

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et système

Thème

Application d'un convertisseur SEPIC à gain en tension élevé sur un système photovoltaïque.

Préparé par :

- TIGHZER LOUNIS
- HAMOUCHE EL-KHOUDIR

Dirigé par : Mr

BELKAID

ABDLHAKIM

Examiné par :

Guenounou.W (P)

Yahiaoui. (Ex)

Belkaid.A (Enc)

Année universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENT

NOUS TENONS À REMERCIER ALLAH LE TOUT PUISSANT DE NOUS AVOIR DONNÉ LE COURAGE ET LA VOLONTÉ POUR RÉALISER CE TRAVAIL.

NOUS REMERCIONS TOUS CEUX QUI NOUS ONT AIDÉS À ÉLABORER CE MÉMOIRE ; PARTICULIÈREMENT :

NOTRE PROMOTEUR MR. BELKAID POUR SON ENCADREMENT ET SON SUIVI.

LES ENSEIGNANTS QUI NOUS ONT ENSEIGNÉS DURANT NOTRE CURSUS UNIVERSITAIRE.

LES MEMBRES DE JURY D'AVOIR ACCEPTÉ D'EXAMINER ET D'ÉVALUER NOTRE TRAVAIL.

SANS OUBLIER NOS FAMILLES QUI NOUS ONT ENCOURAGÉES ET SOUTENUES DANS LES MOMENTS DIFFICILES TOUT AU LONG DE NOTRE CURSUS ET LA PRÉPARATION DE CE MÉMOIRE.

ENFIN, NOS PROFONDS REMERCIEMENTS VONT À TOUTE PERSONNE QUI A CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA RÉALISATION DE CE MÉMOIRE.

MERCI

DEDICACE

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À ;

- MES CHERS PARENTS QUI M'ONT
APPORTÉS SOUTIEN ET CONFORT TOUT
AU LONG DE MA VIE ET QUI SE
SACRIFIENT POUR ME VOIR RÉUSSIR.
- MA SŒUR. SARA ET MON FRÈRE ISHAK
- MA GRAND-MÈRE HENIFA QUE DIEUX
L'ACCUEILLE DANS SON VASTE PARADIS.
- MES AMI(E)S. QUI SONT CHAQUE JOUR-
LÀ POUR MOI.

EL-KHOUDIR

DEDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL :
À MES CHERS PARENTS,
À MES FRÈRES ET SŒURS, (MASSI)
À MA FAMILLE,
À TOUS MES PROCHES,
ET TOUS MES AMIS,
AINSI À MES AMIS DE LA PROMOTION
2022 EN GÉNIE ÉLECTRIQUE.

LOUNIS

Sommaire

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 1

CHAPITRE I..... 3

ÉTAT DE L'ART SUR LES SYSTÈMES

PHOTOVOLTAÏQUES 3

INTRODUCTION :..... 4

I.1. L'ÉNERGIE SOLAIRE 5

I.2. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :..... 5

I.4. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :..... 8

I.5. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :..... 9

I.6. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE

PHOTOVOLTAÏQUE **ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.**

I.7. L'INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT ET DE LA

TEMPÉRATURE :..... 14

I.8. FONCTIONNEMENT À PUISSANCE MAXIMALE :..... 16

I.9. GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV) :..... 17

<u>I.10. LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE :</u>	<u>21</u>
<u>CONCLUSION :</u>	<u>22</u>
<u>CHAPITRE II</u>	<u>23</u>
<u>LES CONVERTISSEURS DC-DC ET LA COMMANDE MPPT</u>	<u>23</u>
<u>.....</u>	<u>23</u>
<u>II.1. LES CONVERTISSEUR DC-DC</u>	<u>24</u>
<u>II.2. DÉFINITION CONVERTISSEUR DC-DC :</u>	<u>24</u>
<u>II.3. RÔLE DES CONVERTISSEURS DC-DC</u>	<u>25</u>
<u>II.4. LES DIFFÉRENTS TYPES DES HACHEURS</u>	<u>25</u>
<u>II.5. LE CONVERTISSEUR SEPIC</u>	<u>31</u>
<u>II.6. DIMENSIONNEMENT D'UN CONVERTISSEUR SEPIC</u>	<u>32</u>
<u>II.7 LA COMMANDE MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING) :</u>	<u>36</u>
<u>CONCLUSION</u>	<u>52</u>
<u>CHAPITRE III</u>	<u>53</u>
<u>MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME PV ...</u>	<u>53</u>
<u>INTRODUCTION</u>	<u>53</u>

<u>III.1. CARACTÉRISTIQUES (I, V) ET (P, V) DE LA</u>	
<u>CELLULE SOLAIRE</u>	<u>53</u>
<u>III.2. CIRCUIT ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE</u>	<u>55</u>
<u>III.3. MODÉLISATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE</u>	
<u>(PV) SOUS SIMULINK</u>	<u>56</u>
<u>III.4. LE CONVERTISSEUR SEPIC.....</u>	<u>60</u>
<u>III.5. ALGORITHME MPPT.....</u>	<u>61</u>
<u>III.6 SIMULATION DE SYSTÈME PV.....</u>	<u>63</u>
<u>CONCLUSION.....</u>	<u>71</u>
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</u>	<u>72</u>
<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>72</u>
<u>RÉSUMÉ.....</u>	<u>83</u>

Liste des figures

Liste des figures

FIGURES CHAPITRE 1

Figure I. 1 : Fonctions principales d'un système photovoltaïque.	5
Figure I. 2 : Système de pompage « au fil du soleil »	6
Figure I. 3 : Système photovoltaïque avec stockage	7
Figure I. 4 : Système photovoltaïque hybride photovoltaïque /groupe électrogène.	7
Figure I. 5 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.	8
Figure I. 6 : Réflexion transmission et absorption.	9
Figure I. 7 : Structure basique d'une cellule PV.	10
Figure I. 8 : Evolution de la caractéristique $I= f(V)$ et $P= f(V)$	12
Figure I. 9 : Influence de l'ensoleillement sur la puissance.	14
Figure I. 10 : Influence de l'ensoleillement sur le courant PV.	15
Figure I. 11 : Influence de la température sur la tension PV.	16
Figure I. 12 : Influence de la température sur la puissance du GPV.	16
Figure I. 13 : Evolution du PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 80W en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b).	17
Figure I. 14 : Encapsulation des cellules.	18
Figure I. 15 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.	19
Figure I. 16 : Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.	20
Figure I. 17 : Association mixte des modules solaires.	20

FIGURES CHAPITRE 2

Figure II. 1 : Convertisseur DC/DC.	25
Figure II. 2 : Schéma de base d'un convertisseur Boost. [17].....	26
Figure II. 3 : Formes d'ondes des courants et des tensions du convertisseur Boost. [17].....	26
Figure II. 4 : Circuit équivalent de Boost quand K est fermée.....	27
Figure II. 5 : Circuit équivalent de Boost quand K est ouvert. [17].....	27
Figure II. 6 : Schéma de base d'un convertisseur Buck. [17]	29
Figure II. 7 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck [17].....	29
Figure II. 8 : Circuit équivalent du Buck quand K est fermée.	29
Figure II. 9 : Circuit équivalent du Buck quand l'interrupteur est ouvert. [17].....	30
Figure II. 10-a : Schéma de base d'un convertisseur SEPIC basique. [18].....	31
Figure II. 10-b : Schéma de base d'un convertisseur SEPIC a gain en tension élevé. [40]	32
Figure II. 11 : SEPIC avec K fermé.	32
Figure II. 13 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur une commande MPPT et une charge.	36
Figure II. 14 : Principe de la commande MPPT.....	37
Figure II. 15 : Algorithme de la Tension Constante.....	40
Figure II. 16 : Algorithme du constant courant.	41

Figure II. 17 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)	42
Figure II. 18 : l'algorithme de P&O classique	43
Figure II. 19 : Divergence de la méthode P&O.....	44
Figure II. 20 : algorithme du poids d'un troisième point	45
Figure II. 21 : Positionnement du point de fonctionnement ($G=1\text{kW/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).....	46
Figure II. 22 : Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN).....	48
Figure II. 23 : Structure de base de la commande floue.....	49

FIGURES CHAPITRE 3

Figure III. 1 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire.	53
Figure III. 2 : Caractéristique d'une cellule P-V.	54
Figure III. 3 : Caractéristique I-V d'une cellule P V.	54
Figure III. 4 : Circuit équivalent d'une cellule idéal.	55
Figure III. 5 : Schéma équivalent d'une cellule PV réelle.	56
Figure III. 6 : Schéma bloc d'un panneau photovoltaïque sous matlab/Simulink.	57
Figure III. 7 : Variation des caractéristiques I-V et P-V en fonction de l'éclairement sous une température fixe $T= 25^\circ\text{C}$.	58
Figure III. 8 : Variation de la puissance P-V en fonction des différents éclairagements.	58
Figure III. 9 : Variation des caractéristiques I-V en fonction de la température avec éclairage fixe.	59
Figure III. 10 : variation de la puissance P-V en fonction de la température sous un éclairage fixé à 1000w/m^2 .	60
Figure III. 11 : Schéma bloc de convertisseur SEPIC a gain de tension élevé sous Simulink.	60
Figure III. 12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire par la commande MPPT.	61
Figure III. 13 : Schéma bloc de la commande MPPT traduit sur Simulink.	62
Figure III. 14 : Modèle Simulink d'un système photovoltaïque général composé d'un hacheur SEPIC et la commande MPPT.	64
Figure III. 15 : Variations de la puissance pour différents valeurs d'éclairement à la sortie de PV.	65
Figure III. 16 : Variations de la tension à la sortie de PV pour différentes valeurs de G.	66
Figure III. 17 : Variation de courant à la sortie de PV en fonction de G.	66
Figure III. 18 : Variation de la tension à la sortie de CS pour différentes valeur d'éclairement.	67
Figure III. 19 : Variation de rapport cyclique D en fonction de l'éclairement.	67
Figure III. 20 : Variation de la puissance à la sortie de PV pour différentes valeurs de T° .	68
Figure III. 21 : Variation de V_{PV} pour différentes valeurs de T° .	69
Figure III. 22 : Variation de courant à la sortie de PV pour T° variable.	69
Figure III. 23 : Variation de V à la sortie de CS pour différentes valeurs de T° .	69
Figure III. 24 : Variation de D en fonction de la température.	70

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Comparatif des rendements des différents types de cellules	13
Tableau II. 1 : Types de pertes dans les composants électroniques._____	35
Tableau II. 2 : Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue._____	50
Tableau III. 1 : Caractéristique de model PV._____	56
Tableau III. 2 : Paramètres de convertisseur SEPIC modifié._____	64

Abréviation

ABRÉVIATIONS

DC	Courant continu « direct current »
AC	courant alternatif « alternating current »
DC/DC	convertisseur tension continu/continu
PV	photovoltaïque
MPP	point de puissance maximale « maximum power point »
MPPT	puissance du point de puissance maximale « maximum power point tracking »
GPV	générateur photovoltaïque
P&O	perturbation et observation « perturb and observe » (P&O)
IC	conductance incrémentée « incremental conductance »
FLC	contrôleur avec la logique floue « fuzzy logic controller »
STC	conditions standards du test « standard test conditions »
MOSFET	transistor à effet de champ d'oxyde métal.
PCB	circuit imprimé (printed circuit board)

Liste des symboles

LISTE DES SYMBOLES

E	Energie
λ	densité d'énergie solaire
h	constante de Planck
c	vitesse de la lumière
I_{ph}	photo courant de la cellule PV
R_s	résistance série de la cellule
I_d	courant traversant la diode dans le circuit équivalent de la cellule PV
V	Tension aux la bornes de la cellule
I_s	courant de saturation polarisation inverse de la diode
I	courant de sortie de la cellule
I_{pv}	courant photovoltaïque
V_{pv}	tension photovoltaïque
P_{pv}	puissance photovoltaïque
I_{sc}	courant du court-circuit « short circuit curent »
A	facteur d'idéalité de la jonction
K_b	constante de Boltzmann (1,381.10)
Q	charge de l'électron (1,602.10)
T	température de jonction thermique
P_{mpp}	poursuite du point de puissance maximale
I_{mpp}	courant de point de puissance maximale
$P(k)$	puissance actuelle
$P(k-1)$	puissance précédente
V_{oc}	tension de circuit ouvert « Open circuit voltage »
FF	facteur de forme
η	Rendement énergétique
E_c	éclairage
S	surfaces actives de la cellule
N_p	nombre de modules connectés en parallèles

V_{cons}	la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série
I_{ccns}	courant de court-circuit de N_s cellules en série
I_{ccnp}	la somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèles
V_{comp}	tension de circuit ouvert de (NP) cellules en parallèles
K_o	coefficient de température de courant court-circuit
T_{ref}	température de référence (289K)
I_{rs}	courant de saturation de diode pour T_{ref}
E_g	énergie de gap de cellule
N_s	nombre de cellule en série
V_e	tension de la source
V_s	la tension aux bornes de la charge
T	temps
T_{off}	temps d'ouverture de l'interrupteur à semi-conducteur dans un convertisseur
T_{on}	temps de fermeture de l'interrupteur à semi-conducteur dans un convertisseur
α, D	rapport cyclique
D_{mpp}	Rapport cyclique de point de puissance maximale
L	L'inductance de la bobine
R	Résistance
C	condensateur
ΔP	variation de la puissance
$V(t)$	tension actuelle
$V(t-1)$	tension précédente
ΔV	Variation de la tension
$E(t)$	L'erreur à l' instant t actuel (dérivée de la puissance)
$E(t-1)$	l'erreur a l'instant précédent (dérivée de la puissance)
$\Delta e(t)$	la variation de l'erreur
(χ)	Fonction d'appartenance
G	Irradiation

Introduction générale

Introduction générale

Le besoin d'énergie au 21^{ème} siècle a eu une augmentation pharamineuse et cela a fin de satisfaire la production mondiale. Pour cela l'être humain utilise différents types d'énergie telle que les combustibles fossiles et le nucléaire dite énergie non renouvelable. Mais ces derniers ont un effet très dévastateur sur l'environnement. Cela a poussé l'humain à mettre en œuvre d'autres initiatives.

Dans ce contexte, les énergies renouvelables sont sélectionnées comme une solution à l'épuisement des combustibles fossiles. Pour les sites isolés, où le réseau n'est pas disponible, les énergies renouvelables offrent une excellente solution, étant donné que les sources d'énergie sont abondantes (rayonnement solaire et vent). De plus, étant donné le soutien adéquat, les énergies renouvelables peuvent répondre à une grande partie de la demande croissante d'énergie conventionnelle des prix inférieurs (au milieu du 21^{ème} siècle, les sources d'énergie renouvelables pourraient représenter trois cinquièmes du marché mondial de l'électricité). De plus, l'électricité peut être produite près du lieu de consommation et sans produire de gaz à effet de serre. Ainsi, des installations autonomes basées sur les énergies renouvelables sont utilisées pour différentes applications dans des sites isolés.

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter, mais avant de la consommer il aura fallu la produire. La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement d'intérêt. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%), c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux est la puissance maximale disponible qui est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé «Maximum Power Point» (MPP), défini par une tension et un courant donnés, et ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge.

Dans ce travail, on étudiera un système photovoltaïque autonome commandé par MPPT, alimentant une charge résistive, constitué à la base d'un convertisseur SEPIC à gain de tension élevé.

Le premier chapitre donne une généralité sur l'énergie solaire et une description générale des systèmes photovoltaïque ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et les différentes parties constituant ces derniers.

Dans le deuxième chapitre nous étudierons les différents types des convertisseurs statique DC-DC et leur modélisation, nous nous intéresserons essentiellement au hacheur SEPIC, suivie d'une autre partie sur la commande MPPT et une description générale sur les différents types d'algorithmes qui utilisent cette technique.

Dans le troisième, on se propose de modéliser puis de simuler les différents composants à l'aide du logiciel « MATLAB ». Dans un premier temps, nous décrirons le modèle électrique équivalent d'un générateur PV. Ensuite, nous passerons à l'étude en simulation du convertisseur SEPIC ainsi que du système entier, une comparaison des résultats de simulation est alors discutée.

Et enfin on terminera ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I
**État de l'art sur les systèmes
photovoltaïques**

Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi, une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix le plus performant avec moindre coût possible. La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telle que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit être correctement dimensionné. Cependant les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système. [1]

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations V-I à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus.ⁱ

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles dont les précisions restent tributaires de la modélisation mathématique des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basés sur la modélisation mathématique du courant-tension. [2]

I.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire née de la fusion d'atome d'hydrogène présent dans le cœur du soleil elle se propage dans l'espace essentiellement sous forme de rayonnement électromagnétique et de photon.

L'énergie solaire reçu sur terre diffèrent d'un point à un autre et cela est du à plusieurs raisons qu'on site :

- La latitude, la saison et l'heur qui influent sur la distance point soleil.
- Le positionnement géographique.

I.2. Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque convertie directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité, elle utilise pour cela des modules photovoltaïque compose de cellule solaire ou de photopiles qui relaisse cette transformation d'énergie

Un système photovoltaïque est composé de trois parties essentielles :

- **Partie production d'énergie**
- **Partie contrôle de l'énergie**
- **Partie utilisant l'énergie produite**

I.2.1. Composition d'un système photovoltaïque :

Un module photovoltaïque seul ne suffit pas pour alimenter régulièrement une installation, tout comme l'éclaircissement l'énergie qu'il fournit est très variable, et toujours en courant continu, on appelle « système photovoltaïque » l'ensemble du composant nécessaire à l'alimentation d'une application en toute fiabilité.

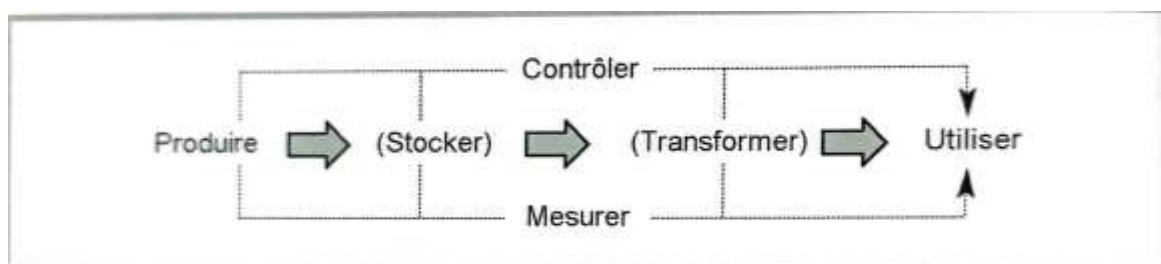


Figure I. 1 : Fonctions principales d'un système photovoltaïque.

Et pour cela différentes configurations de système existent :

I.2.2. Systèmes autonomes « au fil du soleil » :

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux, on peut les trouver dans les deux cas suivants :

- **Alimentation directe** : dans ce cas les fonctions se réduisent à produire et à utiliser, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de lumière et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée.
- **Le pompage aux files du soleil** : il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir, la pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un convertisseur. Le débit d'arrivée de l'eau dans le réservoir est donc variable, directement en fonction du rayonnement solaire, d'où l'expression « au fil du soleil »

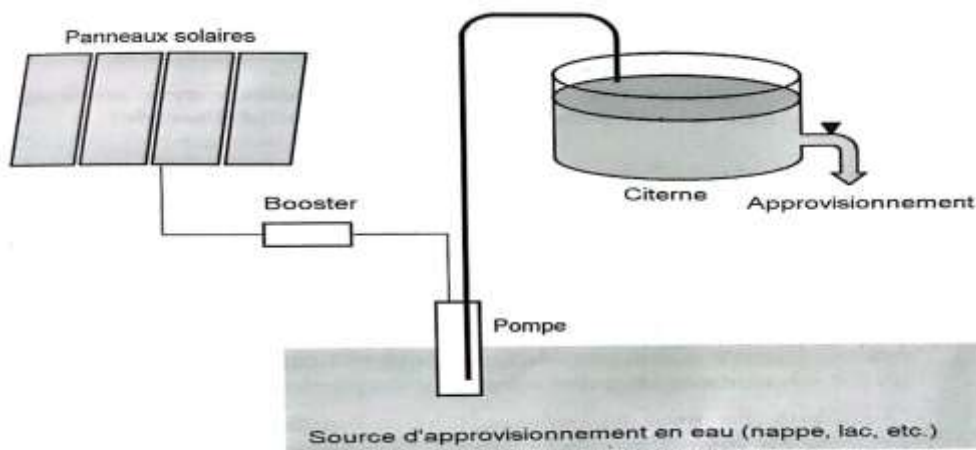


Figure I. 2 : Système de pompage « au fil du soleil »

I.2.3. Systèmes autonomes avec stockage :

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, la batterie du système se charge le jour et sert de réservoir d'énergie en permanence elle peut sans problème à un instant donné recevoir un courant de charge et débiter un courant de décharge de valeur différente.

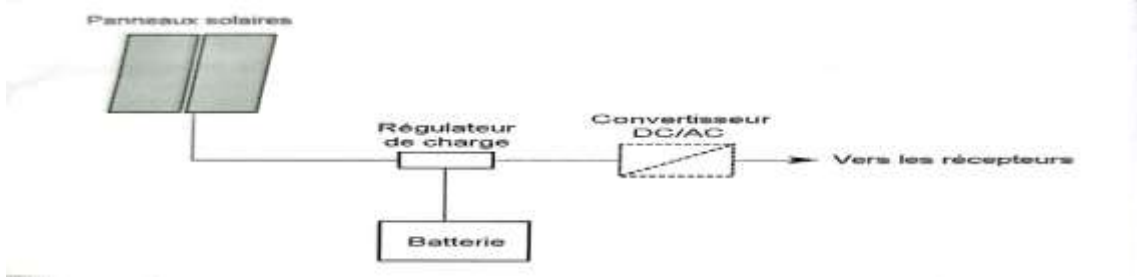
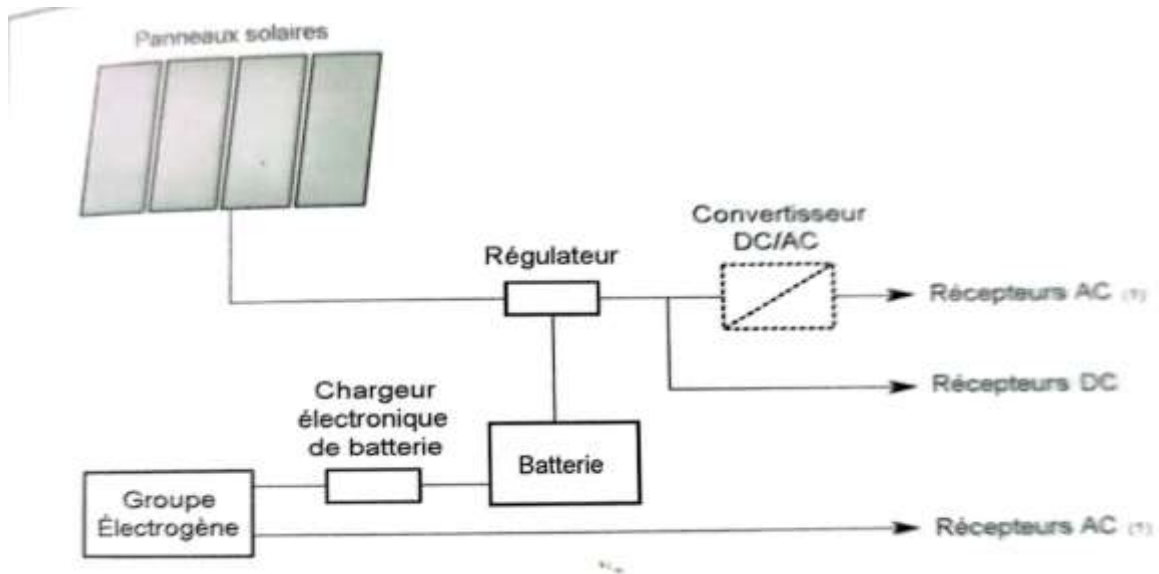


Figure I. 3 : Système photovoltaïque avec stockage

I.2.4. Systèmes autonomes hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires qui sont également indépendante des réseaux de distribution d'électricité en pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou un groupe électrogène à

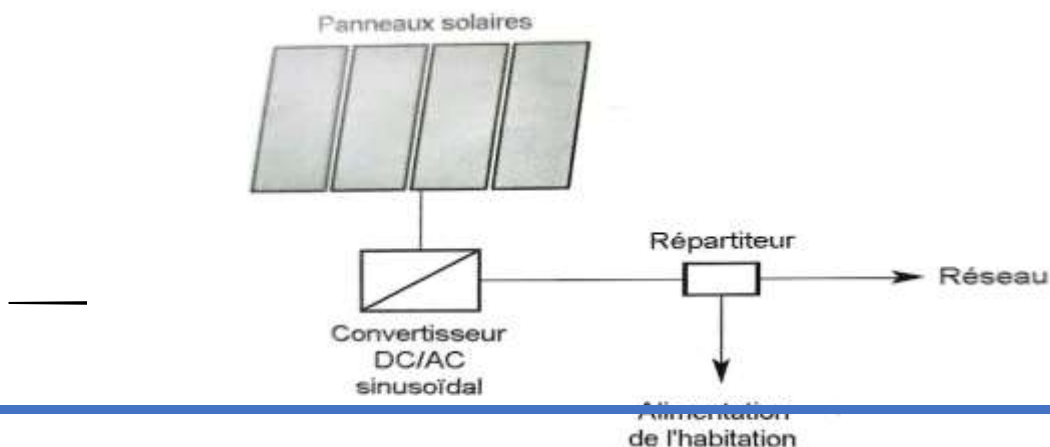


combustible.

