

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**  
N° : .....



**DOMAINE : Génie électrique**  
**FILIERE : Electrotechnique**  
**OPTION : Réseaux électrique**

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

**Intitulé**

---

**Etude comparative des commandes MPPT pour une**  
**chaîne de conversion photovoltaïque**

---

**Proposé et dirigé par :**

Dr. BOUDJELLAL Bilal

Pr. BENSLIMANE Tarak

**Présenté par :**

BENZAOUI Khaled

DELALDJA Ayoub

**Soutenu devant le jury composé de :**

|                  |                                      |            |
|------------------|--------------------------------------|------------|
| KHETTAB Khoutir  | Université Mohamed Boudiaf de M'Sila | Président  |
| BOUDJELLAL Bilal | Université Mohamed Boudiaf de M'Sila | Rapporteur |
| BARKAT Said      | Université Mohamed Boudiaf de M'Sila | Examineur  |

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2018 / 2019**

## *Dédicaces*

*Je dédie mon travail*

*À mes parents, mes frères, ma sœur ainsi que  
toute La famille 'BENZAOUI' pour leurs  
encouragements et prières qui m'ont permis de  
finaliser ce travail. Et n'oublier pas le grand  
merci à mes amies.*

*A tous mes amis qui ont toujours été présents et  
qui n'ont ménagé aucun effort pour me  
bénéficier avec leur aide et leurs suggestions.  
A tous mes collègues de promotion.*

*Khaled*

## *Dédicaces*

*Je dédie mon travail*

*À mes parents, mes frères, ma sœur ainsi que  
toute La famille 'DELLALDJA' pour leurs  
encouragements et prières qui m'ont permis de  
finaliser ce travail. Et n'oublier pas le grand  
merci à mes amies.*

*A tous mes amis qui ont toujours été présents et  
qui n'ont ménagé aucun effort pour me  
bénéficier avec leur aide et leurs suggestions.*

*A tous mes collègues de promotion.*

*Ayoub*

## Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions Allah, et tous ceux qui nous ont données la force et la patience pour accomplir cette tâche modeste*

*A la fin de ce travail, nous remercions sincèrement monsieur **Dr. BOUDJELLAL Bilal** pour ses remarques, ses conseils considérables et ces critiques constructives.*

*Nous remercions de tous nos cœurs **Pr. BENSLIMANE Tarak** pour sa disponibilité et pour son soutien.*

*Nous remercions également tous les membres du jury **Pr. BARKAT Saïd, CHOUDER Aïssa** et **KHETTAB Khoutir** qui nous a fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.*

*Nous remercions tous les enseignants qui ont encadré durant notre cursus universitaire.*

*Nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont toujours soutenus par leur respect et leur gentillesse.*

## *Résumé*

L'énergie des éléments plus fondamentaux et nécessaires à la vie, en raison de la hausse continue de la demande d'énergie est devenue nécessaire de trouver d'autres sources de production d'énergie grâce à l'utilisation des énergies renouvelables et des sources plus importantes de l'utilisation de l'énergie solaire en raison de leurs nombreux avantages.

Dans cette mémoire, nous avons étudié un système de production de l'énergie photovoltaïque. Plusieurs simulations ont été étudiées à savoir la maximisation de puissance MPPT par les deux techniques "perturbe et observe" (P&O) et "l'optimisation par essaim particulaires" (OEP) pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. Les résultats de la simulation obtenue sont très encourageants.

