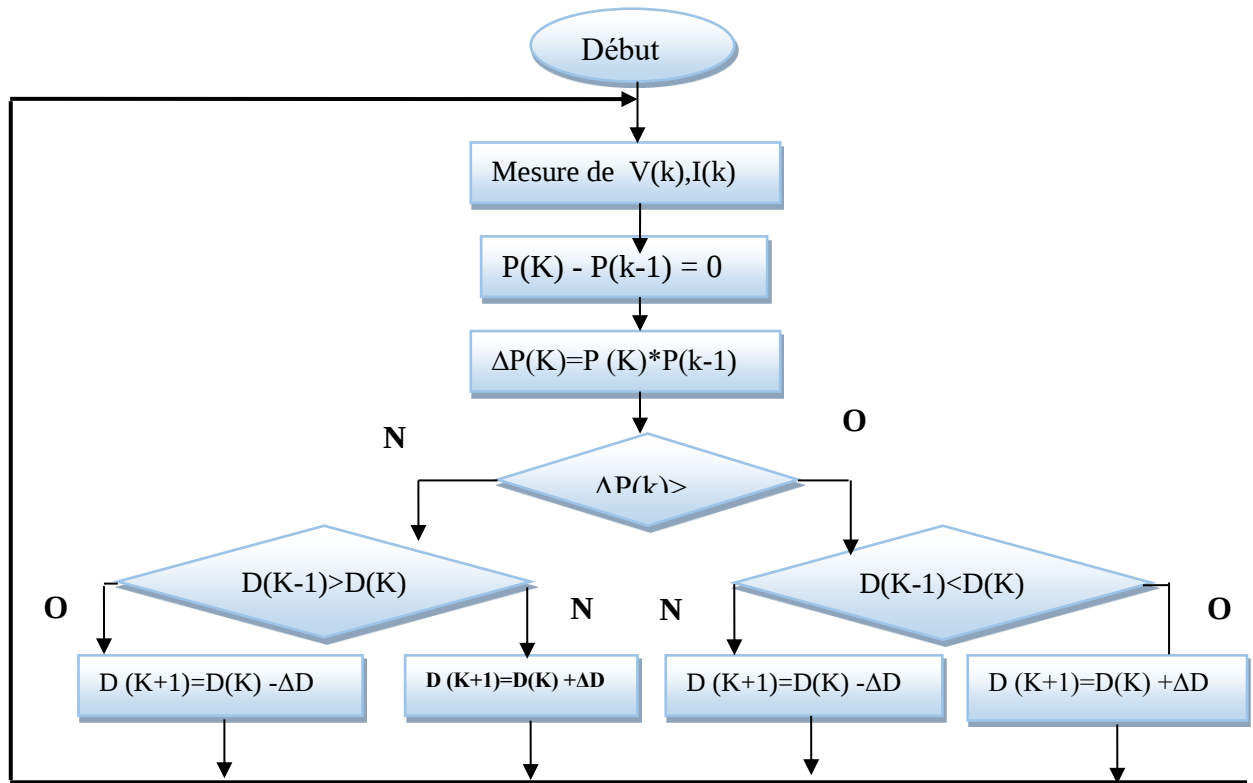


Figure (2.21): Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).

Après avoir modélisé le champ PV et connecté celui-ci au convertisseur DC-DC, nous avons Effectué la simulation de son fonctionnement. Pour cela nous avons implémenté les modèles Obtenus dans Simulink. Une commande MPPT a été insérée à l'aide des blocs programmés sous « Matlab- Simulink » [59].

La commande MPPT permet de se situer à tout moment de l'ensoleillement à la puissance maximale de notre système PV. Pour simuler la puissance maximale, nous avons d'abord connecté notre système PV directement à la charge, puis nous avons par la suite connecté entre la charge et le système PV le convertisseur DC-DC commandé par le MPPT. [60]

- **Principe des commandes « Incrément des conductances » (IncCond) :**

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.6)$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.7)$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes:

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement est à droite du PPM.

En utilisant la relation (2.8), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.8)$$

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, 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 [28].

2.6.4 Commande MPPT par la méthode« Incrément des conductances »:

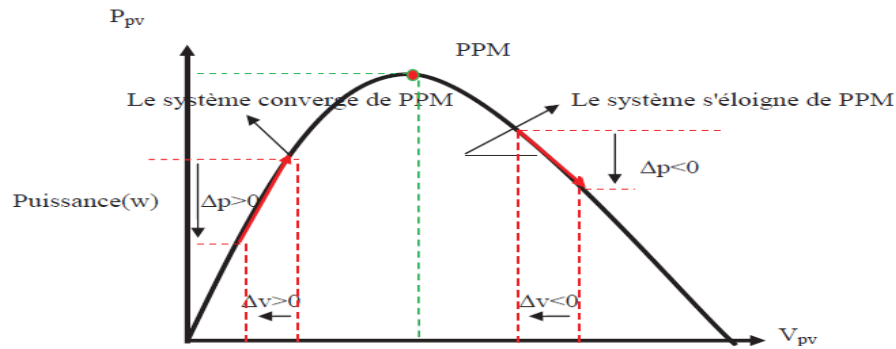


Figure (2.15): Illustration de la méthode IC.

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. Ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

Si au contraire, la puissance décroît, $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Alors, on doit perturber la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPPT.

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. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV

augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPPT.

La figure (II.16) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Selon cet algorithme, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à des instants successifs d'échantillonnage, et pouvoir calculer l'erreur de tension et de puissance :