Figure I. 4 : Système photovoltaïque hybride photovoltaïque /groupe électrogène.

I.2.5. Systèmes raccordés au réseau :

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (sonal-gaz en Algérie), l'avantage



de ce système est l'absence de batterie, on stocke plus l'énergie on l'injecte directement dans le réseau, et cela sans limite quantitative, mais il faut tout de même convertir le courant continu en alternative.

Figure I. 5 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.

I.4. Energie solaire photovoltaïque :

Cette conversion d'énergie met en jeu trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

I.4.1. L'absorption de la lumière :

La lumière se compose de photons, chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde, ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières et même passer au travers. Plus généralement un rayonnement lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- La réflexion
- La transmission
- L'absorption

Ce sont les propriétés optiques du matériau rencontré qui conditionnent la répartition de ces diverses contributions.

Dans un matériau photovoltaïque une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible. [3]

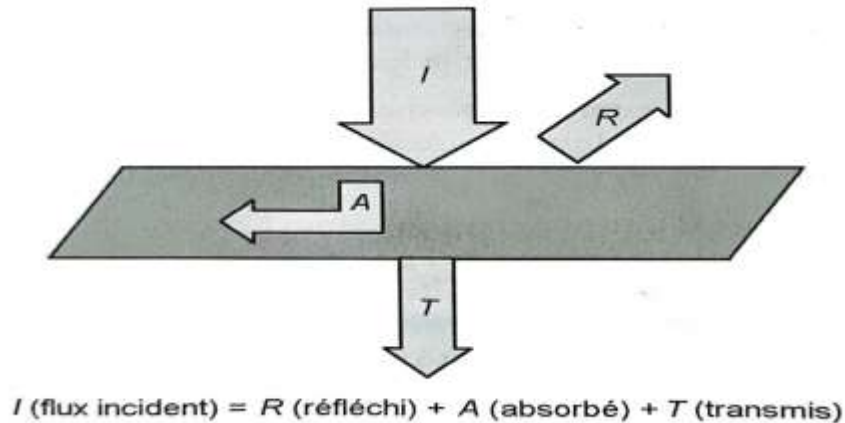


Figure I. 6 : Réflexion transmission et absorption.

I.4.2. Le transfert d'énergie des photons à la charge électrique :

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons charge négative élémentaire, contenu dans la matière semi-conductrice. Les photons absorbés vont tout simplement transfère leur énergie aux électrons périphérique leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau, ces électrons libères sont susceptible de produire un courant électrique. [2]

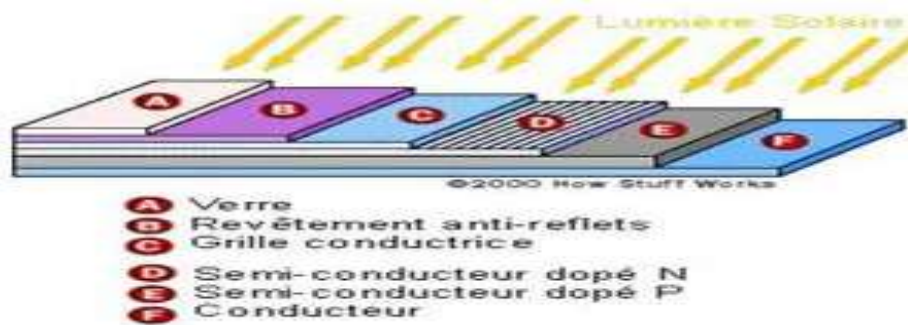
I.4.3. La collecte des charges :

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrice d'énergie, il faut qu'elles circulent il faut donc les attirer hors du matériau semi-conducteur et cela est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendré un champ électrique à l'intérieur du matériau qui va entrainer les charges négatives d'un côté et les charge positives de l'autre.

I.5. La cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation Photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement L'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le



silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement. [4]

Figure I. 7 : Structure basique d'une cellule PV.

I.5.1. Les filières technologiques :

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché. Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents. L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs. Toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis trente ans. Il n'y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes.

I.5.1.1. Le silicium :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est

elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin : [5]

- **Le silicium mono cristallin :**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi cristallin.

- **Le silicium multi cristallin (Poly cristallin) :**

Le silicium multi cristallin (Poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. [5]

I.5.1.2. Les couches minces :

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui, malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kWc. Le kilo watt crête (kWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux Conditions de Test Standard (STC) (1000W.m⁻² et 25°C). La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

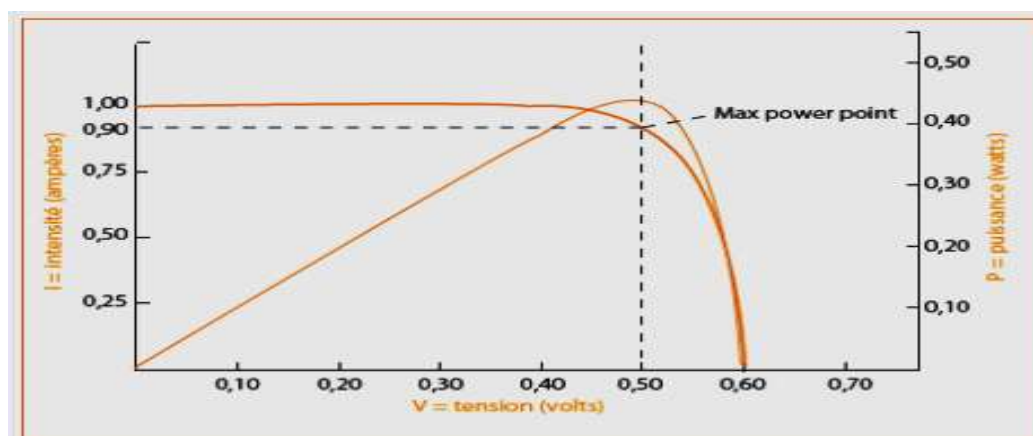
La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de

substrats à bas coût. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (Figure II-6) et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules morphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères. D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront à laboratoire ou à des applications très spécifiques. [5]

I.6. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. [8]

La figure suivante montre les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque



:

Figure I. 8 : Evolution de la caractéristique $I= f(V)$ et $P= f(V)$. [8]

- Le courant de court-circuit I_{cc} : Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée. [9]

$$I_{ph} = I_{cc} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{cell} + I_{ph}R_s}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{ph}R_s}{R_p} \quad 1.1$$

Ou :

I_s (A) est le courant de saturation,

V_t (V) : la potentielle thermodynamique ($J.K^{-1}$) la constante de Boltzmann,

T (K) : la température effective de la cellule en Kelvin,

e (C) : la charge de l'électron,

n : le facteur de non idéalité de la jonction,

I_{ph} (A) : est le courant fourni par la cellule,

V_{cell} (V) : la tension à ses bornes,

I_{cc} (A) : le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'éclairement et la température,

R_p (Ω) : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_s (Ω) : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

- La tension en circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [9]

$$V_{co} = V_t \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad 1.2$$

- La Puissance maximale P_{max} :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} , correspondrait donc à la tension maximale multipliée par le courant maximum. [10]

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad 1.3$$

- **Le facteur de forme FF :**

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale). [10]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad 1.4$$

- **Le rendement η :**

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente. [10]

$$\eta = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{incident}} = \frac{P_{max}}{E \cdot S} \quad 1.5$$

Où :

S : Surface de cellule solaire.

E : Flux incident.

I.7. L'influence de l'éclairement et de la température :

I.7.1. L'influence de l'éclairement :

En appliquant une température constante et en variant l'ensoleillement un panneau photovoltaïque se comporte comme illustrés par les figures suivantes :

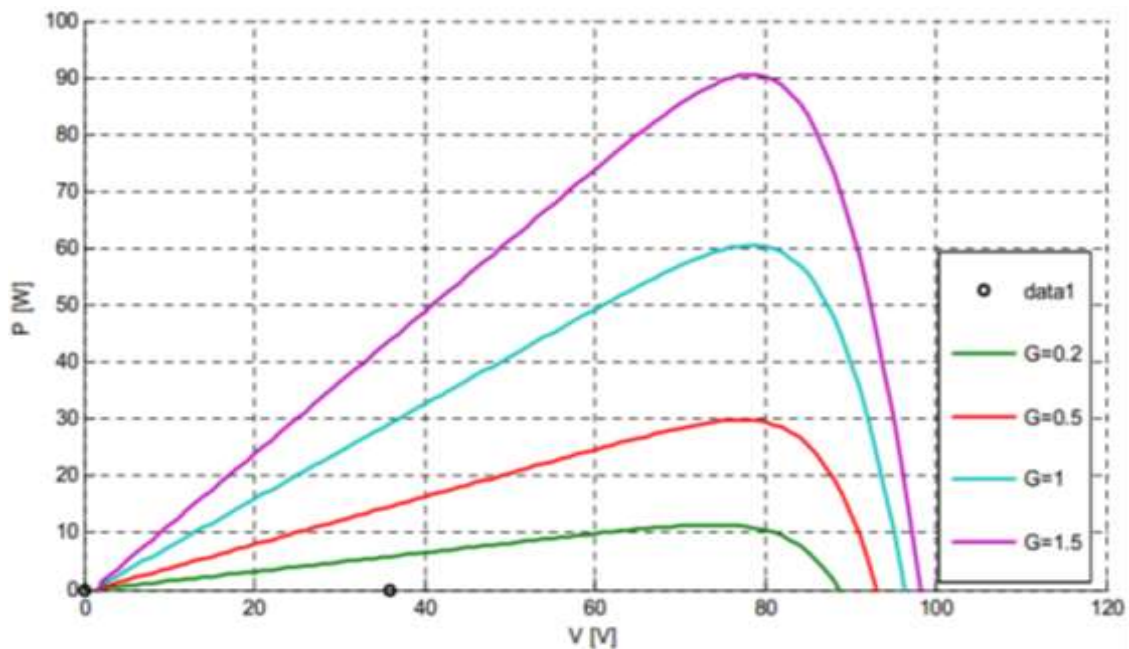


Figure I. 9 : Influence de l'ensoleillement sur la puissance.

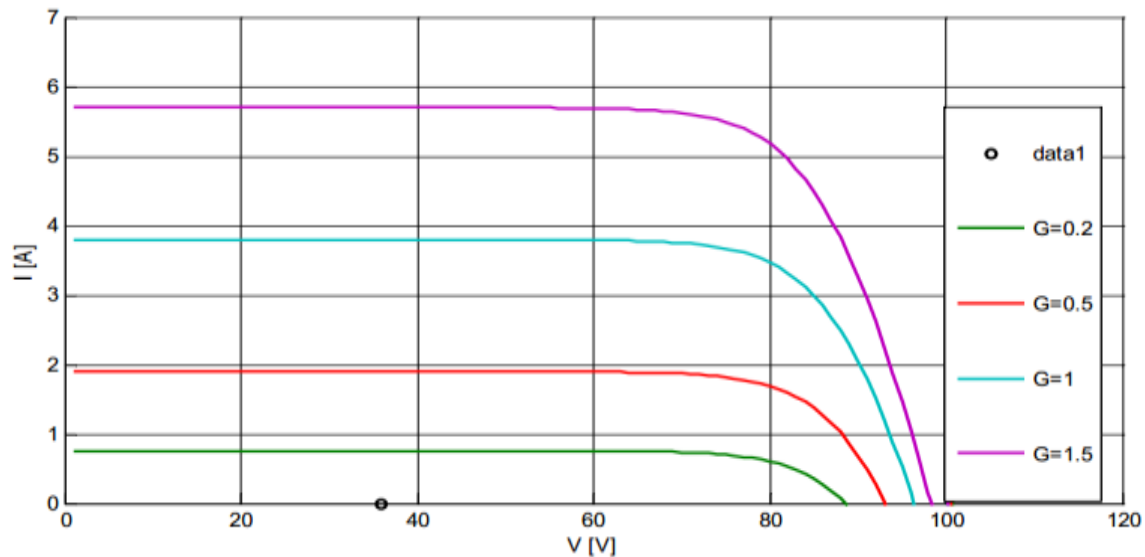


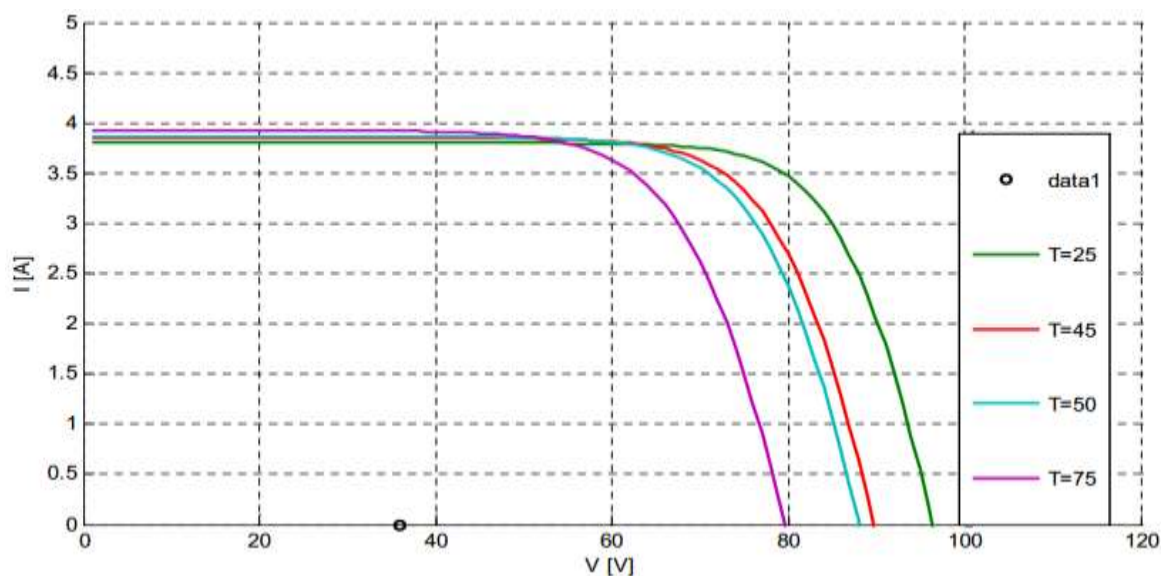
Figure I. 10 : Influence de l'ensoleillement sur le courant PV.

La caractéristique du courant-tension pour différentes valeurs de l'éclairement est décalée d'une distance proportionnelle aux rayonnements solaires, une augmentation de l'ensoleillement engendre essentiellement une augmentation du courant PV, par conséquent la puissance augmente.

I.7.2. L'influence de la température :

Pour le fonctionnement d'un panneau solaire, la cellule PV doit s'exposer au rayonnement solaire. Ceci provoque un échauffement et la température agit sur les différentes caractéristiques de la cellule.

En fixant l'ensoleillement et en faisant varier la température les allures obtenues sont



présentées ci-dessous :

Figure I. 11 : Influence de la température sur la tension PV.

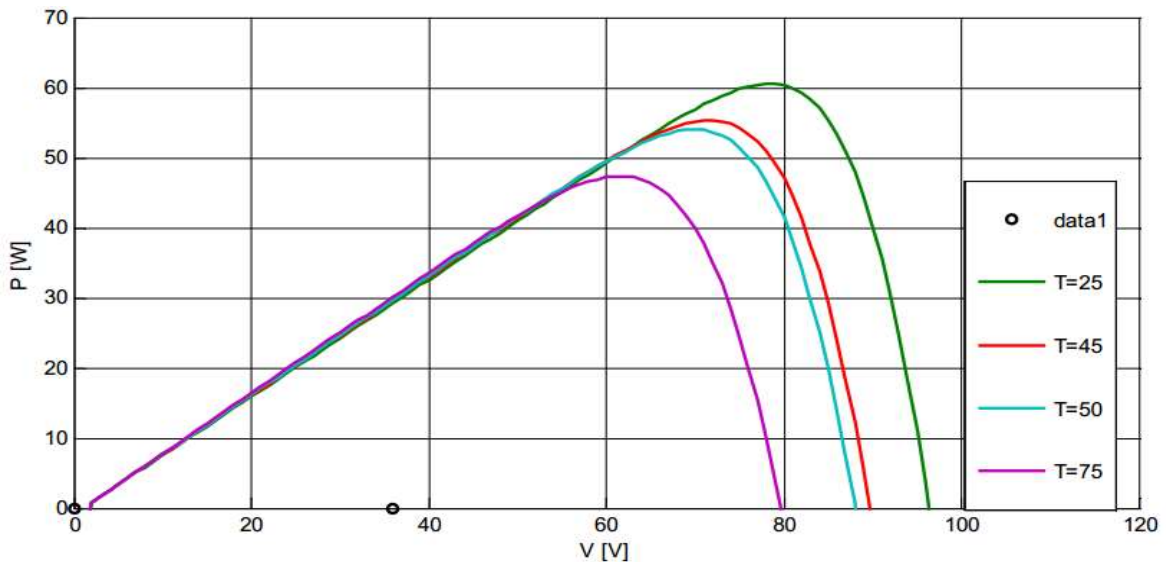
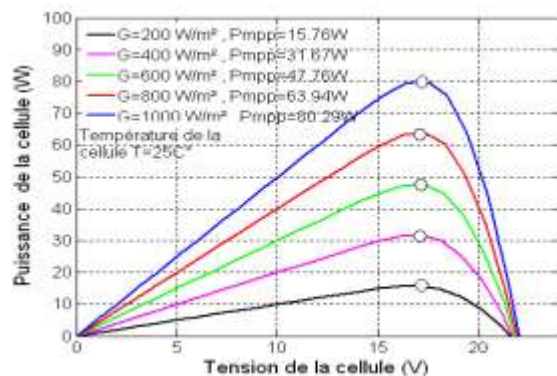
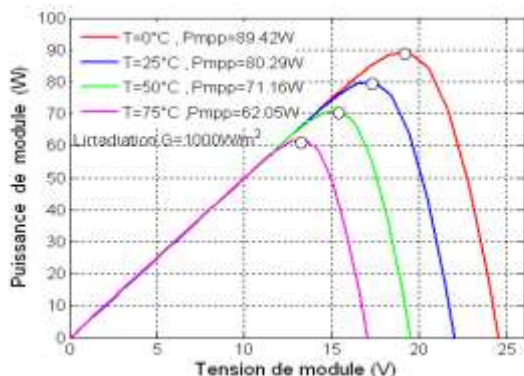


Figure I. 12 : Influence de la température sur la puissance du GPV.

On remarque que l'augmentation de la température entraîne principalement une diminution de la tension par conséquent la puissance du GPV diminue.

I.8. Fonctionnement à puissance maximale :

La caractéristique électrique $p(V)$ de ce type de GPV s'avère proche de celle d'une cellule PV aux rapports de proportionnalités près. Ces rapports dépendent du nombre de cellules connectées en série et du nombre de branches de cellules associées en parallèle. Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM) caractérisé par un courant et une tension nommée respectivement, comme pour la cellule, I_{max} et V_{max} . Sur la figure II-25, nous pouvons observer l'évolution du PPM d'un module commercial typique de 80W crêtes constitué de 36 cellules monocristallines en série, en



fonction de la température et de l'éclairement.

Figure I. 13 : Evolution du PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 80W en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b).

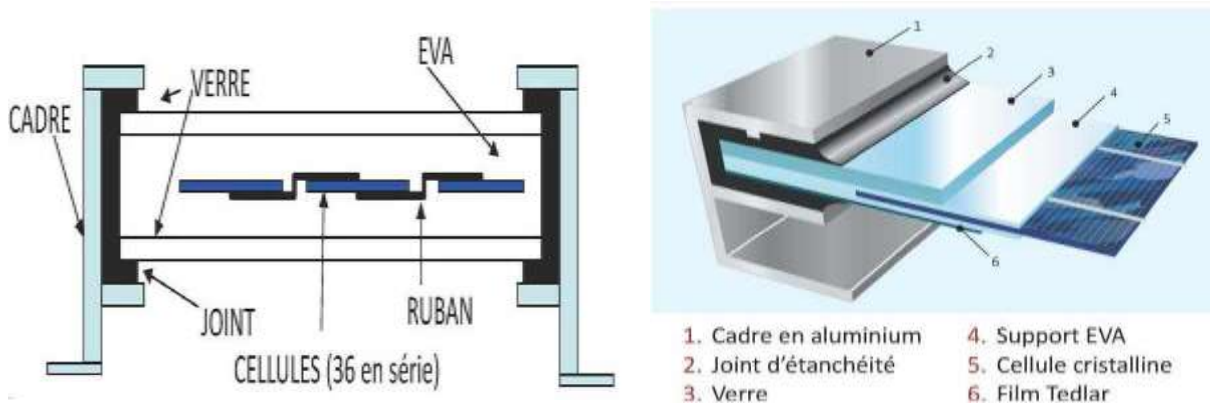
Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes, utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum et les méthodes directes, sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturb & Observ (P&O), l'incrément de conductance.

I.9. Générateur photovoltaïque (GPV) :

I.9.1. La constitution d'un module photovoltaïque :

- Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face.
- Les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle).
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation.
- Un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière.
- La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR.

- Connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass.



- Les 2 câbles unipolaires sont raccordés.

Figure I. 14 : Encapsulation des cellules.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s * V_{pv} * N_p * I_{pv} \quad 1.6$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : le courant de sortie du GPV.

