



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

Spécialité :Machine électrique

Par : Chihab Reguig, Youcef Omane, Youcef Aliat

Thème

**Commande MPPT par mode glissant pour
les systèmes Photovoltaïques**

Devant le jury composé de:

Mr.

Allal Abderrahim

Président

Mr.

Kechida Ridha

Examineur

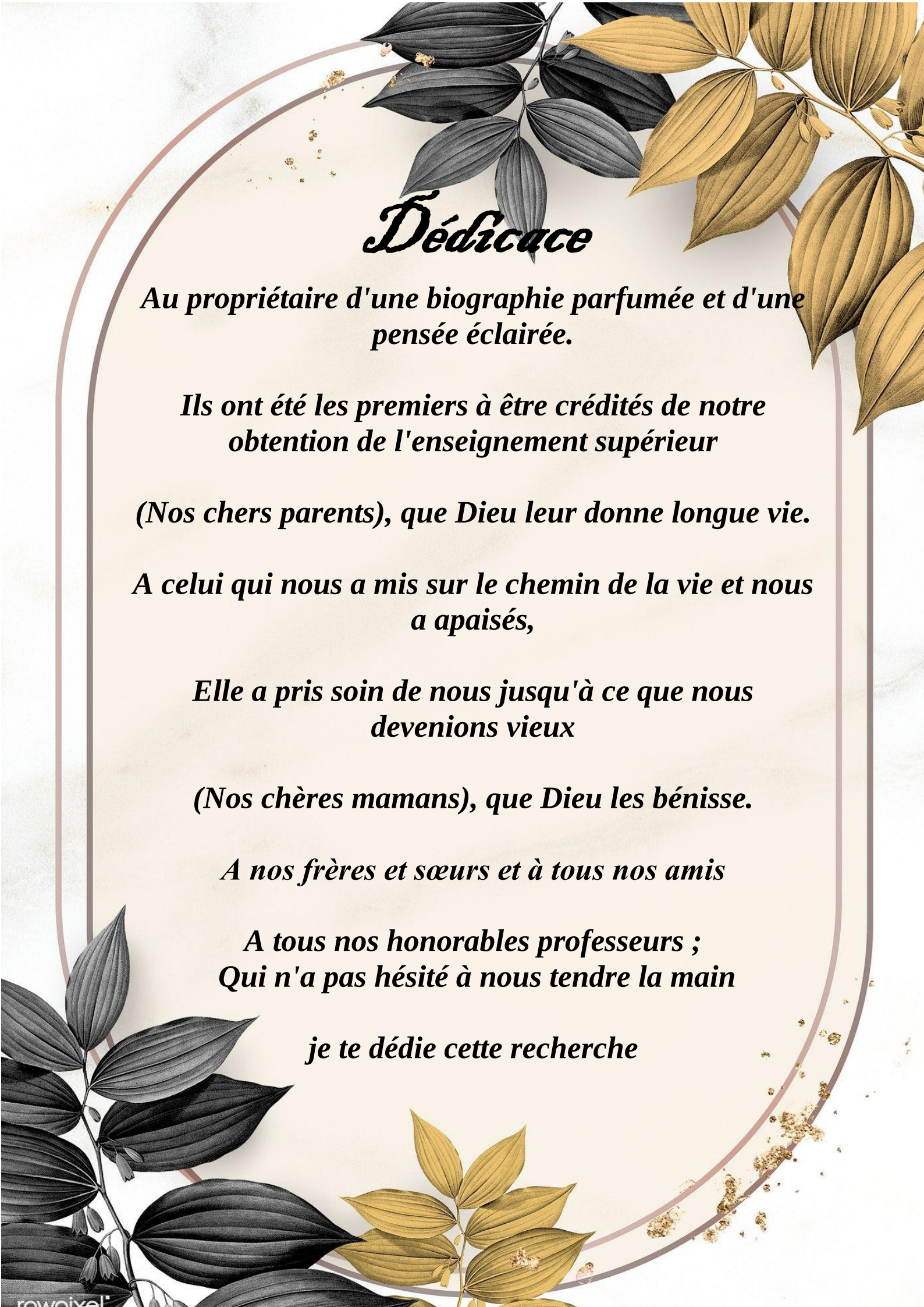
Mr.

Serhoud Hicham

Encadreur

2020-2021





Dédicace

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

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

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

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

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

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

A nos frères et sœurs et à tous nos amis

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

je te dédie cette recherche

Remerciement

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

Nous tenons à exprimer mon encadreur

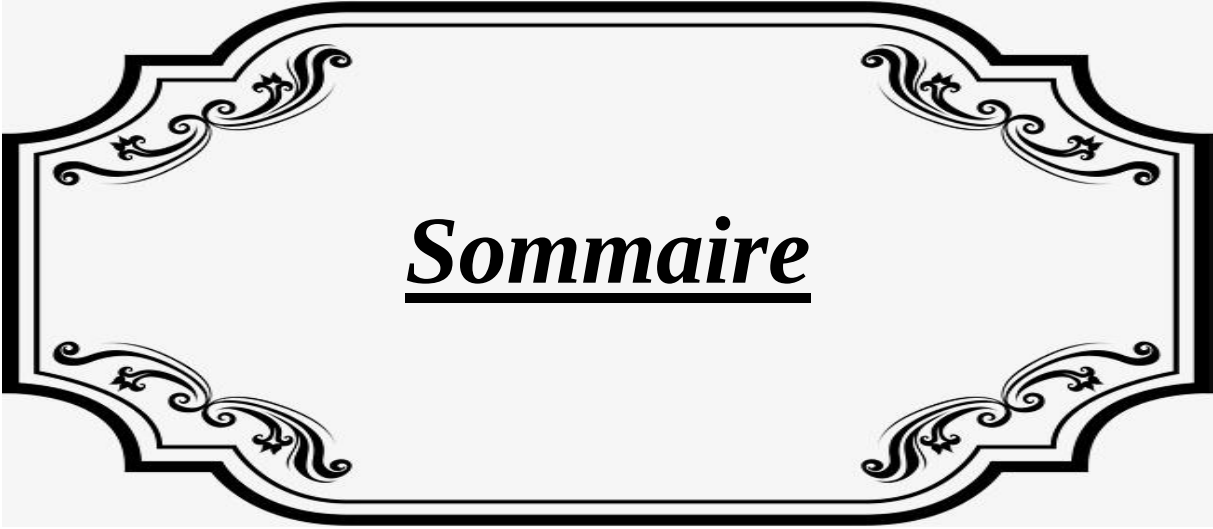
Dr. Hicham serhoud

Patience et précieux conseils.

*Nos remerciements à nos parents pour leur
soutien.*

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





Sommaire

Sommaire

	page
Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	ii
liste de figure	iv
Liste de Tableau	vi
Listes des symboles et abréviations	Viii
Abréviation utilisée	ix
Introduction générale	01
Chapitre I: Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
1.1. Introduction:	04
1.2. Type des systèmes PV:	04
1.2.1. Les systèmes autonomes:	04
1.2.2. Les systèmes PV hybrides:	05
1.2.3. Les systèmes raccordés aux réseaux:	06
1.3. Structure du système PV connecté au réseau:	06
1.4. Générateur PV:	07
1.4.1. Modélisation d'une cellule PV:	08
1.4.2. Mise en parallèle / série :	09
1.4.3. Simulation du générateur PV :	10
1.5. Conclusion:	16
Chapitre II: Techniques de poursuite du point de puissance maximal Mppt	
2.1. Introduction :	18
2.2 .Électronique de puissances dans les systèmes PV connectés aux charge :	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
2.3.1 Simulation d'un panneau PV	23
2.4. Recherche du point de puissance maximale (MPPT)	28
2.4.1 Principe	28
2.4.2. Différents types de commandes MPPT	29
2.4.3. Premières commandes MPPT	29
2.4.4. Commandes MPPT à algorithmes performants	29
2.4.5. Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité	30
2.4.6. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue	30
2.4.7. Les commandes MPPT basées sur les réseaux de neurones	31
2.5 Contrôle de MPPT :	31
2.5.1 PI Control (intégrale proportionnelle)	31
2.5.2 Contrôle direct	32
2.5.3 Contrôle direct de détection de sortie	33
2.6 Commande MPPT par la méthode P&O	34
2.7. Conclusion	41
Chapitre III: Commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques	
3.1 Introduction:	43
3.2 Principe de MPPT (MAXIMUM Power Point Tracking CONTROL)	43
3.3 La détermination de la loi de commande	44
3.4 Système à structure variable	46
3.5 Conception de la commande par mode glissant	47
3.6 Amélioration de la commande SMC	47
3.7 Commande par mode glissant-floue	47
3.8 Résultat de simulation	49
3.9 Conclusion	54
Conclusion générale	56
Bibliographie	59

Liste de figure

	Page
Chapitre I: Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
Figure (1.1) : Système PV autonome avec batterie	05
Figure (1.2) : Système PV hybride	05
Figure (1.3) : Structure d'un système PV connecté au réseau.	06
Figure (1.4) : Structure d'un système PV connecté au réseau	07
Figure (1.5) : Schéma d'une cellule solaire idéale	08
Figure (1.6) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV	09
Figure (1.7) : Schéma de simulation du module PV de type «1Soltech 1STH -215-P»	11
Figure (1.8) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension	11
Figure (1. 9) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension	12
Figure (1.10) : Effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension	13
Figure (1.11) : Effet de la température sur la caractéristique Puissance-Tension	13
Figures (1.12) : caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série	14
Figures (1.13) : caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle	15
Figures (1.14) : caractéristiques résultantes d'un groupement la mise en série/parallèle	15
Chapitre II: Techniques de poursuite du point de puissance maximale Mppt	
Figure (2.1) : Symbole d'un convertisseur DC-DC	19
Figure (2.2) : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	20
Figure (2.3) : Schéma de principe d'un convertisseur Booste	20
Figure (2.4) : Schémas équivalents du hacheur survolteur	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) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque	24
Figure (2.10) : Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire pour différents éclairagements	25
Figure (2.11) : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire pour différents éclairagements	25
Figure (2.12) : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire pour différents températures	26
Figure (2.13) : Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire pour différents températures	26
Figure (2.14) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque	27
Figure (2.15) : Caractéristiques E (t) d'un panneau solaire pour différents éclairagements	27
Figure (2.16) : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire pour différents éclairagements	28
Figure (2.17) : Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire pour différents éclairagements	28
Figure (2.18) : Schéma de principe du MPPT avec la commande directe	32
Figure (2.19) : Puissance de sortie du convertisseur Cúk par rapport à son rapport cyclique (1KW / m ² , 25°C)	33
Figure (2.20) : Principe de la commande P&O	35
Figure (2.21) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O)	35
Figure (2.22) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par P&O	36
Figure (2.23) : Caractéristiques i(v), p(v) d'un panneau solaire KC200GT	37
Figure (2.24) : Caractéristiques E (t) d'un panneau solaire pour un éclairage variable(Varié chaque 0.2 seconds)	37
Figure (2.25) : Caractéristiques T (t) d'un panneau solaire	37
Figure (2.26) : Caractéristiques P (t) d'un système PV pour un éclairage variable	38
Figure (2.27) : Caractéristiques i (t) d'un système PV pour un éclairage variable	38
Figure (2.28) : Caractéristiques v (t) d'un système PV pour un éclairage variable	38
Figure (2.29) : Caractéristiques iv (t) d'un système PV pour un éclairage variable	39
Figure (2.30) : Caractéristiques p (v) d'un système PV pour un éclairage variable	39
Figure (2.31) : Caractéristiques i (v) d'un système PV pour un éclairage variable	39

Chapitre III: Commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques	
Figure .3.1. Système photovoltaïque de structure de base	43
Figure 3.2 : Représentation de la commande discontinue	44
Figure 3.3 : fonction de saturation	44
Figure (3.4) : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	46
Figure (3.5) : Structure du système flou	47
Figure (3.6) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par mode glissant (changement d'éclairage et température automatique)	49
Figure (3.7) : Variation de l'éclairement E	50
Figure (3.8) : Variation de la température	50
Figure (3.9) : Le rapport cyclique de sortie du panneau PV	50
Figure (3.10) : Le courant de la sortie du générateur photovoltaïque	51
Figure (3.11) : La puissance de la sortie du panneau photovoltaïque	51
Figure (3.12) : la tension de sortie du panneau photovoltaïque	51
Figure (3.13) : Le fonctionnement dynamique MPPT pour un changement T et E	52

liste de tableau

	Page
Chapitre I: Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
Tableau (1.1) : Caractéristiques électriques du module PV «1Soltech 1STH -215-P»	10
Chapitre II: Techniques de poursuite du point de puissance maximale Mppt	
Tableau 2.1: Résultats de calcul des paramètres internes pour KC200GT	24
Tableau 2.2: Fiche technique de KC200GT aux conditions STC	24
Tableau 2.3: Fiche technique de KC200GT aux conditions STC	36
Chapitre III: Commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques	
Tableau 3.1: Règles de FSMC	47

Tableau 3.2 : Fiche technique de KC200GT aux conditions STC	48
Tableau 3.1 : Résultats de calcul des paramètres internes pour KC200GT	48

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 ($1000 W/m^2$).
T_{ref}	La température de référence ($298 K^\circ$).
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
Vo	Tension aux borne de la charge
iL	Courant dans l'inductance
u	Représente l'état du l'interrupteur
Iph	Le photo-courant (A).
Isat	Courant de saturation (A)
Rp	Résistances parallèle shunt. (Ω)
RS	Résistance série (Ω).
Icc	Le courant de court-circuit (A)
Vco	La tension de circuit ouvert (V)

Abréviation utilisée

PV: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

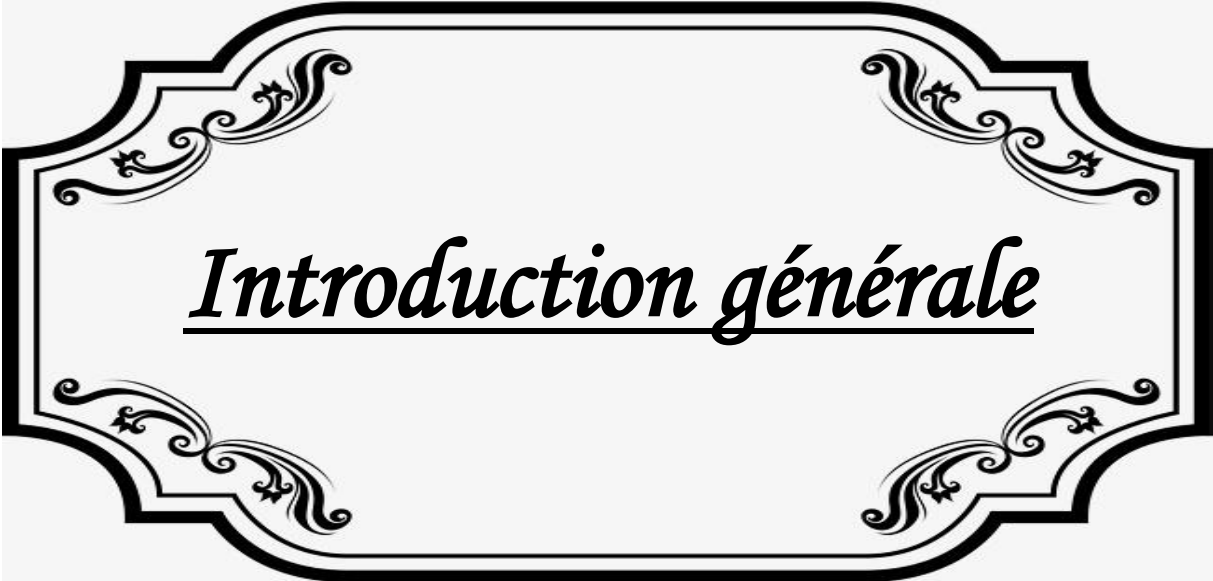
PI : Intégrale proportionnelle

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

L'énergie a été depuis les temps anciens le moteur principal de la vie humaine elle joue un rôle très important dans l'activité journalière et dans le développement des pays. La production d'énergie est indispensable à toutes les activités humaines ainsi les besoins énergétique dans les pays développés et ceux en voie de développement ont augmenté vertigineusement au cours de ces dernières années. Cette production a triplé depuis les années 60 jusqu'à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium [2].

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Les dangers supplémentaires est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, à l'exemple de la crise énergétique des années 70 [2]. Toutes ces raisons amènent les pays qui ont de grands besoins d'énergie à se tourner vers des sources d'énergies renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie. Ces sources sont des solutions très prometteuses pour concurrencer les autres sources d'énergies. Leur exploitation permettrait à l'homme d'assurer ses besoins énergétiques d'une part et de protéger son environnement d'autre part [2].

Dans ce mémoire, on analyse une modélisation et une commande du fonctionnement d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique .

L'objectif de ce travail commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en 03 chapitres :

- Dans le premier chapitre, des notions fondamentales sur le générateur PV connecté au réseau électrique sont présents, tel que type des systèmes PV structure du système PV connecte au réseau, générateur PV, et simulation du générateur PV [2].
- Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé et validé expérimentalement une stratégie de commande robuste avec l'algorithme P&O entre panneau photovoltaïque et le convertisseur DC-DC. Et aussi les techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT et sera consacré à la modélisation du hacheur et du panneau photovoltaïque ainsi que leur principe de fonctionnement et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement du générateur photovoltaïque.
- Dans le troisième chapitre, nous définissons ce qu'est le mode glissant et donnerons Les résultats de simulation obtenus par la commande en mode glissant avec MPPT pour réguler la

tension et courant de sortie. Et étudier s'ils cette commandes donnent des résultats 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

1.1. Introduction:

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite PV basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un GPV qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [1]. Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température.

De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau ce qui va faire l'objet de notre travail. Pour cela, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur les types existants des systèmes PV comme systèmes autonomes, systèmes hybrides et les systèmes connectés aux réseaux, ainsi la structure d'un système PV connecté au réseau. Ensuite, nous présentons le générateur PV, ses caractéristiques et la mise en série/parallèle des modules PV. À la fin, nous présentons un générateur PV composé d'un module ... et montrons l'influence de l'éclairement et la température sur ses caractéristiques [2].

1.2. Type des systèmes PV :

Selon la manière dont l'énergie est utilisée, il existe trois différents types de systèmes PV : comme les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes raccordés au réseau.[2]

1.2.1. Les systèmes autonomes :

Une installation PV autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Cette installation est utilisée pour alimenter un ou plusieurs consommateurs situés, comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau.

Il existe deux types de systèmes PV autonomes avec stockage et sans stockage. Le schéma général d'un système PV autonome est représenté sur la figure (1.1) [3].

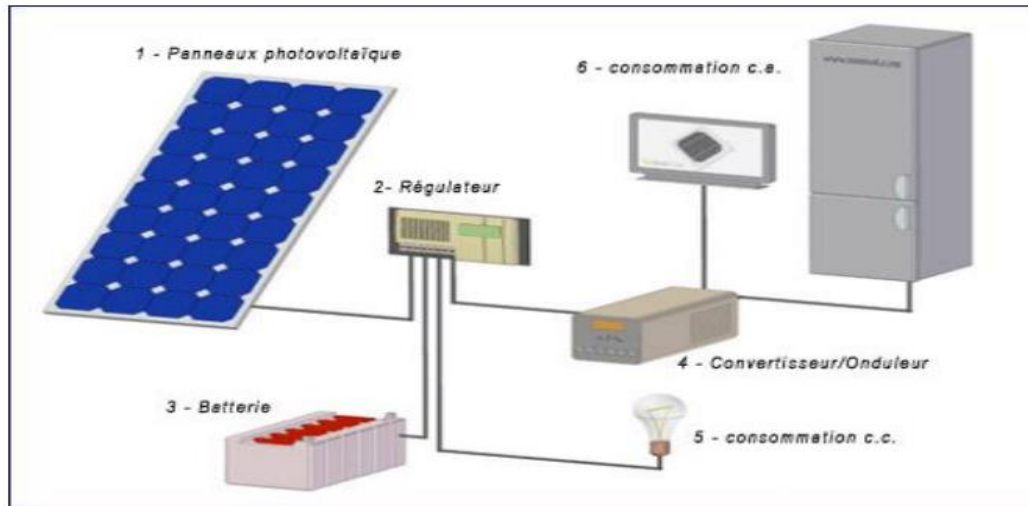


Figure (1.1) : Système PV autonome avec batterie. [2]

1.2.2. Les systèmes PV hybrides :

Les systèmes PV hybrides intègrent un générateur PV et un autre générateur : éolien, groupe électrogène, système hydroélectrique et même parfois le réseau public d'électricité. Ces systèmes s'appliquent particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système PV seul avec les batteries [2].