$$\Delta V = V_{pvk} - V_{pvk-1} \quad (2.9)$$

$$\Delta P = P_{pvk} - P_{pvk-1} \quad (2.10)$$

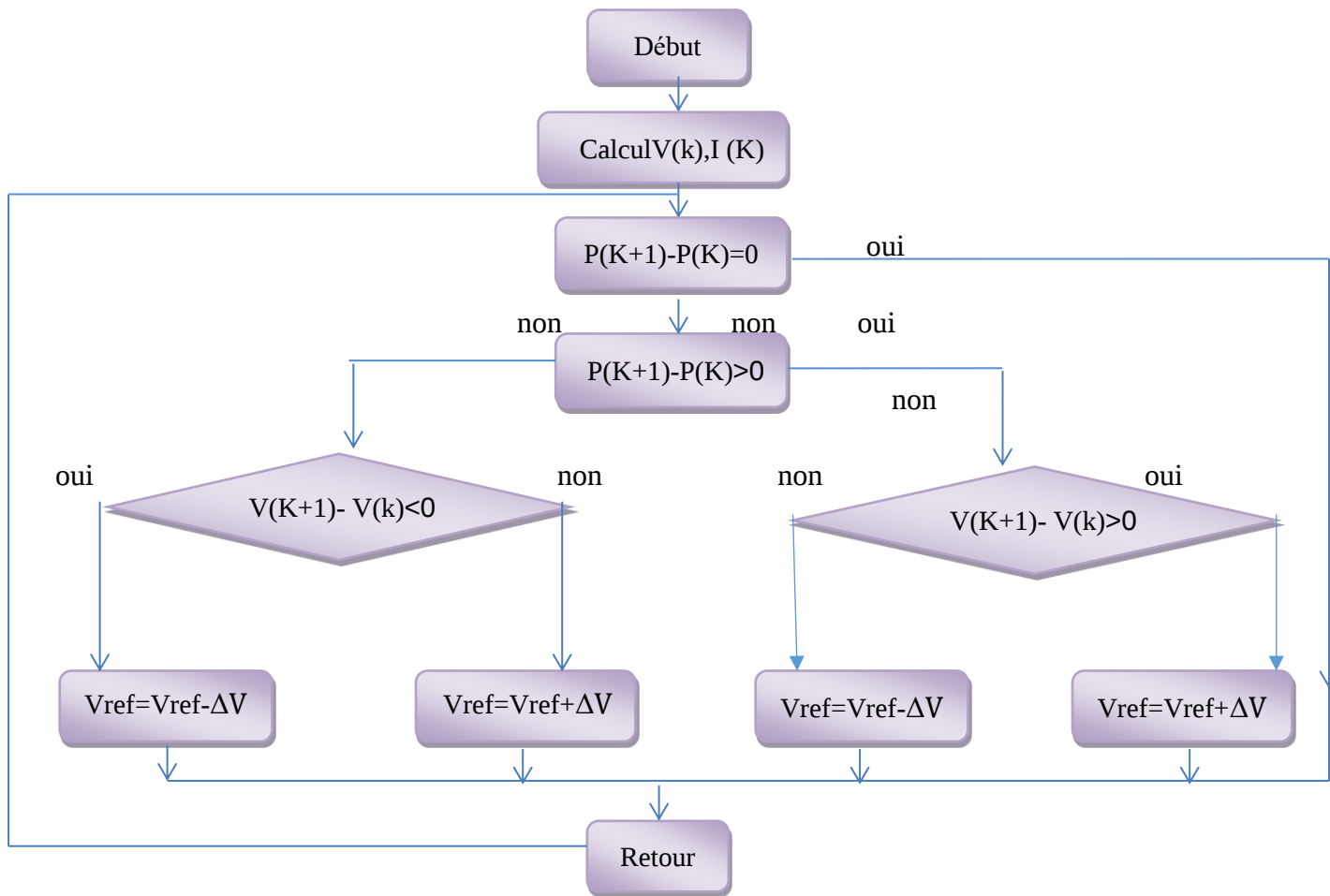


Figure (2.16) : Technique de MPPT basée de la méthode IC.

La méthode IC est aujourd'hui largement utilisée à cause sa simplicité, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi. Cette procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le

système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la perturbation. Il faut noter que si la valeur incrémentée est faible on doit avoir un ralentissement dans la recherche du PPM. Autrement dit, il faut trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

2.6.5 Avantages et inconvénients de IC:

- **Avantage:**

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesures réduit.

- **Inconvénients:**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [29].

2.7. SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par IC:

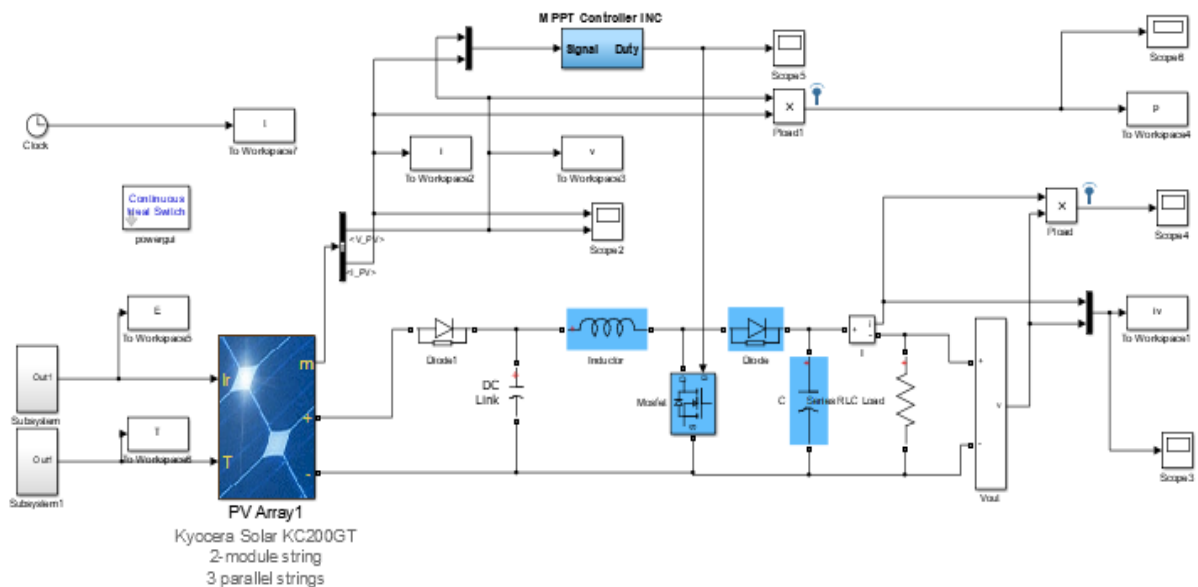


Figure (2.17): Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par IC

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

- **Commentaire :**

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

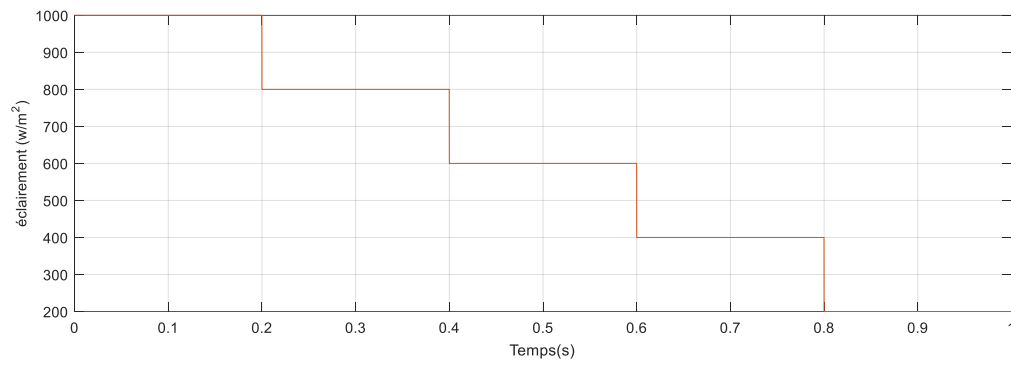


Figure (2.18): Variation de l'éclairement.