I.9.2. Mise en série :

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure II-15. L'équation (II-2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

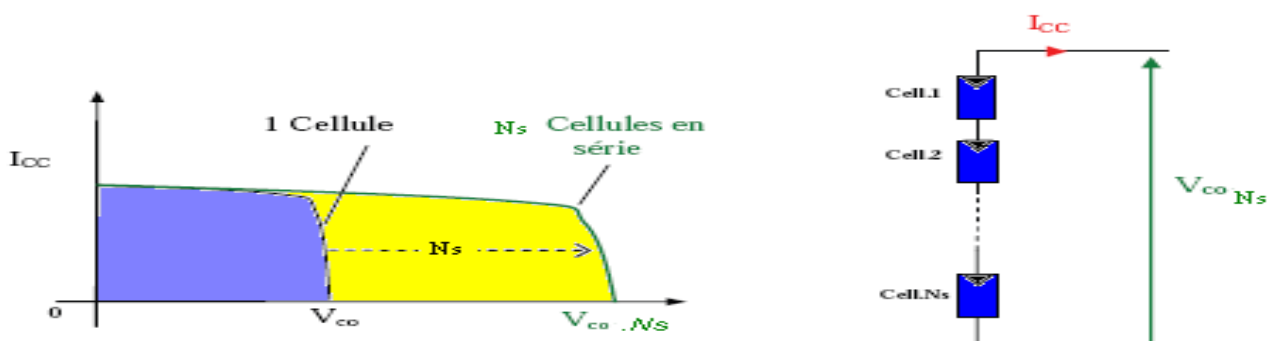
$$V_{co} = N_s * V_{co} \quad 1.7$$

Avec :

V_{co} : La tension du circuit ouvert.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons}=0.6V*36=21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle

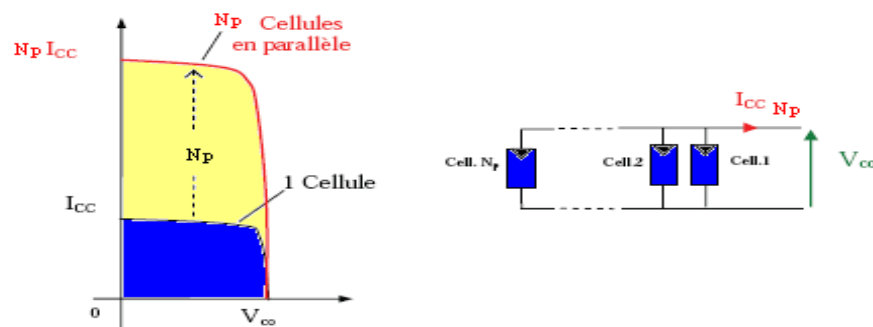


d'une tension de batterie de 12V. [11]

Figure I. 15 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.

I.9.3. Mise en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules 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, Figure II-16. L'équation (II-3) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p



cellules.[11]

Figure I. 16 : Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

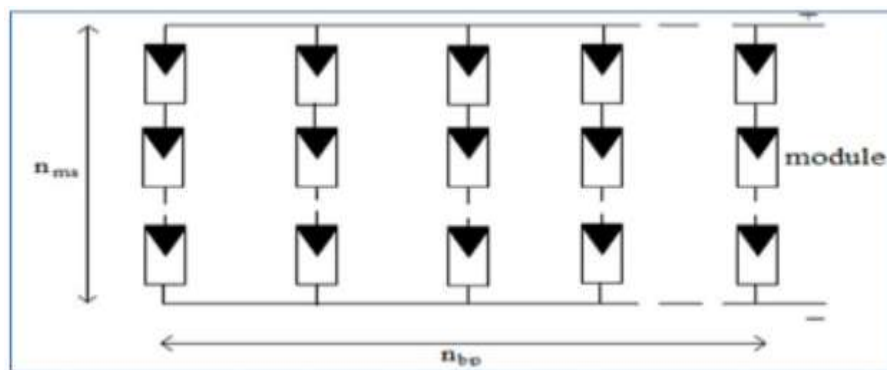
$$I_{cc} = N_p * I_{cc} \quad 1-8$$

Avec :

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

I.9.4. Association série-parallèle :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un



groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.

Figure I. 17 : Association mixte des modules solaires.

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (N_s , N_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison). La puissance du générateur PV sera optimal si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{op} et d'un courant optimal noté I_{op} . Pour réduire les dysfonctionnements, les fabricants ont choisi de ne pas commercialiser des cellules PV seules. Ainsi, les générateurs PV se trouvent souvent sous forme de modules pré-câblés, constitués de plusieurs cellules, aussi appelés par abus de

langage panneaux PV. Chaque référence de module a ses propres caractéristiques électriques garanties à ± 10 % selon le lot de fabrication.

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.[11]

I.10. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.10.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans. [12]

I.10.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation

dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication. [12]

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques comme la cellule, le module photovoltaïque et le panneau solaire, on a également expliqué le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi-que ses types. Ensuite, on a présenté la structure des panneaux photovoltaïques plus les différents types des systèmes photovoltaïques pour l'habitat.

Chapitre II

Les convertisseurs DC-DC et la commande MPPT

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les convertisseurs DC-DC en termes généraux, définition et leur fonctionnement etc. En particulier l'Hacheur SEPIC utilisé dans ce travail. Ainsi, on va parler de la commande MPPT globalement qui sera implémentée dans notre circuit afin de bien estimer les meilleurs résultats de notre simulation du PV.

Les convertisseurs continus - continu ou commercialement appelés DC-DC constituent une partie essentielle des alimentations de puissance. En effet, on trouve ces convertisseurs dans de nombreuses applications à différents niveaux de puissance. [13]

Les convertisseurs DC-DC ont donc un rôle très important dans les systèmes de conversion d'énergie. Pour ce type de fonction, plusieurs topologies de circuits sont proposées. Nous pouvons les classer généralement par les topologies simples, qui sont les convertisseurs DC-DC de second ordre du point de vue de la modélisation mathématique, et les topologies complexes, qui sont ceux d'ordre plus élevé. Pour les topologies simples, nous citons les convertisseurs de second ordre de type Buck (abaisseur), Boost (élevateur) et Buck-Boost (abaisseur-élevateur et inverseur). Pour ceux d'ordre élevé, nous citons les convertisseurs Cük et SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) de quatrième ordre. Du point de vue de l'électronique de puissance, chacun de ces convertisseurs a des avantages et des inconvénients.

Parmi les convertisseurs DC-DC de base, le SEPIC présente beaucoup d'avantages et très peu d'inconvénients par rapport aux autres. En effet, cette topologie SEPIC présente plusieurs éléments intéressants. Le premier et le plus important, est le fonctionnement abaisseur - élevateur avec une tension de sortie ayant la même polarité que la tension d'entrée. Ensuite, la commande de l'interrupteur est référencée par rapport à la masse, ce qui simplifie l'électronique de commande rapprochée de l'interrupteur (MOSFET, IGBT, ...). Pour cela, il peut aussi parfois être préféré pour les applications de correction du facteur de puissance pour la famille des convertisseurs AC-DC. [14]

II.2. Définition convertisseur DC-DC :

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide

de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté et d'avoir une tension de sortie continue réglable. Pour cela les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. [15]

II.3. Rôle des convertisseurs DC-DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors sont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance. La (figure II-1) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge. [16]

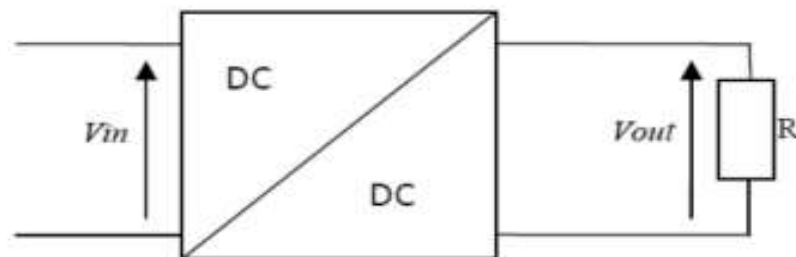


Figure II. 1 : Convertisseur DC/DC.

II.4. Les différents types des hacheurs

Il existe plusieurs différents types des convertisseurs DC-DC, dans en trouve :

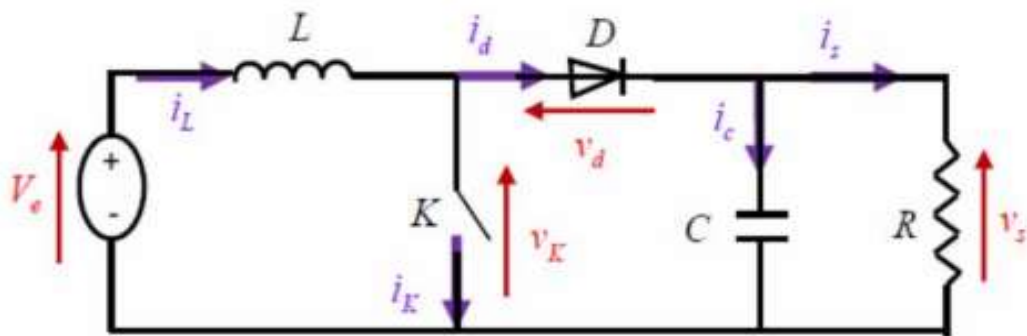
II.4.1. Le Convertisseur Boost

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur élevée. Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (exemple : transistor) et d'une diode D. L'interrupteur k est commandé par un signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI), de période de

découpage fixe T de t de rapport cyclique variable α . Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αT de t ouvert de αT à T , On distingue deux modes de fonctionnement :

- Le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue).
- Le courant dans l'inductance ne s'annule pas (conduction continue).

A cet effet, on s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure (II-2) illustre le principe du fonctionnement de ce convertisseur. La figure (II-3) présente les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des

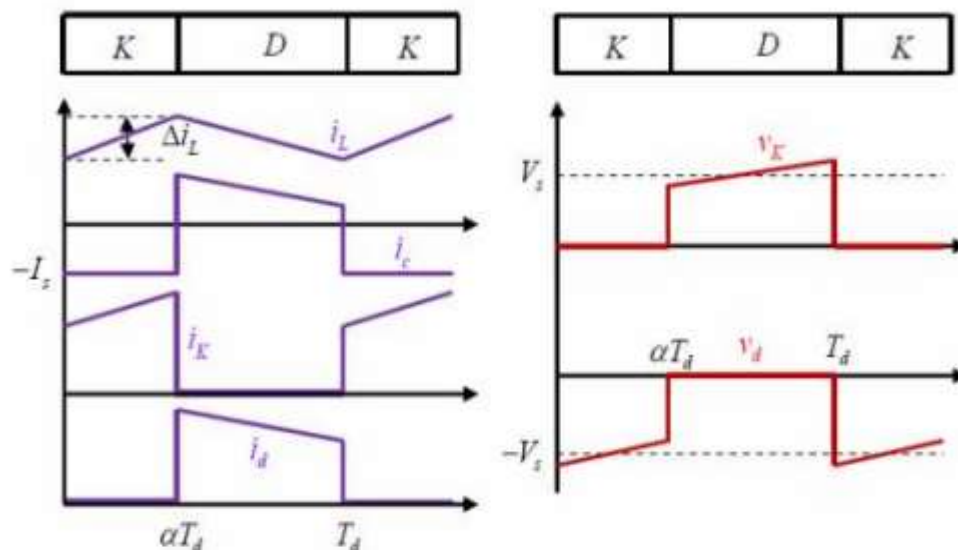


courants (à gauche) et des tensions (à droite). [17]

Figure II. 2 : Schéma de base d'un convertisseur Boost. [17]

Figure II. 3 : Formes d'ondes des courants et des tensions du convertisseur Boost. [17]

Lorsque K est fermée et D est ouvert durant l'intervalle $[0, \alpha T_d]$, le circuit électrique du convertisseur est présenté dans la figure (II-4) :



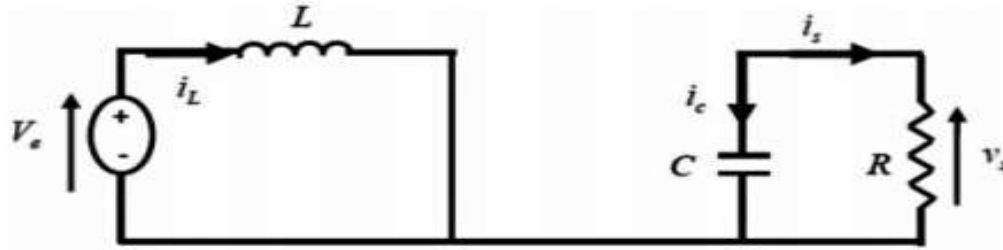


Figure II. 4 : Circuit équivalent de Boost quand K est fermée.

On a les équations suivantes :

$$Ve = L \frac{di_L}{dt} \tag{2.1}$$

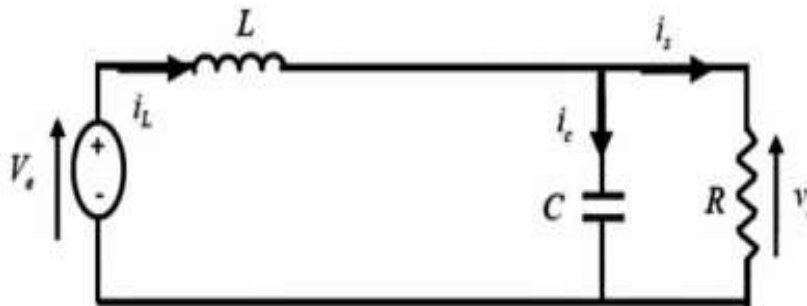
$$i_L = I_{min} + \frac{Ve(t)}{L} \tag{2.2}$$

Avec I_{min} représente la valeur minimale de courant dans l'inductance.

On a à l'instant $t = \alpha T_d$, le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance I_{max} suivant la formule 2-2 :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{Ve}{L} \alpha T_d \tag{2.3}$$

Ainsi, dans le cas où K est ouvert et D est fermée durant l'intervalle $[\alpha T_d, T_d]$, le circuit



électrique devient alors, représenté par la figure (II-5) :

Figure II. 5 : Circuit équivalent de Boost quand K est ouvert. [17]

On a les équations (2-4) et (2-5) suivantes :

$$L \frac{di_L}{dt} = Ve + Vs \tag{2.4}$$

$$i_L = I_{max} + \frac{Ve - Vs}{L} (t - \alpha T_d) \tag{2.5}$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{\min} comme suit :

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad 2.6$$

Avec $\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min}$: représente l'ondulation du courant dans l'inductance. Ceci dit, l'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (2-3) et (2-6) donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad 2.7$$

D'après l'équation (2-7) on peut contrôler la valeur moyenne de la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension. En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance :

$$i_L = \frac{1}{1-\alpha} I_s \quad 2.8$$

On exprime l'ondulation du courant dans l'inductance d'après l'équation (2-3) :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad 2.9$$

Avec f la fréquence de découpage.

Pendant l'intervalle $[0, \alpha T_d]$ seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, ce qui donne l'équation:

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_s \quad 2.10$$

$$\Delta V_s = \alpha \frac{I_s}{C f} = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha) R.C.f} \quad 2.11$$

II.4.2. Le Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible. On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur Buck. La figure (II-6) illustre le principe de fonctionnement de ce convertisseur. Ainsi, la figure (II-7) donne les intervalles de conduction

de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite). [17]

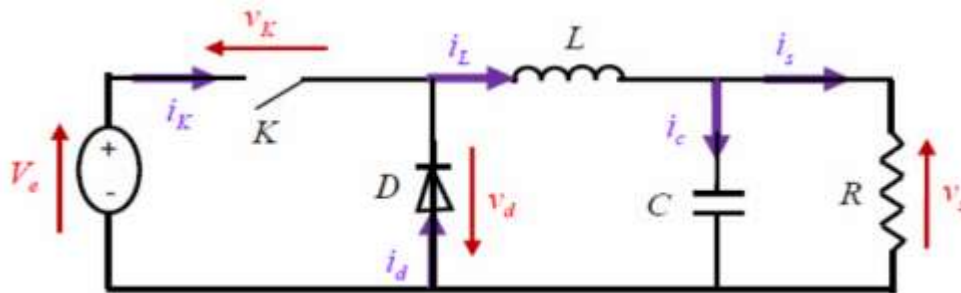


Figure II. 6 : Schéma de base d'un convertisseur Buck. [17]

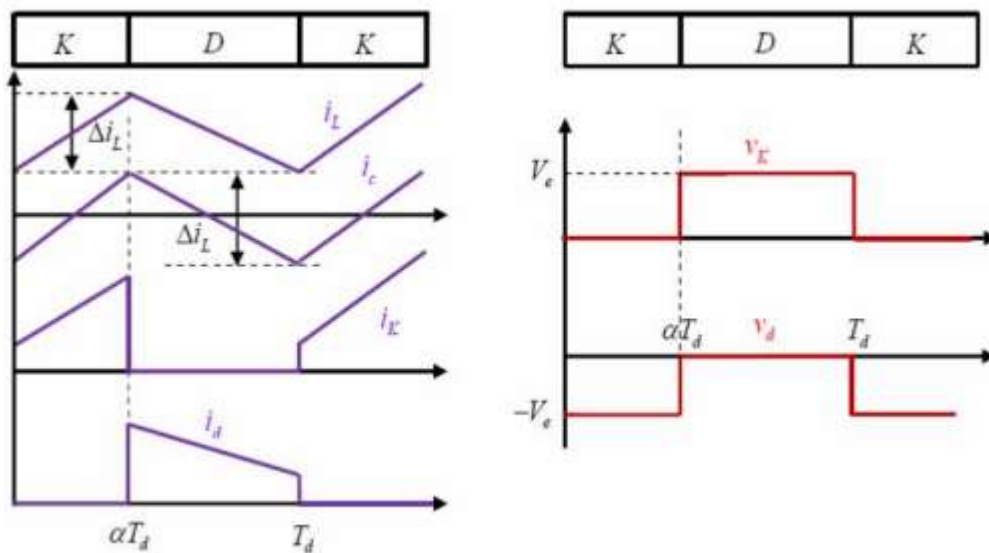
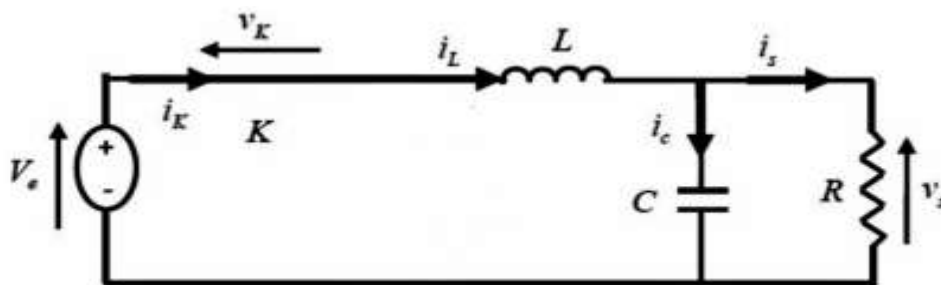


Figure II. 7 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck [17].

Lorsque K est fermée et D est ouvert durant l'intervalle $[0 \alpha T_d]$, le circuit électrique du



convertisseur sera comme montré dans la figure (II-8) :

Figure II. 8 : Circuit équivalent du Buck quand K est fermée.

$$V_e = (L \frac{di_L}{dt}) + V_s$$

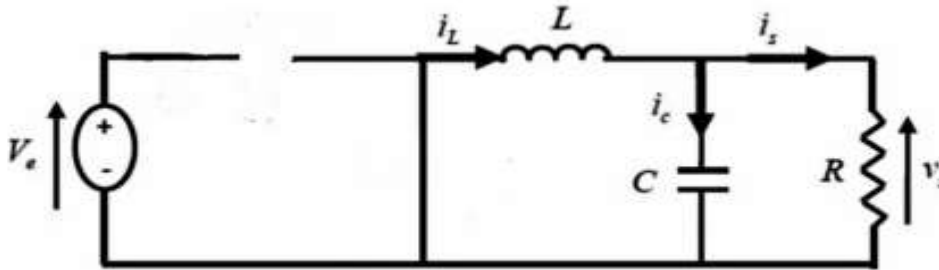
2.12

$$I_L = I_{\min} + (V_e - V_s) / L T_d \quad 2.13$$

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance I_{\max} .

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T_d \quad 2.14$$

Lorsque K est ouvert et D est fermée durant l'intervalle $[\alpha T_d, T_d]$, le circuit électrique devient



alors, voir la figure 2-9 :

Figure II. 9 : Circuit équivalent du Buck quand l'interrupteur est ouvert. [17]

On a les équations : $L \frac{di}{dt} = -V_s \quad 2.15$

$$I_L = I_{\max} - \frac{V_s}{L} (1 - \alpha T_d) \quad 2.16$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{\min} exprimé comme suit :

$$I_{\min} = I_{\max} - \frac{V_s}{L} (1 - \alpha) T_s \quad 2.17$$

Avec : $\Delta i_L = I_{\max} - I$, représente l'ondulation du courant dans l'inductance.

L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (2.14) et (2.17), on obtient la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \alpha V_e \quad 2.18$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance comme suit :

$$I_L = I_s \quad 2.19$$

On conclue que le convertisseur est abaisseur en tension.

Ainsi, on définit l'ondulation du courant dans l'inductance comme suit :

$$\Delta i = \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{Lf} \tag{2.20}$$

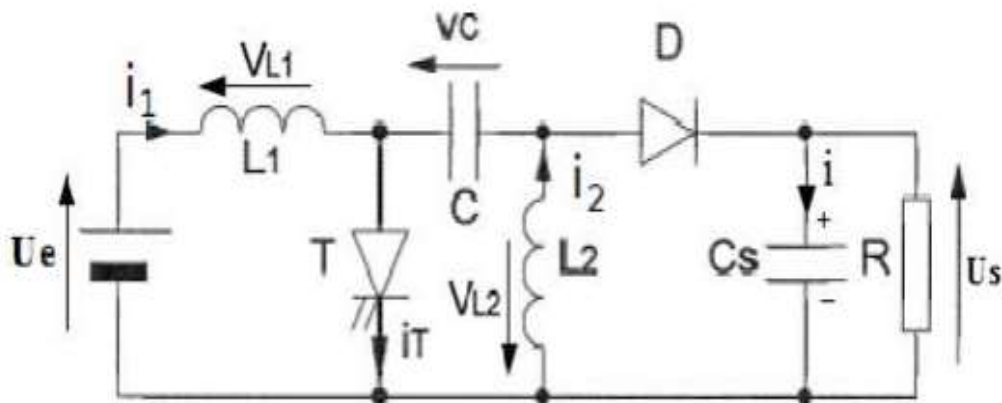
Et l'ondulation de la tension de sortie par la formule :

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i}{8cf} = \frac{\alpha(1-\alpha)V}{8CLf} \tag{2.21}$$

II.5. Le convertisseur SEPIC

II.5.1. Définition

Le convertisseur **SEPIC** (Single Ended Primary Inductor Converter) a été conçu à la fin des années 1970 par Slobodan Cuk. La structure du hacheur **SEPIC** se déduit du hacheur capacitif dit hacheur Cuk par permutation de la diode et de l'inductance de sortie. Il présente des caractéristiques similaires à celle du hacheur Cuk, à l'exception qu'il est non inverseur de tension. La tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur **SEPIC** est composé de deux inductances L1 et L2. Elles peuvent être bobinées sur le même circuit magnétique, cela permet de gagner de la place sur le PCB et à tendance à couter moins chère que deux inductances séparées. La tension de sortie dépend du rapport cyclique appliqué à l'interrupteur K. La topologie du **SEPIC** est appropriée pour les applications de charge de batteries et pour la correction du facteur de puissance (PFC) grâce à



l'inductance en série avec la source. [18]

Figure II. 10-a : Schéma de base d'un convertisseur SEPIC basique. [18]

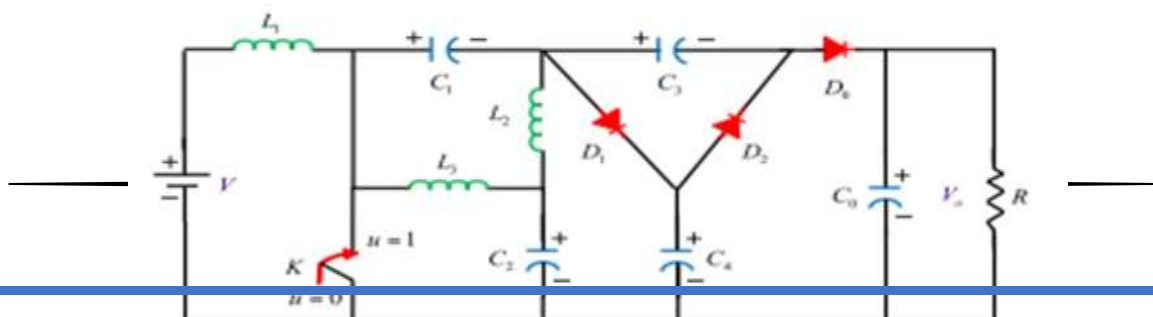


Figure II. 11-b : Schéma de base d'un convertisseur SEPIC a gain en tension élevé. [40]

II.5.2. Principe de fonctionnement de convertisseur SEPIC a gain en tension élevé

L'étude se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur K et la diode.