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [1]. Un système hybride est représenté par la figure (1.2).

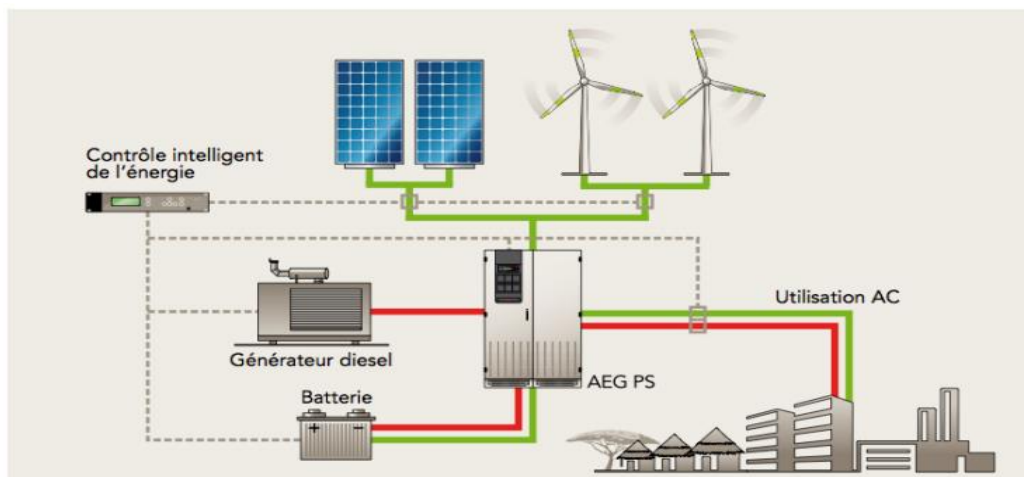


Figure (1.2) : Système PV hybride. [2]

1.2.3. Les systèmes raccordés aux réseaux :

Dans ces systèmes PV, le générateur PV est couplé directement au réseau électrique. Le système PV raccordé au réseau est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV. Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau. La structure d'un système PV connecté au réseau est montrée par la figure (1.3) [4].



Figure (1.3) : Structure d'un système PV connecté au réseau.[2]

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil. Donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie [4]. Dans notre étude, on s'intéresse au fonctionnement d'un système PV connecté au réseau.

1.3. Structure du système PV connecté au réseau :

Il existe essentiellement deux structures de chaîne de conversion PV connectée au réseau. Une structure où le générateur PV est connecté au réseau à travers un seul convertisseur DC/AC (onduleur) et une autre où le générateur PV est connecté au réseau à travers deux convertisseurs : un convertisseur DC/DC (hacheur) et un convertisseur DC/AC (onduleur) connectés entre eux par un bus continu intermédiaire. Mais dans les systèmes PV raccordés au réseau, la structure avec bus continu est la plus utilisée et la plus avantageuse par rapport à celle avec un seul convertisseur [5]. De ce fait, dans ce présent travail, nous adoptons la structure à bus continu intermédiaire. La **figure (1.4)** montre la structure du système PV connecté au réseau utilisée dans notre étude.[2]

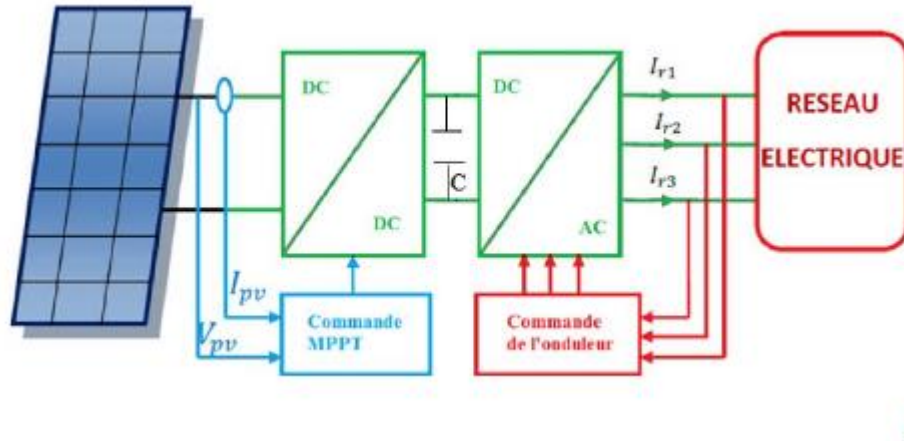


Figure (1.4) : Structure d'un système PV connecté au réseau.[2]

En général, dans une telle structure de système PV, on utilise un convertisseur DC/DC qui est la partie essentielle dans la commande du générateur PV. Ce convertisseur a pour but de délivrer à sa sortie une tension continue supérieure à celle appliquée à son entrée (hacheur survolteur) avec un rendement élevé. Cette tension représente alors la tension du bus continu. En plus, le convertisseur DC/DC a pour objectif de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale par l'intermédiaire d'une commande MPPT qui a pour fonction de poursuivre le point de fonctionnement optimal du générateur PV. On adjoint un convertisseur DC/AC (onduleur) qui servira à délivrer un courant alternatif qui sera injecté au réseau électrique, à partir de la tension continue donnée par le convertisseur DC/DC. L'onduleur est contrôlé pour produire le courant et transmettre le maximum de puissance de telle sorte que le courant du système PV introduit une faible déformation totale d'harmoniques et soit en phase avec la tension du réseau [2].

Le but de l'utilisation d'un système PV connecté au réseau est de produire de la puissance alternative à partir d'une source renouvelable et propre afin d'alimenter directement toutes les charges électriques, ou d'injecter le surplus d'électricité (PV) dans le réseau [2].

1.4. Générateur PV :

La cellule PV, l'élément primaire d'un système PV, est fabriquée la première fois par les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis au cours des années 1950[6]. Elle constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt [7].

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module PV. Les modules PV sont aussi assemblés afin de créer un champ PV. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle d'accroître le courant. Le câblage série et/ou parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.[2]

1.4.1. Modélisation d'une cellule PV:

La photopile est une composante semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n). Le schéma de circuit équivalent d'une cellule PV idéale est représenté par le schéma suivant figure (1.5) [8] :

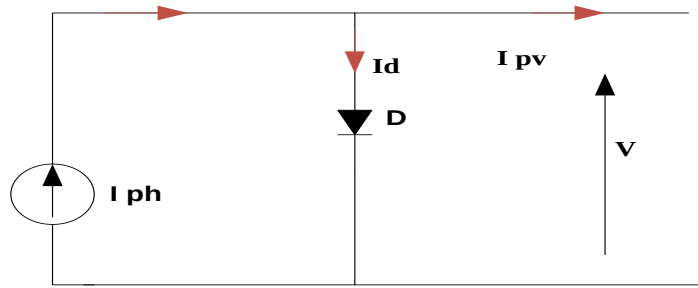


Figure (1.5) : Schéma d'une cellule solaire idéale.[8]

Selon la loi des nœuds, l'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (1.1)$$

Où I_{ph} est le photo-courant qui est constant pour un ensoleillement donné et la diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique Courant-Tension est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_{pv}}{nV_t}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Où I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_0 est le courant de saturation, $V_t = \frac{KT}{q}$ est le potentielle thermique, K est la constante de Boltzmann $K = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$, q est la charge électrique élémentaire d'électron $q = 1.6 \cdot 10^{-19} C$, n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 2$) et T est la température effective des cellules en Kelvin (K). Alors, nous pouvons décrire le modèle mathématique de la cellule PV par [9] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{v_{pv}}{nV_t}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule PV est représentée généralement par le schéma suivant figure (1.6) :

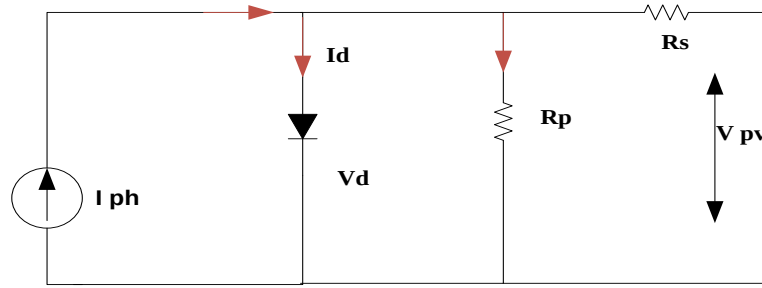


Figure (1.6) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.[8]

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_{ph} caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à R_s [10].

Le modèle mathématique pour la caractéristique Courant-Tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\exp\left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_s)}{nV_t}\right)} - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_s)}{R_{ph}} \quad (1.4)$$

Une cellule PV seule ne peut pas fournir suffisamment de puissance afin d'alimenter une charge ou le réseau électrique. Il convient donc d'associer ces cellules entre elles dans le but de fournir plus de puissance. Donc, le modèle développé pour une cellule PV, peut être étendu au cas du raccordement des cellules en série et en parallèle afin d'obtenir le modèle d'un module PV. Une association en série augmentera la tension de sortie du panneau solaire tandis qu'une association en parallèles augmentera le courant fourni à la charge [2].

1.4.2. Mise en parallèle / série :

Une association de N_s cellules PV en série permet d'augmenter la tension du GPV. Alors, les cellules PV sont traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (1.5) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules PV [11].

$$\begin{cases} V_{coNs} = N_s \cdot V_{co} \\ I_{coNs} = I_{cc} \end{cases} \quad (1.5)$$

Où V_{co} est la tension du circuit ouvert.

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules PV est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (1.6) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules PV [11].

$$\begin{cases} V_{coNp} = V_{co} \\ I_{coNp} = N_p \cdot I_{cc} \end{cases} \quad (1.6)$$

Où I_{cc} est le courant de court-circuit d'une cellule PV, V_{co} est la tension de circuit ouvert d'une cellule PV, I_{ccNp} est le courant de court-circuit de la mise en parallèle, V_{coNp} est la tension de circuit ouvert de la mise en parallèle.

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique Puissance-Tension du générateur PV, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{op} et d'un courant optimal noté I_{op} [12].

1.4.3. Simulation du générateur PV :

Les caractéristiques électriques du module solaire «1Soltech 1STH -215-P» utilisé dans ce travail sont donnés dans le tableau (1.1)

Caractéristiques électriques	E1000w/m ² , T=25 c	
Puissance maximale (P_{max})	215	W
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.11	A
Tension de circuit ouvert (v_{co})	35.54	V
Courant au point de MPP (I_{op})	7.63	A
Tension au point de MPP (v_{op})	28.55	V

Tableau (1.1) : Caractéristiques électriques du module PV «1Soltech 1STH -215-P»

Le schéma de simulation du générateur PV composé d'un module PV de type «1Soltech 1STH -215-P» en l'environnement MATLAB-Simulink est représenté par la figure suivante.

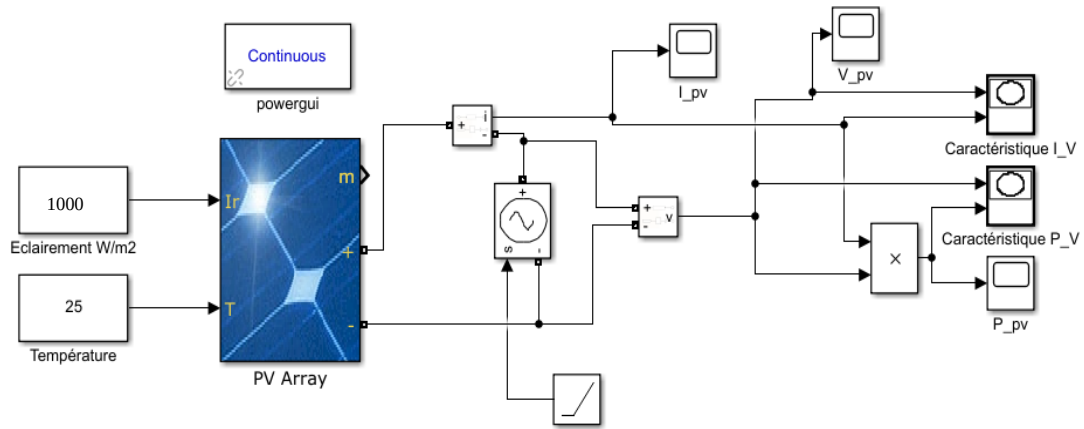


Figure (1.7) : Schéma de simulation du module PV de type «1Soltech 1STH -215-P»

- ✓ Pour constater l'influence des conditions externes de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) du générateur PV, nous avons adopté la méthode suivante :
- ✓ Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on a fixé la température à $T=25^{\circ}$ et on a fait varier l'éclairement dans une gamme de $[600, 1200]W/m^2$.

Les caractéristiques-V et P-V sont donnés par la figure (1.8) et la figure (1.9) [2].

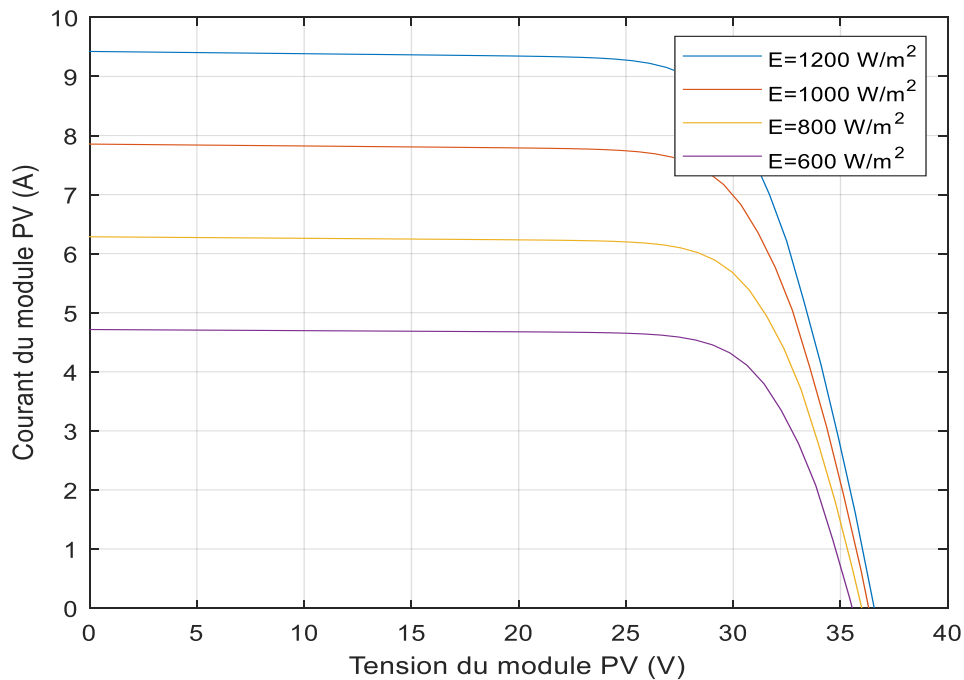


Figure (1.8) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension.[2]

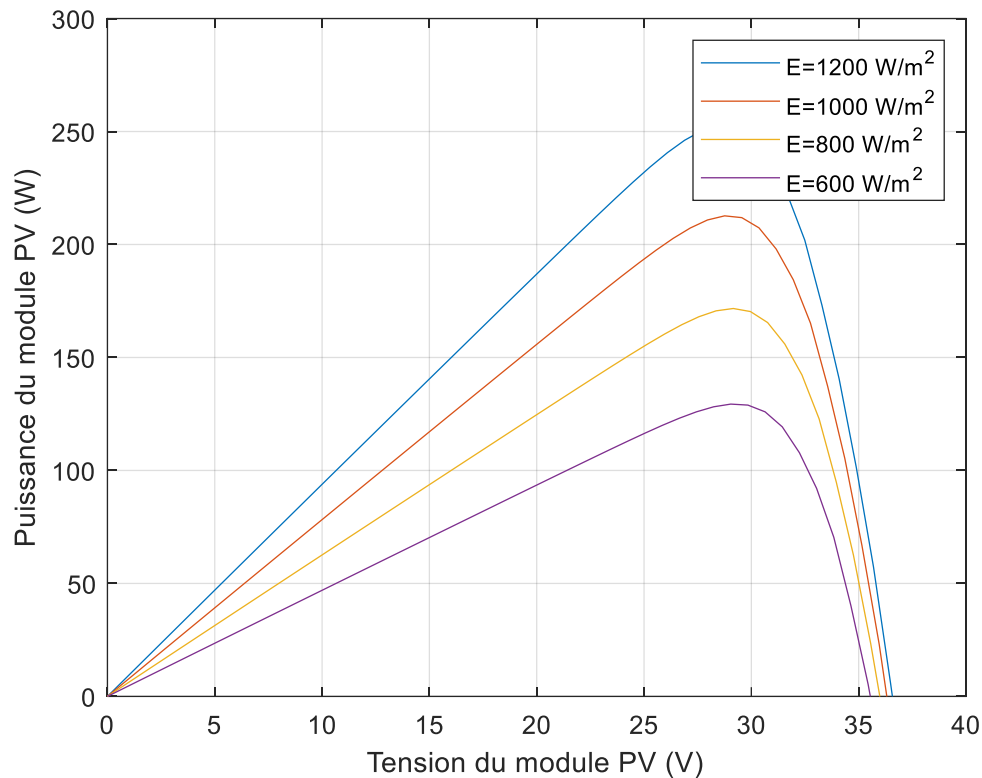


Figure (1.9): Effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension.[2]

- ✓ On remarque que la valeur du courant de court –circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les même proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.[2]
- ✓ Pour un éclairement constant $E=1200\text{W/m}^2$, on varie la température afin de voir l'influence de celui-ci par rapport aux caractéristiques du générateur PV. En faisant varier la température ambiante entre 25°C et 40°C avec un pas de 5°C . Les caractéristiques I-V et P-V sont données par le des deux figures (1.10) et (1.11).
- ✓ On remarque que l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert de générateur PV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant. La puissance du générateur PV est diminuée aussi pour une augmentation de la température.[2]