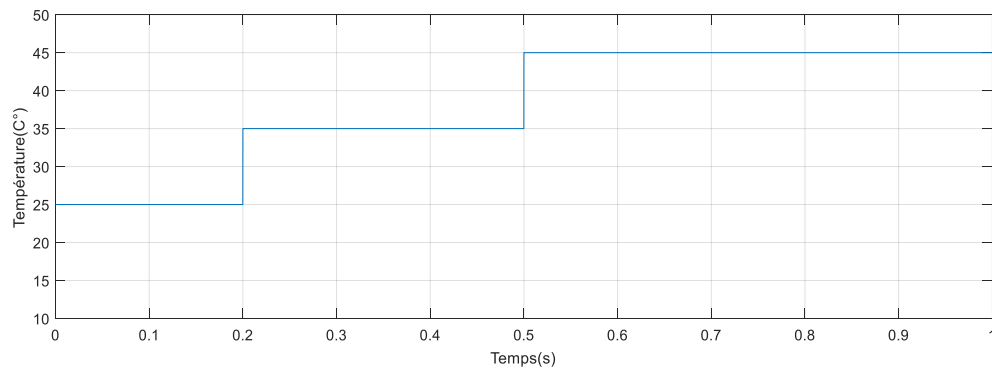


Figure (2.19): Variation de la température.

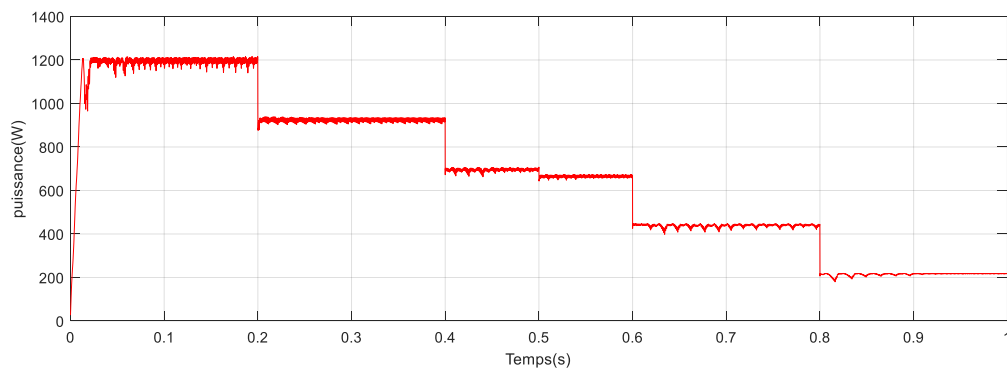


Figure (2.20): Caractéristiques $P(t)$ d'un système PV.

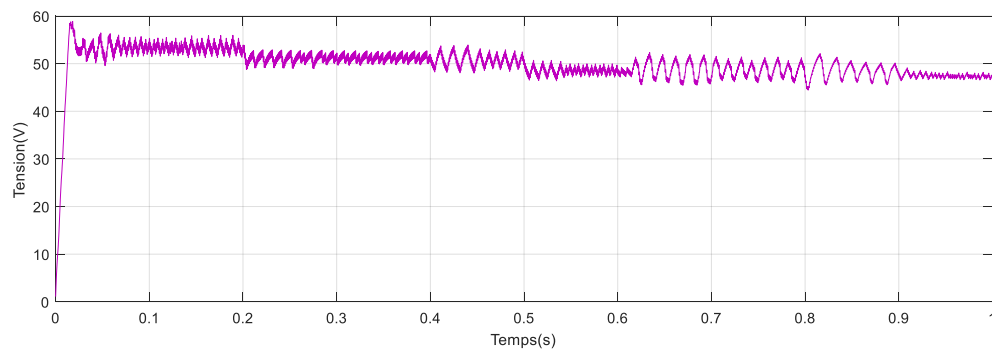


Figure (2.21): Caractéristiques $v(t)$ d'un système PV.

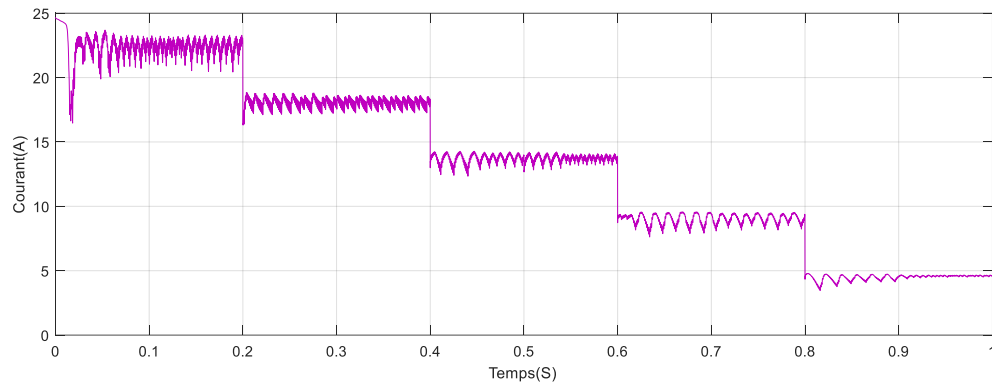


Figure (2.22):Caractéristiques $i(t)$ d'un système PV.

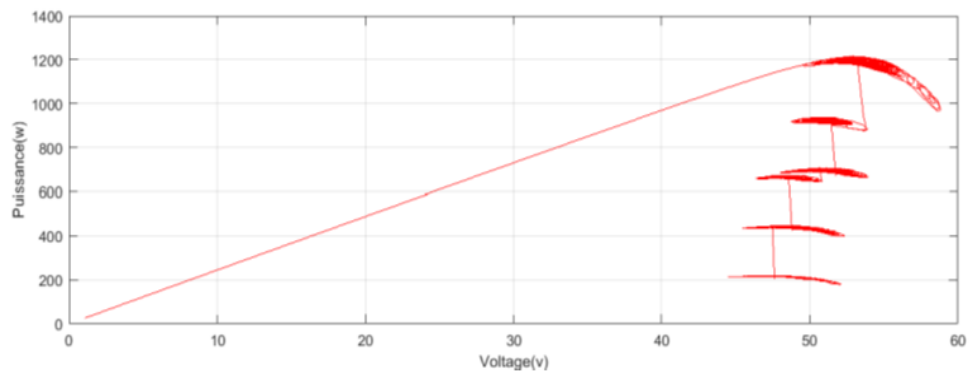


Figure (2.23):Caractéristiques $p(v)$ d'un système PV.