.De 0 à αT : Phase d'accumulation d'énergie.

On ferme l'interrupteur K. les diodes D1 et D0 se met désactivées et D2 conduit, le courant traversant L1 va augmenter linéairement, l'énergie est stockée dans L1. L'énergie contenue dans le condensateur C1 passe dans l'inductance L2, et celle du condensateur C2 vers la charge. La tension est maintenue constante par le condensateur C2. [18]

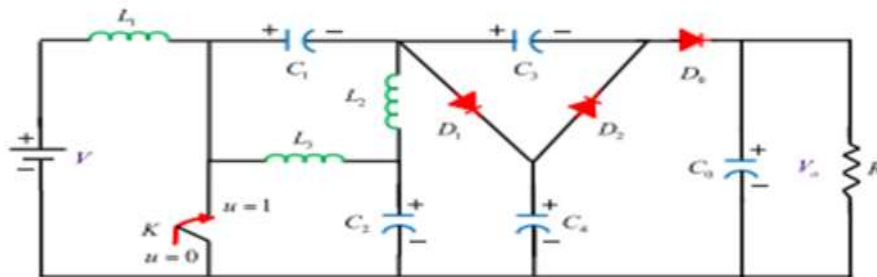


Figure II. 12 : SEPIC avec K fermé. [40]

.De αT à T : Phase de roue libre.

On ouvre l'interrupteur K, ainsi les diodes D1 et D0 conduisent, D2 est désactivée. L'énergie emmagasinée dans l'inductance L1 est restituée dans le condensateur C1. L'énergie dans L2 est transférée vers C2.

On obtient : $[V = V_{c4} + V_{L1}]$. [40]

Dans la théorie, D prend les valeurs entre 0 et 1. Le gain en tension est entre 2 et l'infinie. Mais en pratique D est entre 0.1 et 0.9, ce qui implique que le gain en V peut prendre les valeurs entre 2.22 et 20. Cela montre que le SEPIC modifié fonctionne parfaitement en gain tension élevé mais pas dans le cas inverse. [40].

II.6. Dimensionnement d'un convertisseur SEPIC

Seul le fonctionnement en conduction continue du convertisseur est étudié, c'est-à-dire que le courant dans l'inductance ne s'annule jamais en zéro avant la fin d'un cycle de fonctionnement. Du fait de la complexité de ce hacheur, nous ne l'étudierons pas phase par

phase. Nous utiliserons seulement les équations finales permettant de dimensionner les éléments du convertisseur [18].

II.6.1. Rapport cyclique

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{(V_{out} + V_d)}{V_{in} + V_{out} + V_d} \quad 2.22$$

Avec : V_{IN} la tension d'entrée, V_{OUT} la tension de sortie et V_D la tension de seuil de la diode. Avec un rapport cyclique proche de 50%, la tension d'entrée est égale à la tension de sortie, le gain est unitaire.

Le rapport cyclique varie en fonction de la tension d'entrée appliquée afin d'avoir une tension de sortie constante. Ainsi le rapport cyclique maximal est :

$$\alpha_{max} = \frac{V_{out} + V_d}{V_{IN(min)} + V_{out} + V_D} \quad 2.23$$

II.6.2. Inductances

Les valeurs des inductances sont déterminées principalement par l'ondulation de courant acceptée. Généralement, on autorise une ondulation de 40% du courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est définie par l'équation suivante : [18]

$$\Delta i_L = I_{in} * 40\% + I_{out} * \frac{V_{out}}{V_{in(min)}} * 40\% \quad 2.24$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{in(min)}}{V_i L * f} * \alpha_{max} \quad 2.25$$

Si les inductances L_1 et L_2 sont bobinées sur le même circuit magnétique, les valeurs d'inductances sont remplacées par $2L$ à cause de la mutuelle inductance. Les valeurs d'inductances sont alors :

$$L_1' = L_2' = \frac{L}{2} = \frac{V_{in(min)}}{2 * V_i L * f} * \alpha_{max} \quad 2.26$$

II.6.3. Condensateur de couplage

Le condensateur de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace, donné par :

$$I_{C1(RMS)} = I_{OUT} * \sqrt{\frac{V_{out} + V_d}{V_{in(min)}}} \quad 2.27$$

II.6.4. Condensateur de filtrage

Le condensateur C2 à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donné par [18]:

$$C2 = \frac{I_{out} * \Delta V}{V_r * 0.5 * f} \quad 2.28$$

Avec :

- I_{out} : le courant dans la charge.
- V_r : l'ondulation de tension.

II.6.5. Transistor

Le transistor doit être capable de supporter une tension égale à $V_{IN} + V_{OUT}$, et être traverser par un courant crête égal à $I(peak) = I_{L1}(peak) + I_{L2}(peak)$. Le courant efficace est donné par:

$$I_{k(rms)} = I_{OUT} * \sqrt{\frac{(V_{out} + V_{in(min)} + V_D) * (V_{out} + V_D)}{V^2_{in(min)}}} \quad 2.29$$

II.6.6. Diode

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant $I(peak) = I_k(peak)$. Elle doit résister à une tension inverse de $V_{IN}(min) + V_{OUT}(max)$. Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie I_{OUT} . Il faudra veiller à ce que la puissance dissipée par la diode soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations. Il est recommandé de choisir des diodes Schottky pour limiter ses pertes. [18]

II.6.7. Les pertes joules

Un composant électronique traversé par un courant électrique produit de la chaleur par pertes par effet joule. Lorsque ce courant est élevé, cette chaleur est perceptible. Ces pertes sont de deux types : [18]

- Les pertes par conduction.
- Et les pertes par commutation.

	Transistor MOSFET	Diode
Pertes par conduction	$R_{ds_{on}} * I_{Deff}^2$	$V_F < I_F > + R_0 * I_F^2$
Pertes par commutations	$\frac{1}{2} * V_{Ds} * I_D * (t_r + t_f) * f$	$Q_{rr} * V_r * f$

Tableau II. 1 : Types de pertes dans les composants électroniques. [18]

Il arrive que les pertes par commutation soient supérieures aux pertes par conduction. En particulier lorsque la fréquence est élevée. Les pertes par conduction tendent à diminuer compte tenu de l'évolution des semi-conducteurs et de la diminution de la valeur de la résistance interne $R_{ds_{on}}$ dans le cas de MOSFET.

Ces pertes peuvent être supérieures à la puissance maximale dissipée par le semi-conducteur. Cette puissance dépend de la température ambiante, conventionnellement 25°C, de la température maximale de la jonction ($T_{(v-j) \max}$) et de la résistance thermique jonction-boîtier ($R_{th(j-c)}$), elle est définie par la relation suivante. [18]:

$$P_{tot} = \frac{T_{(v-j) \max} - 25}{R_{th(j-c)}} \quad 2.30$$

Si la température dépasse $T_{(v-j) \max}$, la puissance dissipée est nulle, et la jonction est détruite. Afin de maintenir la température du composant acceptable, il est nécessaire de monter un dissipateur thermique ou un radiateur sur le composant. Dans ce cas :

$$P_D = (T_{(v-j)} - T_{amb}) / R_{th(j-amb)} \quad 2.31$$

L'écart entre les deux températures se calcule en appliquant la loi d'Ohm-thermique. La puissance maximale dissipée est [18]:

$$P_D = (T_{(v-j)} - T_{amb}) / (R_{th(j-c)} + R_{th(c-r)} + R_{th(r-amb)}) \quad 2.32$$

A partir de cette formule, on en déduit la valeur de la résistance thermique du dissipateur. [18]:

$$R_{th(r-amb)} = ((T_{(v-j)} - T_{amb}) / P_D) - (R_{th(j-c)} + R_{th(c-r)}) \quad 2.33$$

La valeur calculée de $R_{th(r-amb)}$ permet de choisir le dissipateur thermique adéquat pour le montage.

II.7 La commande MPPT (Maximum power point tracking) :

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximal. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur photovoltaïque et le récepteur un hacheur commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT.

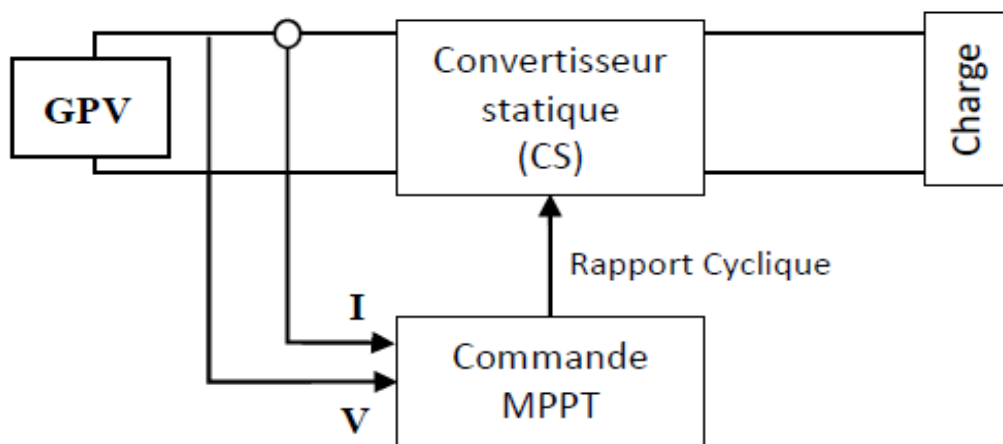


Figure II. 13 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur une commande MPPT et une charge. [19]

Cette commande fait varier le rapport cyclique du convertisseur de telle sorte que la puissance fournie par le GVP soit la P_{max} disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur jusqu'à se placer sur le MPP en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du convertisseur (I_{pv} et V_{pv}). La MPPT est donc utilisé pour les objectifs suivants :

- Forcer le système à fonctionner au visionnage du MPP malgré les changements de l'environnement, c'est à dire fournir un bon rendement de conversion.
- Maintenir la poursuite dans une large gamme de variation des conditions de l'environnement. Dans la section suivante, nous présentons un aperçu sur les différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature. [19]

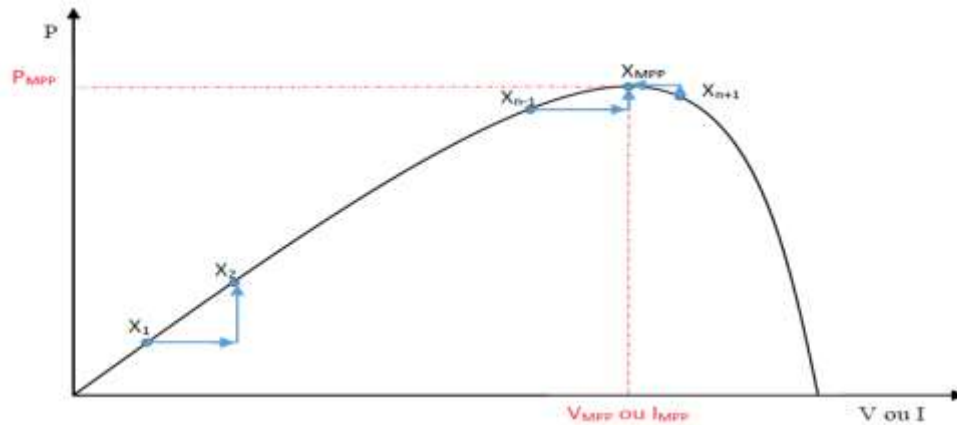


Figure II. 14 : Principe de la commande MPPT. [19]

II.7.1 Classification Des Commandes MPPT :

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. [20]

II.7.1.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :

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

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb & Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{cc}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction. [20]

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du CS :**

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

systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial. [20]

II.7.1.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :

- **MPPT indirect :**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. [20]

- **MPPT direct :**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP.

Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. [20]

II.7.2 les algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer.

II.7.2.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) :

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert VOC et la relation linéaire approximative (2.34) liant cette tension avec la tension de point maximal V_{MPP} du GPV [21-22]

$$V_{MPP} = K_1 * V_{OC} \quad 2.34$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité. Il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que k_1 est déterminé, le V_{MPP} peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (2.34) avec V_{OC} mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension V_{mpp} est alors prise comme tension de référence.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle V_{PV} et la tension de référence V_{ref} (V_{mpp}). Le signal d'erreur est traité pour rendre $V = V_{ref}$ (Figure II.15).

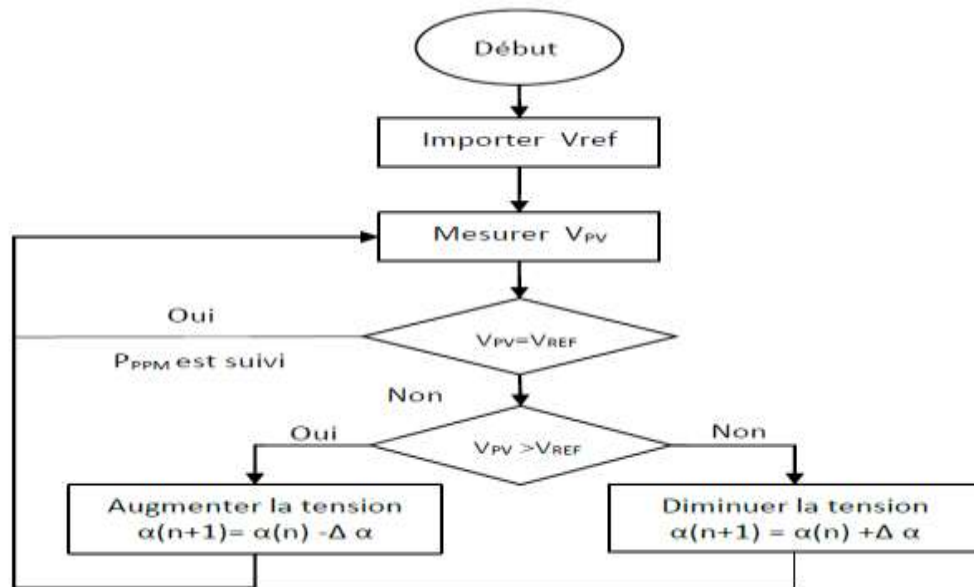


Figure II. 15 : Algorithme de la Tension Constante. [23]

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire [21]. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension Voc. Toute en considérant la perte de puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV. [23]

II.7.2.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current):

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{sc} (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (2.35) liant cette courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV : [22]

$$I_{mpp} = k_2 * I_{sc}$$

2.35

Avec k_2 constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV, k_2 est déterminée pour le GPV utilisé. La constante k_2 est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [24]. La mesure du courant ISC durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant ISC à l'aide d'un capteur de courant.

Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrémenté en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (IMPP) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance [21]. (Figure II-16) :

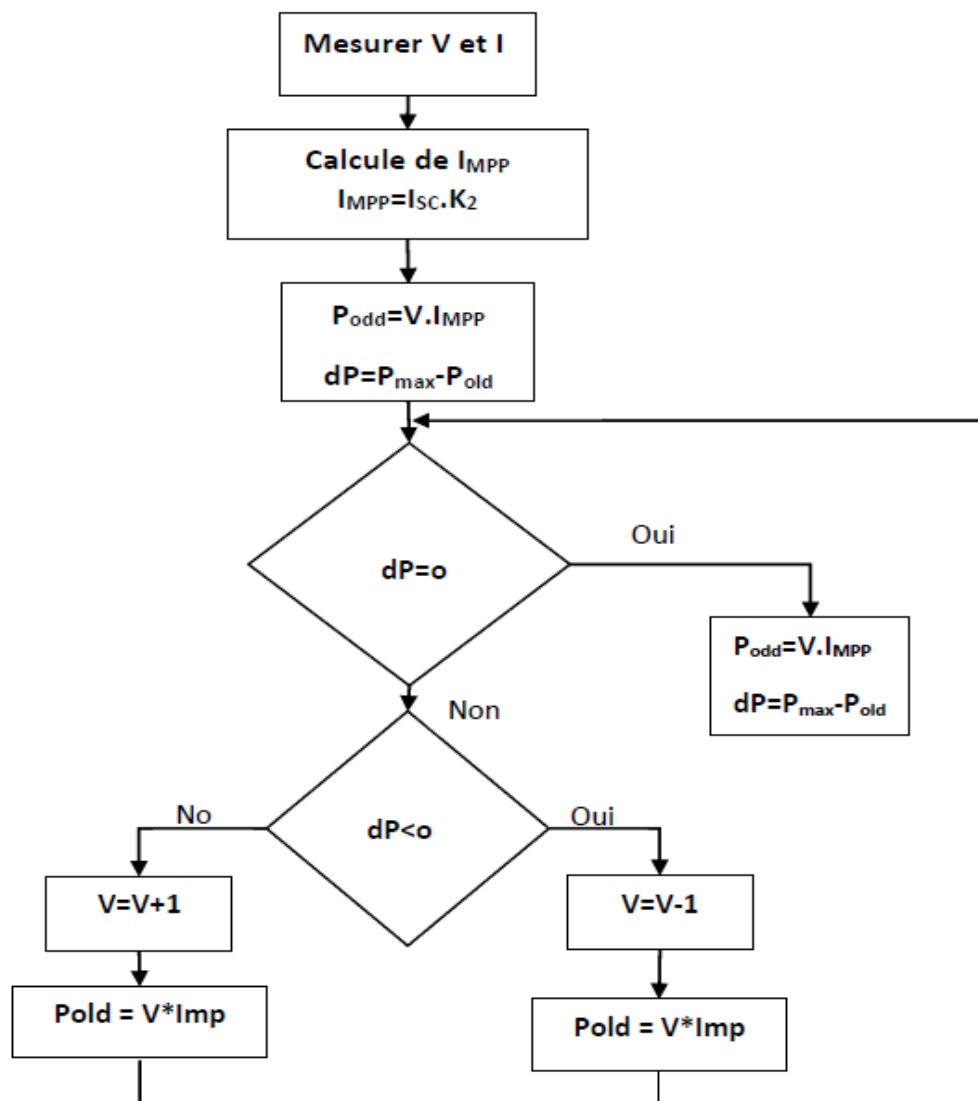


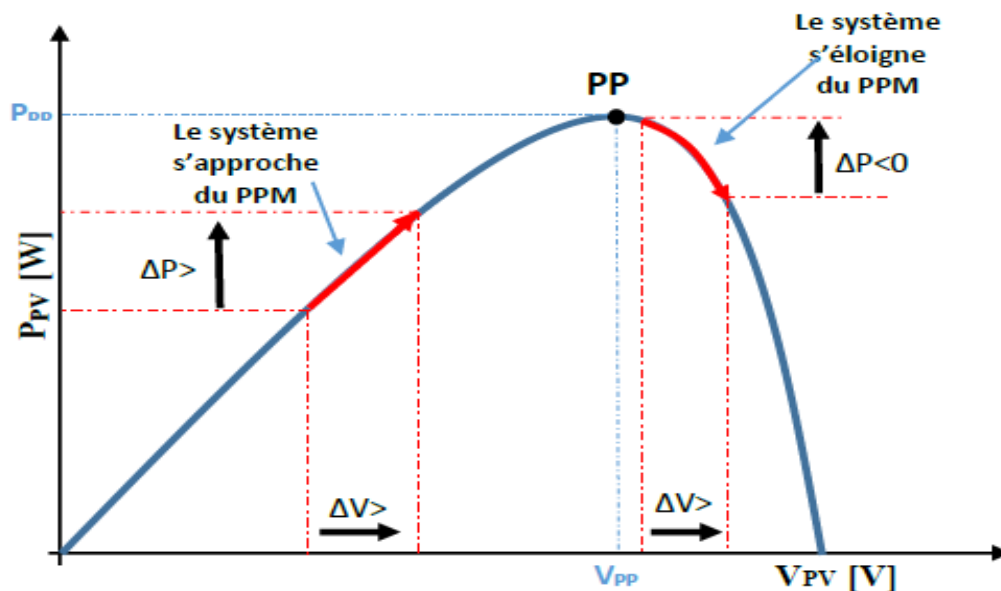
Figure II. 16 : Algorithme du constant courant. [21]

II.7.2.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) :

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [25]. Cependant, la

variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

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. (Figure II.17) montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande



approprié. [26]

Figure II. 17 : Recherche du PPM par la méthode (P&O). [26]

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV)

sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés. [24]

La Figure II-18 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

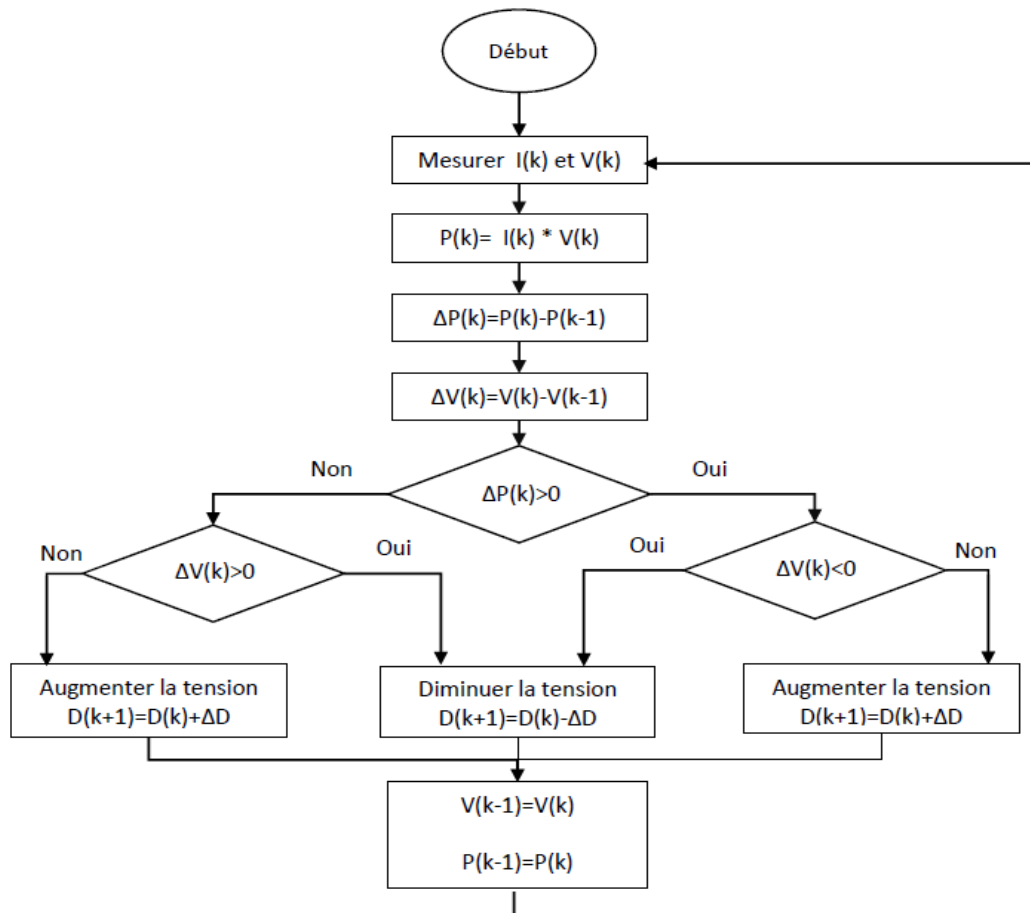


Figure II. 18 : l'algorithme de P&O classique. [27]

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation, [27] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure II.23. Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P_1 à P_2 , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. [24]

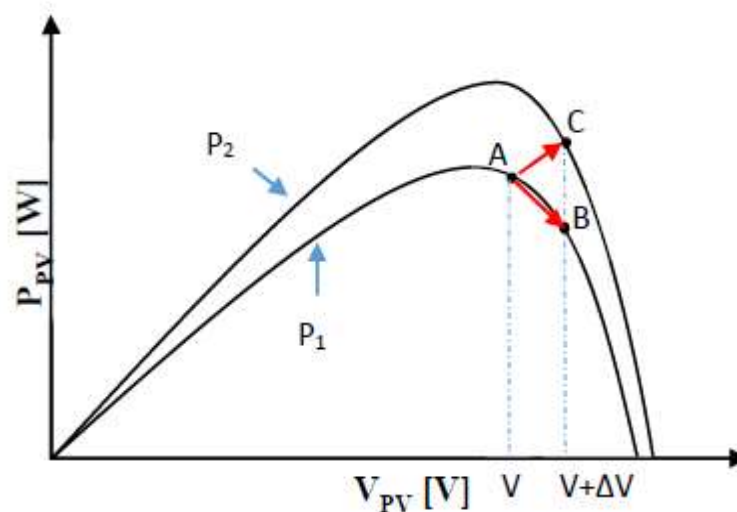


Figure II. 19 : Divergence de la méthode P&O. [28]

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

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la (Figure II.19) avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [28].