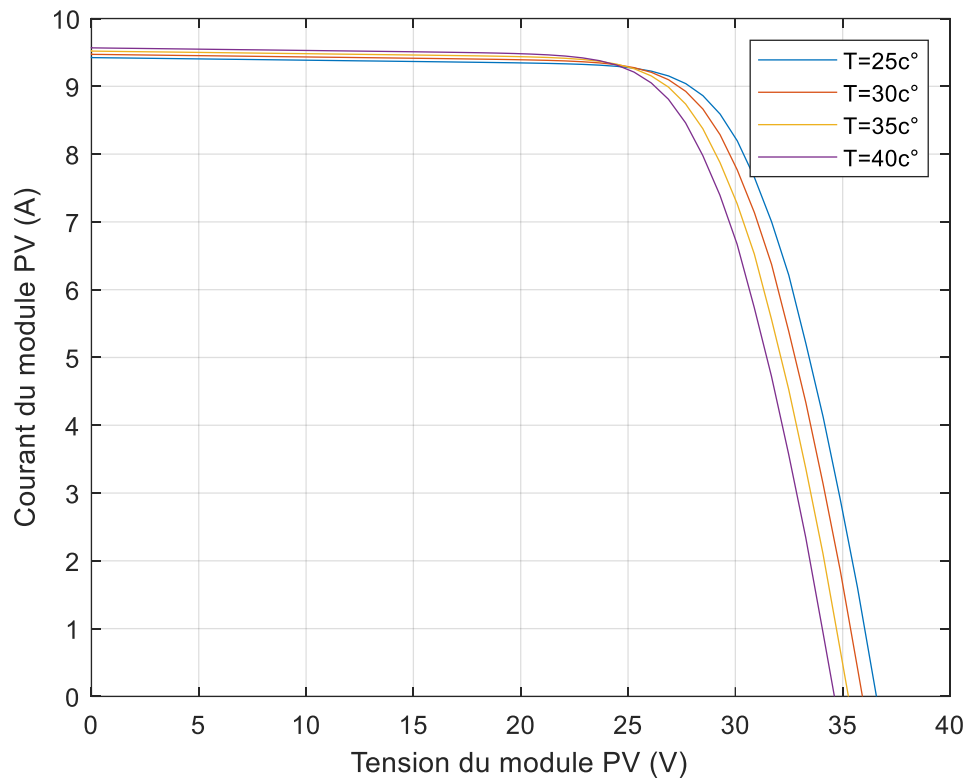


Figure (1.10) : Effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension.[2]

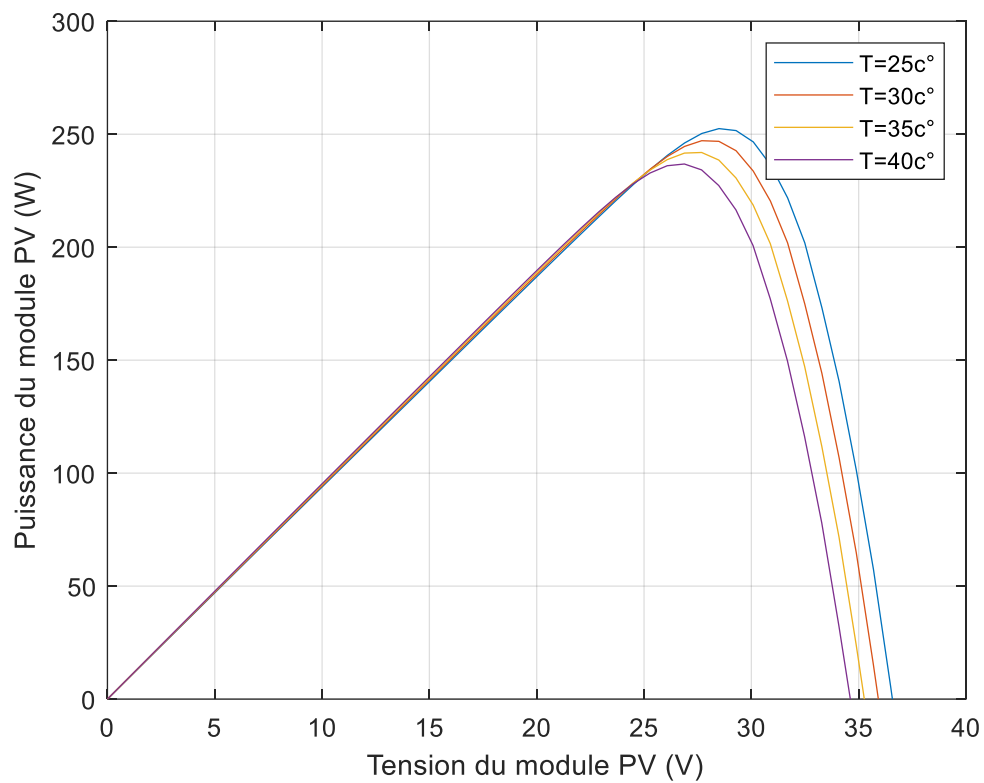
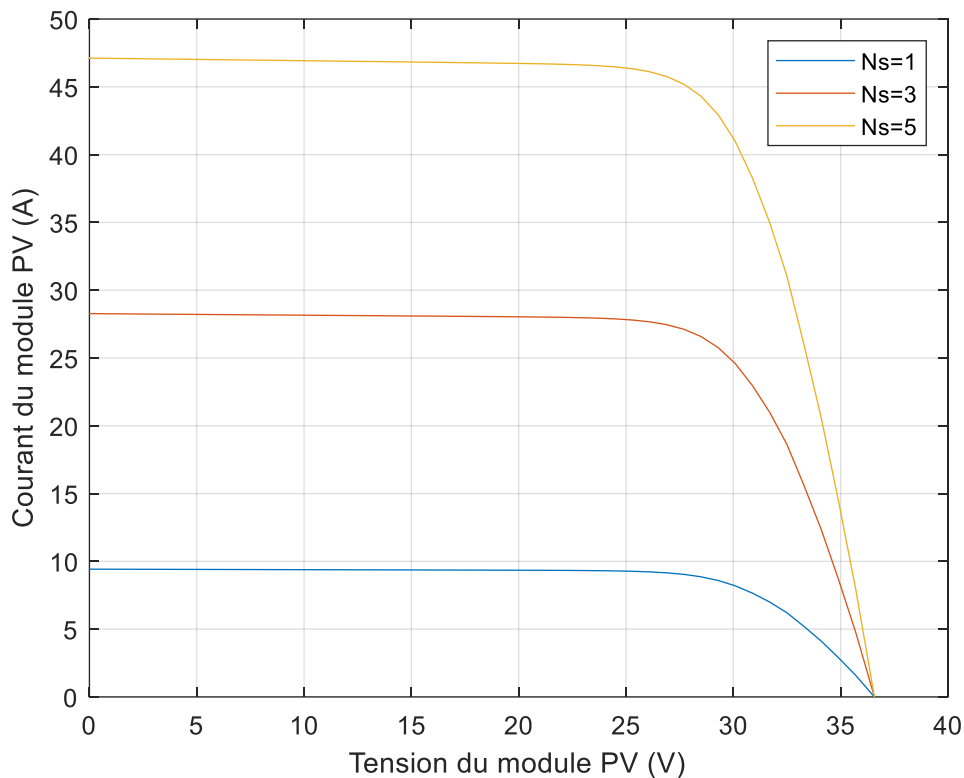


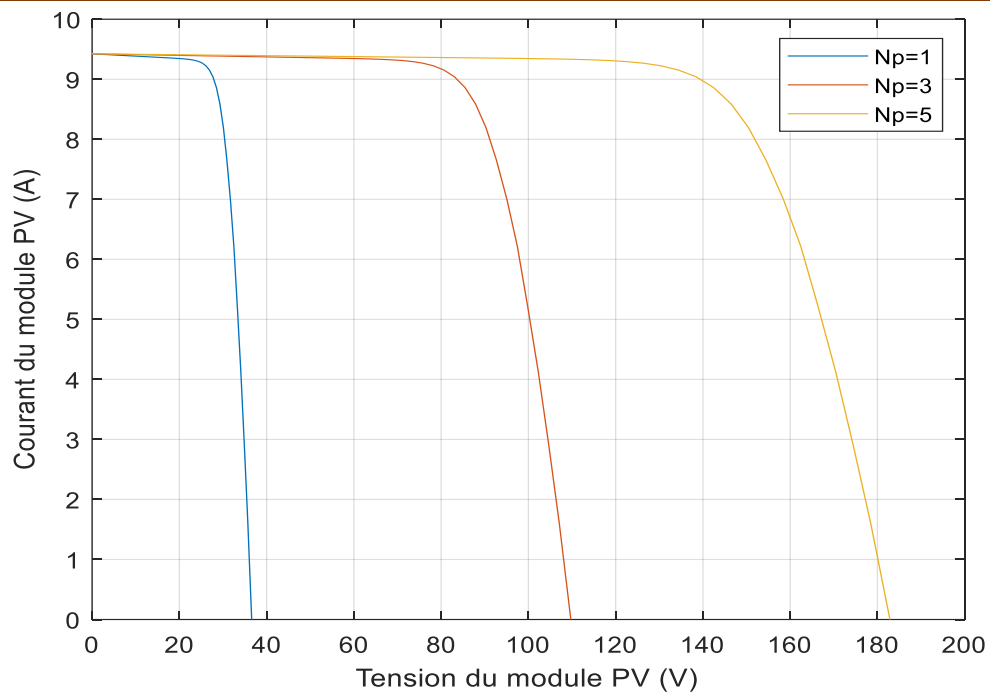
Figure (1.11) : Effet de la température sur la caractéristique Puissance-Tension.[2]

A partir des deux figures (1.9) ainsi que (1.11), on peut observer que la caractéristique P_{pv} (V_{pv}) change considérablement avec la variation du niveau d'ensoleillement ; alors que le changement est assez négligeable lors de la variation de la température. Ceci s'explique par le fait que le courant varie considérablement avec la variation de l'irradiation ; alors que la tension varie peu. Par contre, cette dernière varie beaucoup, quand la température varie.

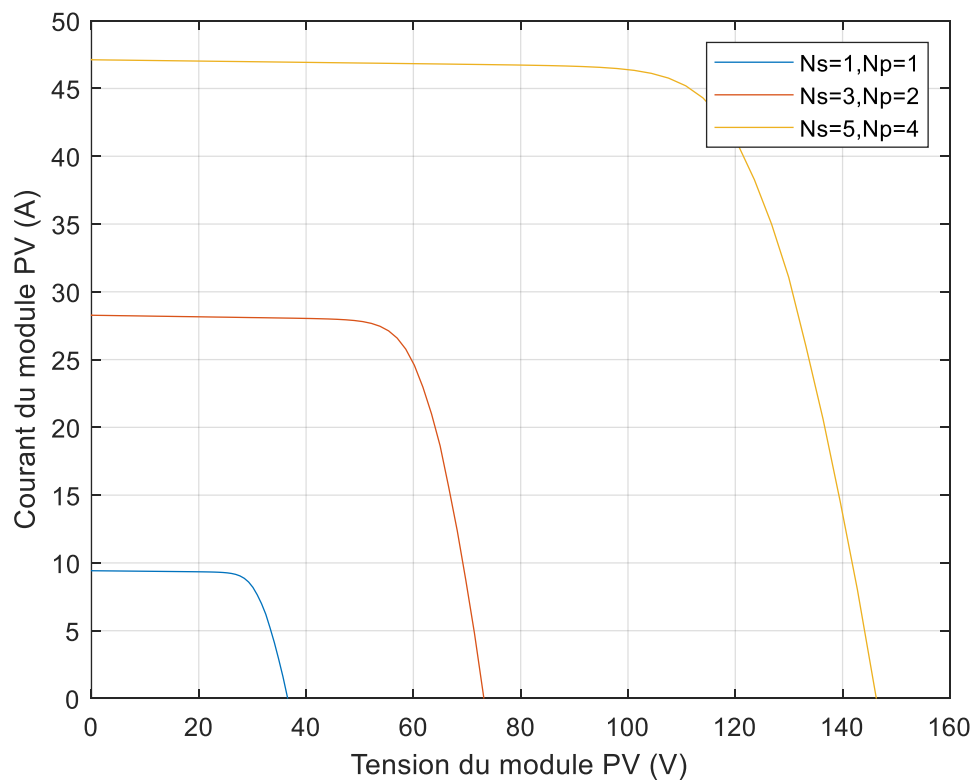
- ✓ Pour montrer l'effet de la mise en série et/ou en parallèle sur les caractéristiques Courant-Tension du générateur PV, nous avons simulé le générateur PV pour les différents cas des nombres de modules en série et/ou en parallèle. Les figures (1.12), (1.13) et (1.14) montrent l'effet de la mise en série des modules PV pour un nombre de modules de 1, 3 et 5, la mise en parallèle des modules PV pour un nombre de modules de 1, 3 et 5 et la mise en série/parallèle. On remarque que l'association de N_s modules PV en série permet d'augmenter la tension du générateur PV. Ainsi que l'association de N_p modules PV en parallèle permet d'augmenter le courant du générateur PV.



Figures (1.12) : caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.[2]



Figures (1.13) : caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle.[2]



Figures (1.14) : caractéristiques résultantes d'un groupement la mise en série/parallèle.[2]

1.5. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons exposé les notions de base d l'énergie PV. Nous avons présenté le principe de l'effet PV, le générateur PV ainsi les paramètres électriques d'un module PV. Une bonne partie est consacrée à étaler les différents types des systèmes PV ainsi les différentes topologies des systèmes PV connectés aux réseaux électriques.

Chapitre II:

*Techniques de 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.

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.

Dans ce chapitre nous représentons les convertisseurs DC-DC (hacheurs), modélisant aussi les commandes des convertisseurs commande 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 ».

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 [2].

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[13].

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

L'électronique de puissance est encore une technologie émergente et ses applications tendent à se multiplier. Sa fonction principale est de convertir l'énergie électrique à partir d'une étape à une autre. Elle joue un rôle important dans la production d'énergie électrique et

l'intégration des sources d'énergies renouvelables dans le réseau électrique. Par ailleurs l'électronique de puissance est largement utilisée car ses applications deviennent plus intégrées dans les systèmes connectés au réseau électrique, comme les systèmes photovoltaïques (PV).

Au cours des dernières années, l'électronique de puissance a subi une évolution rapide due principalement à deux facteurs. Le premier est le développement rapide des semi-conducteurs et les progrès de la technologie des transistors, qui sont capables de commuter rapidement et de manipuler des puissances élevées. Les thyristors ont été substitués par des MOSFETs et des IGBTs alors que les onduleurs commutés à base de thyristors ont été remplacés par des onduleurs auto commutés à base de transistors MOSFETs et des IGBTs. Les onduleurs auto commutés utilisent, généralement, la commande PWM (Modulation à largeur d'impulsion) et une fréquence de commutation élevée (de 1 kHz à 20 kHz), ce qui permet de générer un signal de sortie pouvant être pratiquement sinusoïdal. Cette conception est robuste, efficace, permettant de garantir une fiabilité élevée [14,15].

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)

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.[2]

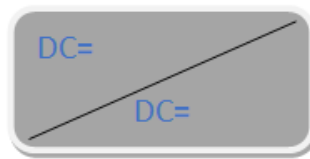


Figure (2.1) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.[2]

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 [16]. La technique découpage apporté 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

carrière de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [16].

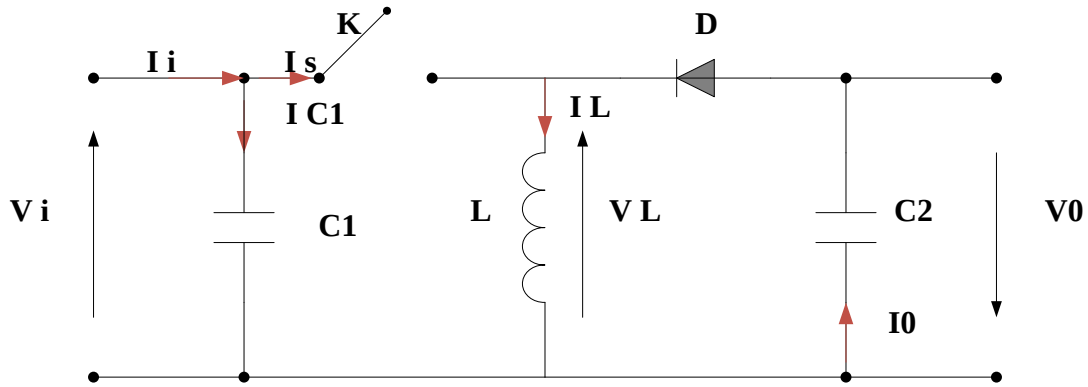


Figure (2.2) : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.[16]

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 [16].

2.2.2. Modélisation du hacheur survolteur :

Le convertisseur survolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur booste ou hacheur parallèle. La figure (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 [16].

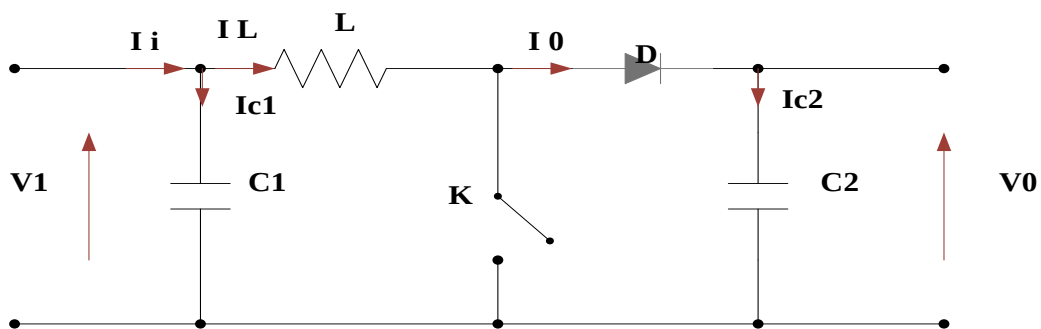


Figure (2.3) : Schéma de principe d'un convertisseur Booste[16]

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 [16] :

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

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. [2]

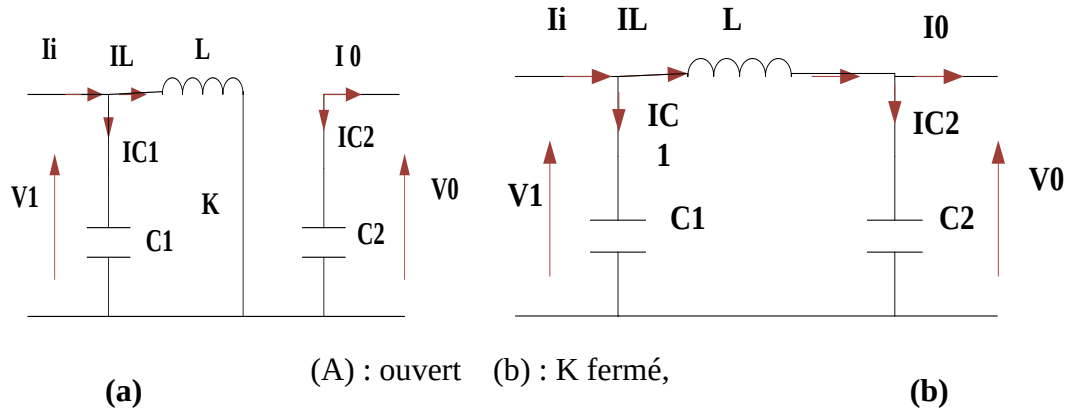


Figure (2.4) : Schémas équivalents du hacheur.[16]

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 [16] :

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

En appliquant la relation (2.4) sur les systèmes d'équations (2.2) et (2.3), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur : [2]