**Mots clés :** Système photovoltaïque, Convertisseur boost, Commande MPPT, Modélisation, P&O, OEP.

# Table des matières

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Table des matières.....</b>                                      | <b>i</b>    |
| <b>Liste des Figures.....</b>                                       | <b>iii</b>  |
| <b>Liste des Tableaux.....</b>                                      | <b>v</b>    |
| <b>Glossaire.....</b>   | <b>vii</b>  |
| <b>Nomenclature .....</b>   | <b>viii</b> |
| <b>Introduction générale .....</b>                                  | <b>2</b>    |
| <b>Chapitre I. Généralité sur les systèmes photovoltaïques.....</b> | <b>5</b>    |
| I.1 Introduction.....   | 5           |
| I.2 L'énergie renouvelable .....                                    | 5           |
| I.2.1 Types d'énergie renouvelables.....                            | 6           |
| I.2.1.1 L'énergie éolienne .....                                    | 6           |
| I.2.1.2 L'énergie hydraulique.....                                  | 6           |
| I.2.1.3 L'énergie géothermique.....                                 | 6           |
| I.2.1.4 L'énergie biomasse.....                                     | 6           |
| I.2.1.5 L'énergie solaire .....                                     | 7           |
| I.2.2 Le potentiel solaire en Algérie .....                         | 7           |
| I.3 Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque .....        | 9           |
| I.3.1 Mode autonome.....  | 9           |
| I.3.1.1 Système autonome avec stockage .....                        | 9           |
| I.3.1.2 Système autonome sans stockage .....                        | 9           |
| I.3.2 Mode connecté aux réseaux .....                               | 10          |
| I.3.3 Mode hybride .....  | 10          |
| I.4 Générateur photovoltaïque GPV .....                             | 11          |
| I.4.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ..... | 11          |
| I.4.2 Différents types de cellules photovoltaïques.....             | 12          |
| I.4.3 Association de cellules photovoltaïques .....                 | 13          |
| I.4.3.1 Association de cellules photovoltaïques en série .....      | 13          |
| I.4.3.2 Association de cellules photovoltaïques en parallèle.....   | 14          |
| I.4.4 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque ..... | 14          |
| I.4.5 Protections d'un générateur photovoltaïque.....               | 16          |
| I.4.6 L'influence de la température et l'éclairement sur GPV.....   | 17          |
| I.4.6.1 L'influence de la température sur les panneaux.....         | 17          |
| I.4.6.2 L'influence de l'éclairement sur les panneaux.....          | 18          |
| I.5 Conclusion .....  | 19          |
| <b>Chapitre II. Modélisation d'un système photovoltaïque .....</b>  | <b>21</b>   |
| II.1 Introduction.....  | 21          |
| II.2 Connexion directe GPV-Charge .....                             | 21          |
| II.3 Relation entre un GPV et une charge (étage d'adaptation).....  | 23          |
| II.4 Système PV étudié .....  | 24          |
| II.5 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV).....           | 24          |