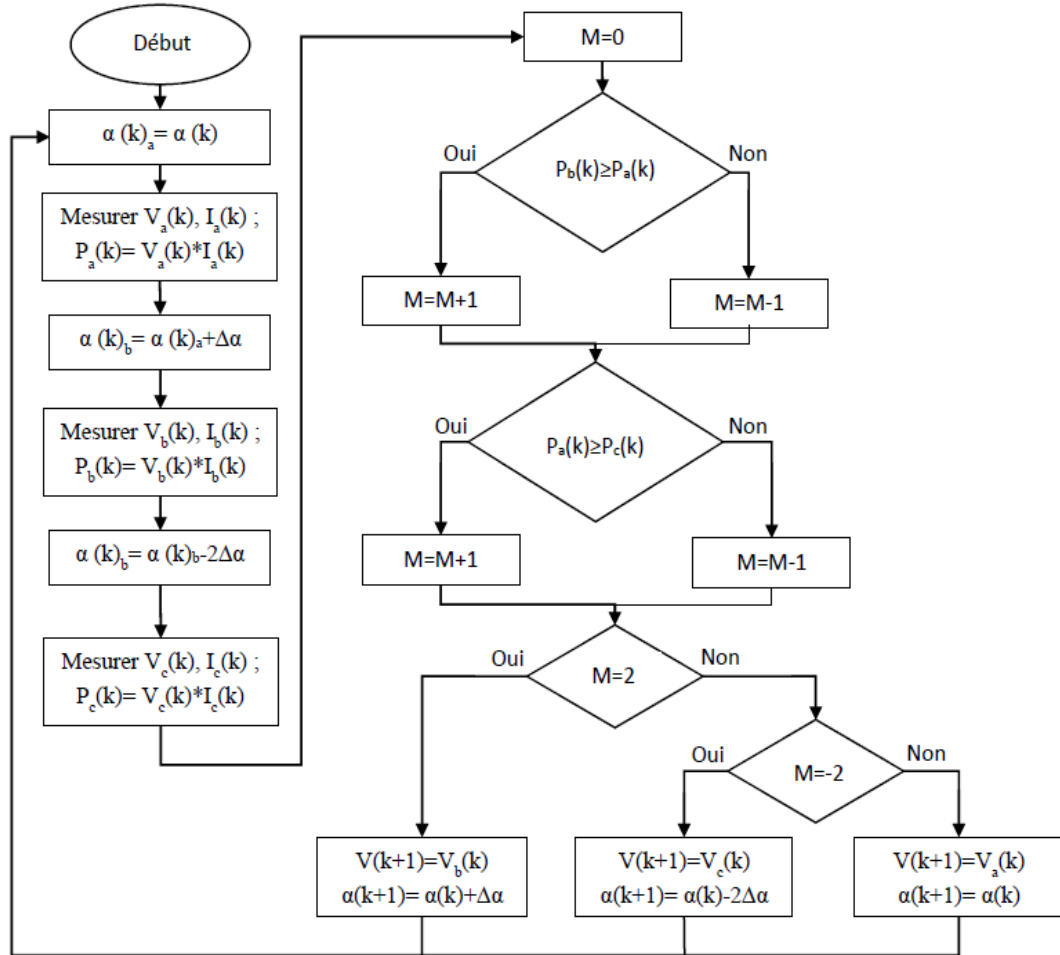


Figure II. 20 : algorithme du poids d'un troisième point. [29]

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode p&o classique sauf que le pas de perturbation est variable. Où plusieurs échantillons de puissance Ppv est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manier qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. Certaine étude propose que le pas soit :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \frac{p(k) - p(k-1)}{v(k) - v(k-1)}$$

2.36

II.7.2.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance) :

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad 2.37$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad 2.38$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (**PPV**) par rapport à la tension (**VPV**) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite [21].

La Figure II.21 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 sur la droite du PPM.

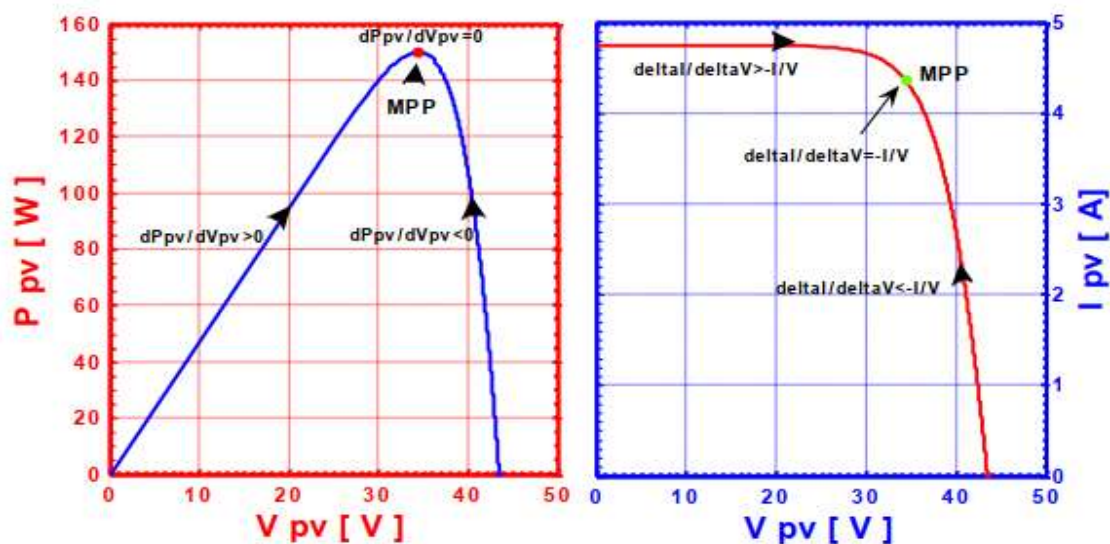


Figure II. 21 : Positionnement du point de fonctionnement ($G=1\text{kW/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).

L'algorithme IC se résulte en dérivant la puissance du panneau par rapport à la tension et en mettant les résultats à zéro.

Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d[V_{pv} \cdot I_{pv}]}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad 2.39$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = - \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad 2.40$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance :

- Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > - \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = - \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < - \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$), comme l'illustre l'algorithme de la (figure 2.25). V_r correspond à la tension de référence et force le **GPV** à fonctionner à cette valeur.

Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale **VOPT**. Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{PV} .

Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la Figure II-22 :

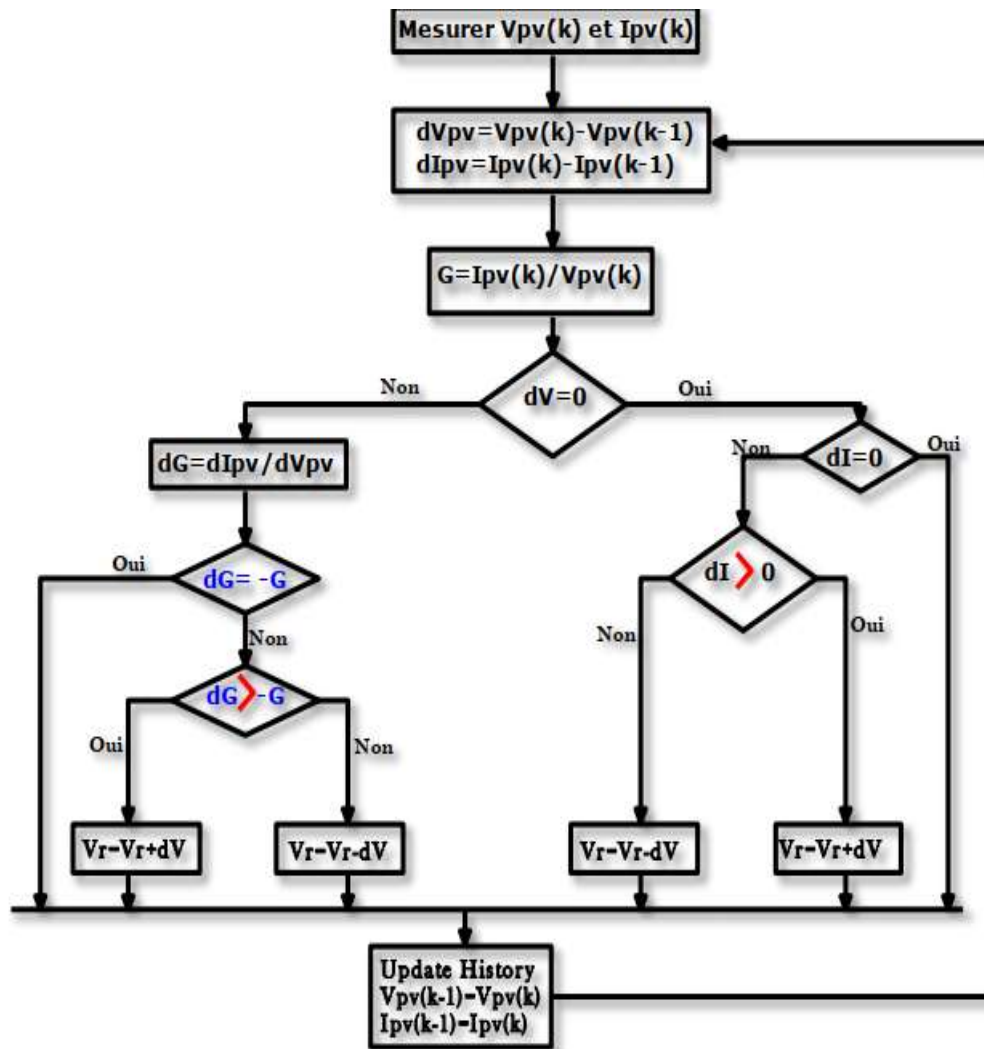


Figure II. 22 : Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN). [30]

II.7.2.5 La Commande MPPT Flou :

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy-Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [39-40]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

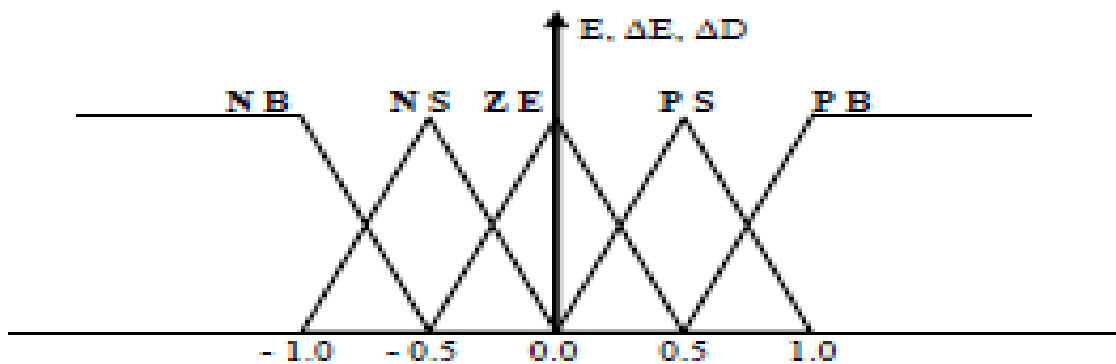
Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta \alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. [29]

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

- *la fuzzification.*
- *la lecture de la table de vérité.*
- *la défuzzification.*

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

- NB : Négative Big,
- NS : Négative Small,
- ZE : Zéro,
- PS : Positive Small,
- PB : Positive Big.



Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en figure II-23 :

Figure II. 23 : Structure de base de la commande floue.

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

$$\mathbf{E(n)} = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad 2.41$$

$$\Delta \mathbf{E(n)} = \mathbf{E(n)} - \mathbf{E(n-1)} \quad 2.42$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le Tableau 2.2. Une valeur est attribuée au paramètre de sortie ΔD :

Tableau II. 2 : Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

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

La variable linguistique assignée à ΔD , dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie ΔD est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. [30]

En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un **PPM**. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à ΔD s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La défuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie ΔD , afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. Noppadol Khaehintung a démontré en 2004 que l'emploi d'une commande **MPPT** basée sur le principe de la logique floue permet d'améliorer d'un facteur 8 le temps de réponse par rapport à une commande P&O classique.

Dans cet article, aucune indication n'est donnée sur la variable d'incrément, mais après analyse des relevés, on en déduit que celle-ci est relativement petite car les oscillations autour du PPM. Sont très faibles expliquant la différence en termes de réponse dynamique. Un phénomène secondaire à prendre en compte est le temps mis par cette commande pour se stabiliser sur un nouveau PPM. La commande floue met 1,75 s pour s'immobiliser sur le PPM, alors que la commande P&O s'y positionne au bout de 1,25s, c'est-à-dire dès qu'elle l'a atteint.

Une comparaison plus fine est donc nécessaire pour affirmer les gains de ce nouveau type de commande à l'algorithmique de base très complexe.

La commande logique floue est comparée directement à la méthode Hill Climbing. Les différents oscillogrammes montrent que le temps de réponse est légèrement amélioré, par contre l'erreur statique obtenue est relativement faible. Ici, contrairement à l'exemple cité ci-dessus, la valeur de l'incrément est importante. Malheureusement la qualité des relevés ne permettent pas de déterminer avec précision le gain en termes de temps de recouvrement ainsi que le rendement de cette commande à cause d'une échelle de temps et des calibres de mesures trop grands.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité. De la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau.

Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM. Mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [30].

II.7.2.6 autres méthodes :

Il existe d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer : [31]

- Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels
- Méthode de look-up table
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de β
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

II.7.3 Critères d'évaluation d'une commande MPPT :

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de Fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance P_{in} effectivement délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe, ...). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{mppt} , permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{mppt} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad 2.43$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance est importante pour évaluer les qualités de ce type de commande.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu général sur les différentes topologies et modes de fonctionnement des convertisseurs statiques (les hacheurs), en particulier le Hacheur **SEPIC**, ce dernier est un convertisseur DC-DC indirect non réversible, à stockage capacitif qui permet d'abaisser ou d'élever la tension de sortie. Ainsi, on a parlé de la commande MPPT mécanisme et méthodes d'utilisation, qui sera implémentée dans ce système PV.

Nous avons aussi entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles

Dans le chapitre suivant, on va faire une simulation d'un système PV pour voire l'évaluation de la tension et de la puissance en sortie du convertisseur à l'aide de la commande MPPT.

Chapitre III

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

Introduction

Après avoir présenté et citer les différents composants d'un système photovoltaïque et la commande MPPT ainsi que le convertisseur DC-DC (Hacheur SEPIC), dans ce chapitre, on se propose de le modéliser puis de simuler ses composants à l'aide du logiciel « MATLAB ». Dans un premier temps, nous décrirons le modèle électrique équivalent d'un générateur PV. Ensuite, nous passerons à l'étude en simulation du convertisseur SEPIC ainsi que du système entier.

III.1. Caractéristiques (I, V) et (P, V) de la cellule solaire

La caractéristique principale de la cellule solaire est la caractéristique **I-V** qui montre comment une cellule solaire répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier de conditions d'ensoleillement et de température (figure III-1). Il y a trois points importants dans cette courbe [32]:

- Le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale (point 5).
- Le point où la tension est égale à zéro et le courant est au maximum (courant de court-circuit, point 4).
- Le point où le courant est égal à zéro et la tension est au maximum (tension de circuit ouvert, point 1) Également la caractéristique **I-V** peut être divisée en deux zones:

-Une zone où la cellule est considérée comme une source de tension (1-2).

-Une zone où la cellule est considérée comme une source de courant (3-4).

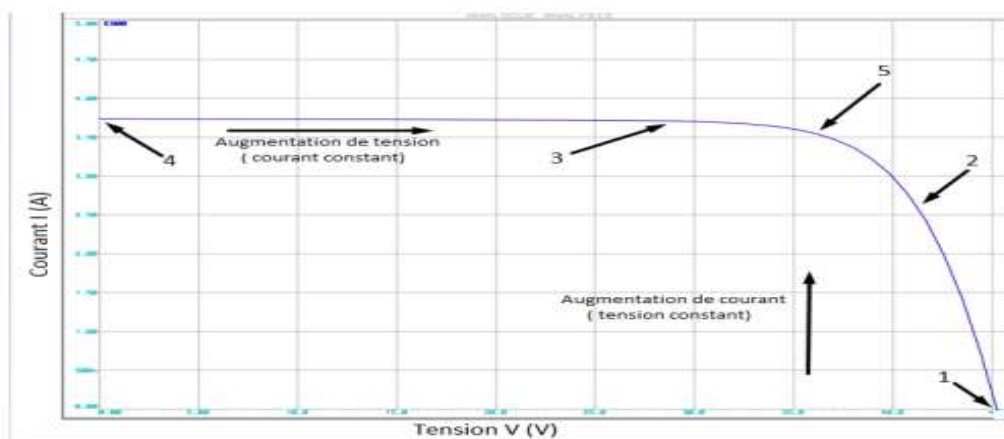


Figure III. 1 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire.

En générale, les constructeurs fournies les caractéristiques d'une cellule PV à (1000(w/m²) / 800(w/m²) / 600(w/m²) / 400(w/m²) / 200(w/m²)) et 25°C comme le montrent les deux figures (III.2) et (III.3) [33]:

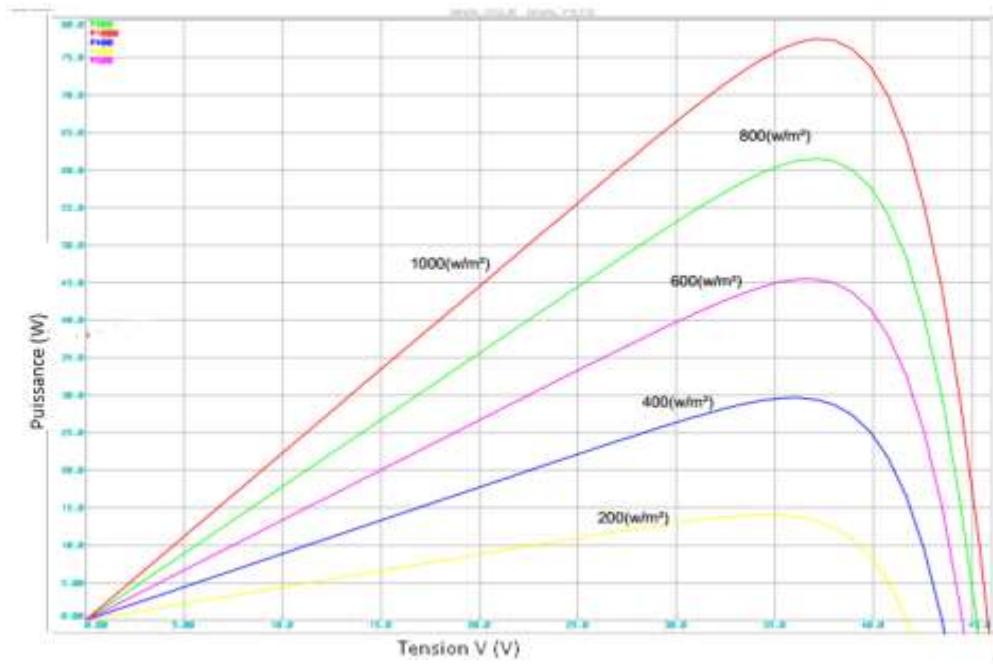


Figure III. 2 : Caractéristique d'une cellule P-V.

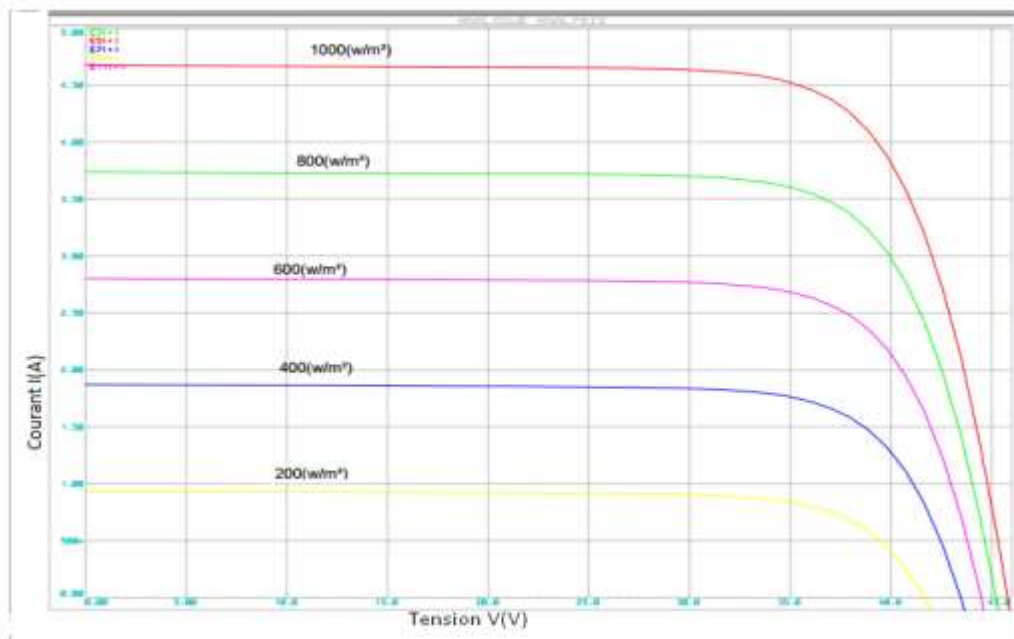


Figure III. 3 : Caractéristique I-V d'une cellule P V.

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque est donnée par le produit entre la tension de circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} et le facteur de forme FF comme le représente la formule suivante :

$$P_{max} = V_{co} * I_{cc} * FF \quad 3.1$$

III.2. Circuit équivalent d'une cellule solaire

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme étant un générateur de courant idéal en parallèle avec une diode [33].

III.2.1. Cas d'une cellule idéal

Dans le cas idéal, la cellule photovoltaïque soumise à l'éclairement et connecté à une charge qui peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (III-4), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéal [34].

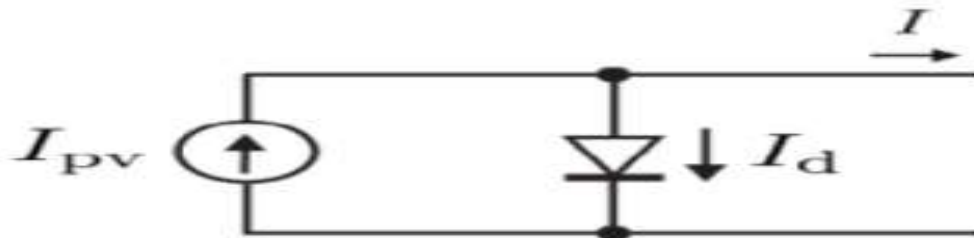


Figure III. 4 : Circuit équivalent d'une cellule idéal.

L'équation de ce modèle est bien :

$$I = I_{pv} - I_d \quad 3.2$$

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

III.2.2. Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte des effets résistifs parasites dues à la fabrication et est représenté sur la figure (III-5) :

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant I_{pv} caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s), et une résistance parallèle (R_p) [35].