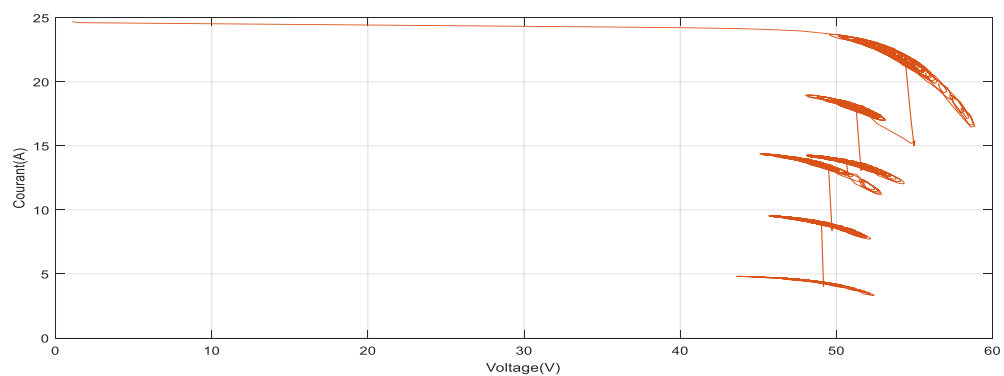


Figure (2.24) : Caractéristiques $i(v)$ d'un système PV.

:

- ✓ La figure (2.20) présente allure de puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur IC 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 différents éclairagements:
- ✓ 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 $t=1\text{s}$ 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 et le stabilise au tour du MPP avec une certaine oscillation qui est causée par l'algorithme de commande.

2.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude par simulation MPPT par méthode d'Incrémental Conductance (IC). Qui basées sur le contrôle de 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.

Dans le prochain chapitre, nous présentons une approche intelligente (MPPT-floue).pour l'amélioration des performances de contrôle d'un système photovoltaïque.

Chapitre III:
Commande par mode glissant pour les
systèmes Photovoltaïques

3.1. Introduction :

Le réglage par mode de glissement est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. Ses principaux avantages sont la garantie de la stabilité et de la robustesse pour de larges variations des paramètres du système. La théorie des systèmes à structure variable et les modes glissants associés (en anglais sliding mode), est une technique de commande non linéaire est caractérisée par la discontinuité de la commande au de commande non linéaire. Elle est caractérisée par la discontinuité de la commande au passage par une surface de commutation appelée surface de glissement. [61]

La technique des modes glissants consiste à diriger la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre d'où le phénomène de glissement.

La discussion qui a lieu au premier congrès de l'IFAC en 1960 entre NEIMRAK et FILLIPOV a été concluante, dans la mesure où un nouveau problème sur la théorie des modes glissants a été posé. Ce n'est que durant cette discussion que l'ambiguïté de la détermination du comportement dynamique du système commandé sur la surface de commutation a été levée [62].

3.2. Principe de MPPT (Maximum Power Point Tracking Control) :

La méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est simple et est basée sur la relation qui existe entre la tension de charge et la tension en circuit ouvert du panneau PV Ainsi, lorsqu'une connexion directe est effectuée entre la source et la charge, la sortie du module PV est rarement maximale et le point de fonctionnement n'est pas optimal Pour pallier ce problème, il est nécessaire d'ajouter un dispositif d'adaptation, contrôleur MPPT avec un convertisseur DC-DC, entre la source et la charge, (Fig. 3.1)[63].

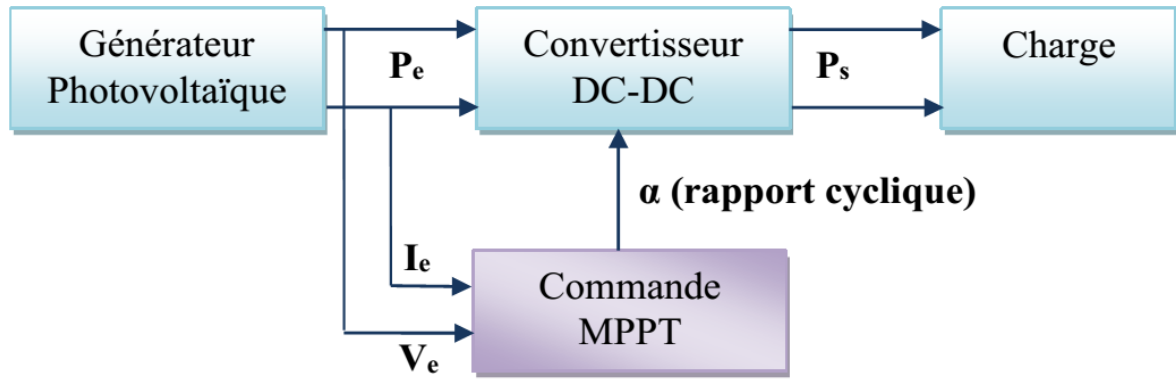


Figure 3.1: Système photovoltaïque avec commande MPPT

3.3. La détermination de la loi de commande :

La structure de la commande en mode glissant se compose de deux parties : la première traite de la quantité de contrôle équivalente U_{eq} , qui maintient le point de fonctionnement dans la surface de commutation et le déplacer à l'origine, et le second assure la stabilisation du contrôleur ONU [64].

Les systèmes à structure variable sont appelés systèmes dont la structure change. Ce type de systèmes a une caractéristique intéressante pour les applications de contrôle, qui consiste en un mode glissant, ce mode se produit sur la surface de commutation, et le système reste insensible aux variations de paramètres et aux perturbations.

Dans ce cas, le glissement de surface peut être conçu avec l'erreur de la puissance de sortie et l'erreur de sortie intégrale a été ajoutée pour atteindre un état stationnaire nul.

Un choix possible de la structure d'un contrôleur de mode glissant est :

$$u = u_{eq} + k \cdot \text{sign}(S) \quad (3.1)$$

Où u_{eq} est appelé contrôle équivalent qui dicte le mouvement de la trajectoire d'état le long de la surface de glissement. La structure d'un contrôleur de mode glissant est définie par :

$$u = D(t+1), \quad u_{eq} = D(t) \quad (3.2)$$

Avec $D(t)$ est le rapport cyclique un temps t et $D(t+1)$ est le rapport cyclique à un temps $t+1$.

- k est une constante, représentant la sortie maximale du contrôleur requise pour

surmonter les incertitudes et les perturbations des paramètres S est appelée fonction de commutation car l'action de commande commute son signe des deux côtés de la surface de commutation S est défini comme:

$$S = P(k+1) - P(k) \quad (3.3)$$

Où P est la puissance instantanée du générateur photovoltaïque Où P est la puissance de sortie du réseau photovoltaïque à un instant $P(t)$ et $P(k+1)$ est la puissance de sortie à un instant $(t+1)$.

$$\text{sign}(S) = \begin{cases} 1 & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

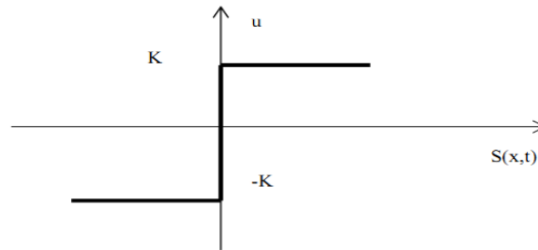


Figure 3.2: Représentation de la commande discontinue.