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

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

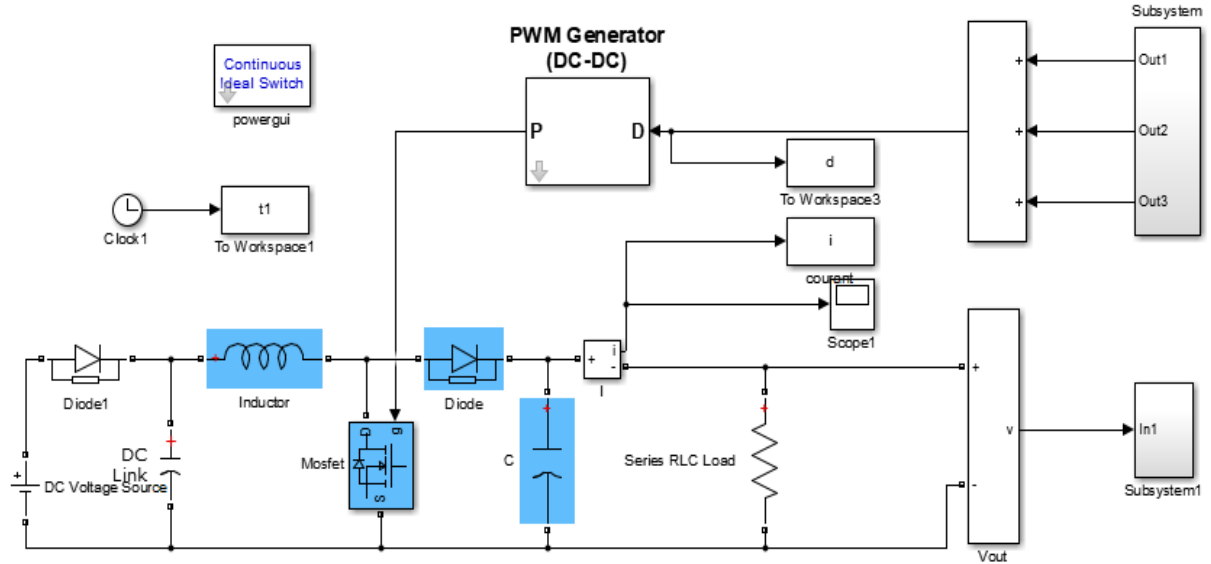


Figure (2.5) : Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC

Les valeurs des paramètres du convertisseur DC-DC: Résistance (R_h) = 1 Ω , Inductance (L_h) = 4 e-4 H, Capacitance (C_h) = 1200 e-6 F, 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

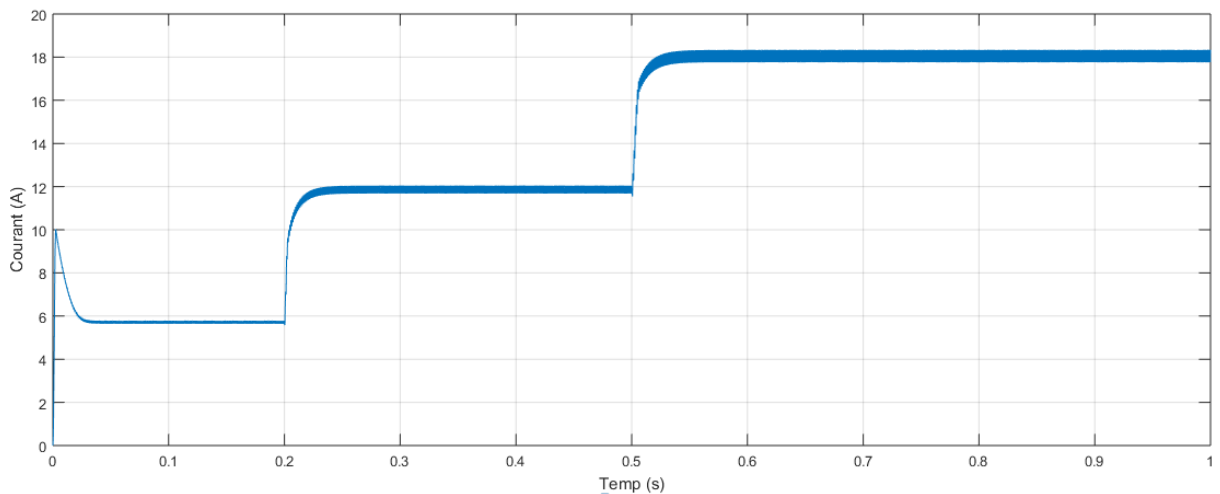


Figure (2.6) : Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC

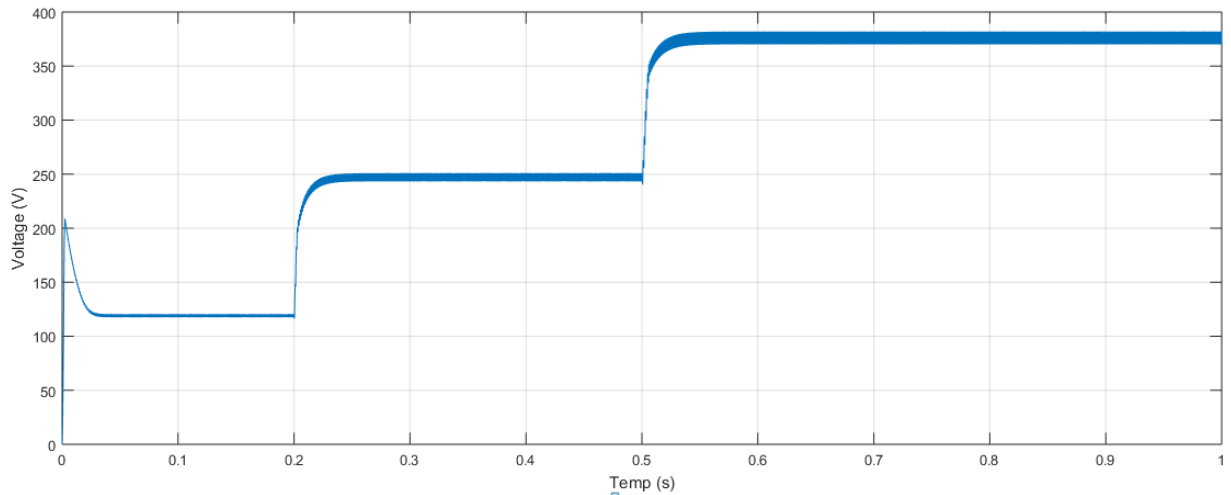


Figure (2.7) : Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC

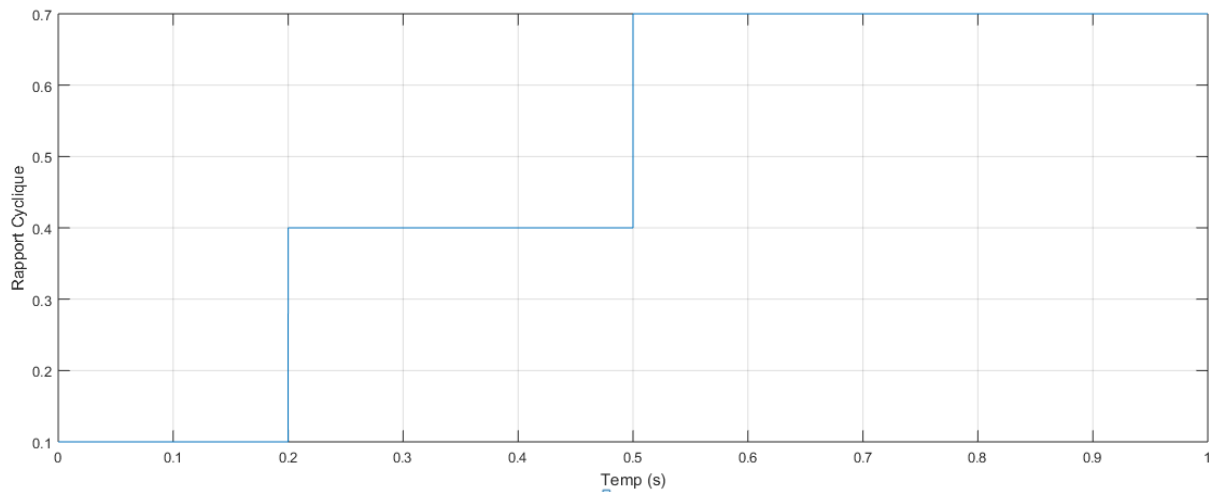


Figure (2.8) : variation du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC

Les figures (2.6 et 2.7) représentent des Résultats expérimentaux de convertisseurs boost 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.

2.3.1 Simulation d'un panneau PV :

- La figure (2.9) illustre le bloc schématique de SIMULINK d'un panneau photovoltaïque pour les effets du changement d'éclairage et des changements de température sur la puissance et le courant donné.

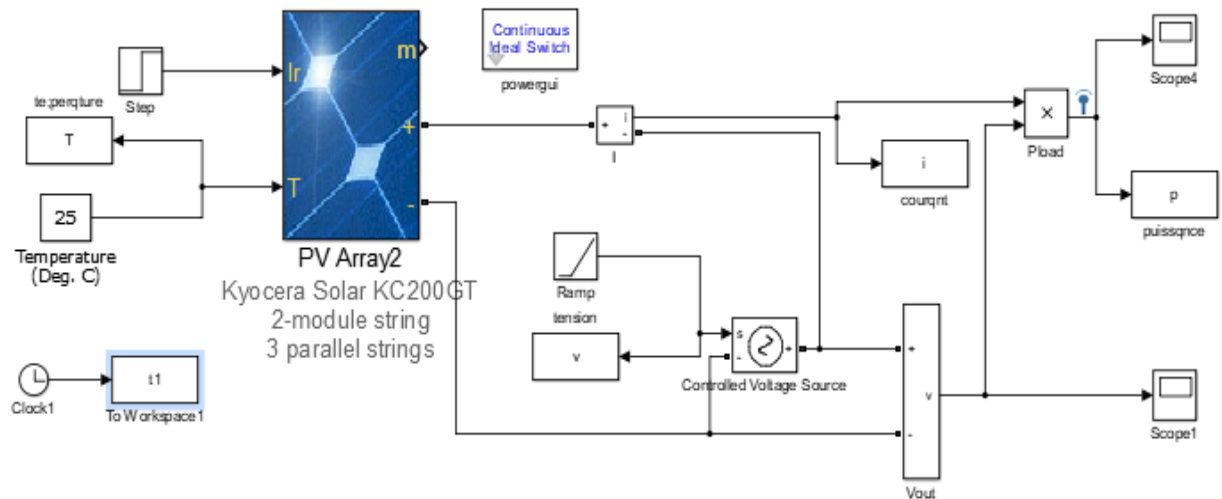


Figure (2.9) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque

Intitulé du paramètre (Désignation)	Grandeur
Résistance série (Sr)	0.0036 Ω
Facteur d'idéalité (n)	1.4099
Courant inverse de saturation (I0)	4.0992 e-7 A
Photo courant (Iph)	8.2100 A

Tableau 2.1: Résultats de calcul des paramètres internes pour KC200GT

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

Tableau 2.2 : Fiche technique de KC200GT aux conditions STC

Les résultats de simulation d'un panneau photovoltaïque représentent par les figures (2.10) à (2.17). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque.

Ces courbes issues de la simulation précédent sont expriment les effets de l'éclairage et de la température sur la quantité de puissance et de courant sortant du panneau solaire .

❖ **1^{ère} cas** Nous avons fixé la température pour différents éclairements :

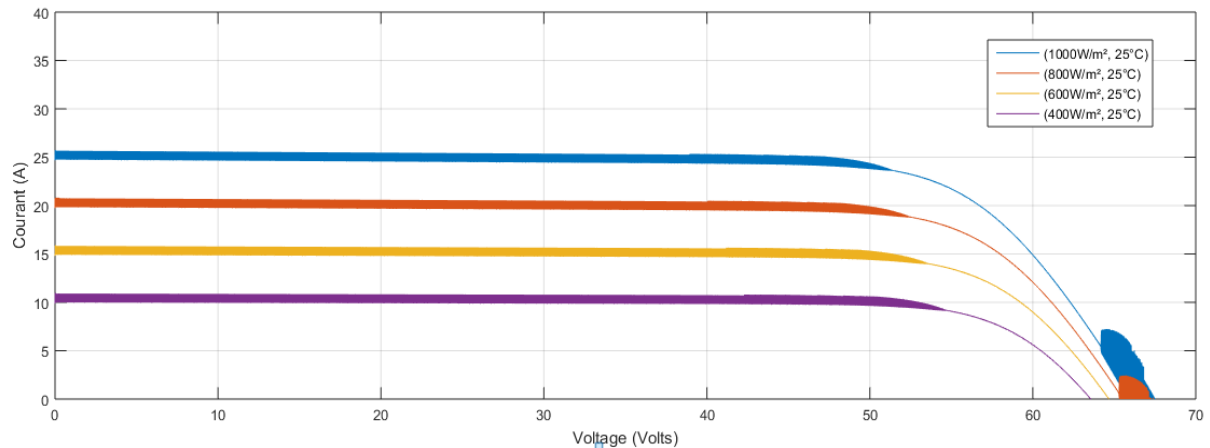


Figure (2.10) : Caractéristiques $I(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements

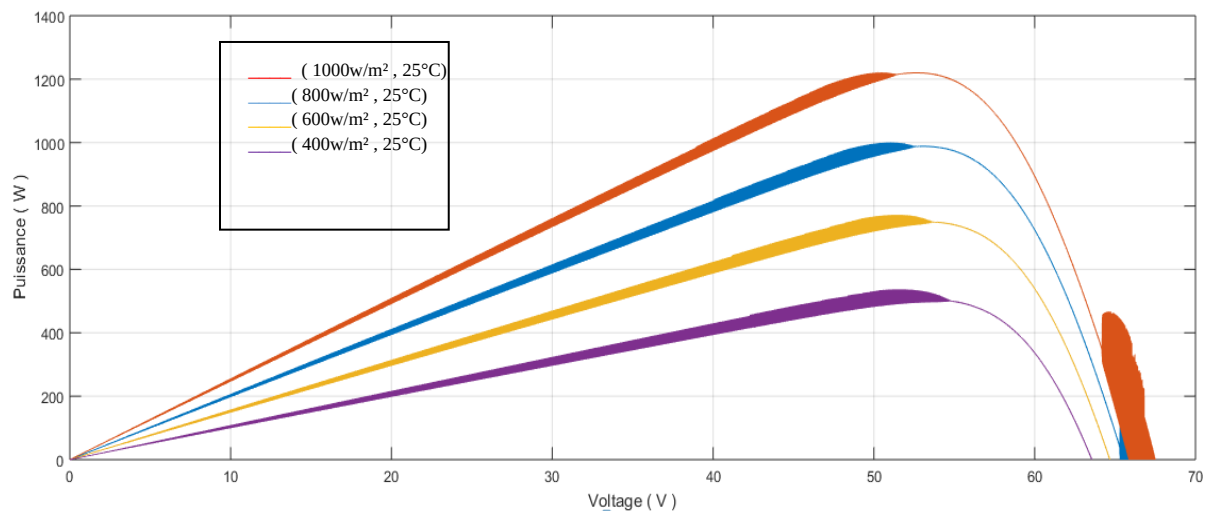


Figure (2.11) : Caractéristiques $P(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements

➤ **Commentaire :**

Pour la figure (2.10) on remarque que pour l'éclairement $E=1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc}=25\text{A}$ et pour $E=800\text{w/m}^2$ le courant $I_{sc}=20\text{A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante quand l'éclairement augmente le courant augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

Pour la figure (2.11) on remarque que pour l'éclairement $E=1000 \text{ w/m}^2$ la puissance $P=1224.8\text{W}$ et pour $E=800\text{w/m}^2$ la puissance $P=1000\text{W}$ on peut voir que la puissance subit

Une variation Importante, quand l'éclairement augmente la puissance augmente, mais par contre la tension varie légèrement. [17]

❖ **2^{ème} Cas On va fixer l'éclairement et varié dans la température :**

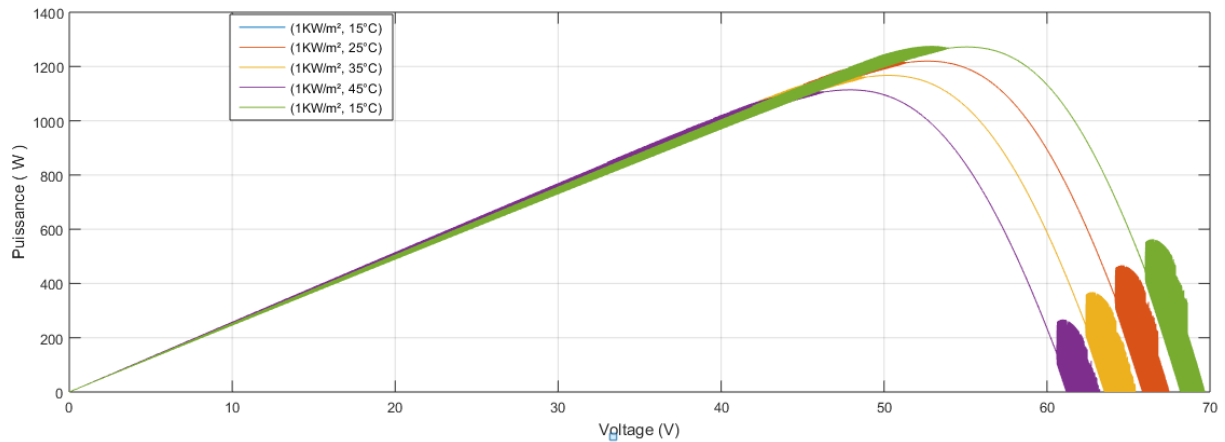


Figure (2.12) : Caractéristiques $P(V)$ d'un panneau solaire pour différents températures

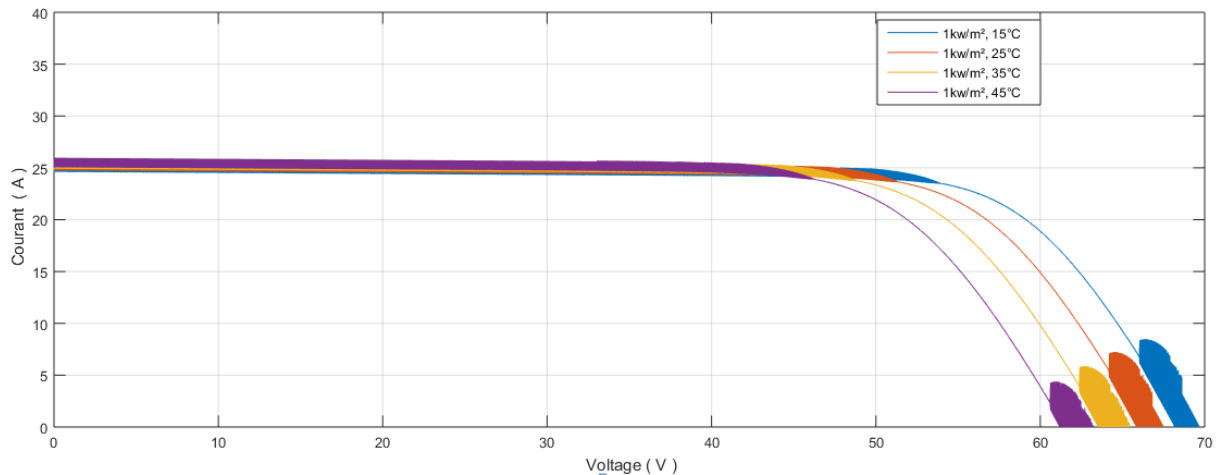


Figure (2.13) : Caractéristiques $I(V)$ d'un panneau solaire pour différents températures

➤ **Commentaire :**

Pour les figures (2.12) et (2.13) nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente. [17]

❖ **3^{ème} Cas on va fixer la température et varié dans l'éclairage chaque 0.2 seconde:**