| II.5.1 Cas d'une cellule idéale .....                               | 25          |
| II.5.2 Cas d'une cellule réelle .....                               | 26          |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| II.5.3  | Cas d'un module photovoltaïque .....   | 27        |
| II.5.4  | Cas d'un générateur photovoltaïque .....   | 28        |
| II.6  | Modélisation d'un convertisseur DC/DC : .....  | 29        |
| II.6.1  | Principe de fonctionnement .....   | 29        |
| II.6.2  | Le type des convertisseurs DC/DC : .....   | 30        |
| II.6.3  | Convertisseur Boost (élevateur de tension).....  | 30        |
| II.6.3.1  | Modélisation d'un convertisseur Boost .....  | 30        |
| II.6.3.2  | Principe de fonctionnement d'un convertisseur survolteur .....                                   | 31        |
| II.6.3.3  | Fonctionnement en mode de conduction continu (MCC) .....   | 32        |
| II.6.3.4  | Calcul de la valeur de l'inductance de la bobine assurant un fonctionnement en mode continu..... | 33        |
| II.6.3.5  | Formes d'ondes .....   | 36        |
| II.6.3.6  | Ondulation du courant.....   | 36        |
| II.6.3.7  | Ondulation de la tension .....   | 36        |
| II.6.4  | Dimensionnement des composants .....   | 37        |
| II.6.4.1  | Calcul de l'inductance.....  | 38        |
| II.6.4.2  | Calcul de la capacité du condensateur de sortie.....   | 38        |
| II.6.4.3  | Calcul de la capacité du condensateur d'entrée .....   | 38        |
| II.7  | Principe du MLI (PWM).....   | 39        |
| II.8  | Conclusion .....   | 40        |
| <b>Chapitre III. Commande d'un systeme photovoltaïque .....</b> |  | <b>42</b> |
| III.1   | Introduction.....  | 42        |
| III.2   | Techniques de commande MPPT .....  | 43        |
| III.2.1   | Méthodes indirectes .....  | 43        |
| III.2.2   | Méthodes directes .....  | 43        |
| III.3   | Méthode de perturbation et observation (P&O).....  | 44        |
| III.3.1   | Méthode de perturbation et observation (P&O).....  | 44        |
| III.4   | Optimisation par essais particuliers OEP .....   | 49        |
| III.4.1   | Origines.....  | 49        |
| III.4.2   | Principe .....   | 49        |
| III.4.3   | Principales caractéristiques .....   | 51        |
| III.4.4   | Configuration de la méthode.....   | 51        |
| III.4.4.1   | Nombre de particules .....   | 51        |
| III.4.4.2   | Topologie du voisinage.....  | 51        |
| III.4.5   | Technique MPPT basée sur PSO .....   | 52        |
| III.5   | Résultats de simulation .....  | 57        |
| III.5.1   | Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O .....  | 59        |
| III.5.1.1   | Variation de l'ensoleillement avec température fixe.....   | 59        |
| III.5.1.2   | Variation de la température avec ensoleillement fixe .....                                       | 63        |
| III.5.2   | Résultat de simulation de OEP (PSO).....   | 67        |
| III.5.3   | Comparaison par simulation des commandes MPPT- OEP et MPPT-P&O .....                             | 72        |
| III.6   | Conclusion .....   | 76        |
| <b>Conclusion générale.....</b>                                 |  | <b>78</b> |
| <b>Références bibliographiques.....</b>                         |  | <b>81</b> |