Actuellement, de nombreuses solutions ont été développées afin d'éliminer ou au moins réduire ce phénomène par remplacer la fonction $\text{sgn}(s)$ par la fonction de saturation représentée par la figure 3.3.[65]

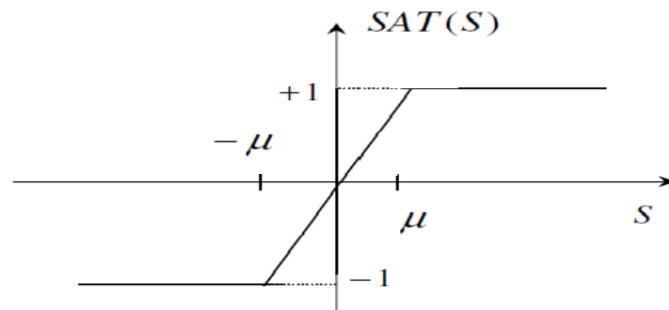


Figure 3.3: fonction de saturation.

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\mu}\right) = \begin{cases} \frac{s}{\mu} & \text{si } |s| \leq \mu \\ \text{sgn}(s) & \text{si } |s| > \mu \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec μ représente l'épaisseur du voisinage de la surface dans lequel les composantes hautes fréquences sont filtrées. Comme le seuil est grand, il ya moins de commutation, mais plus la précision diminue. Ainsi le développement d'une méthode par mode glissant nécessite un compromis entre la robustesse et les performances.

Cette surface de glissement garantit que le mouvement de glissement est atteint et régule le convertisseur élévateur de tension de sortie. Dans ce système de contrôle, il est nécessaire de mesurer la puissance de sortie du générateur photovoltaïque et de modifier le rapport cyclique du signal de contrôle du convertisseur DC/DC. Ainsi, la puissance de sortie du générateur photovoltaïque est mesurée et comparée à la puissance de sortie du générateur photovoltaïque précédent, en fonction du résultat de la comparaison, le cycle de service optimal du contrôle en mode glissant est modifié et le processus est répété jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte.

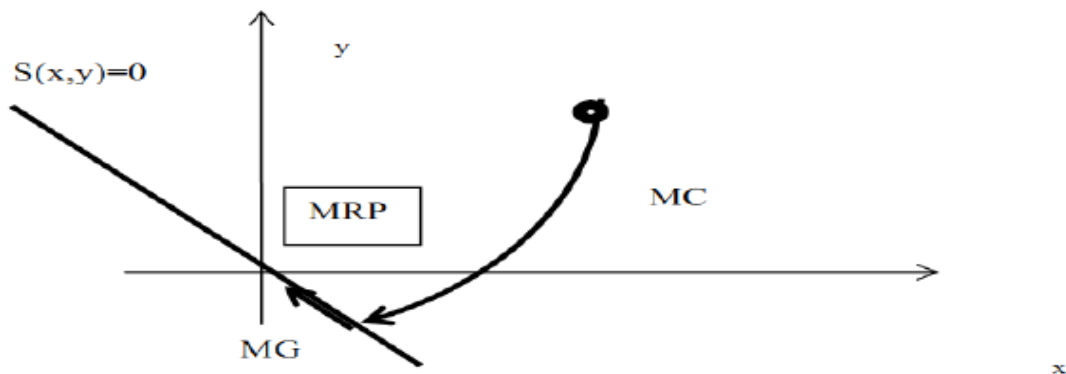


Figure 3.4: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

3.3. Résultat de simulation :

Les valeurs des paramètres du convertisseur DC-DC :

- Résistance (R_h) = 1 Ω , Inductance (L_h) = 4 e-4H , Capacitance (C_h) = 1200 e-6F
- Diode : Résistance (R_{on}) = 0.001 Ω , Tension directe (V_d) = 0.8 V,
- Résistance d'amortissement (R_a) = 500 Ω , Capacité d'amortissement (C_a) = 250e-9 F,
- Mosfet : FET Résistance (R_{on}) = 0.1 Ω , Interne diode résistance (R_d) = 0.01 Ω ,
- RLC : Résistance R = 120 Ω , Tension nominale V_n = 50 Vrms .

Les performances de l'algorithme proposé sont simulées à l'aide de MATLAB 2015a

Un bloc de générateur photovoltaïque a été utilisé pour simuler un générateur solaire.

La simulation a été effectuée lorsque l'éclairement solaire passe de 1000 W/m² à 200 W/m² et que les changements de température de 25 C° à 45 C° peuvent être observés sur la Fig. 3.7, fig3.8.

Le résultat de la simulation obtenu à du système basé sur MPPT avec régulateur de mode glissant, l'irradiation et la température utilisées sont variables et la charge est considérée comme constante (R=120 ohms). La puissance de sortie moyenne du générateur photovoltaïque, indiquant des valeurs dans la région de la puissance maximale.

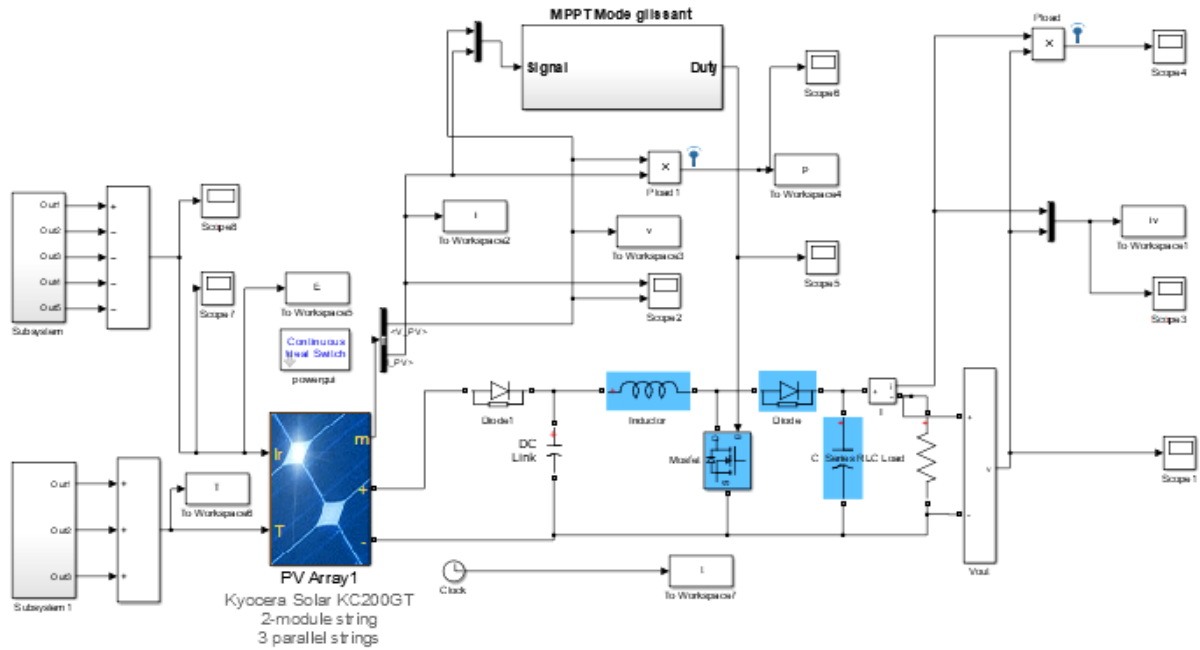


Figure (3.5) : Schéma de simulation de SMC MPPT

La Température et irradiation du générateur photovoltaïque sont modifiées conformément à la Fig. 3.7.et Fig. 3.8.