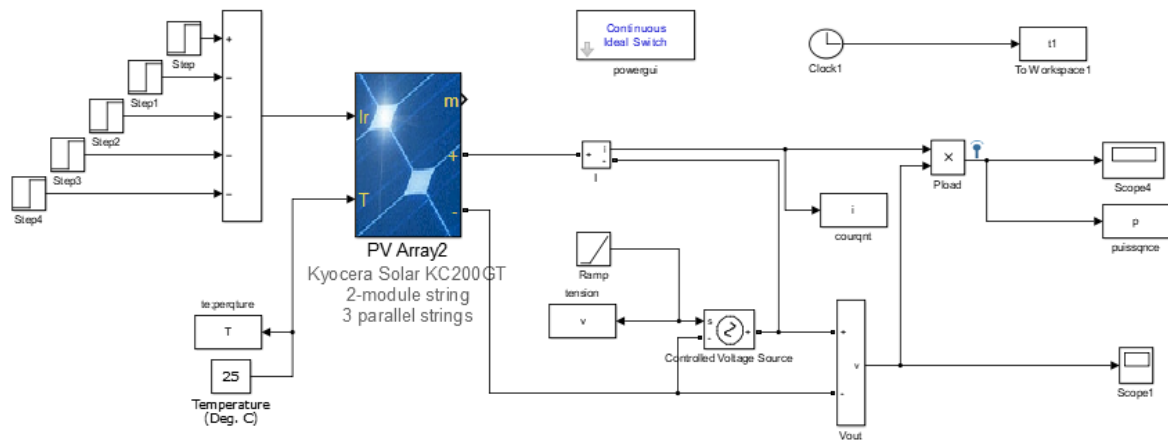


Figure (2.14) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque

- **Eclairement (1000W/m^2) et température (25C°)** $0 < t < 0.2$ seconde
- **Eclairement (800W/m^2) et température (25C°)** $0.2 < t < 0.4$ seconde
- **Eclairement (600W/m^2) et température (25C°)** $0.4 < t < 0.6$ seconde
- **Eclairement (400W/m^2) et température (25C°)** $0.6 < t < 0.8$ seconde
- **Eclairement (200W/m^2) et température (25C°)** $0.8 < t < 1$ seconde

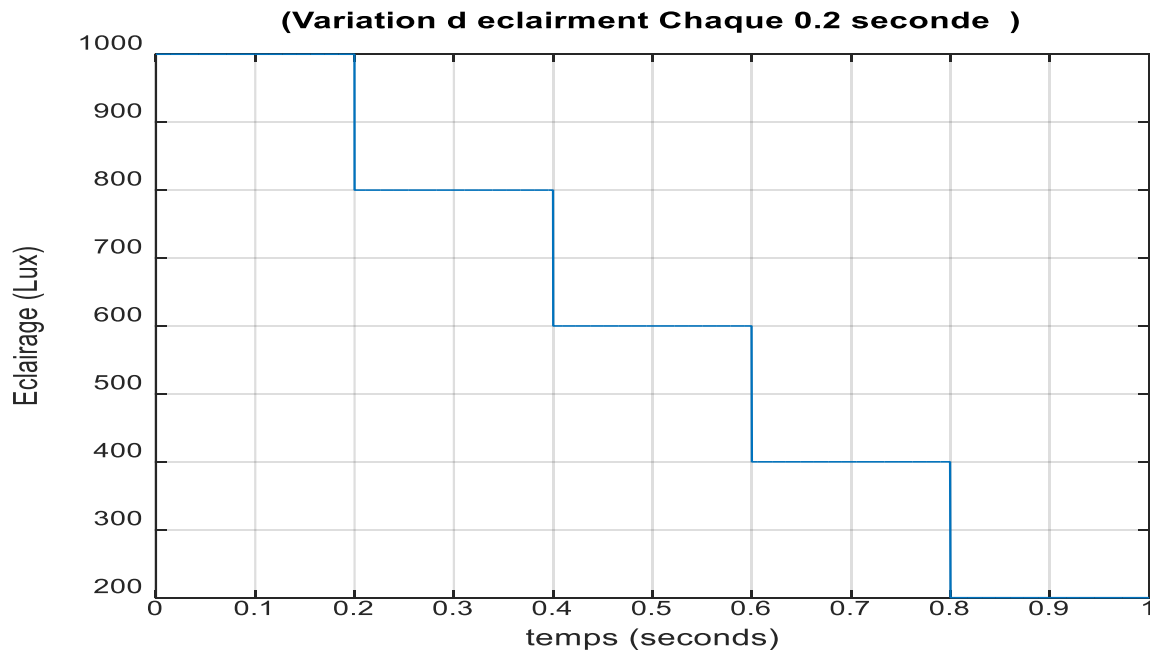


Figure (2.15) : Caractéristiques $E(t)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements

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 ($T=25\text{C}^\circ$, $E=1000, 800, 600, 400, 200 \text{ W/m}^2$)

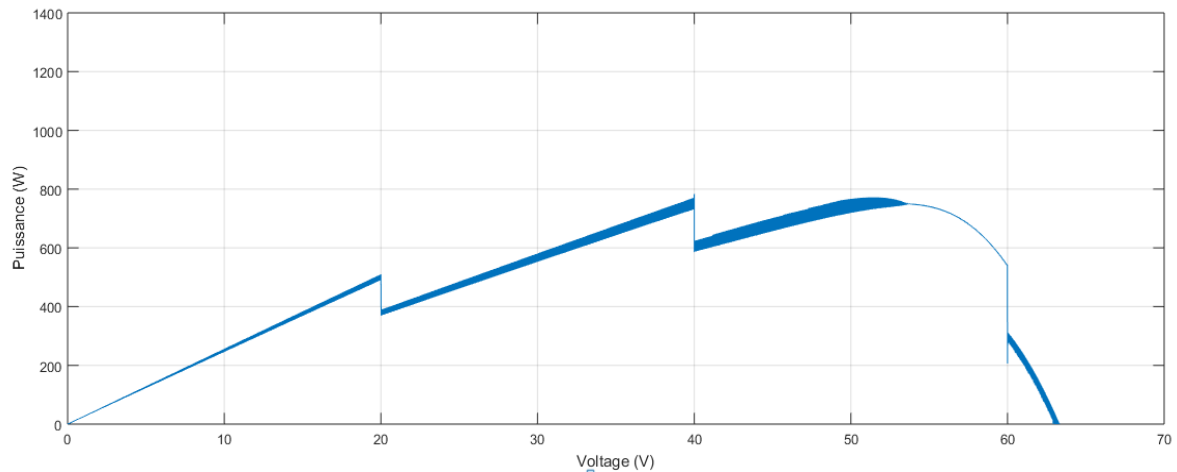


Figure (2.16) : Caractéristiques $P(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements

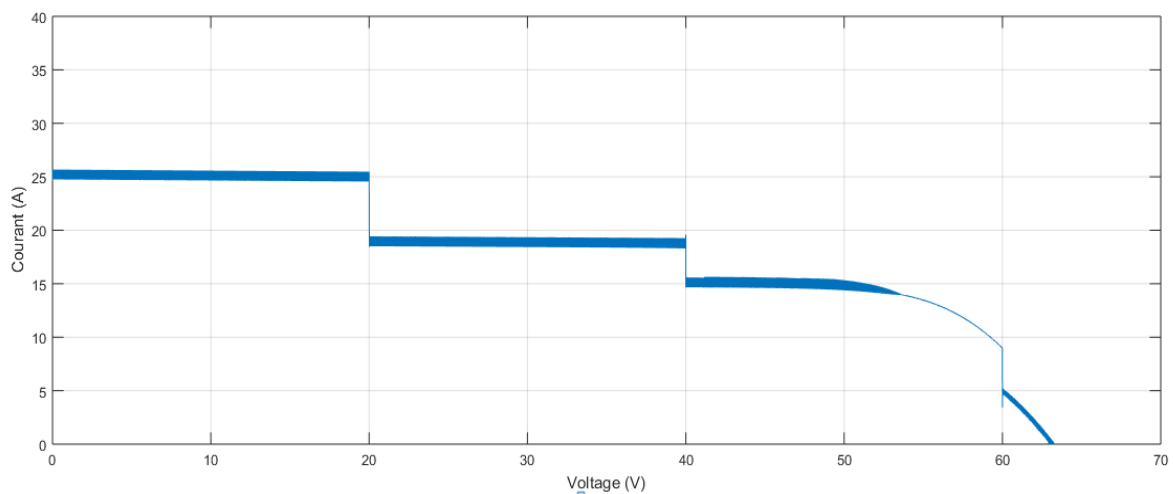


Figure (2.17) : Caractéristiques $I(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclairements

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 correspond 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. [18]

2.4.2. Différents types de commandes MPPT :

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). [18]

2.4.3. Premières commandes MPPT [18] :

En Janvier 1968, A.F. Boehringer 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 [18] :

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

- **Principe des commandes « *Perturb and Observe* » (P&O) [18] :**

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. [18]

- **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 :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.1) \quad , \quad dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.2)$$

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. [20]

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. [18]

2.4.6. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue [18] :

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 [18] :

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. [21]

2.5.1 PI Control (intégrale proportionnelle) [21]:

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 [21] :

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.

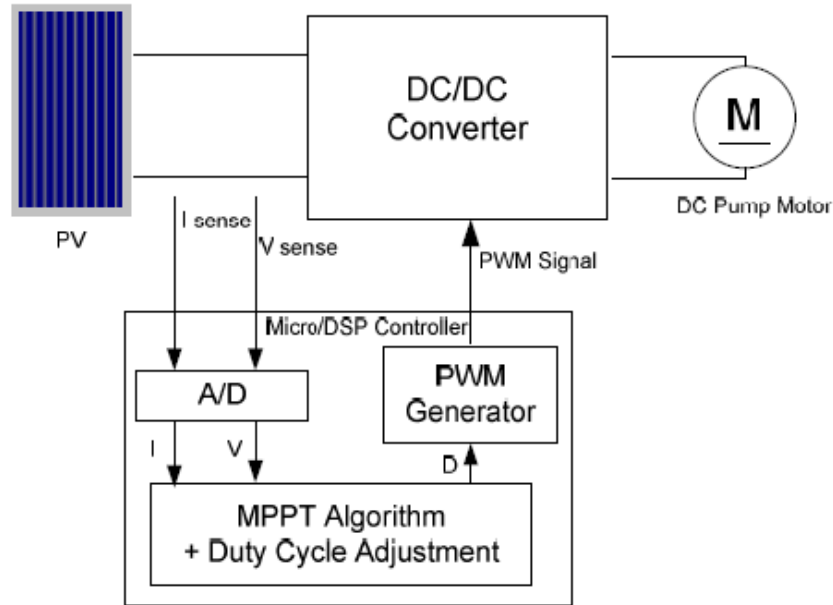


Figure (2.18) : Schéma de principe du MPPT avec la commande directe[21]

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 ~ 50 msec 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 le 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.

2.5.4 Contrôle direct de détection de sortie [21] :

Cette méthode est une variante de la commande directe susmentionnée et présente l'avantage de ne nécessiter que deux capteurs pour la tension et le courant de sortie. Les deux mentionnés ci-dessus les méthodes utilisent la détection d'entrée qui permet un contrôle précis du point de fonctionnement du module. Dans en plus avec des capteurs d'entrée, cependant, ils nécessitent généralement un autre ensemble de capteurs pour le sortie pour détecter la condition de surtension et de surintensité de la charge. L'exigence de quatre les capteurs rendent souvent difficile la prise en compte des systèmes à faible coût.

Cette méthode de détection de sortie mesure le changement de puissance de PV du côté sortie de convertisseur et utilise le rapport cyclique comme variable de contrôle. La simulation **MATLAB** suivante illustre la relation entre la puissance de sortie du convertisseur et son cycle de service. Dans la simulation, le module PV BP SX 150S est couplé au convertisseur Cúk idéal (sans perte) avec une charge résistive (6 Ohms). Le cycle de service du convertisseur est balayé de 0 à 1 avec un pas de 1%, et le la puissance de sortie du convertisseur est représentée sur la figure (2.19).

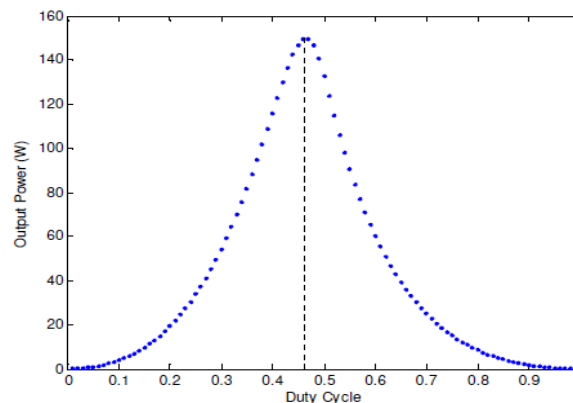


Figure (2.19) : Puissance de sortie du convertisseur Cúk par rapport à son rapport cyclique ($1\text{KW} / \text{m}^2$, 25°C).[21]

Comme la montre la figure, il y a un pic de puissance de sortie lorsque le rapport cyclique du convertisseur est varié. Cette méthode de contrôle utilise l'algorithme P&O pour localiser le MPP. La figure (2.19) montre l'organigramme de l'algorithme. Afin d'adapter le cycle de

service en tant que variable de contrôle, l'algorithme P&O utilisé ici est une version légèrement modifiée de celle précédemment introduit, mais l'idée de son fonctionnement est la même. L'algorithme perturbe le cycle de service et mesure la puissance de sortie du convertisseur. Si la puissance est augmentée, le devoir le cycle est encore perturbé dans le même sens ; sinon la direction sera inversée. Lorsque la puissance de sortie du convertisseur est atteinte au pic, un module PV ou un générateur est supposé d'opérer au MPP.

Même si cela fonctionne parfaitement dans la simulation avec le convertisseur idéal, il y a une certaine incertitude sur le pic de puissance de sortie qui correspond au MPP en pratique avec convertisseurs non idéaux. De plus, cette méthode de contrôle ne fonctionne qu'avec l'algorithme P&O et ses variations, et cela ne fonctionne pas avec l'algorithme IncCond.

2.6 Commande MPPT par la méthode P&O [21] :

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.

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 stables. 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.

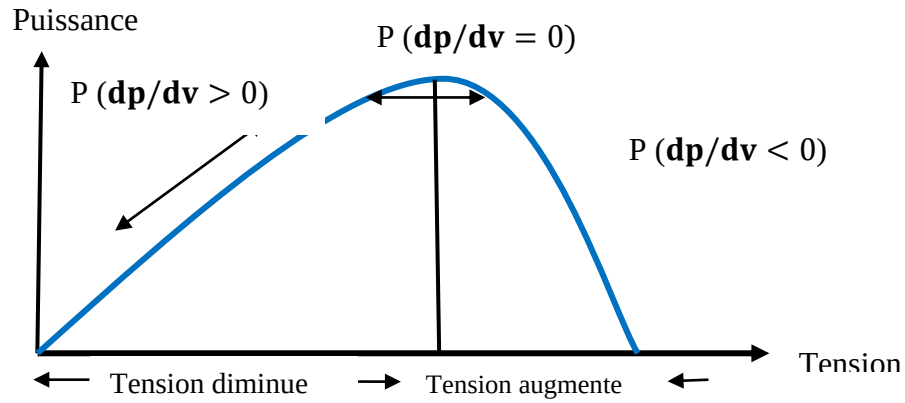


Figure (2.20) : Principe de la commande P&O.[21]

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

- D : rapport cyclique

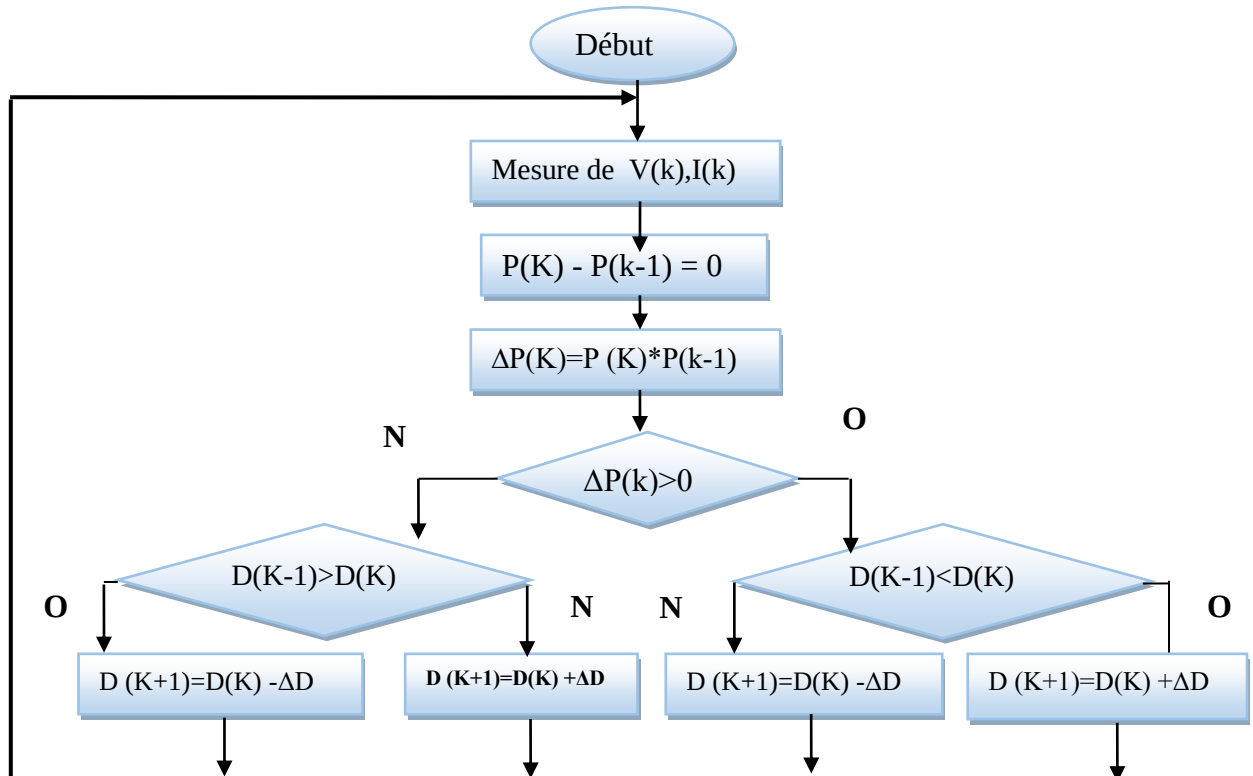


Figure (2.21) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).[21]

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 simulink.