## Liste des Figures

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1– Potentiel solaire en Algérie [6].   | 8  |
| Figure I.2– Schéma block d'une cellule PV.  | 12 |
| Figure I.3– Jonction PN d'un Cellule Photovoltaïque.  | 12 |
| Figure I.4– Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.  | 13 |
| Figure I.5– Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.  | 14 |
| Figure I.6– Cellule, module et panneau PV.  | 15 |
| Figure I.7– Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque [9].   | 16 |
| Figure I.8– Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [9], [11], [16]. | 17 |
| Figure I.9– Dépendance des caractéristiques du panneau PV de la température.  | 18 |
| Figure I.10– Dépendance des caractéristiques du panneau PV de l'éclairement.  | 18 |
| Figure II.1– Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour [9].   | 22 |
| Figure II.2– Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe [9], [13], [16].                   | 23 |
| Figure II.3– Connexion GPV-charge à travers un étage d'adaptation.  | 23 |
| Figure II.4– Connexion GPV-charge à travers un convertisseur DC/DC.   | 24 |
| Figure II.5– Schéma bloc du générateur photovoltaïque.  | 24 |
| Figure II.6– Schéma équivalent d'une cellule idéale.  | 25 |
| Figure II.7– Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [18].  | 26 |
| Figure II.8– Convertisseur DC/DC.   | 29 |
| Figure II.9– Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.   | 31 |
| Figure II.10– Circuit équivalent du convertisseur boost avec S fermé.   | 31 |
| Figure II.11– Circuit équivalent du convertisseur boost avec S ouvert.  | 32 |
| Figure II.12– Fonctionnement de boost en mode continu [9].  | 33 |
| Figure II.13– Frontière entre le mode continu et discontinu [18].   | 34 |
| Figure II.14– Courant de sortie et celui de la bobine à la frontière ( $V_{dc}$ constant).                                      | 35 |
| Figure II.15– Formes d'ondes courants/tensions d'un convertisseur boost en mode continu.  | 37 |
| Figure II.16– Principe de la commande MLI.  | 40 |
| Figure III.1– Chaîne de conversion d'énergie solaire à base d'une commande MPPT [12], [20].                                     | 42 |
| Figure III.2– Caractéristiques de fonctionnement de la méthode Perturbation-Observation [9], [22].                              | 45 |
| Figure III.3– Algorithme de la méthode de Perturbation et Observation [23].   | 46 |
| Figure III.4– Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.   | 48 |
| Figure III.5– Modèle de simulation de la méthode P&O [24].  | 48 |
| Figure III.6– Mouvement de particule dans le processus d'optimisation [27].   | 50 |
| Figure III.7– trois topologies différentes a) Etoile b) Anneau c) Rayon [25].   | 52 |
| Figure III.8– Organigramme de l'algorithme MPPT proposé basé sur PSO [28].  | 55 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figure III.9– Pseudo-code de l'algorithme MPPT proposé basé sur PSO. ....  | 56 |
| Figure III.10– Caractéristiques P–V et I–V de champ photovoltaïque. ....   | 57 |
| Figure III.11– Schéma bloc du système photovoltaïque sous Simulink. ....   | 58 |
| Figure III.12– Schéma bloc du GPV sous Simulink. ....  | 58 |
| Figure III.13– Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT-P&O. ....  | 59 |
| Figure III.14– Profil de l'ensoleillement. ....  | 59 |
| Figure III.15– Présente l'évolution de tension, courant et puissance du GPV pour un<br>ensoleillement variable. ....   | 60 |
| Figure III.16– Rapport cyclique du convertisseur boost. ....   | 61 |
| Figure III.17– Impulsion de la gâchette du transistor (IGBT) ....  | 61 |
| Figure III.18– Evolution de tension, de courant et de puissance de charge pour un<br>ensoleillement variable. ....   | 62 |
| Figure III.19– Profile de la température. ....   | 63 |
| Figure III.20– Evolution de tension, de courant et de puissance du GPV pour une température<br>variable. ....  | 64 |
| Figure III.21– Rapport cyclique D. ....  | 65 |
| Figure III.22– Impulsion de la gâchette du transistor ....   | 65 |
| Figure III.23– Evolution de tension, de courant et de puissance de charge pour une<br>température variable. ....   | 66 |
| Figure III.24– Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT OEP. ....  | 67 |
| Figure III.25– Profil de l'ensoleillement. ....  | 68 |
| Figure III.26– Evolution de tension, de courant et de puissance du GPV pour un<br>ensoleillement variable. ....  | 69 |
| Figure III.27– Rapport cyclique du convertisseur boost. ....   | 70 |
| Figure III.28– Présente l'évolution de tension, de courant et de puissance de charge avec<br>système PV commandé en MPPT-OEP pour un ensoleillement variable. .... | 71 |
| Figure III.29– Profil de l'ensoleillement. ....  | 72 |
| Figure III.30– Présente l'évolution de tension, de courant et de puissance de GPV avec<br>système PV commandé en MPPT-OEP pour un ensoleillement variable. ....    | 73 |
| Figure III.31– Rapport cyclique du convertisseur boost. ....   | 74 |
| Figure III.32– Présente l'évolution de tension, courant et puissance de la charge pour un<br>ensoleillement variable. ....   | 75 |