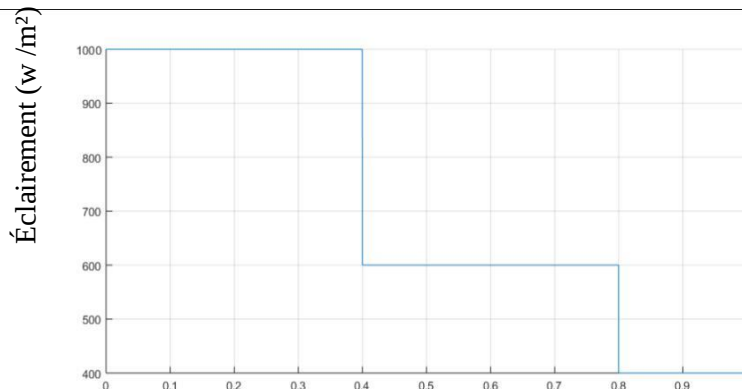
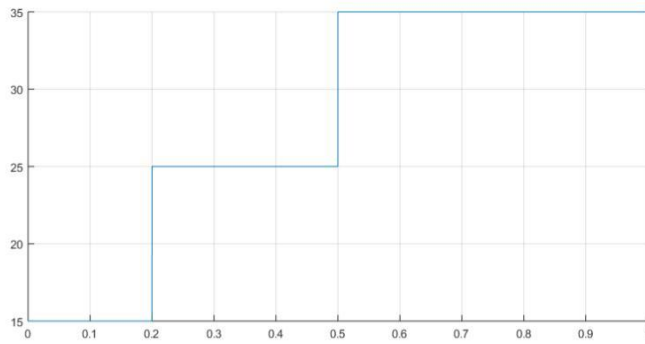


Figure 3.6: Variation de l'éclairement E



Temps (s)