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. [22]

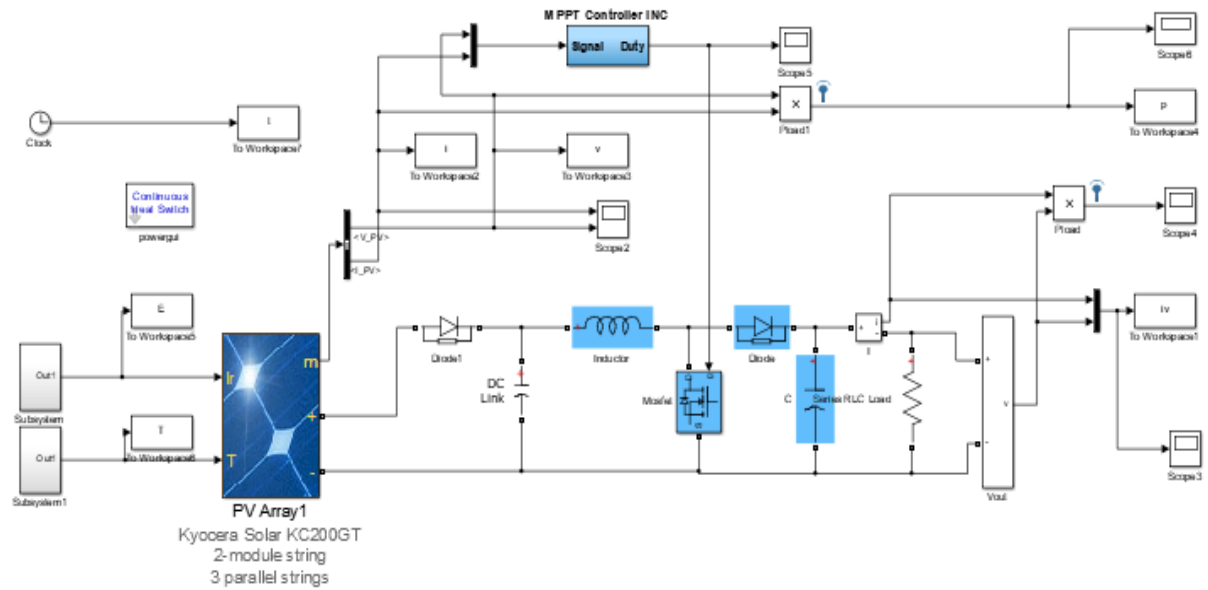


Figure (2.22) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par P&O

- Les caractéristiques utilisées pour le module PV sont données par le Tableau II.2 :

Nombre de cellule en série par panneau (N_s)	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 (N_{ps})	2
Nombre de panneau en parallèle (N_{pp})	3

Tableau 2.3 :Fiche technique de KC200GT aux conditions STC

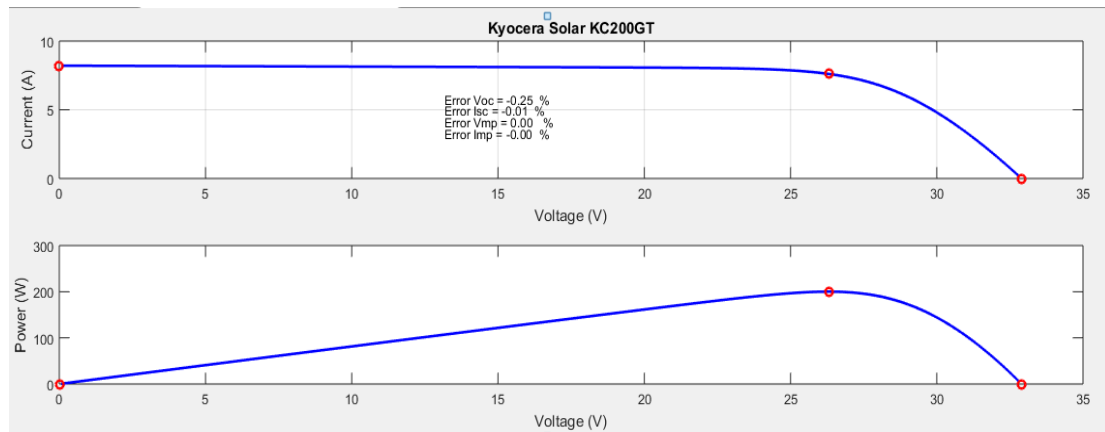


Figure (2.23) : Caractéristiques $i(v)$, $p(v)$ d'un panneau solaire KC200GT

➤ **Commentaire :**

La figure suivante présente allure de puissance en fonction de tension d'un système photovoltaïque (panneau 200w) commandé par un contrôleur P&O dans une température et éclairements constantes ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$) :

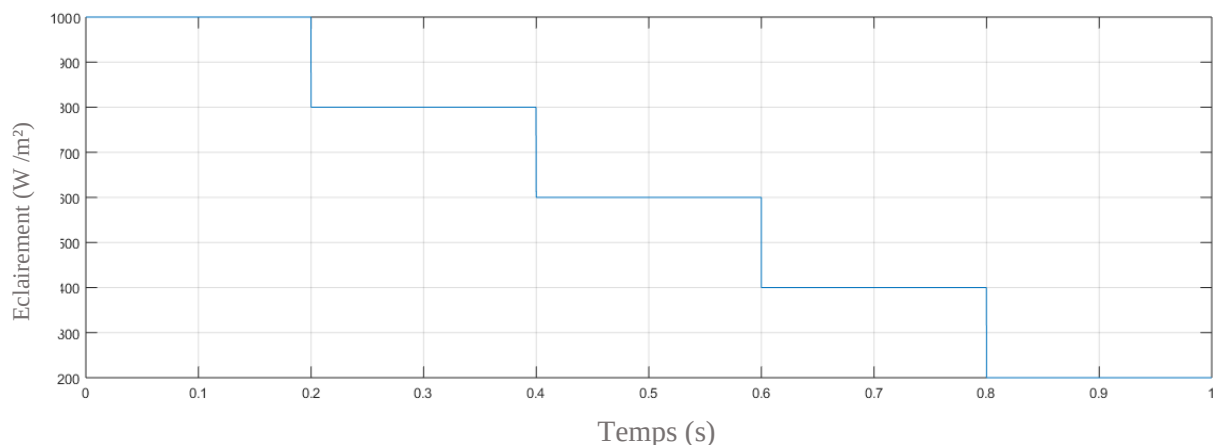


Figure (2.24) : Caractéristiques $E(t)$ d'un panneau solaire pour un éclairement variable (Varié chaque 0.2 seconds)

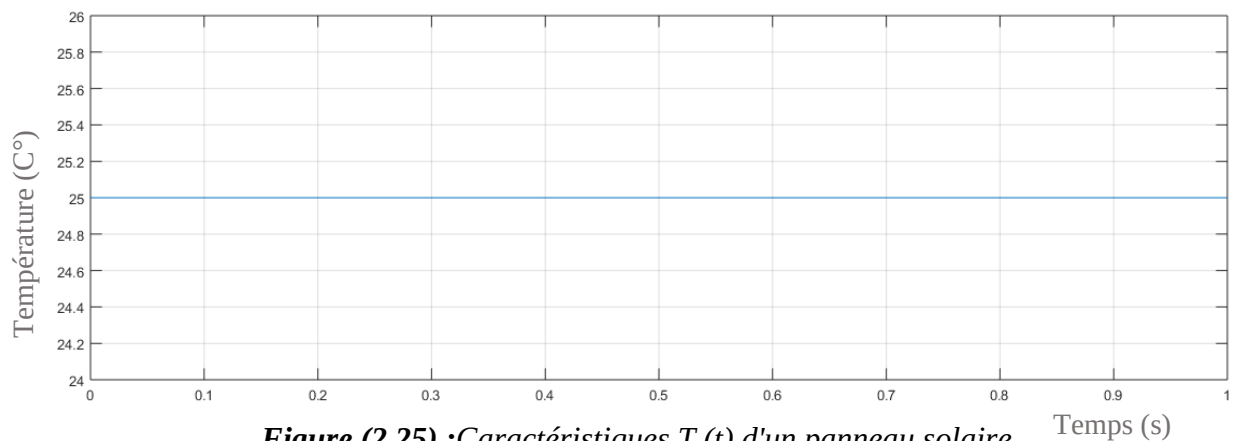


Figure (2.25) : Caractéristiques $T(t)$ d'un panneau solaire

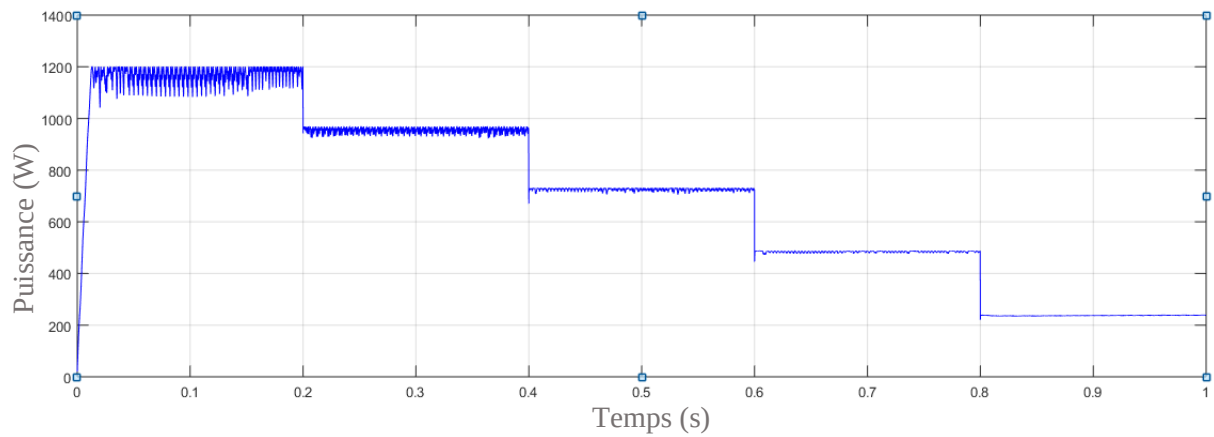


Figure (2.26) : Caractéristiques $P(t)$ d'un système PV pour un éclairement variable

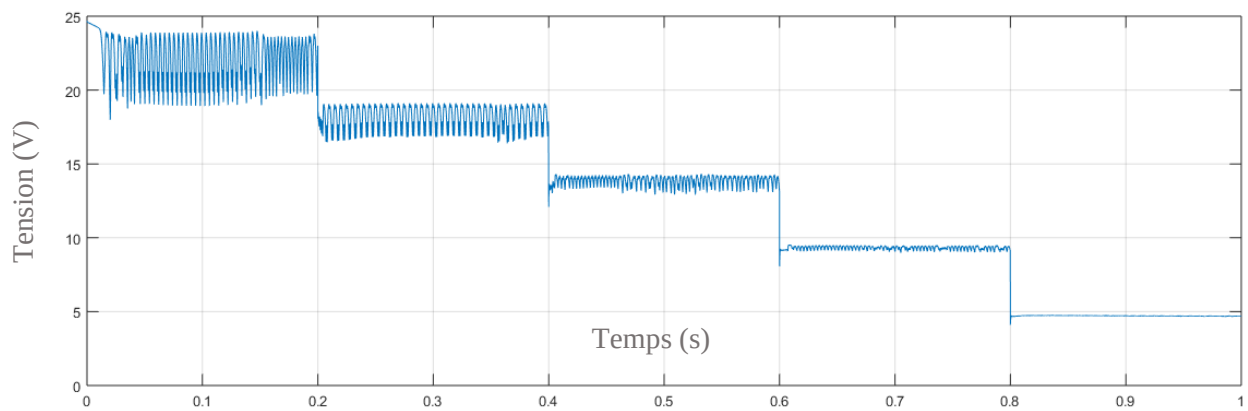


Figure (2.27) : Caractéristiques $i(t)$ d'un système PV pour un éclairement variable

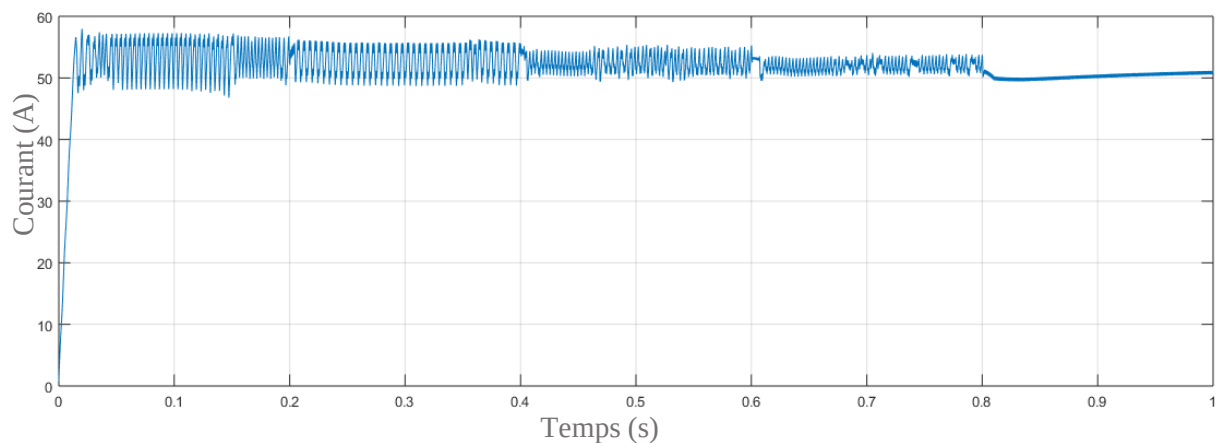


Figure (2.28) : Caractéristiques $v(t)$ d'un système PV pour un éclairement variable

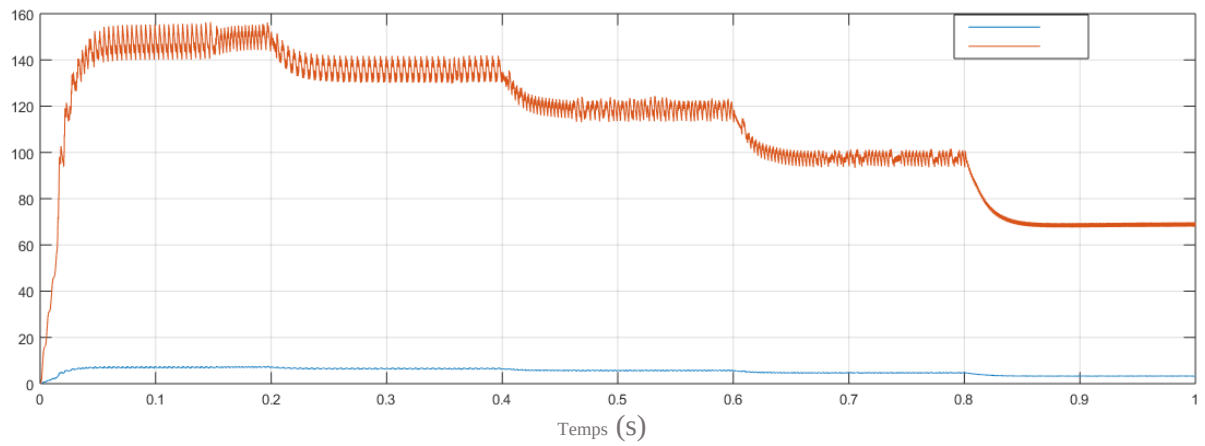


Figure (2.29) : Caractéristiques $i_v(t)$ d'un système PV pour un éclairement variable

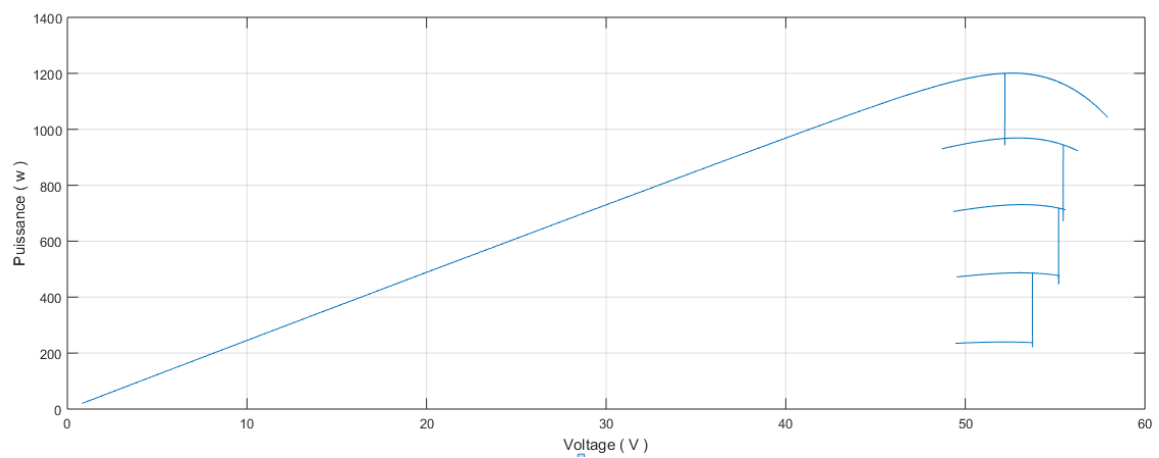


Figure (2.30) : Caractéristiques $p(v)$ d'un système PV pour un éclairement variable

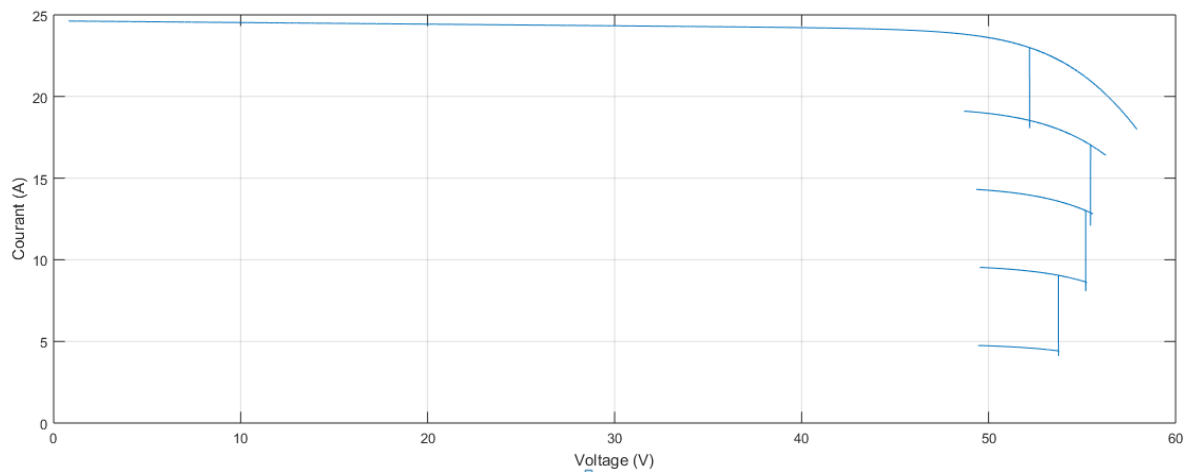


Figure (2.31) : Caractéristiques $i(v)$ d'un système PV pour un éclairement variable

➤ **Comment sur les figures:**

- ✓ La figure (2.26) présente allure de puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur P&O dans une température et éclairements constantes ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W/m}^2$) :

De la figure (2.26) , 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 (2.26), (2,28) présentent allure de puissance et la tension en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairements ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=200,400, 600, 800,1000\text{W/m}^2$) :

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 fixe $T=25^{\circ}\text{C}$. Par conséquent, nous constatons dans les figures (2.26, 2.28), une augmentation de la tension qui induit une diminution de la puissance, le point de fonctionnement du système s'éloigne du MPP, après 0.01s. La commande remonte le Point de fonctionnement est le stabilise au tour du MPP avec une certaine oscillation Qui est causée par l'algorithme de commande. [17].

- ✓ Les figures (2.30), (2.31) présente allure de puissance et le courant en fonction de la tension d'un système photovoltaïque (panneau 200w) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différents éclairements ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000, 800, 600, 400, 200\text{W/m}^2$) .

D'après les figures obtenues on remarque que la puissance réagit en fonction de l'éclairement et ce fixe toujours à la puissance maximale et la pour la courbe de courant.

2.7. Conclusion :

Pour avoir le meilleur transfert de puissance entre le générateur photovoltaïque 'GPV' et la charge, nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de conversion sous Matlab Simulink et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) a été conçu puis simulé. Il force le générateur GPV à travailler à son point de puissance maximale (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique, bien que satisfaisante par rapport à une connexion directe du générateur photovoltaïque.

Chapitre III:

*Commande MPPT 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. [24]

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.[23]

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) [24].

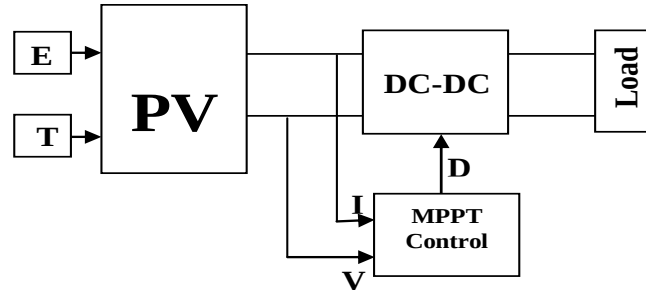


Figure (3.1) : Système photovoltaïque de structure de base.[24]

3.3 La détermination de la loi de commande [23] :

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.