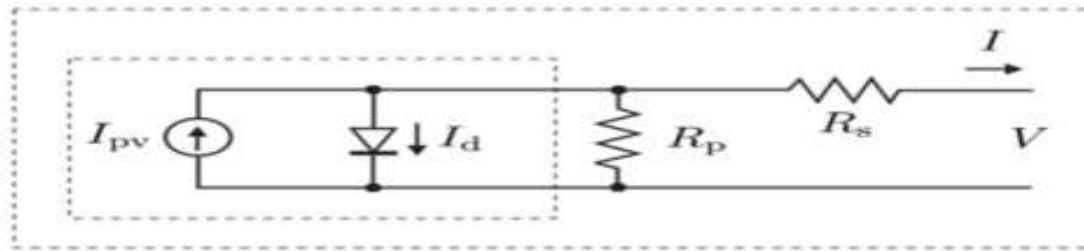


Figure III. 5 : Schéma équivalent d'une cellule PV réelle.

III.3. Modélisation d'un système Photovoltaïque (PV) sous Simulink

Dans notre travail, nous commençons par simuler un panneau PV sous Simulink dans les différentes conditions d'éclaircements et de températures. Ensuite, nous avons construit notre convertisseur DC/DC (SEPIC) et on a visualisé la tension et le courant à la sortie de convertisseur ainsi, la puissance. Et nous avons implémenté la commande MPPT dans notre circuit basé sur l'algorithme P&O, pour atteindre le MPP des caractérisés I et V, quoique ce soit les variations a l entrés de panneau solaire [36].

III.3.1 Simulation d'une cellule photovoltaïque

La simulation de panneaux photovoltaïque sous Simulink et dus aux changements des paramètres d'entrer (éclairage et température).

Dans notre application nous avons a utilisé le module PV suivant :

Array type: SUNPOWER SPR-315 E-WHT-D ; 5 series modules ; 64 parrallel string, ayant les caractéristiques suivantes (tableau 1) [36] :

Paramètre	Valeur
Courant de court-circuit I_{cc}	6.14 A
Tension de circuit ouvert V_{oc}	64.6 V
Courant maximale	5.76 A
Tension maximal	57.7 V
Puissance maximale	315.072 W

Tableau III. 1 : Caractéristique de model PV.

Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour modéliser un système photovoltaïque sous Matlab Simulink. La résolution de l'équation courant-tension $I(V)$ qui caractérise le module photovoltaïque nécessite l'utilisation de méthodes numériques. Ceci est dû au fait que cette caractéristique est non linéaire et dépend de l'éclairement solaire.

Le schéma bloc sous Simulink de la cellule photovoltaïque est représenté dans la figure suivante :

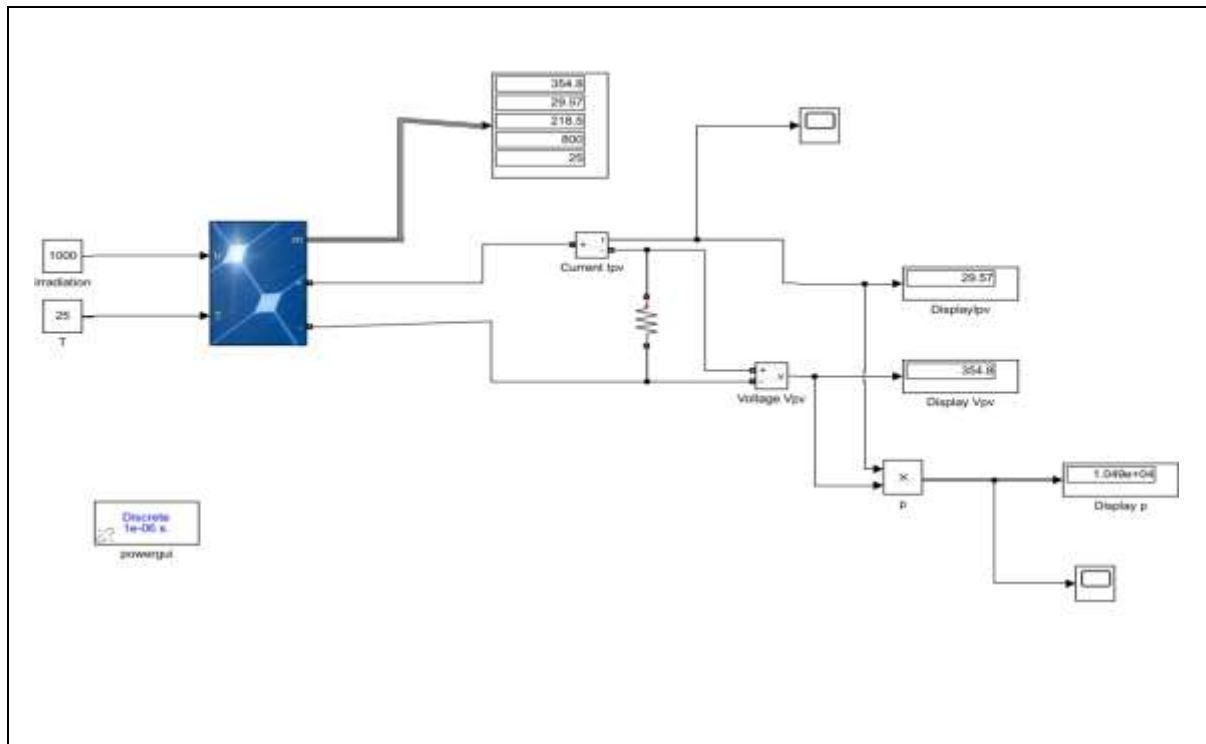


Figure III. 6 : Schéma bloc d'un panneau photovoltaïque sous matlab/Simulink.

Deux simulations seront effectuées, en premier on fait varier l'éclairement et on fixe la température, la deuxième c'est l'inverse. Et on va visualiser le courant et la tension à la sortie de panneau ainsi l'évaluation de la puissance maximale pour les valeurs suivantes :

Température [25 45 60] °C ;

Irradiation [1000 500 200] W/m² ;

On fait varier l'irradiation et on fixe la température à 25°C, Ensuite on varie la température et on garde l'irradiation à 1000 w/m².

III.3.1.1. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module

Les figures (III-7) et (III-8) présentent les résultats de la simulation des caractéristiques I-V et P-V du module photovoltaïque Soltech 1STH pour différents éclairements et à une température constante ($T = 25\text{ °C}$). On observe sur les figures que l'augmentation de l'éclairement engendre celle de la puissance du module PV ainsi que celle du courant. Alors que, la tension à circuit ouvert (VOC) varie très peu. La puissance passe de 58 watt à 246 watt lorsque la valeur de l'éclairement varie de 100 w/m^2 à 1000 w/m^2 .

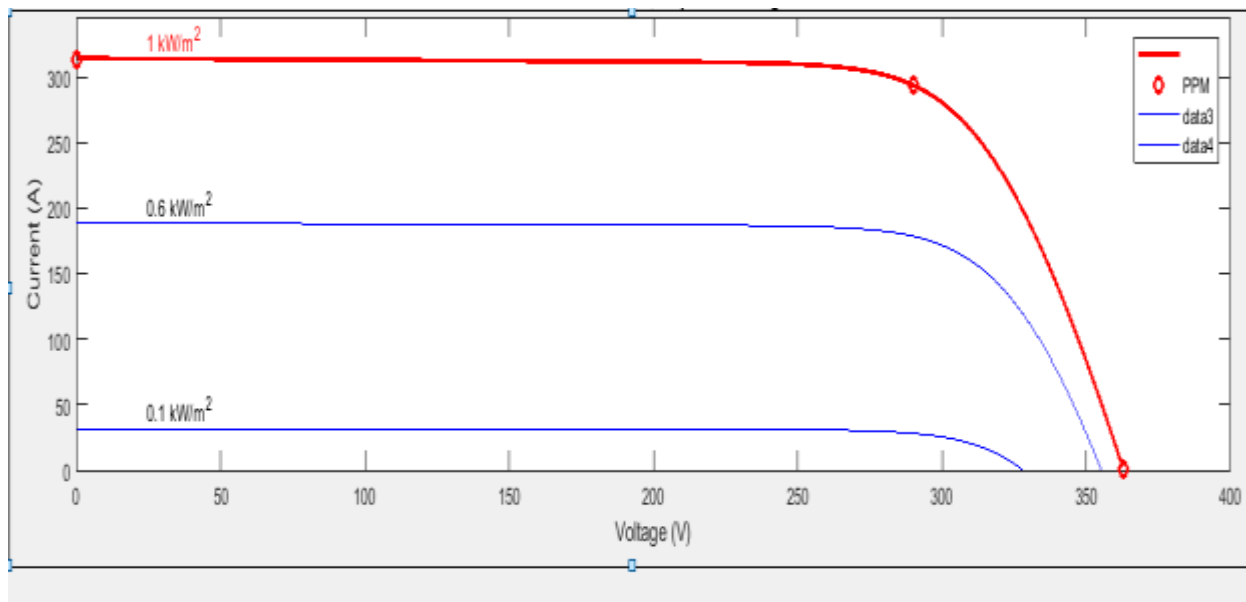


Figure III. 7 : Variation des caractéristiques I-V et P-V en fonction de l'éclairement sous une température fixe $T = 25\text{ °C}$.

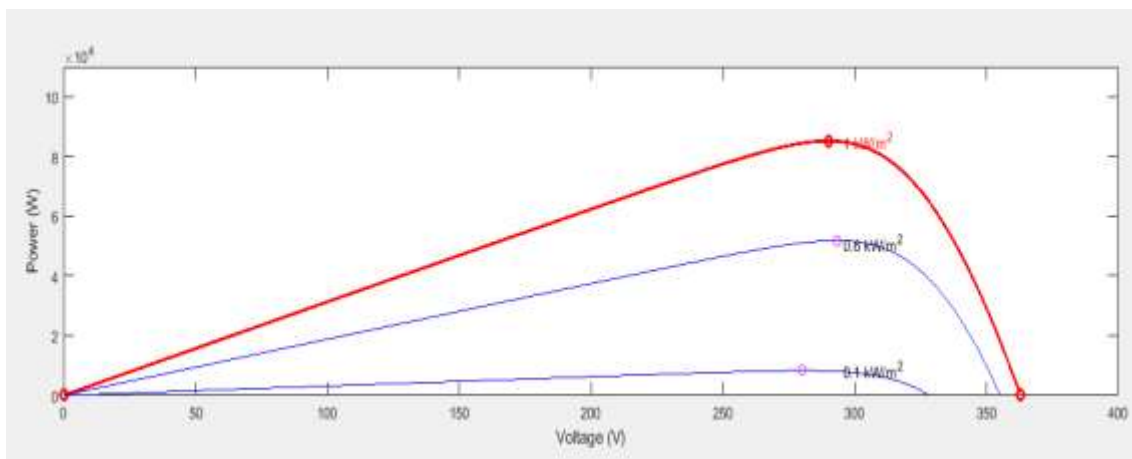


Figure III. 8 : Variation de la puissance P-V en fonction des différents éclairements.

III.3.1.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module

La température est un paramètre très important dans le comportement des modules photovoltaïques. Elle influence sur les caractéristiques d'un module PV. Les figures III-9 et III-10 montrent les résultats de simulation des courbes I-V et P-V du module PV pour différentes températures sous un éclairement ($G=1000 \text{ w/m}^2$). Nous observons sur ces courbes que la variation de la température influe fortement sur VOC et sur la puissance. En effet, lorsque la température varie de 25°C à 60°C la tension de circuit ouvert diminue de 43 V à 41 V. Quant à la puissance, elle baisse de sa valeur maximale et atteint la valeur de 250 watt. Par contre la valeur du courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de la température.

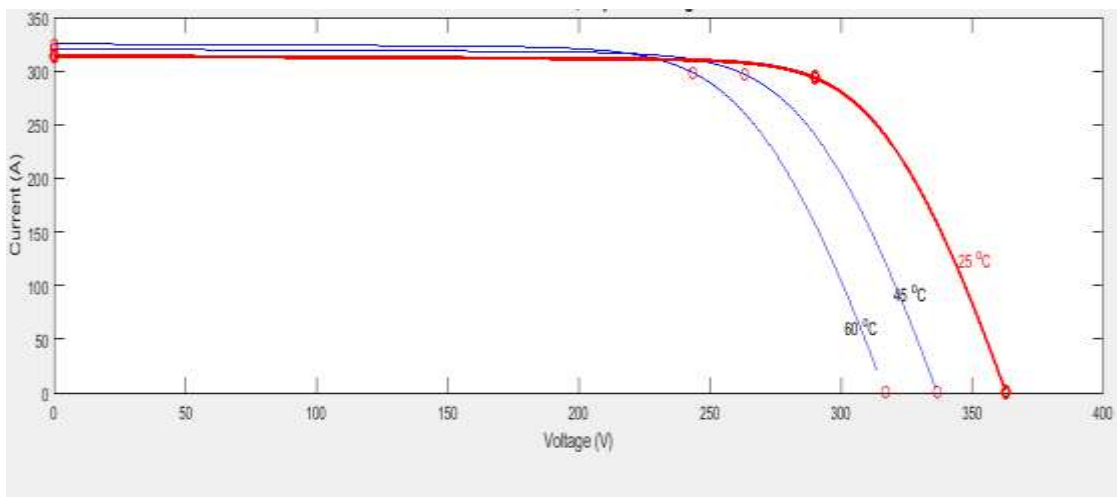


Figure III. 9 : Variation des caractéristiques I-V en fonction de la température avec éclairement fixe.

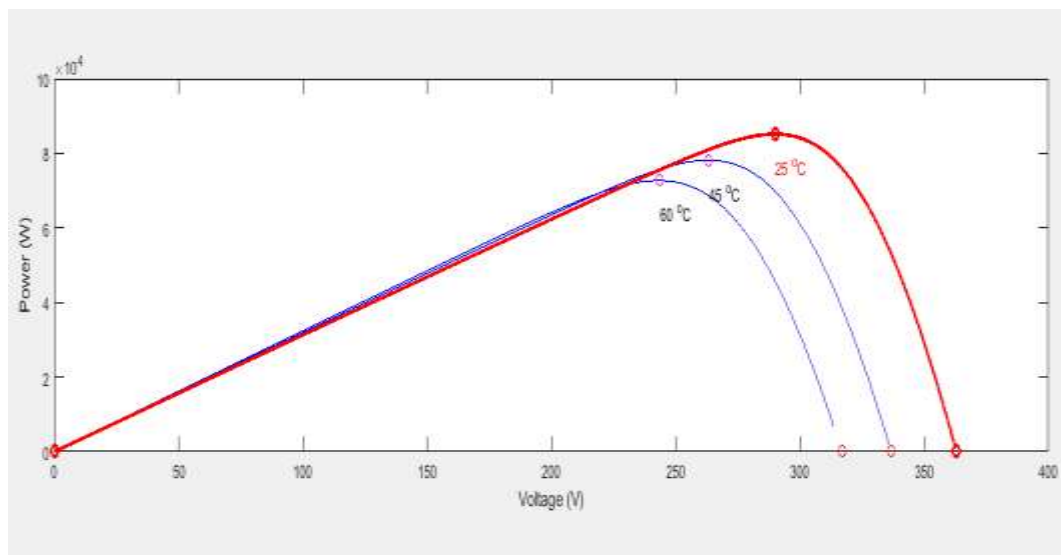


Figure III. 10 : variation de la puissance P-V en fonction de la température sous un éclairage fixé à 1000w/m².

III.4. Le convertisseur SEPIC

Le convertisseur SEPIC est représenté sur Simulink sous le modèle (figIII-11).

La tension d'entrée est continue à la valeur $V=20V$, il est commandé par MOSFET avec un signal de Gachet de type impulsion en parallèle avec l'entrée. La charge à la sortie de convertisseur est de type résistif $R=12\text{ Ohm}$.

Concernant les valeurs des composants du hacheur (l'inductance et les condensateurs de filtrage, de couplage), on a fait le dimensionnement dans le Chapitre 2, ainsi les valeurs proposé pendant l'encadrement.

Les valeurs sont notées dans le tableau III-2.

On lance la simulation est on observe la tension et la puissance a sortie du convertisseur.

On obtient la puissance $P \sim 10KW$ pour $R=12\text{ Ohm}$.

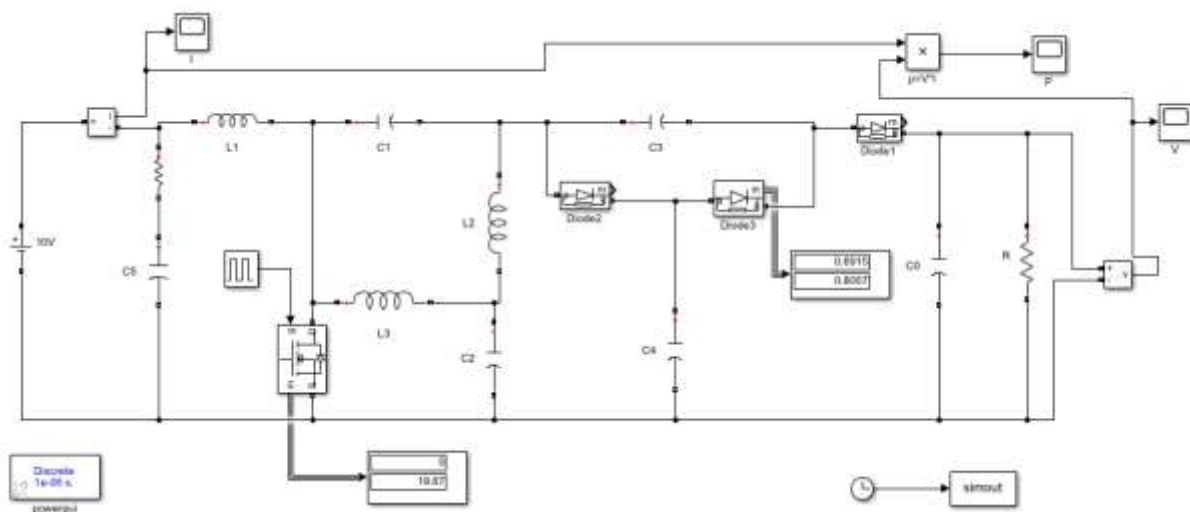


Figure III. 11 : Schéma bloc de convertisseur SEPIC a gain de tension élevé sous Simulink.

III.5. Algorithme MPPT

III.5.1. Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (*VPPM* et *IPPM*). [23]

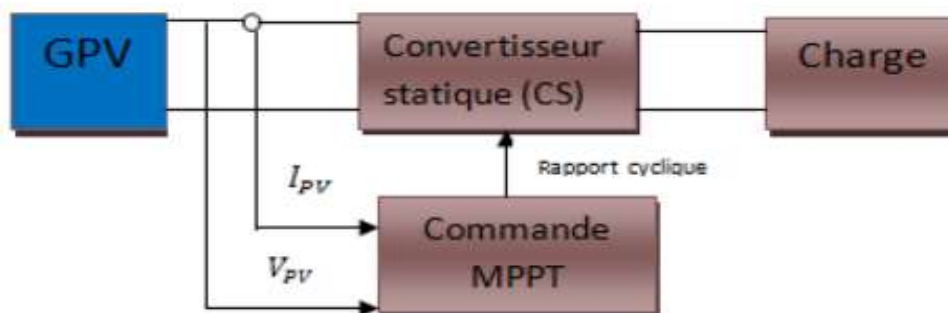


Figure III. 12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire par la commande MPPT.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (SEPIC), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V) jusqu'à se placer sur le MPP [23].

Dans ce travail on fait l'étude et l'analyse de la commande MPPT basée sur la méthode Perturb and Observe (P&O).

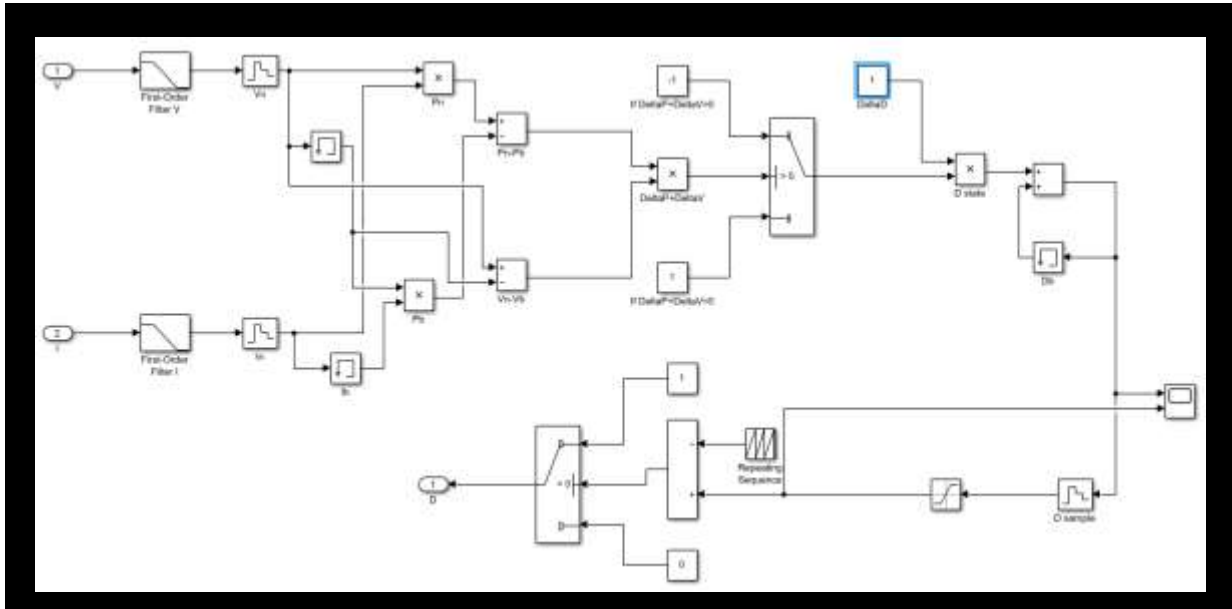


Figure III. 13 : Schéma bloc de la commande MPPT traduit sur Simulink.

III.5.2 Algorithm Perturb and Observ (P&O)

Dans ce travail, on a basé la commande MPPT sur la méthode P&O qui est un algorithme qui cherche le MPP de la puissance à la sortie de GPV, avec des conditions initiales de tension.

Algorithme P&O:

```
function D = PO(Vpv, Ipv)
Delta=25e-6;
D_init=0.4;
D_min=0;
D_max=0.9;

persistent Vold Pold D_old;
DataType = 'double';

if isempty(Vold)
Vold=0;
Pold=0;
D_old=D_init;
end

P=Vpv*Ipv;
dV=Vpv - Vold;
dP=P-Pold;

if dP~=0
if dP>0
if dV>0
D = D_old-Delta;
else
```

```

Vref = D_old+Delta;
end
else
if dV>0
D=D_old+Delta;
else
D=D_old - Delta;
end
end
else
D = D_old;
end
if D >= D_max||D <= D_min
Vref = D_old;
end
D_old=D;
Vold=Vpv;
Pold=P;

```

III.6 Simulation de système PV

Le but de ces simulations est de visualiser les différentes allures de puissance P (à la sortie du panneau et la sortie du convertisseur statique), des rapports cycliques D des tensions délivrées par le panneau photovoltaïque et du convertisseur statique avec la méthode de poursuite de la puissance maximal (MPP) par l'algorithme P&O.

La figure (III-14) montre le schéma fonctionnel sous Simulink du système photovoltaïque général, ce dernier se compose des éléments suivants : le panneau solaire, le hacheur SEPIC, la charge et le contrôleur MPPT à base de P&O.