## Liste des Tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau I.1 – Taux d’ensoleillement pour chaque région de l’Algérie [6].....                  | 8  |
| Tableau I.2 – Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 200 [15].....       | 15 |
| Tableau II.1 – Type des convertisseurs DC/DC. ....  | 30 |
| Tableau III.1 – Signes des perturbations [9].....   | 45 |
| Tableau III.2 – Paramètres du système photovoltaïque étudié. ....                             | 57 |
| Tableau III.3 – Paramètres de simulation du système PV commandé en MPPT basé sur PSO<br>..... | 67 |



## **Glossaire**

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor   |
| MCC  | Mode de Conduction continue         |
| MLI  | Modulation de Largeur d'Impulsion   |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking        |
| PV   | Photovoltaïque                      |
| P&O  | Perturbation et observation         |
| OEP  | Optimisation par essaim particulier |
| MPP  | Pointe de puissance maximale        |

---

## Nomenclature

|            |  |
|------------|--|
| $C_{dc}$   | Condensateur de sortie du convertisseur Boost              |
| $C_{pv}$   | Condensateur d'entier du convertisseur Boost               |
| $f_s$      | Fréquence de système PV                                    |
| $i_{cell}$ | Le Courant fournie par la cellule photovoltaïque           |
| $i_{ph}$   | Courant photonique, du modèle d'une cellule photovoltaïque |
| $i_{pv}$   | Courant du système photovoltaïque                          |
| $I_{sat}$  | Le courant de saturation                                   |
| $I_{rr}$   | Le courant de saturation de la diode                       |
| $I_{sc}$   | Le courant de court-circuit                                |
| $V_{oc}$   | La tension de circuit-ouvert                               |
| $V_{cell}$ | La tension aux bornes de la cellule                        |
| $G$        | Ensoleillement   |
| $q$        | Charge de l'électron                                       |
| $\alpha$   | Coefficient de température de $I_{ph}$ .                   |
| $K$        | Constant de Boltzmann                                      |
| $E_g$      | L'énergie du band gap                                      |
| $n$        | Facteur d'idéalité de la jonction                          |
| $N_s$      | Nombre de cellules connectées en série                     |
| $N_p$      | Nombre de cellules connectées en parallèle                 |
| $L_{Gpv}$  | Inductance du convertisseur du système photovoltaïque      |
| $P_{pv}$   | Puissance débitée par la source solaire photovoltaïque     |

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'énergie est indispensable à la vie de tout le monde, peu importe quand et où ils sont. Cela est particulièrement vrai en ce nouveau siècle, où les gens continuent à poursuivre un haut niveau de vie. Parmi les différents types d'énergie que l'Homme a besoin au quotidien, l'électricité est la plus importante qui lui sert pour l'éclairage, le chauffage, la cuisson, la distraction, la communication et l'information, etc. Au cours du XXe siècle, on a abondamment utilisé les combustibles et les sources d'énergie à base d'hydrocarbures, ce qui s'est manifesté par le dégagement de grandes quantités de gaz notamment le dioxyde de carbone.

La pollution de l'air, les changements climatiques, les risques du nucléaire, les limites des réserves des énergies traditionnelles (uranium, pétrole, charbon et gaz naturel) qui sont épuisables et leurs répartitions non équitables sur le globe terrestre, l'augmentation des peuples du monde et l'accroissance des besoins énergétiques ont fait prendre conscience qu'un recours à d'autres moyens de production d'énergies respectueux de la planète où nous vivons, s'impose.

La solution est de recourir aux énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologiques. Malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques ; coût élevé et rendement bas. Le photovoltaïque (PV) fait partie de ces énergies [1].

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque (PV) qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé. L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Concernant ce travail, nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), et l'optimisation par essaim particulier (OEP) [2].

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter d'une manière générale l'énergie renouvelable, générateur photovoltaïques et leurs composants, ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un GPV.

Dans le troisième chapitre, on va modéliser un système photovoltaïque, comme la modélisation de GPV et la modélisation de convertisseurs DC/DC à savoir, le convertisseur Boost.

Dans le troisième chapitre, nous exposerons les techniques du contrôle pour poursuite du point de puissance maximale (MPPT) par les deux techniques. La première est la commande MPPT de type perturbe et observe (P&O) et le deuxième est la commande MPPT basée sur l'optimisation par essaim particulaires (OEP). La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats de simulation du système photovoltaïque, validant les techniques des commandes établies.

En fin, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale, dont nous rappelons quelque commentaire et que les perspectives qui pourront faire suite à notre travail.

# **Chapitre I. Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

# Chapitre I. Généralité sur les systèmes photovoltaïques

## I.1 Introduction

Le Soleil a toujours fasciné l'Homme. Il est source de vie et sans lui, nous n'existerions pas. Néanmoins, si nous replaçons le Soleil dans le contexte de l'Univers - ce dernier contient des centaines de milliards de milliards d'étoiles - c'est un astre tout à fait ordinaire, une étoile parmi les étoiles - soit une sphère que sa température élevée rend lumineuse.

Cette étoile – notre étoile – située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène et apparaît sous un angle d'un peu plus d'un demi-degré. Il faudrait donc 93 000 soleils côte à côte pour occuper l'étendue de la voûte céleste. Son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète. La Lune est 400 fois plus petite que le Soleil, mais 400 fois plus près de la Terre, ce qui explique la taille apparente similaire des deux astres dans le ciel, ce dont on peut se rendre compte en particulier lors des éclipses de Soleil.

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein. Cette énergie est transmise sous forme de rayonnement [3].

## I.2 L'énergie renouvelable

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres [4].