Figure 3.7 : Variation de la température

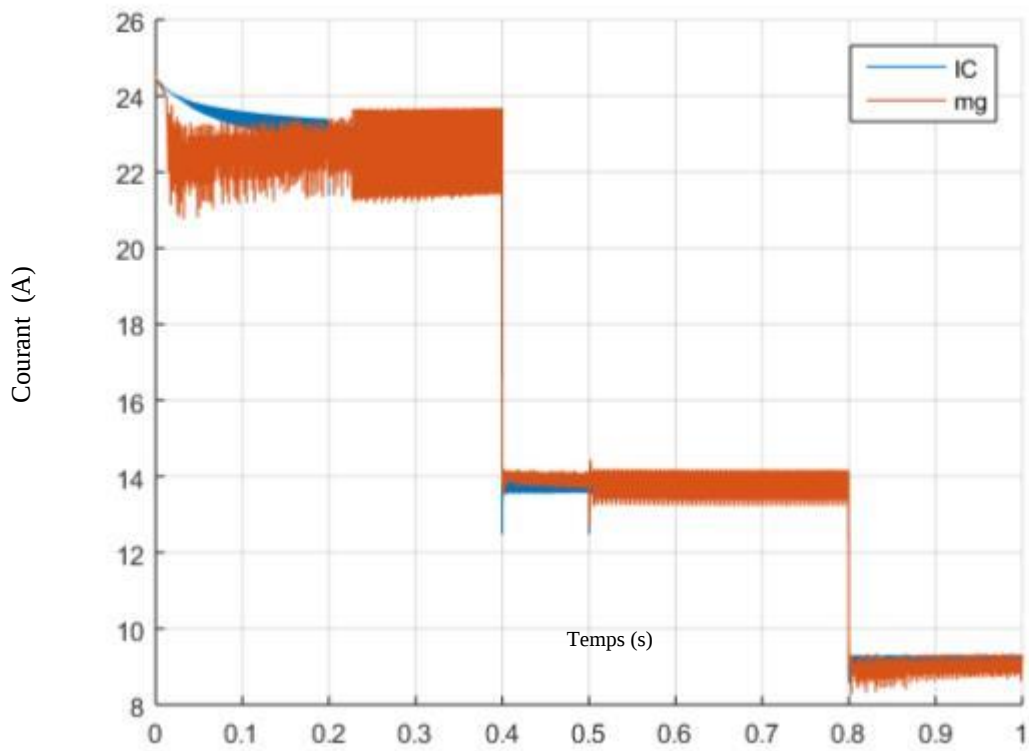


Figure 3.8 : Le courant de la sortie du générateur photovoltaïque

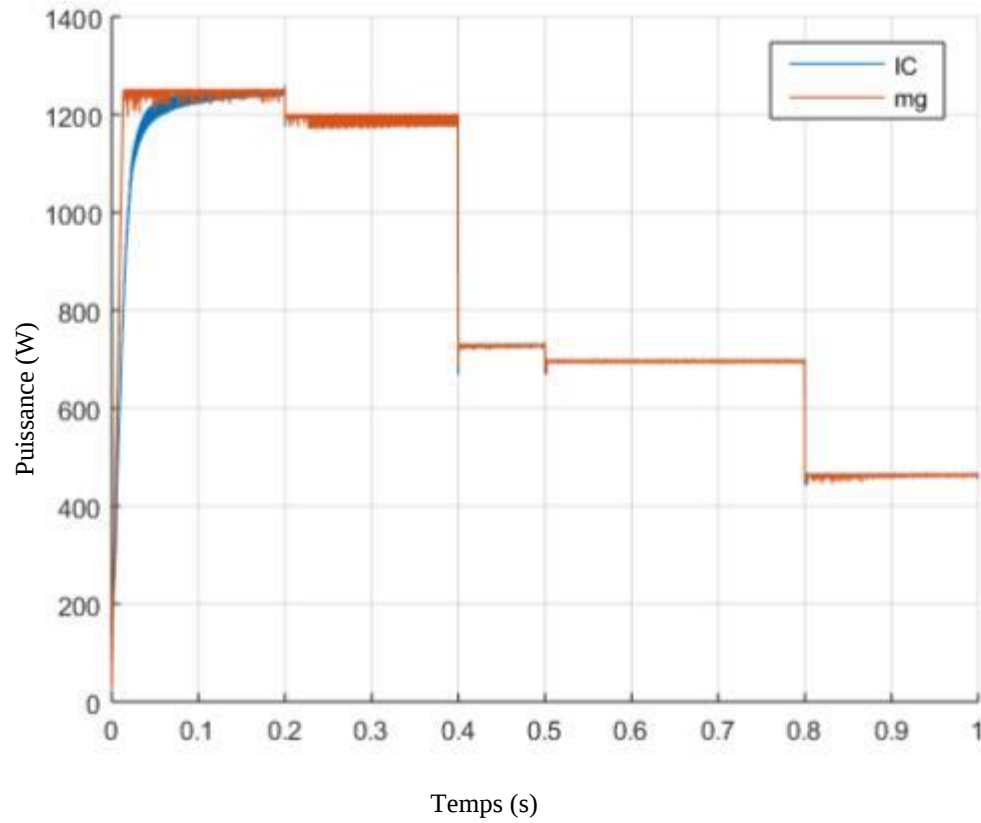


Figure 3.9 : La puissance de la sortie du panneau photovoltaïque

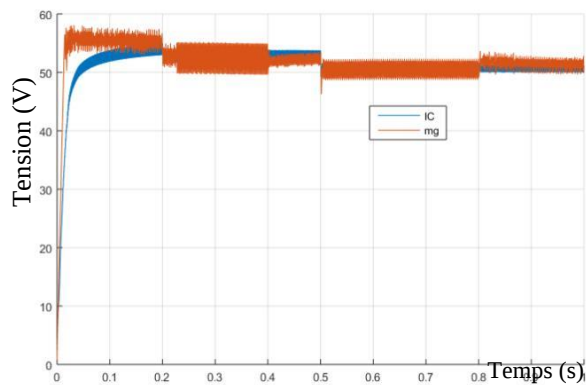


Figure 3.10: la tension de sortie du panneau photovoltaïque

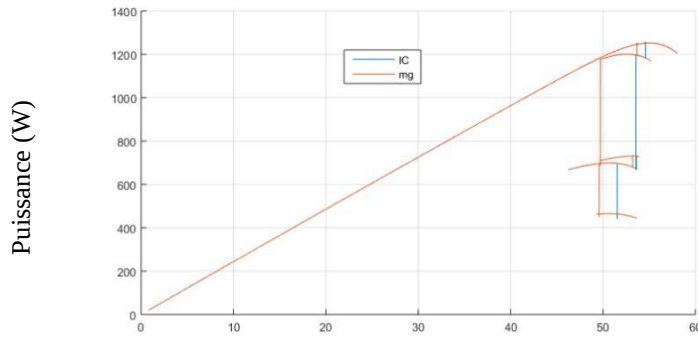


Figure 3.11: Le fonctionnement dynamique MPPT pour un changement T et E

La simulation a été effectuée pour différent éclairement passant de 1000 w/m^2 à 200 w/m^2 Et de la température qui varie de 25° C à 45° C comme la montre les figure 3.7 et 3.8.

D'après les figures (3.7 à 3.11), les résultats de la simulation obtenue pour le système basé sur MPPT avec le contrôleur démodée glissement, avec la variation de l'irradiation et de la température utilisée et la charge est considérée constante ($R = 120 \text{ ohms}$).

Dans la figure (3.10), la puissance de sortie moyenne du générateur photovoltaïque indique des valeurs de puissance maximale.

La figure (3.11) montre, en détail la variation dynamique du MPPT pour un changement de température et d'éclairage progressif. La sortie de puissance du générateur photovoltaïque, indique la proximité du point de puissance maximale ce qui permet d'assurer une bonne vitesse dynamique

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons une nouvelle proposition de contrôleur en mode glissant pour le suivi du point de puissance maximale. Les paramètres d'entrée du contrôle sont le changement de puissance de sortie du PV et la sortie est Le rapport cyclique pour générer le MPPT optimal dans différentes conditions de fonctionnement, la méthode donne de très bons résultats, l'algorithme de contrôle donne une convergence rapide et des performances robustes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette thèse a discuté de la caractéristique du module solaire photovoltaïque et divers Méthodes MPPT au début. Le coucou Un système solaire photovoltaïque basé sur un convertisseur a été envisagé pour l'analyse de cette recherche. Basé sur équations électriques du module solaire photovoltaïque, Le modèle MATLAB/Simulink a été conçu pour valider et étudier les effets de la température et irradiation. Le module solaire photovoltaïque de *KC200GT* a été utilisé pour analyser le convertisseur DC-DC Boos système photovoltaïque basé. Le contrôleur de mode coulissant MPPT a été simulé à partir d'un module solaire photovoltaïque. Le L'efficacité de l'algorithme MPPT a été testée pour le changement de charges et par rapport aux autres charges condition

Les résultats de simulation ont permis de mettre en évidence les performances et la robustesse de la loi de commande proposée.

Comme perspectives, nous souhaitons valider les commandes utilisées par une implémentation expérimentale tout en essayant de les appliquer aux autres types de convertisseurs DC-DC.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Gergaud, Olivier. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur. Diss. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [2] Pankow, Yann. "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque." National School Superior of Art and Trades, Lille (2004).
- [3] يوسف , et al. "Commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques." (2021).
- [4] Boukhers, Djamil, and A. Bouzid. "Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque. Application au pompage." (2007).
- [5] Boukhers, Djamil, and A. Bouzid. "Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque. Application au pompage." (2007).
- [6] BENRABAH, Athmane, and Fouad DJAIDJA. DETERMINATION DE LA POSITION DU SOLEIL A M'SILA. Diss. university of M'sila.
- [7] BENZAF Khoudir, BSIKRI Abdelmalek. "Détermination des performances énergétiques d'un concentrateur Cylindro-Parabolique: Etude expérimentale."
- [8] Bessemoulin, Pierre, and Jean Oliviéri. "Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette." *La météorologie* 2000.31 (2000): 42-59.
- [9] Nadjib, MECHALIKH Med, and HAMADA Charaf Eddine. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Diss. 2013.
- [10] Naima, Mekhenane, Makhoul Sabir, and Hebbir Nacer. "Impact des conditions météorologiques (Vent et poussière) sur le rendement des cellules photovoltaïques." (2021).
- [11] Khaoula, T. E. B. A. N. I. Modélisation du rayonnement solaire global pour différentes définitions de la durée du jour. Diss. faculté des sciences et de la technologie* univ bba, 2023.
- [12] Arrachdi, Latifa, M. Boussaid, and Kada Bouchouicha. Quantification de l'albédo des obstacles entourant un panneau solaire dans un milieu Désertique. Diss. universite Ahmed Draia-ADRAR, 2020.
- [13] Boulesbaa, Bouchra, Mohamed Ali Encadreur Lahmer, and Sofiane Encadreur Haddad. Étude de l'effet des caractéristiques de la couche TCO sur les propriétés de la cellule PV en silicium. Diss. Université de Jijel, 2019.
- [14] Lamiss, Abbad, Djouadi Sara, and Labed Nabil. "Elaboration d'un code de cacul pour l'etude des cellules solaires photovoltaïques a haut rendement." (2021).