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 :

$$u = u_{eq} + k \cdot \text{sign}(S) \quad (4.1)$$

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 :

$$u = D(t+1) \quad , \quad u_{eq} = D(t) \quad (4.2)$$

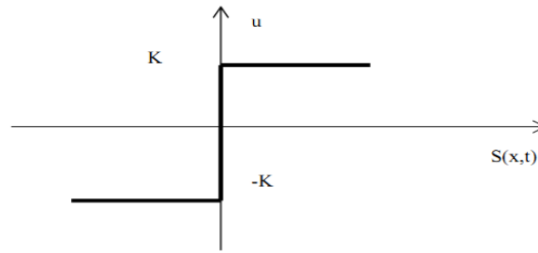
Avec $D(t)$ est le rapport cyclique un temps t et $D(t+1)$ est le rapport cyclique à un temps $t+1$.

- 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 :

$$S = P(k+1) - P(k) \quad (4.3)$$

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) [28].

$$\text{sign}(S) = \begin{cases} 1 & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$



Figure(3.2) : Représentation de la commande discontinue.[28]

Actuellement, de nombreuses solutions ont été développées afin d'éliminer ou au moins réduire ce phénomène par remplacer la fonction sgn (s) par la fonction de saturation représentée par la **figure 3.3**

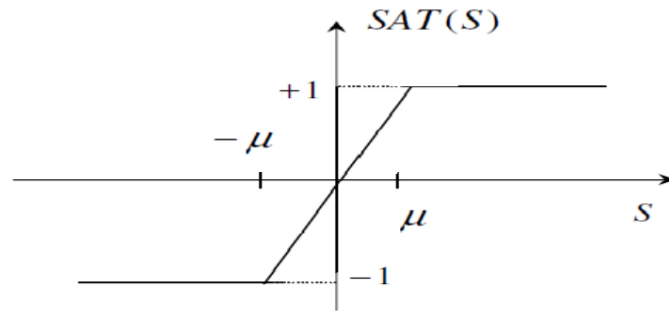


Figure (3.3) : fonction de saturation.[28]

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\mu}\right) = \begin{cases} \frac{s}{\mu} & \text{si } |s| \leq \mu \\ \text{sgn}(s) & \text{si } |s| > \mu \end{cases} \quad (4.5)$$

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.[23]

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. [28]

3.4 Système à structure variable [23] :

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant [25]. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est conduite vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est forcée à rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit est appelé mouvement de glissement [25]. La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [26] :

- Le mode de convergence -MC- : C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $s(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode de glissement -MG- : C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $s(x, y) = 0$.
- Le mode du régime permanent -MRP- : Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

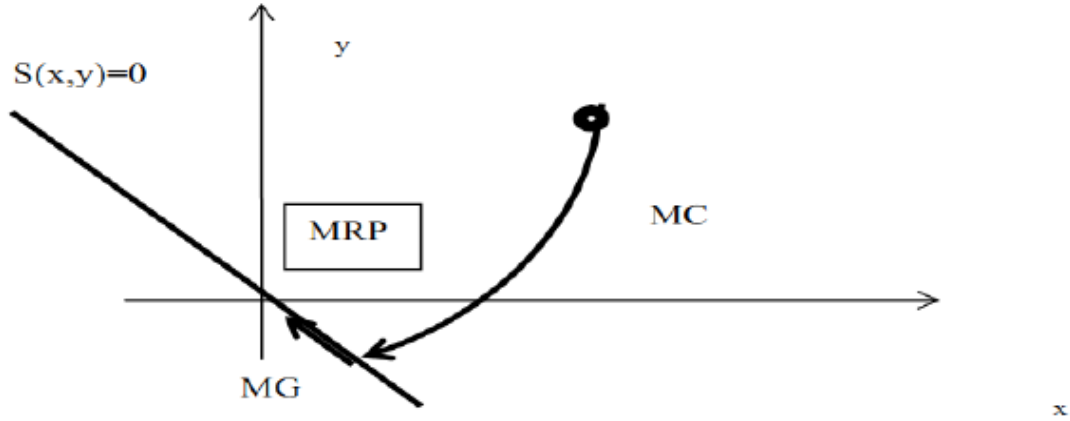


Figure (3.4) : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.[23]

3.5 Conception de la commande par mode glissant [23] :

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples : la haute précision, la simplicité, l'invariance, la robustesse, etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour les systèmes ayant un modèle imprécis [26]. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et des Perturbations sur le modèle. [25]

3.6 Amélioration de la commande SMC [27] :

Le principal inconvénient de la commande par mode glissant (SMC) est la fréquence de commutation élevée (chattering) [28-29]. Pour remédier à ce phénomène la commande doit s'adapter aux variations des paramètres ou des perturbations externes. Cependant, on propose une commande par mode glissant floue (FSMC) pour pallier efficacement au phénomène de (chattering) [30-31]

3.7 Commande par mode glissant-floue [27] :

L'élimination du phénomène de chattering est effectuée en lissant la de commande discontinuité dans une couche limite mince à proximité de la surface de glissement [32]. En fait, la fonction signe est remplacée par fonction sat comme suit.

$$\text{sat}\left(\frac{s(t)}{\varphi}\right) = \begin{cases} \text{sgn}(s(t)) & \text{Si } S(t) > 0 \\ \frac{s(t)}{\varphi} & \text{Si } S(t) < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Où, φ est l'épaisseur de la couche limite.

La fonction sat est à son tour remplacée par un système flou qui agit comme fonction de saturation avec une pente non linéaire à l'intérieur de la couche limite mince.

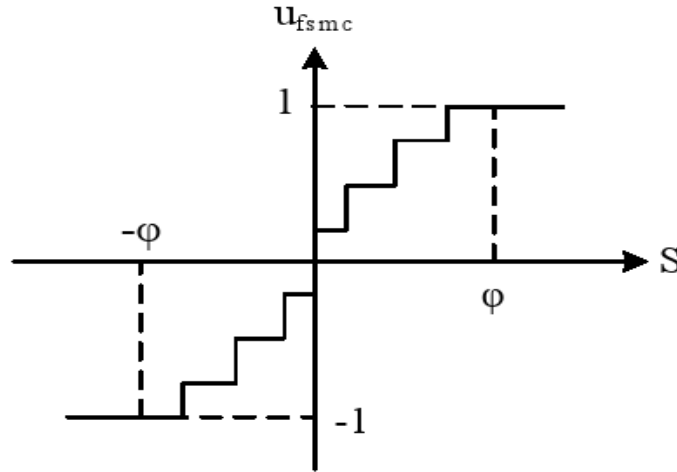


Figure (3.5) : Structure du système flou.[27]

La commande FSMC a deux signaux : $S(t)$ et sa dérivée $\Delta S(t)$ comme variables d'entrées et U_{fsmc} en tant que variable de sortie. La méthode de défuzzification utilisée est basée sur la méthode du centre de gravité. Les règles floues et la méthode d'inférence Mamdani floue sont conçus pour avoir une réponse appropriée, l'éliminer le phénomène de chattering, et de satisfaire la condition de stabilité (tableau IV.1).

E/CE	Négative	Zéro	Positive
Négative	Négative	Négative	Zéro
Zéro	Négative	Zéro	Positive
Positive	Zéro	Positive	Positive

Tableau 3.1:Règles de FSMC

3.8 Résultat de simulation :

Les valeurs des paramètres du convertisseur DC-DC :

- Résistance (R_h) = 1 Ω , Inductance (L_h) = 4 e-4 H , Capacitance (C_h) = 1200 e-6 F
- 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 .

Nombre de cellule en série par panneau (N_s)	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 (N_{ps})	2
Nombre de panneau en parallèle (N_{pp})	3

Tableau 3.2 : Fiche technique de KC200GT aux conditions STC

Intitulé du paramètre (Désignation)	Grandeur
Résistance série (R_s)	0.0036 Ω
Facteur d'idéalité (n)	1.4099
Courant inverse de saturation (I_0)	4.0992 e-7 A
Photo courant (I_{ph})	8.2100 A

Tableau 3.1 : Résultats de calcul des paramètres internes pour KC200GT

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, fig 3.8.

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.

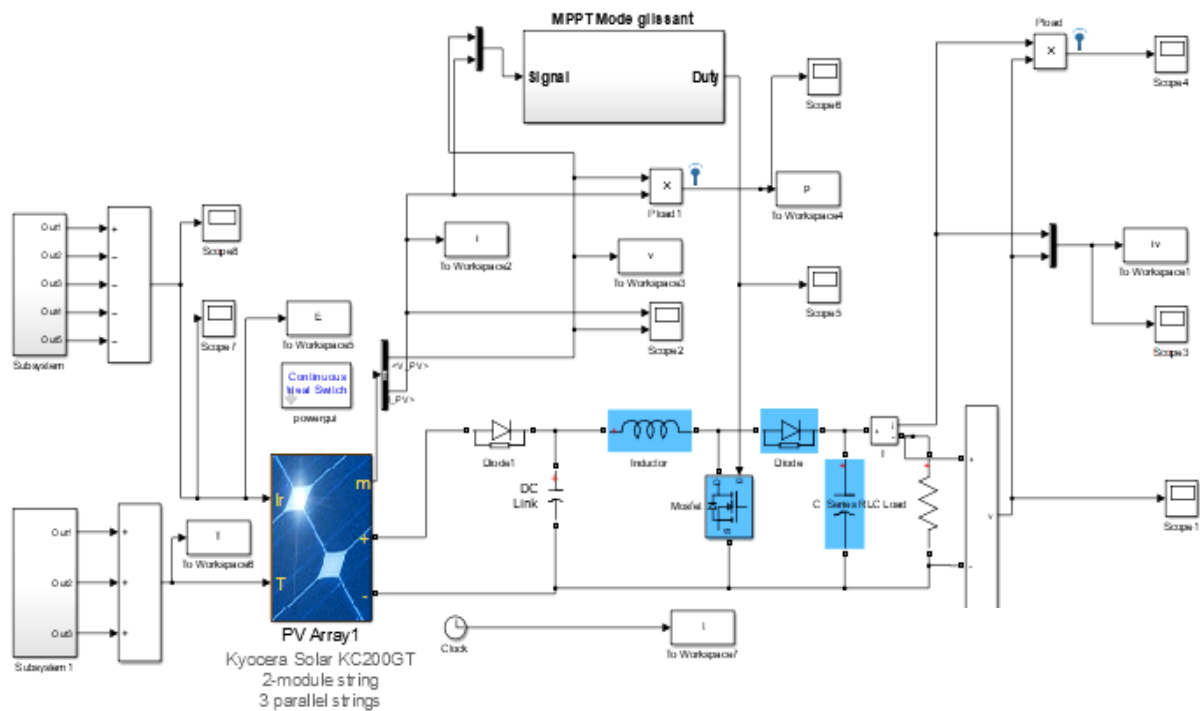


Figure (3.6) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par mode glissant (changement d'éclairage et température automatique)

- Eclairement (1000W/m²) 0 < t < 0.2 seconde
- Eclairement (800W/m²) 0.2 < t < 0.4 seconde
- Eclairement (600W/m²) 0.4 < t < 0.6 seconde
- Eclairement (400W/m²) 0.6 < t < 0.8 seconde
- Eclairement (200W/m²) 0.8 < t < 1 seconde
- Température (25C°) 0 < t < 0.2 seconde

- Température (35C°) $0.2 < t < 0.5$ seconde
- Température (45C°) $0.5 < t < 1$ second