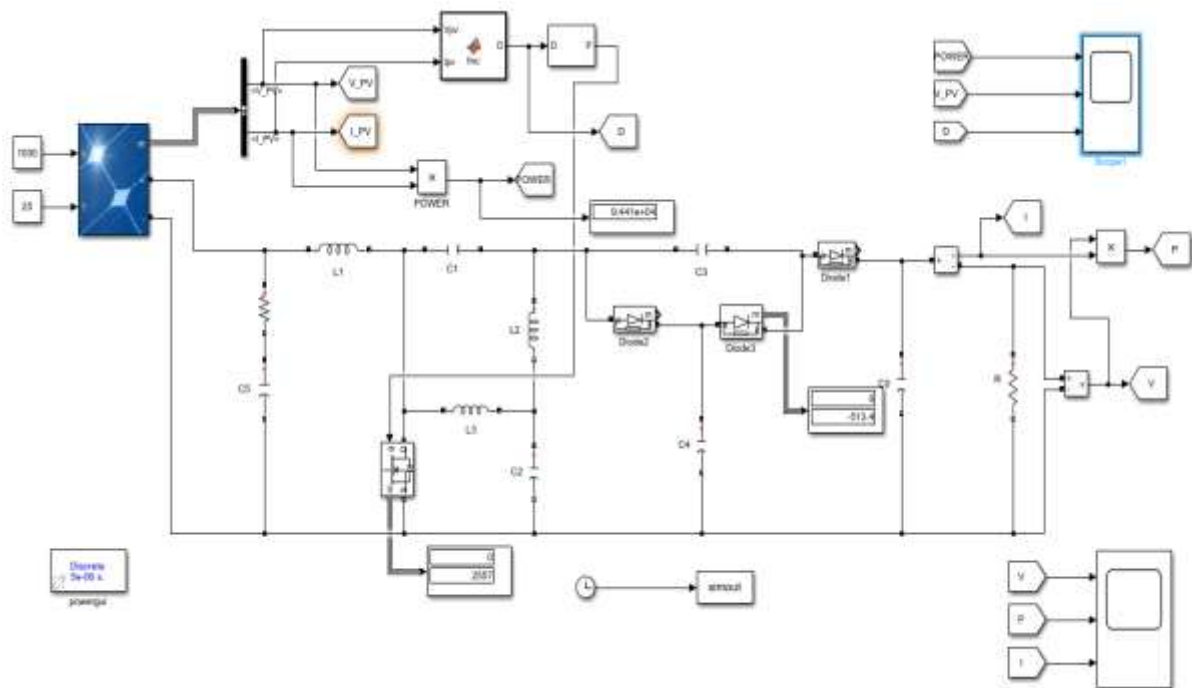


Figure III. 14 : Modèle Simulink d'un système photovoltaïque général composé d'un hacheur SEPIC et la commande MPPT.

Les différentes valeurs utilisées dans cette simulation sont données dans le tableau suivant :

Paramètre	Label	Valeur
Fréquence	f	50 KHz
Inductance	L_1	5 mH
Inductances	$L_{2,3}$	0.1 mH
Capacités	$C_{1,2,3,4}$	5 μ F
Capacité	C_0	10 μ F
Capacité	C_{teg}	1 μ F
Résistance	R	25 Ω

Tableau III. 2 : Paramètres de convertisseur SEPIC modifié. [40]

III.6.1 Résultats de la simulation

La simulation que nous avons faite consiste à étudier le système sous les conditions suivantes, en première partie :

- Une température fixe de 25°C.
- Un éclairage qui prend la valeur de 1000w/m² entre t = 0s et t = 2s, la valeur de 500w/m² entre t = 2s et t = 4s et la valeur de 200w/m² entre t = 4s et t = 6s.

Les figures (III-15), (III-16), nous illustrent l'évolution de la puissance et la tension à la sortie de convertisseur pour les différentes valeurs d'irradiation [1000 500 200] W/m² :

III.6.2 Variation des caractéristiques V-PV et P-PV

III.6.2.1. Influence de l'ensoleillement

Pour différentes valeurs d'éclairement et $T = 25^\circ\text{C}$, nous illustrons les variations de V et P à la sortie de PV dans les figures suivantes :

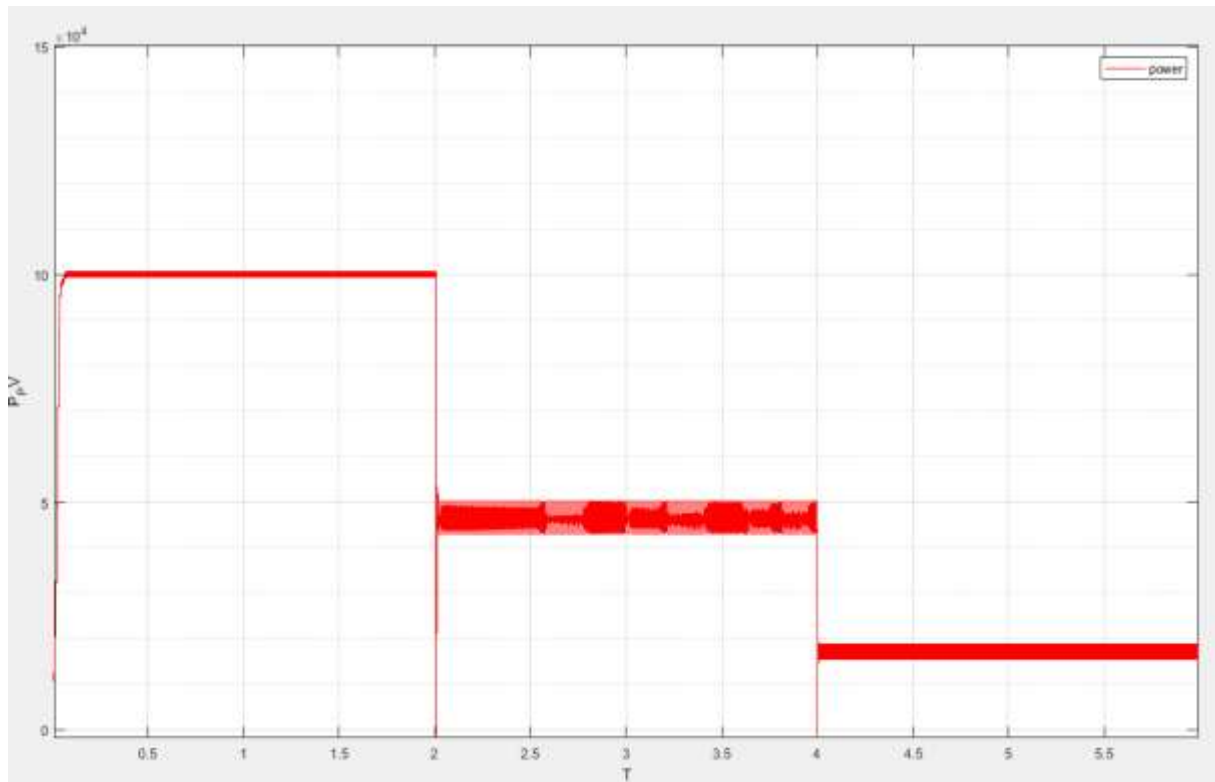


Figure III. 15 : Variations de la puissance pour différentes valeurs d'éclairement à la sortie de PV.

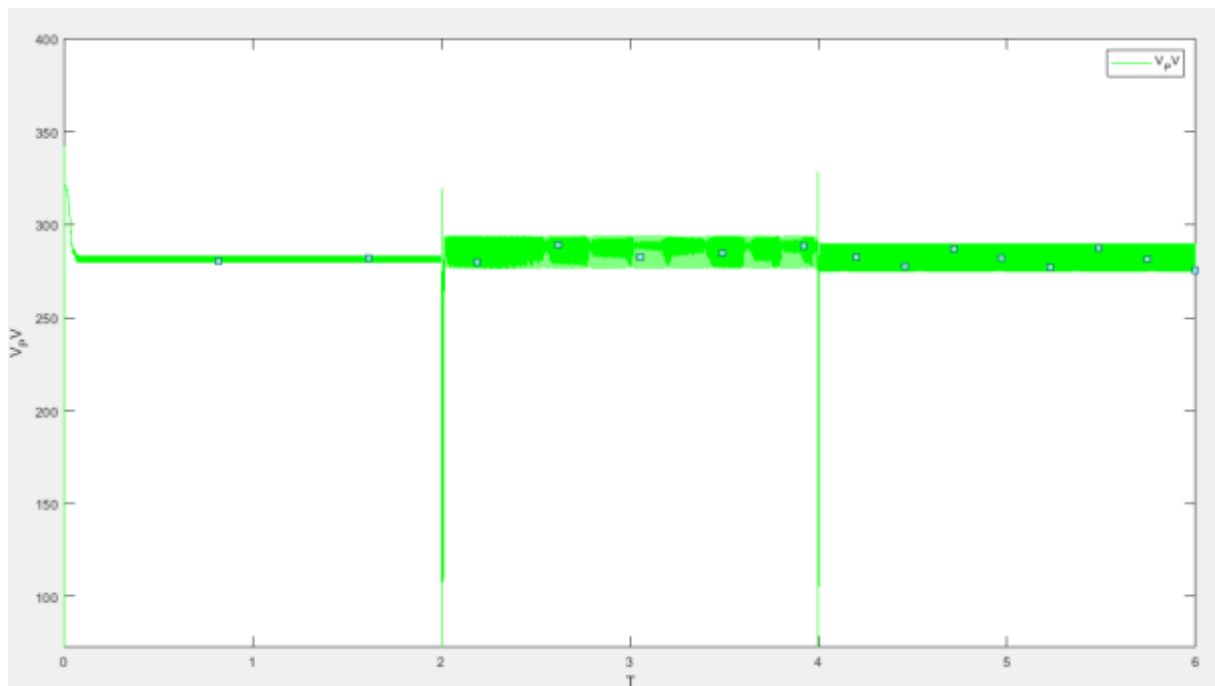


Figure III. 16 : Variations de la tension à la sortie de PV pour différentes valeurs de G.

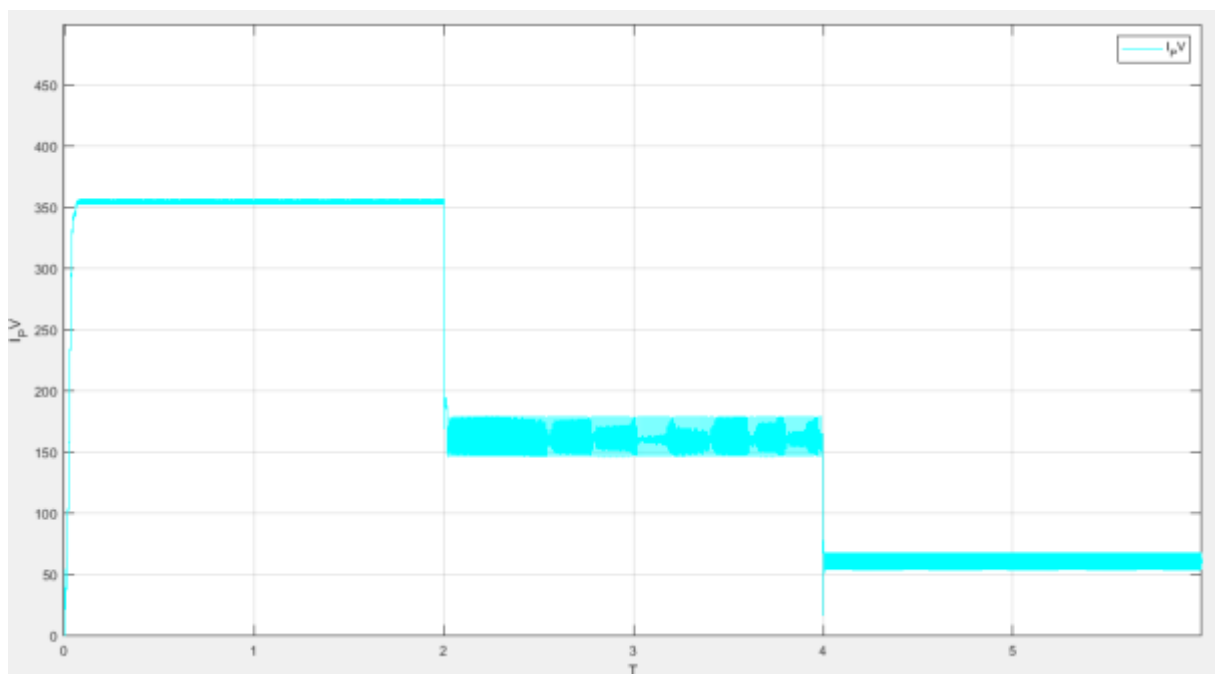


Figure III. 17 : Variation de courant à la sortie de PV en fonction de G.

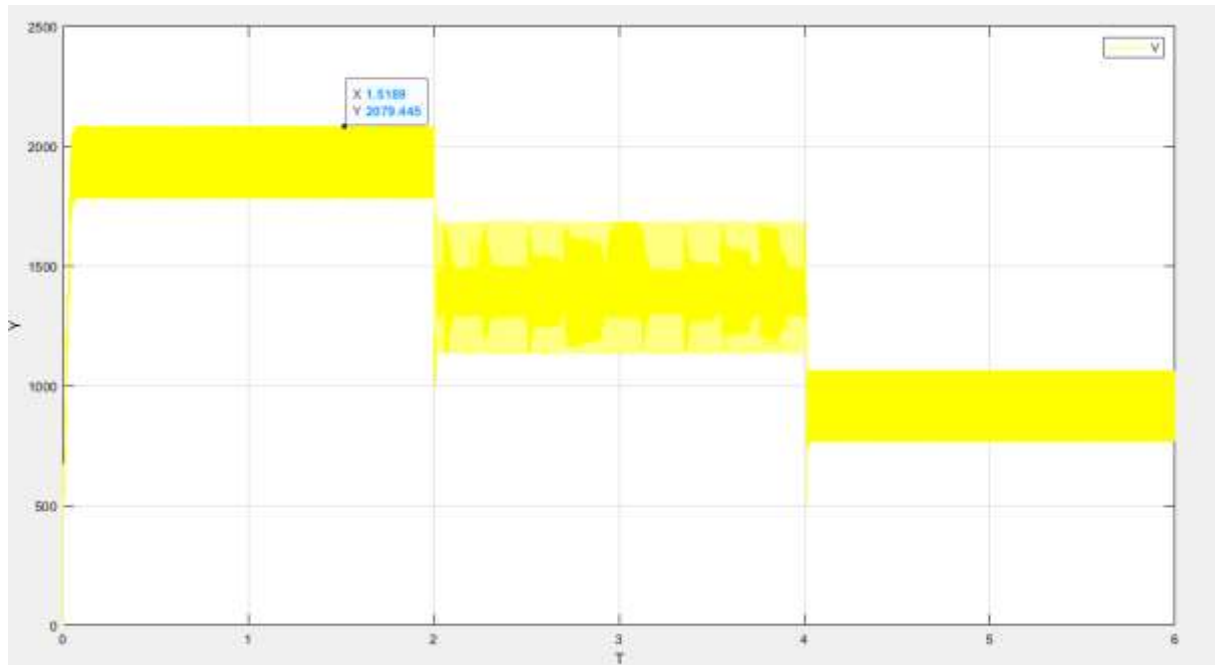


Figure III. 18 : Variation de la tension à la sortie de CS pour différentes valeurs d'éclairement.

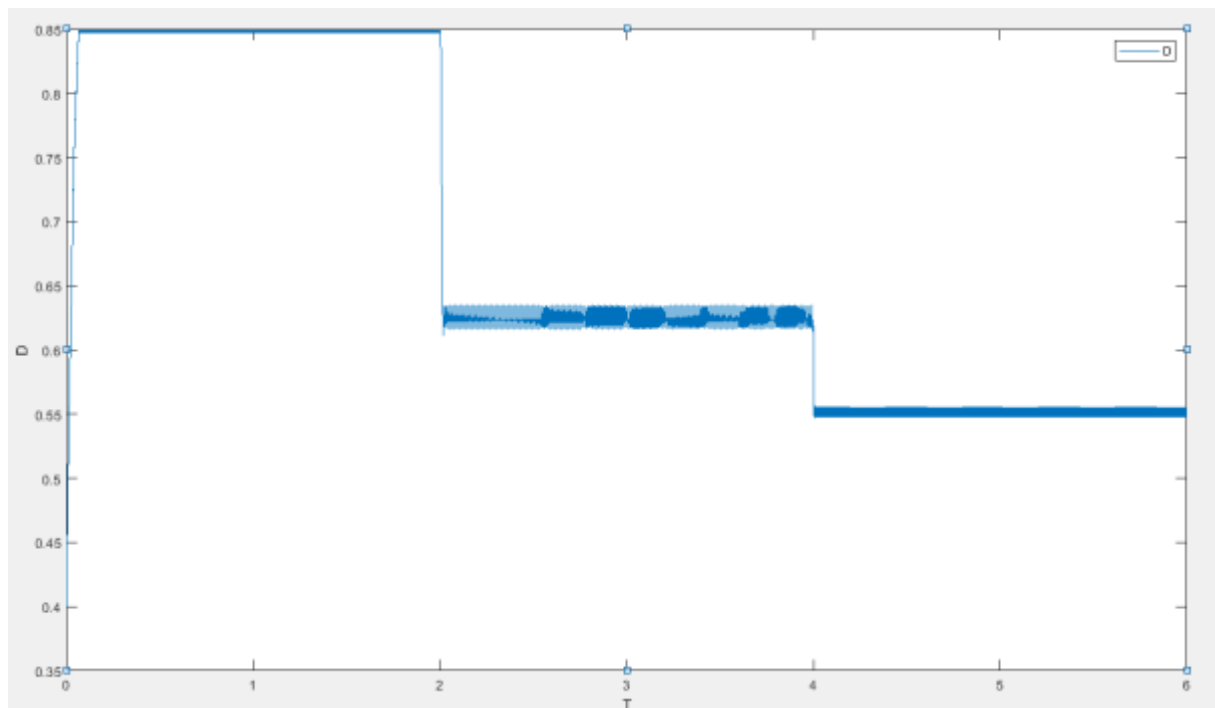


Figure III. 19 : Variation de rapport cyclique D en fonction de l'éclairement.

III.6.2.2. Influence de la température

On fait varier la température à l'entrée de PV et on garde l'irradiation fixe à $G=1000\text{w/m}^2$. Les résultats sont observés dans les figures suivantes :

T° prend les valeurs : « 25°C entre $t=0\text{s}$ et $t=2\text{s}$ » . « 45°C entre $t=2\text{s}$ et $t=4\text{s}$ ». « 60°C entre $t=4\text{s}$ et $t=6\text{s}$ ».

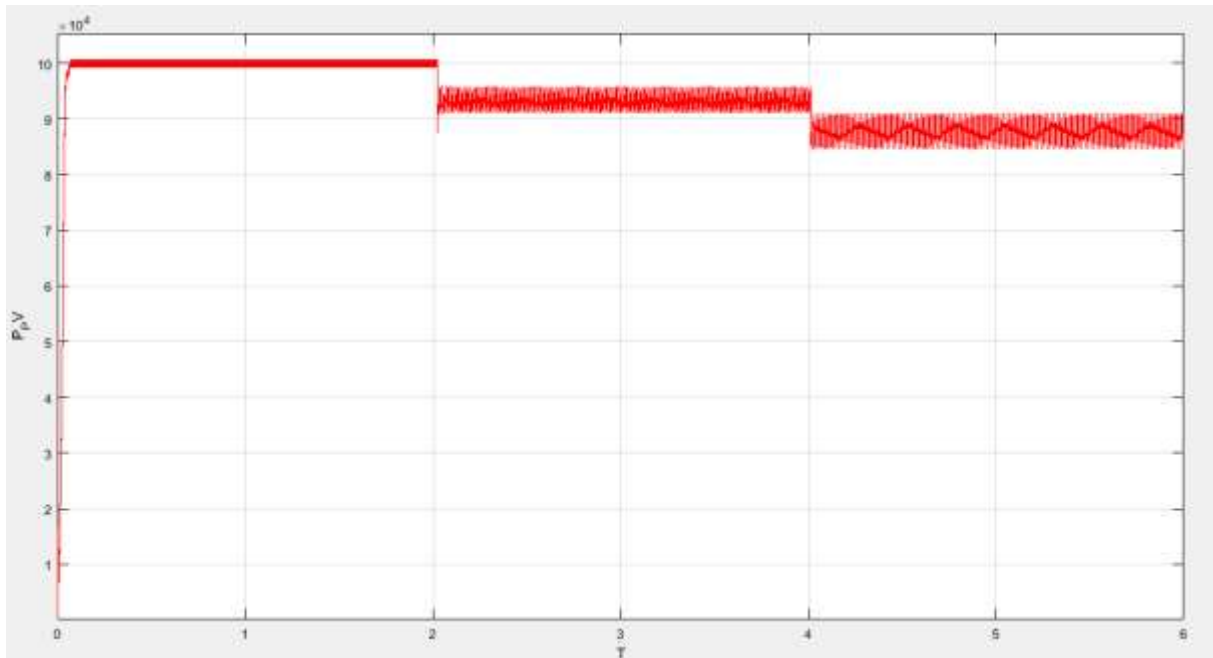


Figure III. 20 : Variation de la puissance à la sortie de PV pour différentes valeurs de T° .