- [15] MULTON, Bernard, et al. "Les moteurs électriques pour applications de grande série." *Revue 3EI* juin (2000): 1.
- [16] Larbi, Degla Mohammed, Ben Ahmed Bachir, and N. A. S. R. I. Nadjib. "Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque." (2017).
- [17] Larbi, Degla Mohammed, Ben Ahmed Bachir, and N. A. S. R. I. Nadjib. "Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque." (2017).
- [18] Djerioui, Ali. "Etude et modélisation d'un système photovoltaïque pour l'habitat résidentiel autonome."
- [19] CASSORE, Fabien, Guillaume ORLANDI, and R. A. U. Maxime. "CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COLORANT." Encadrant: Jacques PERSELLO.
- [20] Ouahiba, Djebarni, and Loukrichi Nour Elhouda. Détection d'ombrage dans les systèmes solaires photovoltaïques. Diss. faculté des sciences et de la technologie univ bba, 2022.
- [21] BEN AICHA, M. U. S. T. A. F. A., ADEL GUENDOUZI, and Naima Sofi. "Commande d'un système photovoltaïque à batterie par mppt." (2022).
- [22] Debbakh, Saad, and Yakoub Elbar. Minimisation des pertes d'un réseau électrique de distribution en présence d'un générateur d'énergie dispersé par une méthode hybride PSO-Firefly. Diss.
- [23] Benkhelil, E., and A. Gherbi. "Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque avec un étage d'adaptation DC/DC." *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar* (2011): 159-170.
- [24] Boudouda, Imene, Wassila Belouad, and Souad Encadreur Merabet. Etude comparative entre les deux méthodes de détermination des paramètres électriques d'un module photovoltaïque. Diss. Université de Jijel, 2017.
- [25] Bensalem, Salaheddine. Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires. Diss. 2018.
- [26] Koehl, Arnaud. Modélisation, observation et commande d'un drone miniature à birotor coaxial. Diss. Université Henri Poincaré-Nancy I, 2012.
- [27] Larbi, Degla Mohammed, Ben Ahmed Bachir, and N. A. S. R. I. Nadjib. "Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque." (2017).
- [28] Nadjib, MECHALIKH Med, and HAMADA Charaf Eddine. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Diss. 2013.
- [29] CHOHRIR, Imene, FatmaZohra AHMANI, and Nouredine HANINI. "Apport de la logique floue pour la poursuite de point de puissance maximale dans un système photovoltaïque." (2017).
- [30] ABDOUNE, Abderrazak. Modélisation et optimisation du système photovoltaïque. Diss. Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2012.

- [31] يوسف, et al. "Commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques." (2021).
- [32] Abouda, Salim. Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes. Diss. Reims, 2015.
- [33] Djouadi, S., and K. Fathi. Etude et réalisation d'une carte de commande universelle des convertisseurs d'énergie. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [34] Estivals, Bruno. Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2010.
- [35] Lopez, Miguel. Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée. Diss. Université Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [36] GOHMES, MOHAMMED YACINE, BELKASEM DJELLALI, and AKRAM DJEDAI. Modélisation et commande d'un système PV connecté au réseau électrique utilisant DSTATCOM. Diss. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [37] HIZI, NADIR, and TAKY-EDDINE DJABOREBBI. Etude comparative des commandes MPPT pour les systèmes photovoltaïques. Diss. UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.
- [38] Slama, Fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Diss. 2018.
- [39] LATRECHE, Soufiane. "Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino Uno." (2016).
- [40] BENSABOUDI, Mohamed Samir, and Salah Eddine ARAR. Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque. Diss. Dr Bousmaha Imen Souhila, 2020.
- [41] GOHMES, MOHAMMED YACINE, BELKASEM DJELLALI, and AKRAM DJEDAI. Modélisation et commande d'un système PV connecté au réseau électrique utilisant DSTATCOM. Diss. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [42] Sarri, Sofiane, Hocine Boutefaha, and Djafer Encadreur Lalili. Commande en MPPT d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur multiniveaux. Diss. Université de Jijel, 2020.
- [43] De Broglie, Louis. Recherches sur la théorie des quanta. Diss. Migration-université en cours d'affectation, 1924.
- [44] Koehl, Arnaud. Modélisation, observation et commande d'un drone miniature à birotor coaxial. Diss. Université Henri Poincaré-Nancy I, 2012.
- [45] Abouda, Salim. Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes. Diss. Reims, 2015.
- [46] Aouchiche, Nedjma. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. Diss. Bourgogne Franche-Comté, 2020.

- [47] HOUICHE, Chaima, and Lemia FAID. Commande MPPT intelligente d'une classe de systèmes photovoltaïques. Diss. univ msila, 2021.
- [48] Aouchiche, Nedjma. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. Diss. Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [49] Abouda, Salim. Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes. Diss. Reims, 2015.
- [50] Abouda, Salim. Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes. Diss. Reims, 2015.
- [51] Abouda, Salim. Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes. Diss. Reims, 2015.
- [52] HAKOUMI, Ahmed, Abdeldjalil BENAMAR, and Touhami GHITAOUI. Commande MPPT et contrôle d'un systemephotovoltaïque 3KW par la logique floue. Diss. Université Ahmed Draïa-Adrar, 2019.
- [53] Elhanin, Mazed. Commande MPPT basée sur les informations fournisseurs par les cellules de contrôle photovoltaïque et les réseaux de neurones artificiels. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2008.
- [54] Abbas, Hanen, et al. "Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque." *Journal of Renewable Energies* 17.3 (2014): 435-445.
- [55] Gueye, Daouda, et al. "Experimental Validation Under dSPACE of the ANN-PID Control of the DC Link for Injection of Solar Energy to the Grid." *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 12.4 (2022): 2015-2022.
- [56] BACHIRI, Chaima. Contrôle Direct du Couple du Moteur à Induction Double Stator (MSDS) utilisant la technique d'optimisation Gray Wolf. Diss. university of M'sila, 2021.
- [57] Abouda, Salim. Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes. Diss. Reims, 2015.
- [58] Faiza, Benadel. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. Diss. UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [59] Aouchiche, N., MS Aït Cheikh, and A. Malek. "Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation." *Journal of Renewable Energies* 16.3 (2013): 485-498.
- [60] Guingane, Toussaint Tilado, et al. "Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB/SIMULINK." *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement* 2.1 (2016).
- [61] Zouaoui, Yamina. Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone. Diss. 2018.

- [62] ACHOUR, Abdelmalak. Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone. Diss. Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2005.
- [63] Abouda, Salim. Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompes. Diss. Reims, 2015.
- [64] Merabet, Adel. Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone. Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [65] Aly, S., L. Pibouleau, and S. Domenech. "Traitement par une méthode d'éléments finis de modèles de colonnes de rectification discontinue à garnissage." *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 65.6 (1987): 991-1003.

ANNEXE

Tableau 1: Les paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant

c	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 2 : Fiche technique de KC200GT aux conditions STC

Éclairement (E), Température (T)	E = 1000 w/m ² , T = 25 °C
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