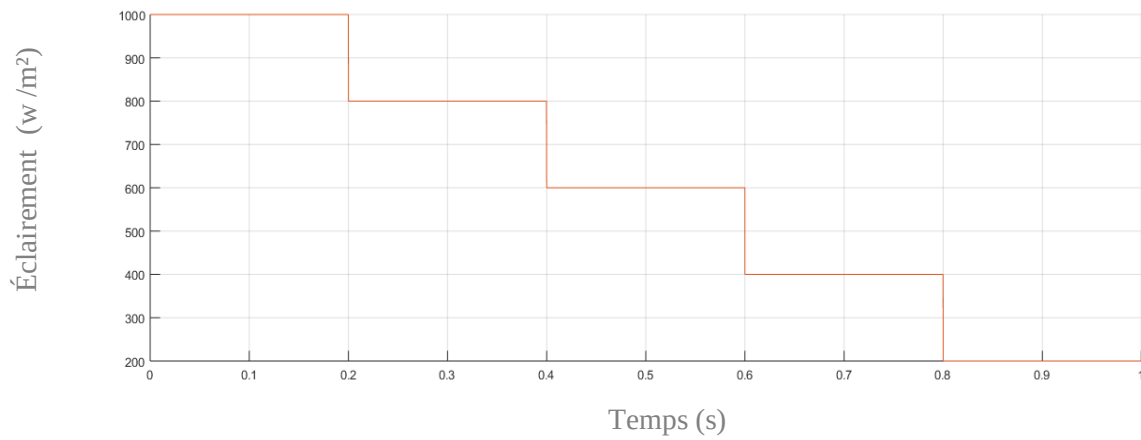


Figure (3.7) : Variation de l'éclairement E

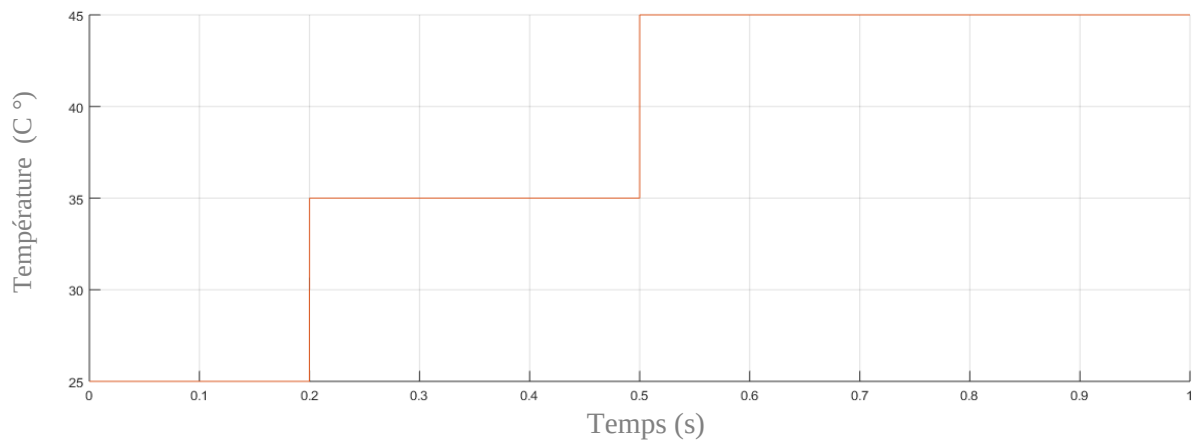


Figure (3.8) : Variation de la température

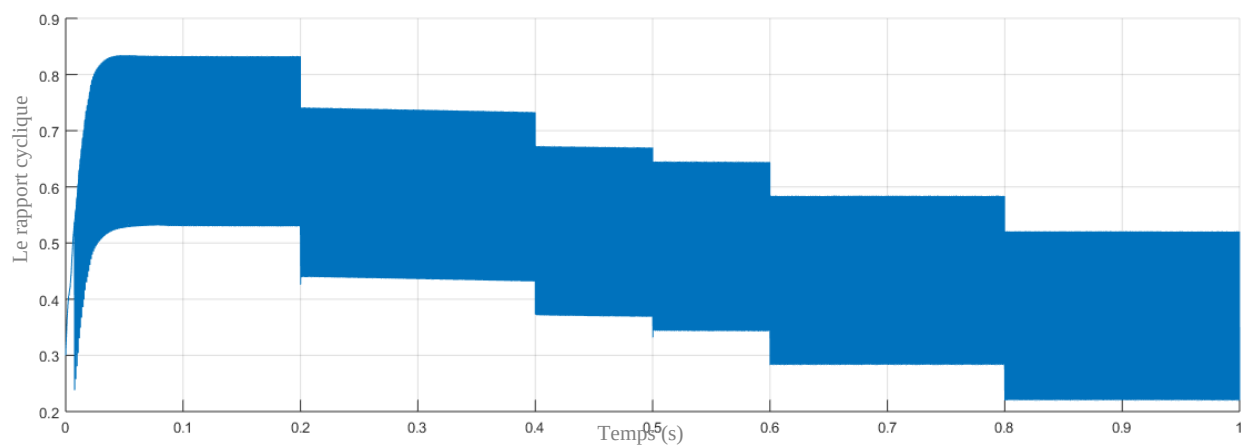


Figure (3.9) : Le rapport cyclique de sortie du panneau PV

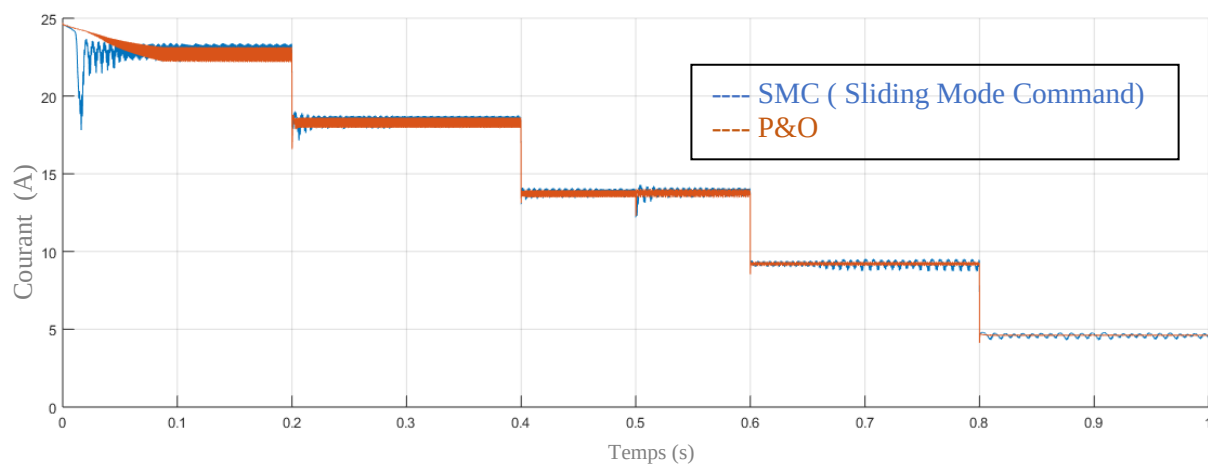


Figure (3.10) : Le courant de la sortie du générateur photovoltaïque

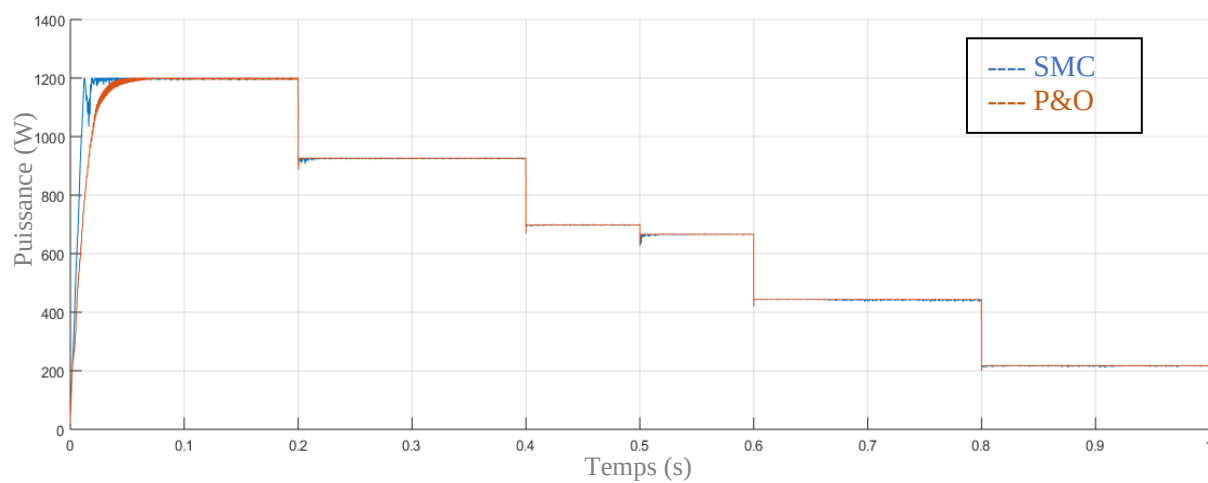


Figure (3.11) : La puissance de la sortie du panneau photovoltaïque

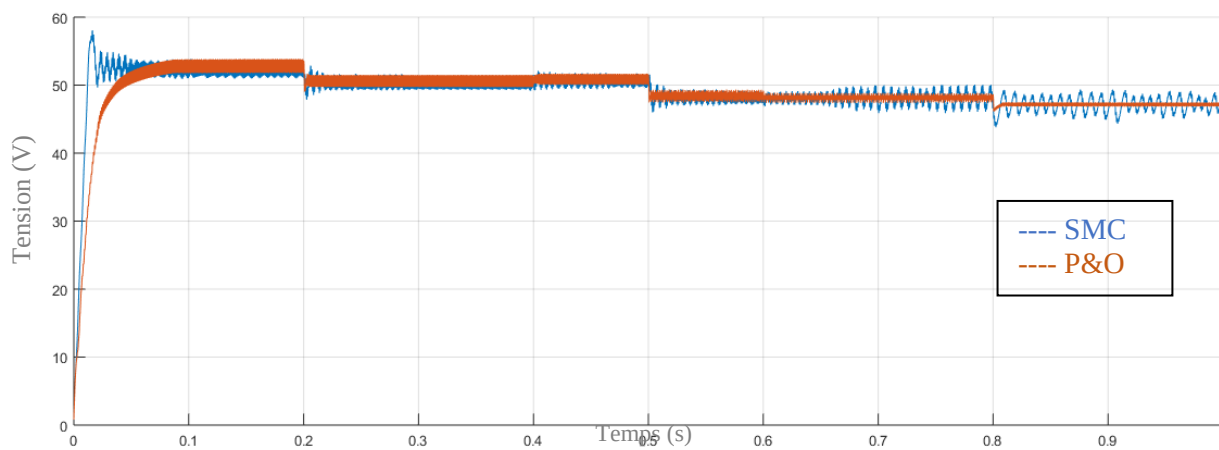


Figure (3.12) : la tension de sortie du panneau photovoltaïque

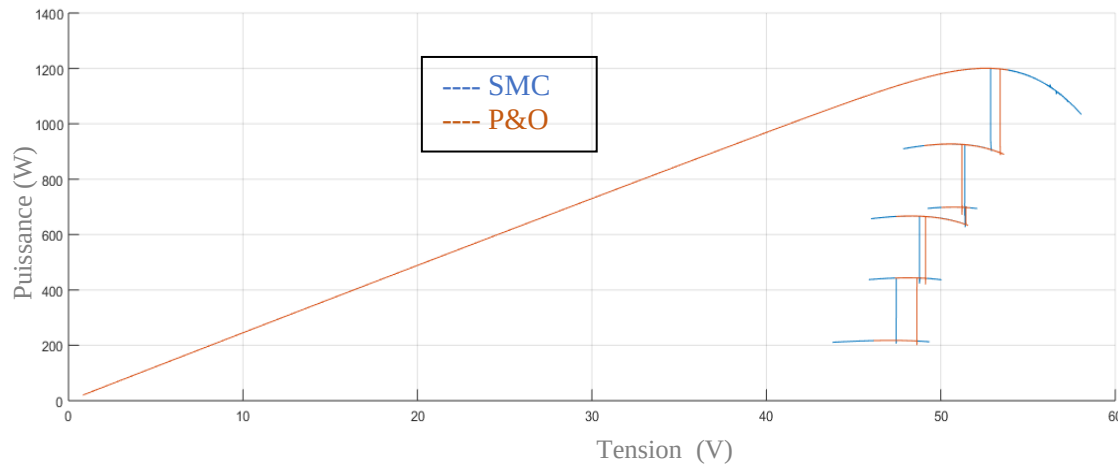


Figure (3.13) : Le fonctionnement dynamique MPPT pour un changement T et E

➤ **Commentaire :**

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 (3.9 à 3.13), les résultats de la simulation obtenue pour le système basé sur MPPT avec le contrôleur de mode de 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 (3.11), la puissance de sortie moyenne du générateur photovoltaïque indique des valeurs de puissance maximale.

La figure (3.13) 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.

3.9 Conclusion :

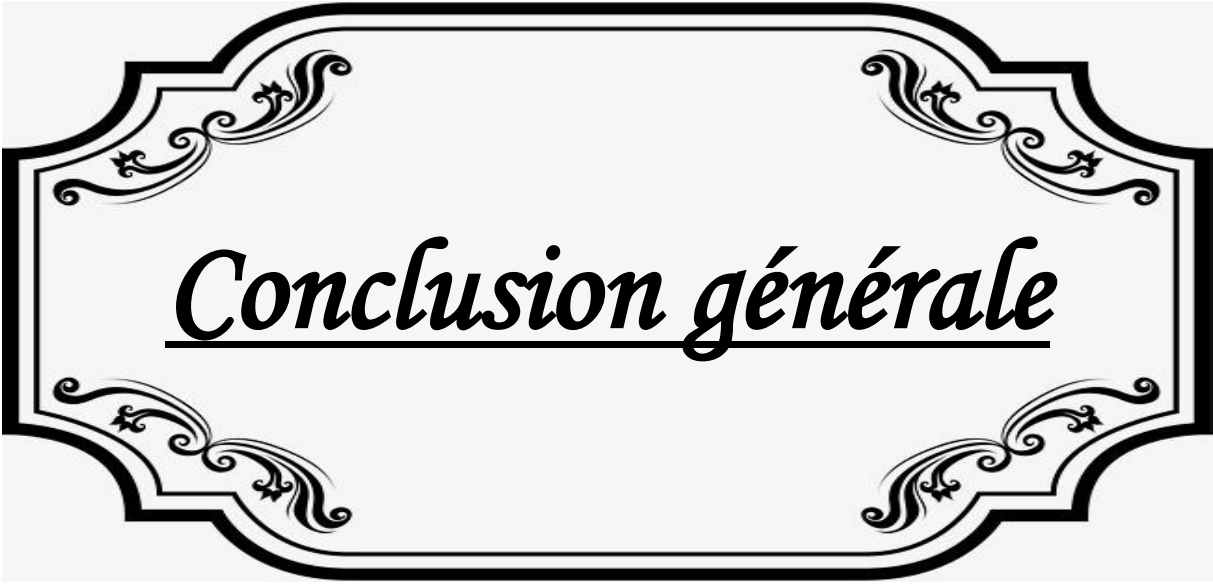
Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales de la commande en Mode glissant. Cette méthode de commande reste encore de nos jours une des méthodes les Plus utilisées dans le contrôle des systèmes non linéaires. Les raisons de ce succès sont dues Aux performances en stabilité et en robustesse et aussi à la facilité de sa mise en œuvre et de Son implémentation.

L'apparition du phénomène de réticence est du à la présence du terme discontinu dans la commande totale. Pour y remédier, plusieurs méthodes ont été évoquées. En dernier lieu, une application d'un système du second ordre a été faite avec des résultats de simulation commentés pour mettre en évidence ses définitions et ses propriétés.

A partir du contenu de ce chapitre, on ne conclut que la commande par mode glissant présente des avantages majeurs pour l'automatique :

- Bien adapté aux éléments de l'électronique de puissance (convertisseur de puissance).
- Robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation ou d'identification
- Bonne dynamique : rapidité, stabilité.

En revanche, l'un des inconvénients majeurs de cette commande est le phénomène de Broutement. Nous avons exposé les solutions qui permettent d'éviter la présence de ce Phénomène. D'autres méthodes sont aussi proposées dans la littérature comme par exemple, La commande en mode glissant d'ordre supérieur.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre projet de fin d'étude, nous avons présenté une modélisation et une commande d'un système photovoltaïque connecté à la charge électrique. Dans un premier temps, nous avons exposés un rappel sur le générateur PV et les différents types des systèmes PV et Structure du système PV connecte à la charge. Nous avons étudié, dans un deuxième temps, une étude de modélisation des éléments constituant le système PV connecté au charge électrique, tel que le générateur PV, le hacheur survolteur, la commande MPPT de type P&O, ainsi techniques de poursuite du point de puissance maximale et la commande de mode glissant avec MPPT.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m^2 , température 25°C .
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- Nous avons proposé et validé expérimentalement une stratégie de commande robuste avec l'algorithme P&O entre panneau photovoltaïque et le convertisseur DC-DC, par une validation expérimentale. Cette loi de commande garde son efficacité sous différentes contraintes et assure la stabilité du système et la maximisation de puissance, la stratégie de commande a été appliquée sur les topologies des convertisseurs : Boost elle a montré de meilleures performances au niveau du temps de réponse et dépassement.
- Nous avons présenté les notions fondamentales de la commande en Mode glissant. Cette méthode de commande reste encore de nos jours une des méthodes les plus utilisées dans le contrôle des systèmes non linéaires. Les raisons de ce succès sont dues aux performances en stabilité et en robustesse et aussi à la facilité de sa mise en œuvre et de son implémentation.

L'apparition du phénomène de réticence est due à la présence du terme discontinu dans la commande totale. Pour y remédier, plusieurs méthodes ont été évoquées. En dernier lieu, une application d'un système du second ordre a été faite avec des résultats de simulation commentés pour mettre en évidence ses définitions et ses propriétés.

A partir du contenu de ce chapitre, on ne conclut que la commande par mode glissant

présente des avantages majeurs pour l'automatique :

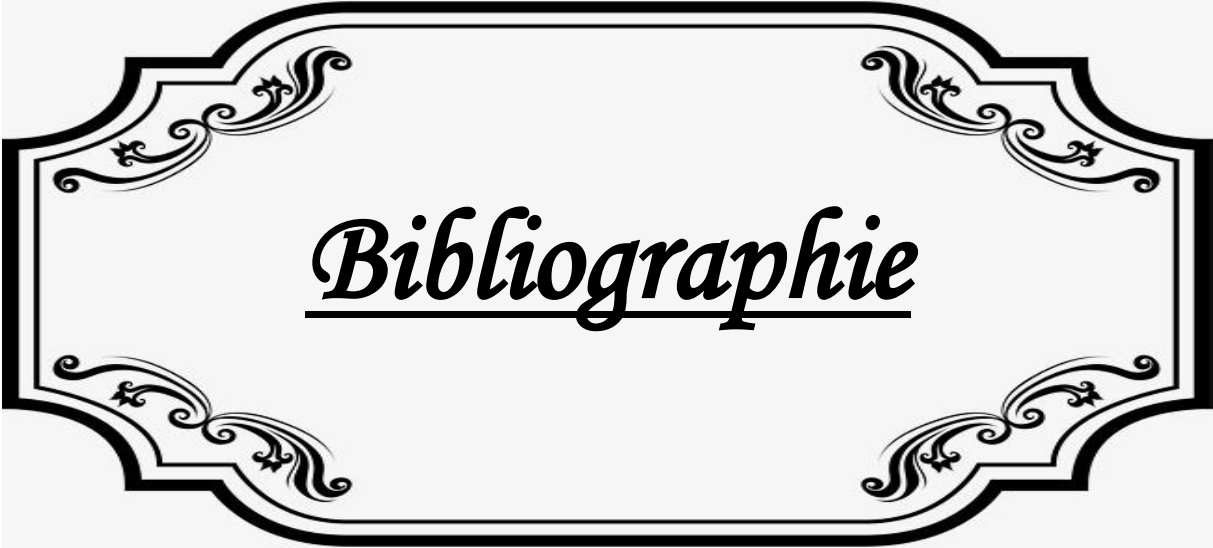
- Bien adapté aux éléments de l'électronique de puissance (convertisseur de puissance).
- Robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation ou d'identification.
- Bonne dynamique : rapidité, stabilité.

Pour la continuité de ce travail, il nous vient à l'esprit de définir les axes de recherches qui sont, à notre avis, prometteurs pour le développement de système photovoltaïque

Modélisation et commande d'un système photovoltaïque couplé au réseau électrique

Commande dynamique et gestion optimale de l'énergie dans un site rural

Application de nouvelles commandes pour l'énergie renouvelable.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] **K. Ouabdelkader, H.Mersl**, « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira , Bejaia,2015.
- [2] **G.MedYacine, D.belkacem, D.akram**, « modélisation et commande d'un système PV connecte au réseau électrique utilisant DSTATCOM. » , Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla,2020
- [3] **C. Alonso**, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie», Mémoire pour l'habilitation à diriger les recherches, Université *Paul Sabatier* – Toulouse III, 12 Décembre 2003.
- [4] **AbbassenL.**,« Etude de la connexion au réseau électrique d'un centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [5] **S. Vighetti** « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion »,these de en Génie Electrique ,Université De Grenoble Institut Polytechnique De Grenoble E24 septembre 2010.
- [6] **A. Nouar**, «Etude et Modélisation des différent modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales», Mémoire de Magister, Université Setif 2010.
- [7] **S. Bellakehal**,« Conception et commande des machines amants à permanents dédiées aux énergies renouvelables», Thèse doctorat, Université de Constantine ,2010.
- [8] **M. Z. F.Z. Zerhoun**, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique », revue des énergies renouvelables, vol.11, no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [9] **P. Stéphane** « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

- [10] **A. Zidane, M. Sahtout**, « Les Systems Photovoltaïques Connectes au Réseau », Thème de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.
- [11] **A. Corinne** « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatie Toulouse III, 2003.
- [12] **M. Keciri, N. Benmessaoud**, « Etude et maximisation de puissance d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012.
- [13] **A. Azi**, « Contribution au développement d'un outil d'aide aux performances diagnostic des MPPT dans la chaine de conversion photovoltaïque », Mémoire magister, Université de M'sila, 2014.
- [14] **M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V. G. Agelidis**, « Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—An overview », in Proc. IEEE PESC'02, vol. 2, pp. 1995–2000, 2002.
- [15] **H. Haeberlin**, « Evolution of inverters for grid connected PV-systems from 1989 to 2000 », in Proc. 17th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. , pp. 426–430. Munich, Germany, Oct. 22–26, 2001.
- [16] **A. Bouden**, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [17] **ROUBI Houdheyfa, AIB Hichem** « Amélioration de la commande MPPT d'un système Photovoltaïque par backstepping », Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, M'sila, 2019
- [18] **Salim ABOUDA**, « contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage », thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 14 avril 2015.

[19] **zouzouabd-elmoumen&hannachihaythem** « Optimisation de la pour suite de point de puissance maximale (MPPT) d'un système PV » , Université kasdi merbah – ouergla .

Aussi **Salim ABOUDA** , « Contribution a la commande des systemes photovoltaïques: application aux systemes de pompage » , these présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax , 14 avril 2015 .

[20] **F. OUDIAI1 , K.LAGHA-MENOUER2 , A. HADJ ARAB 3 , R. ZIRMI4** « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance » , Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, RP 17, 1500, Tizi-Ouzou, ALGERIE

[21] **Akihiro Oi** , « Design and simulation of photovoltaic water pumping system » , A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo , September 2005.

[22] **T. T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, D. Bonkougou** ,« Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur tension (boost) avec le logiciel MATLAB/SIMULINK » , UFR/SEA, Université Ouaga 01 , 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso , 2016

[23] **Karim KADIR, Djamal KAHIL** ,« Application à l'extraction de la puissance» maximale d'un panneau photovoltaïque » , Mémoire de Fin d'Études MASTER ACADÉMIQUE , Université Mouloud MAMMERI De Tizi-Ouzou , 24/09/2014 .

[24] **V. I. UTKIN** , « Discontinuous control system : state of art in theory and pplication » , Ed. MIR, Moscou 1978.

[25] **I. J SLOTIN** « Applied nonlinear control» , Englewood Cliffs,NJ. Prentice.

[26] **W.Gao,J.C.Hung** « Variable structure control système » , IEEE Trans.Idust.Applic. Vol.40,N°.1,pp45-55,1993.

- [27] **BOUZERIA HAMZA** , « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque » , THÈSE de DOCTORAT 3^{ème} cycle LMD en Électrotechnique , Université Hadj Lakhdar, Batna, 30/04/2016 .
- [28] **A. Lopez De Heredia Bermeo**, « Commandes Avancées des Systèmes Dédiés à L'amélioration de la Qualité de L'énergie: de Basse Tension à la Montée en Tension », Thèse de Doctorat de l'université de Grenoble 2006
- [29] **S. Zebbiche, A.H. Chebhi** , « Commande par mode glissant avec réduction du broutement et introduction aux observateurs de mode glissant », mémoire de Magistère, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2003.
- [30] **Z. Junhui, W. Mingyu, L. Yang, Z. Yanjing and L. Shuxi**, « The Study on the Constant Switching Frequency Direct Torque Controlled Induction Motor Drive with a Fuzzy Sliding Mode Speed Controller », IEEE the Natural Science Foundation of Chongqing, 2007.
- [31] **C. Chien-AN, C. Huann-Keng. and T. Chih-Huang**, « The Novel Fuzzy Sliding Mode Control Of Synchronous Reluctance Motor », IEEE Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2008
- [32] **M. Ertugrul, and O. Kaynak**, « Neuro sliding mode control of robotic manipulators ». Mechatronics. Vol. 10, No.1-2, pp.243-267, 2000.

résumé

Dans ce mémoire nous avons comme objectif : d'étudier commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques, ET étudier, la modélisation et simulation d'un système PV connecté au charge électrique et présenté les résultats et les résultats de simulation d'un convertisseurs DC-DC . Nous avons effectué une étude générale du générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à sa puissance maximale en utilisant un convertisseur survolteur DC-DC commandé par un algorithme MPPT de type 'P&O', puis, nous avons utilisé les résultats de simulation mentales de la commande en mode glissant.

Mots de clés:

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

ملخص:

هدفنا في هذه الرسالة: دراسة التحكم في MPPT عن طريق الوضع الإنزلاقي للأنظمة الكهروضوئية، ودراسة نمذجة ومحاكاة النظام الكهروضوئي المتصل بالحمل الكهربائي وعرض النتائج ونتائج المحاكاة لمحولات DC-DC. . لقد أجرينا دراسة عامة للمولد الكهروضوئي وتشغيله بأقصى طاقته باستخدام محول تعزيز DC-DC يتم التحكم فيه بواسطة خوارزمية MPPT من النوع 'P&O' ، ثم استخدمنا نتائج المحاكاة العقلية للتحكم في وضع الانزلاق.

الكلمات الدالة :

المولد، الكهروضوئية، محولات DC-DC ، MPPT نوع « P&O » ، الوضع الإنزلاقي.

Abstract :

In this thèse we have as objective: to study MPPT control by sliding mode for Photovoltaic systems, and to study, the modeling and simulation of a PV system connected to the electric load and presented the results and the simulation results of a converters DC-DC. We carried out a general study of the photovoltaic generator and it's operation at it's maximum power using a DC-DC boost converter controlled by a MPPT type 'P&O' algorithm, then, we used the results of mental simulation of the control in sliding mode.

Keywords :

Generator , photovoltaic , DC-DC converters , MPPT type P&O, sliding mode.