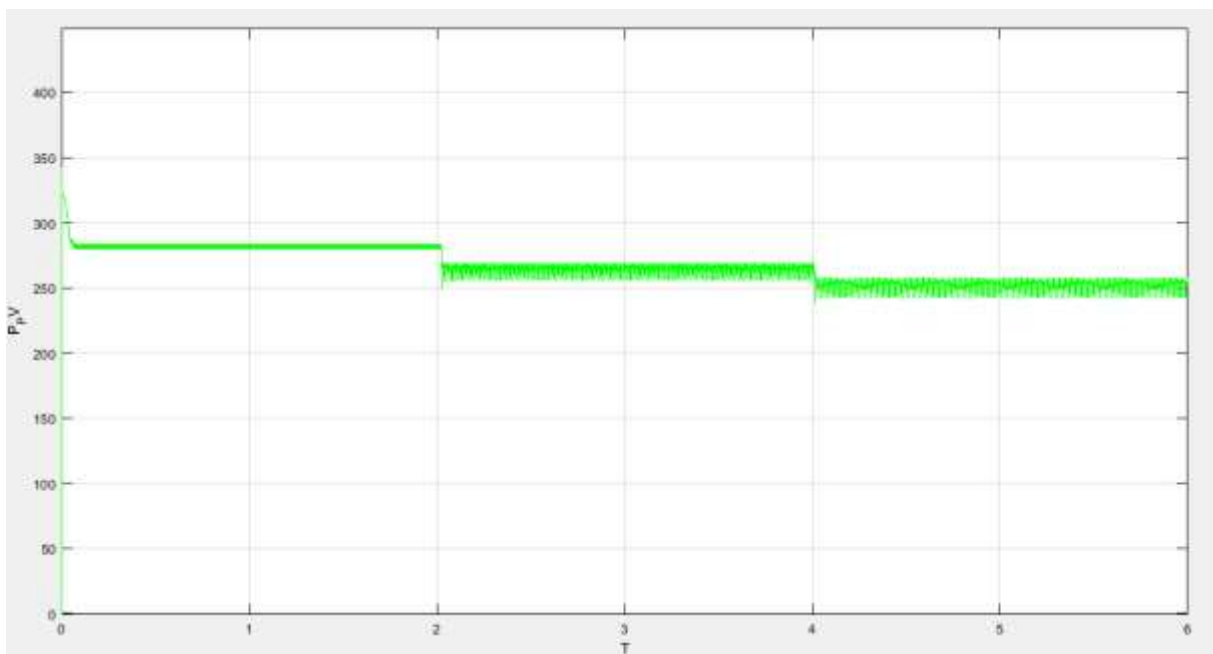
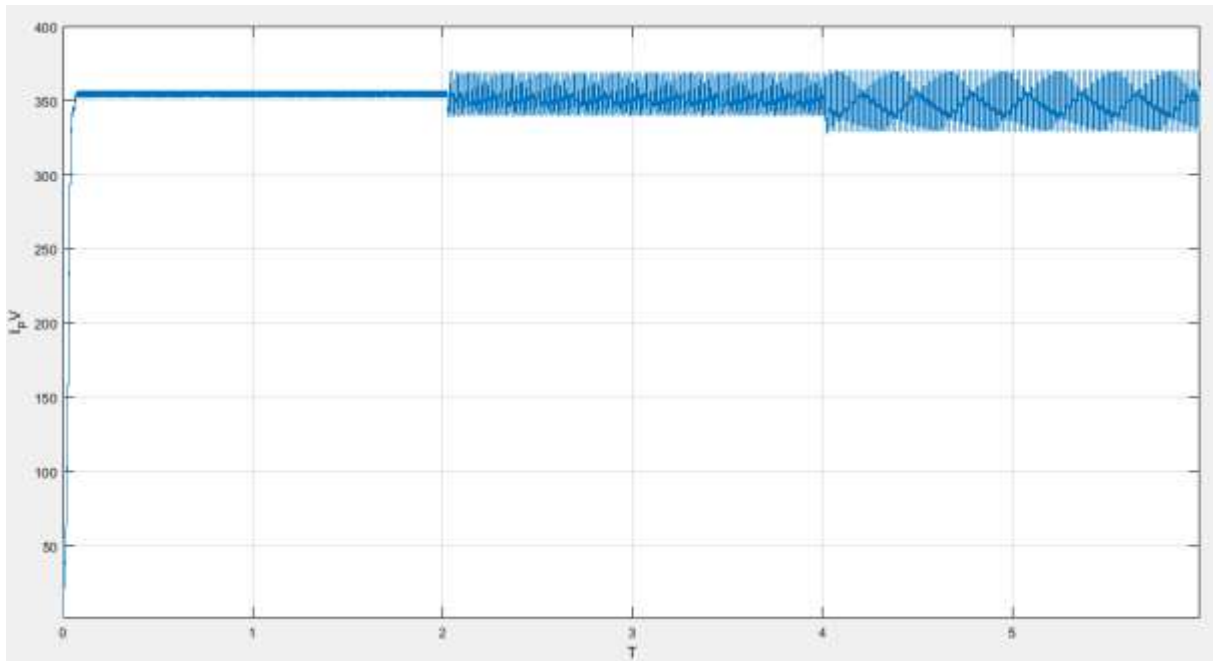
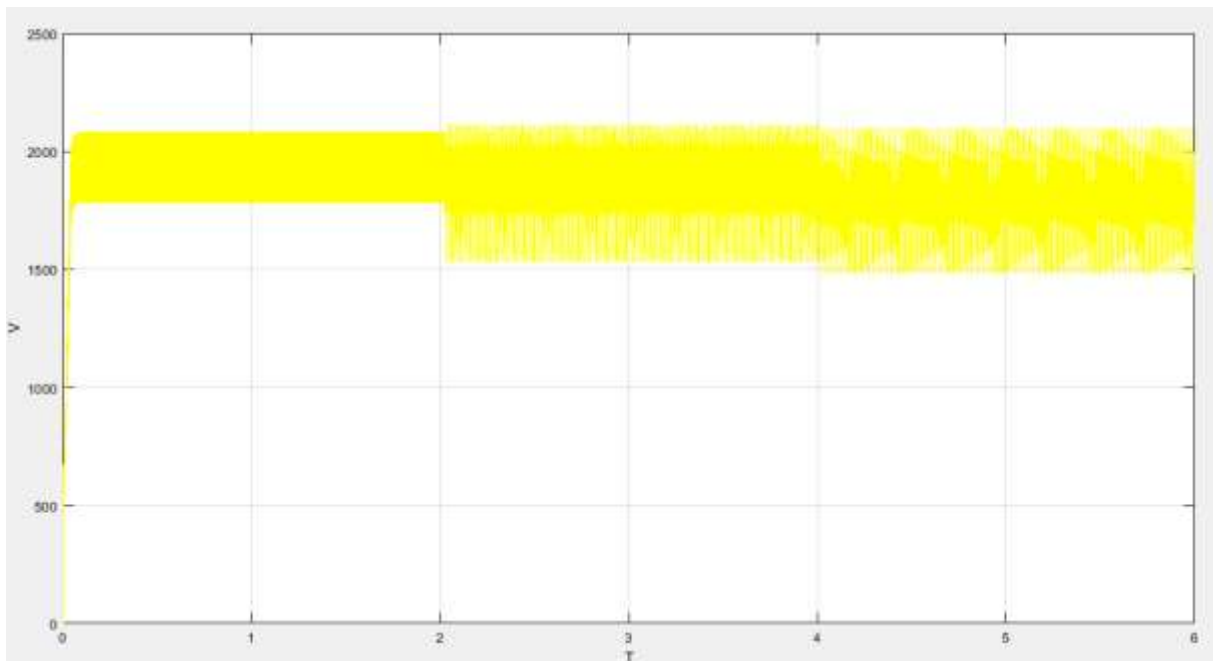


Figure III. 21 : Variation de V_{PV} pour différentes valeurs de T° .Figure III. 22 : Variation de courant à la sortie de PV pour T° variable.Figure III. 23 : Variation de V à la sortie de CS pour différentes valeurs de T° .

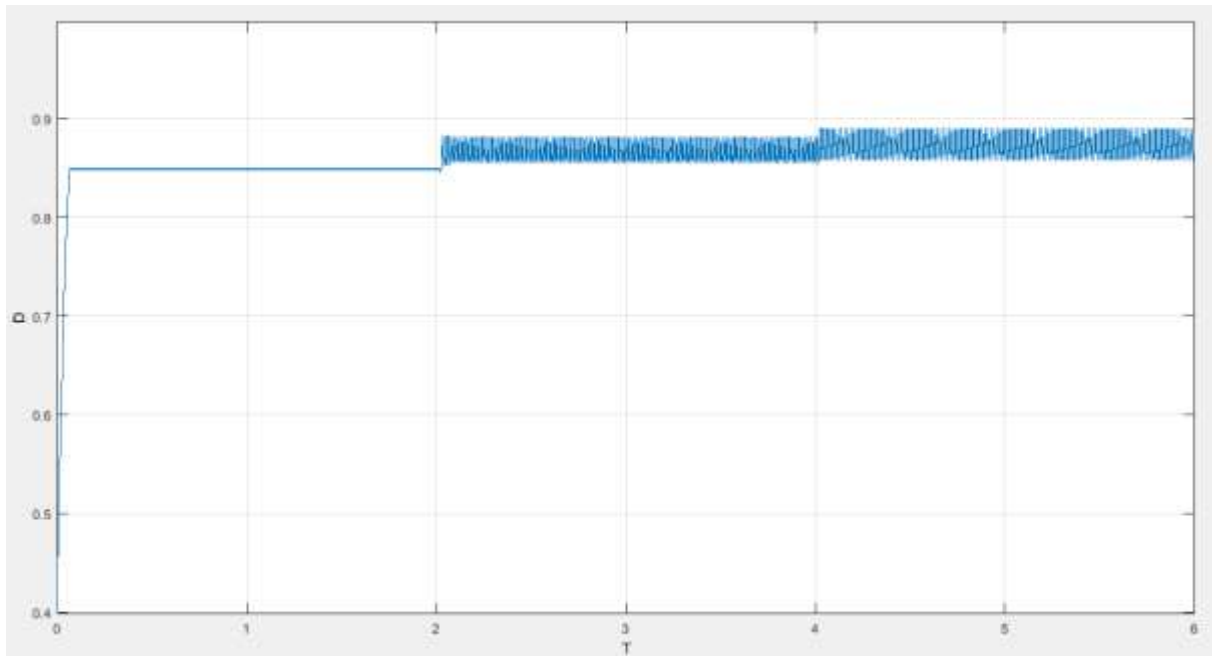


Figure III. 24 : Variation de D en fonction de la température.

- **Interprétation des Résultats :**

Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge.

Dans la première étape ($0s < t < 6s$) la commande MPPT fait varier la valeur de α selon les valeurs de la tension et du courant capté. On remarque que la valeur de la tension est variée jusqu'à atteindre une valeur égale à 0 V. Puis, elle se stabilise à cette valeur. Aussi la puissance est augmentée puisque la tension varie. Après un certain temps, la puissance se stabilise à une valeur maximale presque de 100KW. Cette stabilité prouve que le principe de la commande MPPT est vérifié.

- **Interprétation des résultats pour changement de l'éclairement**

Il est clair que la valeur de la tension ait un lien direct et proportionnel à l'intensité du rayonnement, elle diminue avec la diminution de cette dernière.

De même pour la puissance puisqu'elle dépend de la tension, elle baisse une fois l'éclairement diminue. Ce que les figures précédentes nous montrent, une baisse d'éclairement est accompagnée par la chute de puissance, mais ici la commande MPPT interprète pour maintenir le maximum de puissance.

- **Interprétation des résultats pour changement de la température :**

Nous remarquons que la température a une influence directe sur la tension de sortie de GPV, elle baisse fortement pour des températures élevées. Ce qui fait lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte car la puissance diminue environ de 0.5% pour chaque augmentation d'un degré °C.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a cité deux différents circuits équivalant de la cellule solaire, et on a simulé un modèle sous Simulink pour vérifier ces caractéristiques P-V et I-V. Aussi, on a fait la simulation du système PV sous le logiciel « Simulink MATLAB » pour une intensité du rayonnante variable et une température de 25 °C en premier lieu, et l'inverse en deuxième pour observer le fonctionnement du hacheur SEPIC a gain tension élevé et vérifier la commande MPPT (P&O), puis faire une interprétation des résultats.

L'éclairement et la température fait varient la valeur du rapport cyclique α qui varie selon les valeurs de I et V. Cela fait varier la tension pour augmenter la puissance. On peut dire après cette étude que la méthode P&O répond rapidement et efficacement.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'agit de modéliser, simuler et d'optimiser un GPV associé à un convertisseur DC/DC a gain en tension élevé commandé par MPPT pour alimenter une charge résistive. Plusieurs méthodes MPPT existantes en littérature sont utilisées pour optimiser l'énergie d'un panneau solaire sous l'effet des paramètres météorologique. Notre travail a été basé sur l'utilisation de l'algorithme classique (P&O) pour faire le suivi du MPP. L'objectif est était la simulation du fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de l'irradiation et la température sur la puissance générer par ce modèle. La précision et l'efficacité des résultats obtenus par cet algorithme ont été vérifiées en utilisant la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Dans le premier chapitre, on a présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques démontré le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ces types et présenté la structure des panneaux photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, j'ai présenté une description théorique sur les hacheurs tout en donnant leurs différents types. Ensuite, la modélisation d'un convertisseur DC-DC de type Hacheur SEPIC. Ensuite, on a présenté le principe de la recherche du point de puissance maximale « MPPT » ainsi que ces différentes méthodes (algorithmes) rencontrées le plus souvent dans la littérature. Enfin, nous avons donné une étude comparative entre les techniques de commande MPPT classique.

Dans le troisième chapitre, on a cité les différents circuits équivalent de cellule solaire. On peut considérer la cellule solaire comme un générateur du courant. Ensuite, on a étudié l'influence de l'éclairement et de la température sur un module PV. Aussi, présenté le circuit électrique du Hacheur SEPIC qui est utilisé dans ce mémoire. Enfin, j'ai présenté la simulation du système PV sous logiciel « MATLAB » par l'algorithme P&O. Les résultats obtenus montrent la précision et l'efficacité de la commande.

Ce mémoire a été conçu pour l'étude des nouvelles technologies utilisées pour la recherche de l'énergie renouvelable et sans dégâts atmosphérique. L'énergie solaire est alors une solution très adéquate pour les problèmes des énergies polluante et aussi la recherche d'énergie électrique dans les zones rurales.

ANNEXE : Algorithme P&O:

```
function D = PO(Vpv, Ipv)
Delta=25e-6;
D_init=0.4;
D_min=0;
D_max=0.9;

persistent Vold Pold D_old;
DataType = 'double';

if isempty(Vold)
Vold=0;
Pold=0;
D_old=D_init;
end

P=Vpv*Ipv;
dV=Vpv - Vold;
dP=P-Pold;

if dP~=0
if dP>0
if dV>0
D = D_old-Delta;
else
Vref = D_old+Delta;
end
else
if dV>0
D=D_old+Delta;
else
D=D_old - Delta;
end
end
else
D = D_old;
end
if D >= D_max || D <= D_min
Vref = D_old;
end
D_old=D;
Vold=Vpv;
Pold=P;
```

Références bibliographiques

BIBIographie

- [1] A. Ould mohamed yahia «étude et modalisation d'un générateur photovoltaïque » revue des Energie Renouvelables Vol.11 N° 3 2008 pp 473-483, 2008.

- [2] T.U. Townsend « A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct- Coupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.

- [3] Anne Labouret et Michel Viloz « ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE »

- [4] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

- [5] Vighetti Stéphane « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2019.

- [7] Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.

- [8] O.Bensedik, F.Djaloul, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système PV », mémoire de master, université kasdi rabah ouregla, 2012
- [9] Narimen Debili « étude et optimisation en environnement MATLAB/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque » mémoire de magister université de Constantine
- [10] Saidani.A « amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, université de M'sila 2015.
- [11] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [12] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». Revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [13] I.Bouzghaya, « Etude d'un Hacheur à Stockage Capacitif », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Boughi, , 2013.
- [14] D.Imane, « Etude d'un convertisseur DC-DC de type SEPIC », Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2017.
- [15] A.ABID et B.Yassine, «Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque », Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2017.
- [16] FERRAH FATEH," Etude et simulation d'un étage mppt pour un système à Energie renouvelable ", Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013.

- [17] ACHOUR Abderraouf, Analyse et commande d'un hacheur Buck- boost, mémoire demaster:Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [18] JMohamed B. Debbat, Rochdi Bachir-Bouiadjra, Hafid A. Bouziane, Sliding mode control of two-level Boost DC-DC converter, 4th International Conference on Electrical Engineering IGEE, Boumerdes, December 13th -15th, 2015.
- [19] V. Boitier, P. Maussion “ Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques”, 1 LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France.
- [20] A. Yafaoui., B. Wu and R. Cheung implementation of maximum power point tracking algorithm for residential photovoltaic systems”, 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10 – 14, 2007.
- [21] M.BEDRANE Farid. Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. University Abdurrahman MIRA de Bejaia
- [22] Anantapuram, “investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output” ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012
- [23] ACHOUR Abderraouf, Analyse et commande d'un hacheur Buck- boost, mémoire demaster:Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.

- [24] d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy, "an improved MPPT converter using current compensation method for small scaled pv-applications," IEEE applied power electronics conf. Andexposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003
- [25] Akihiro Oi, "design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of cali-forniapolytechnic state university, 2005
- [26] Hajar Bagheri "advances in electric power engineering" publisher: lulu (usa), 2015
- [27] Bisker Asma, Chiri Meriem, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en modeconnecté au réseau », diplôme
- [28] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [29] Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam « étude d' une chaine de conversion photovoltaïque », diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, université de m'sila, 2010
- [30] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva "energy comparison of seven MPPT techniques for PV systems" scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico dimilano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009;
- [31] Hakoumi Ahmed et benamar abdeljalil mémoire fin d'étude commande MPPT et contrôle d'un système PV par logique flou univers ahmed draria adrar

- [32] BENMOUSSA Fouad, “Optimisation des paramètres d’un modèle électrique d’une cellule photovoltaïque”, mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Université AMIRA BEJAIA, 2015.
- [33] L.Yassine, “Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale(MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes”, mémoire de Magister, Université Sétif–1,2013.
- [34] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho,"Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays",IEEE Transactions on power electronics, vol.24,no.5, may2009
- [35] Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. Et Energ.Vol. 66,2, pp. 131-136, Bucarest, 2021.Electrical Engineering Department, University of Bejaia, Algeria, belkaid08@yahoo.fr Engineering and Architecture Faculty of Nisantasi University, Istanbul, Turkey.
- [36] Rev. Roum. Sci. Techn.-Electrotechn. Et Energ.Vol. 66,2, pp. 131-136, Bucarest, 2021.Electrical Engineering Departement, University of Bejaia, Algeria, belkaid08@yahoo.fr

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 1

CHAPITRE I..... 3

ÉTAT DE L'ART SUR LES SYSTÈMES

PHOTOVOLTAÏQUES 3

INTRODUCTION :..... 4

I.1. L'ÉNERGIE SOLAIRE 5

I.2. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :..... 5

I.2.1. Composition d'un système photovoltaïque :..... 5

I.2.2. Systèmes autonomes « au fil du soleil » :..... 6

I.2.3. Systèmes autonomes avec stockage :..... 6

I.2.4. Systèmes autonomes hybrides :..... 7

I.2.5. Systèmes raccordés au réseau :..... 7

I.4. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :..... 8

I.4.1. L'absorption de la lumière :..... 8

I.4.2. Le transfert d'énergie des photons à la charge électrique :..... 9

I.4.3. La collecte des charges :..... 9

I.5. LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :..... 9

I.5.1. Les filières technologiques :..... 10

I.5.1.1. Le silicium :..... 10

I.5.1.2. Les couches minces :..... 11

I.6. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE

PHOTOVOLTAÏQUE **ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.**

<u>I.7. L'INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT ET DE LA</u>	
<u>TEMPÉRATURE :.....</u>	14
<i>1.7.1. L'influence de l'éclairement :.....</i>	<i>14</i>
<i>1.7.2. L'influence de la température :.....</i>	<i>15</i>
<u>I.8. FONCTIONNEMENT À PUISSANCE MAXIMALE :....</u>	16
<u>I.9. GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV) :.....</u>	17
<i>1.9.1. La constitution d'un module photovoltaïque :.....</i>	<i>17</i>
<i>1.9.2. Mise en série :.....</i>	<i>18</i>
<i>1.9.3. Mise en parallèle :.....</i>	<i>19</i>
<i>1.9.4. Association série-parallèle :.....</i>	<i>20</i>
<u>I.10. LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DE</u>	
<u>L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE :</u>	21
<i>1.10.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :.....</i>	<i>21</i>
<i>1.10.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :.....</i>	<i>21</i>
<u>CONCLUSION :.....</u>	22
<u>CHAPITRE II.....</u>	23
<u>LES CONVERTISSEURS DC-DC ET LA COMMANDE MPPT</u>	
<u>.....</u>	23
<u>II.1. LES CONVERTISSEUR DC-DC.....</u>	24
<u>II.2. DÉFINITION CONVERTISSEUR DC-DC :.....</u>	24
<u>II.3. RÔLE DES CONVERTISSEURS DC-DC</u>	25
<u>II.4. LES DIFFÉRENTS TYPES DES HACHEURS</u>	25

TABLES DES MATIERES

II.4.1. Le Convertisseur Boost	25
II.4.2. Le Convertisseur Buck.....	28
<u>II.5. LE CONVERTISSEUR SEPIC.....</u>	31
II.5.1. Définition	31
II.5.2. Principe de fonctionnement de convertisseur SEPIC a gain en tension élevé	32
<u>II.6. DIMENSIONNEMENT D'UN CONVERTISSEUR SEPIC</u>	32
II.6.1. Rapport cyclique.....	33
II.6.2. Inductances.....	33
II.6.3. Condensateur de couplage	33
II.6.4. Condensateur de filtrage.....	34
II.6.5. Transistor.....	34
II.6.6. Diode	34
II.6.7. Les pertes joules.....	34
<u>II.7 LA COMMANDE MPPT (MAXIMUM POWER POINT</u>	
<u>TRACKING) :</u>	36
II.7.1 Classification Des Commandes MPPT :	37
II.7.1.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :	37
II.7.1.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :	38
II.7.2 les algorithmes MPPT :	39
II.7.2.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) :	39
II.7.2.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current):	40
II.7.2.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) :	41
II.7.2.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance) :	46
II.7.2.5 La Commande MPPT Flou :	48
II.7.2.6 autres méthodes :	51
II.7.3 Critères d'évaluation d'une commande MPPT :	51
<u>CONCLUSION.....</u>	52
<u>CHAPITRE III.....</u>	53
<u>MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME PV</u>	53
<u>INTRODUCTION.....</u>	53

<u>III.1. CARACTÉRISTIQUES (I, V) ET (P, V) DE LA</u>	
<u>CELLULE SOLAIRE</u>	<u>53</u>
<u>III.2. CIRCUIT ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE</u>	<u>55</u>
<i>III.2.1. Cas d'une cellule idéal</i>	<i>55</i>
<i>III.2.2. Cas d'une cellule réelle</i>	<i>55</i>
<u>III.3. MODÉLISATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE</u>	
<u>(PV) SOUS SIMULINK</u>	<u>56</u>
<i>III.3.1 Simulation d'une cellule photovoltaïque</i>	<i>56</i>
<i>III.3.1.1. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module</i>	<i>58</i>
<i>III.3.1.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module</i>	<i>59</i>
<u>III.4. LE CONVERTISSEUR SEPIC.....</u>	<u>60</u>
<u>III.5. ALGORITHME MPPT</u>	<u>61</u>
<i>III.5.1. Principe de la commande MPPT</i>	<i>61</i>
<i>III.5.2 Algorithm Perturb and Observ (P&O)</i>	<i>62</i>
<u>III.6 SIMULATION DE SYSTÈME PV</u>	<u>63</u>
<i>III.6.1 Résultats de la simulation</i>	<i>64</i>
<i>III.6.2 Variation des caractéristiques V-PV et P-PV.....</i>	<i>64</i>
<i>III.6.2.1. Influence de l'ensoleillement</i>	<i>64</i>
<i>III.6.2.2. Influence de la température.....</i>	<i>68</i>
<u>CONCLUSION.....</u>	<u>71</u>
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</u>	<u>72</u>
<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>72</u>
<u>RÉSUMÉ.....</u>	<u>83</u>

Résumé

RÉSUMÉ

L'énergie solaire l'une des énergies renouvelable les plus connu et ne saurais dire la plus abordé dans le domaine de la recherche scientifique mais reste néanmoins loin de nous avoir attribué tous ses secret, en effet elle dépend totalement des rayons du soleil qui ne sont nullement pas constant ce qui fait varier très brutalement les valeur obtenu en sortie c'est pour cela que différentes techniques de stabilité son misent en disposition et figure à ce jour comme objets de recherche a fin de perfectionné cette aspect.

L'énergie photovoltaïque occupe de plus en plus un pourcentage important dans les sources d'énergie alternatives pour ses avantages très sains sur l'environnement. Les panneaux photovoltaïque soufre d'un rendement assez bas si le générateur PV ne fonctionne pas à proximité du point appelé point de puissance maximale, pour qu'on profite d'un rendement élevé, il faut poursuivre ce point et changer l'emplacement lié aux conditions météorologique changent est une étape très importante dans la conception des systèmes photovoltaïque.

Cette thèse concerne l'étude, le dimensionnement et la réalisation d'un système photovoltaïque, ainsi la simulation sur MATLAB-Simulink on utilisant un convertisseur DC-DC de type SEPIC du gain en tension élevé. Ce qui concerne la poursuite de point de puissance maximale on a présenté trois techniques célèbres du MPPT, dans on cite P&O pour le suivi de PPM à la sortie de GPV.

Ce travail sera conclu avec différentes parties de la simulation MATLAB, et sera intercepté pour tirer des conclusions.

ABSTRACT

Solar energy is one of the best-known renewable energies and could not be said to be the most evoked in the field of scientific research, but nevertheless remains far from having attributed all its secrets to us, in fact it depends totally on the rays of the sun which do not are by no means not constant, which causes the value obtained at the output to vary very suddenly. This is why different sound stability techniques make available and are to this day objects of research in order to perfect this aspect.

Photovoltaic energy is increasingly occupying a large percentage in alternative energy sources for its very healthy benefits on the environment. The photovoltaic panels suffer from a fairly low yield if the PV generator does not operate near the point called the maximum power point, in order to benefit from a high yield, it is necessary to continue this point and change the location linked to the changing weather conditions is a very important step in the design of photovoltaic systems.

This thesis concerns the study, the dimensioning and the realization of a photovoltaic system, as well as the simulation on MATLAB-Simulink on the use of a DC-DC converter of the SEPIC type of the gain in high voltage. Regarding maximum power point tracking on a presentation of three famous MPPT techniques, in P&O is quoted for PPM tracking at GPV output.

This work will be concluded with different parts of the MATLAB simulation, and will be intercepted to draw conclusions.