## **I.2.1 Types d'énergie renouvelables**

Différentes techniques ont été élaborées pour pouvoir extraire de l'énergie des phénomènes et d'éléments naturels et parmi les énergies les plus utilisées on a :

### **I.2.1.1 L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne utilise la force du vent. Son principe est de transformer dans un premier cas l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis dans un second cas par l'intermédiaire d'un générateur l'énergie mécanique en énergie électrique ; son inconvénient est qu'elle peut engendrer des nuisances sonores.

### **I.2.1.2 L'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique c'est une technique très ancienne qui permet de stocker des masses importantes d'eau que l'on transforme ensuite en électricité. On la nomme aussi hydroélectricité. Celle-ci peut être produite par des centrales hydrauliques alimentées en partie par des barrages.

### **I.2.1.3 L'énergie géothermique**

Des centrales géothermiques se servent de la chaleur dégagée par le noyau terrestre. L'avantage de cette énergie est qu'elle ne dépend pas des conditions climatiques ni des saisons. L'énergie géothermique se présente sous deux formes :

- Basse température pour chauffer les habitations des particuliers,
- Haute température, dans ce cas, c'est un moyen de produire de l'électricité.

### **I.2.1.4 L'énergie biomasse**

L'énergie biomasse concerne le bois, les résidus forestiers, les déchets organiques et verts ainsi que le biocarburant ou essence verte. Cette essence verte est classée en deux types :

- Ethanol issu du blé, maïs, betterave, canne à sucre,
- Biodiesel issu du colza, tournesol, soja.

Ces biocarburants sont souvent mélangés aux carburants classiques pour limiter les effets de serre. Le bois, quant à lui, est un combustible utilisé depuis la nuit des temps pour le chauffage et la cuisine [4].

### I.2.1.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie de rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière prévenante sur la surface de la terre après filtrage par l'atmosphère terrestre. Cette énergie produite par l'homme en captant le rayonnement émis par le soleil principalement sous forme électrique ou thermique, c'est l'une des principales formes d'énergie renouvelables.

Dans une maison solaire, l'apport solaire permet de faire de l'économie importante. Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau.

L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins. L'énergie solaire permet donc de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un cout proportionnel quasi nul [5].

- A) **Chauffe-eau solaire** : L'énergie solaire est principalement utilisée pour le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage de bâtiments comme il est présenté.
- B) **Le gisement solaire** : Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. La connaissance du gisement solaire d'une région selon les coordonnées géographiques du site, selon le nombre d'année de mesures disponibles, selon la saison et le temps (mois, jour, heure) et selon la nature du nombre d'heures d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol [5].
- C) **Le rayonnement solaire** : Que soit la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10GW. Le rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :
  - 5% dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4 \mu\text{m}$ ) ;
  - 40% dans la bande visible ( $0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$ ) ;
  - 55% dans la bande des infrarouges ( $> 0.8 \mu\text{m}$ ) [5].

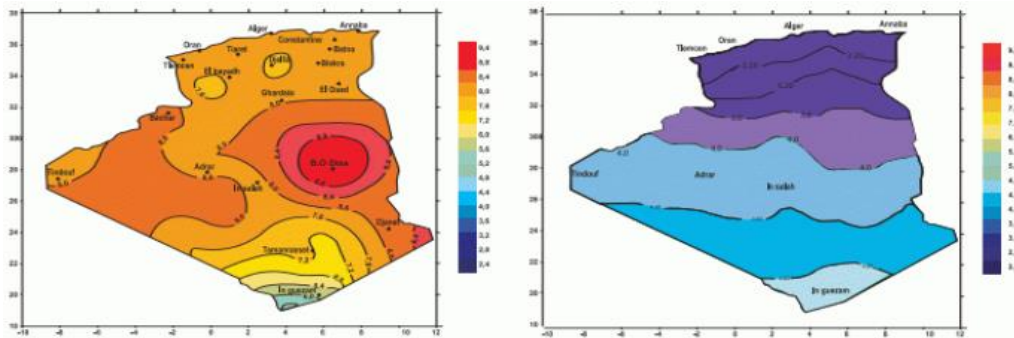
## I.2.2 Le potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 *kwh* sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700 \text{ kwh}/\text{m}^2/\text{an}$  au nord et

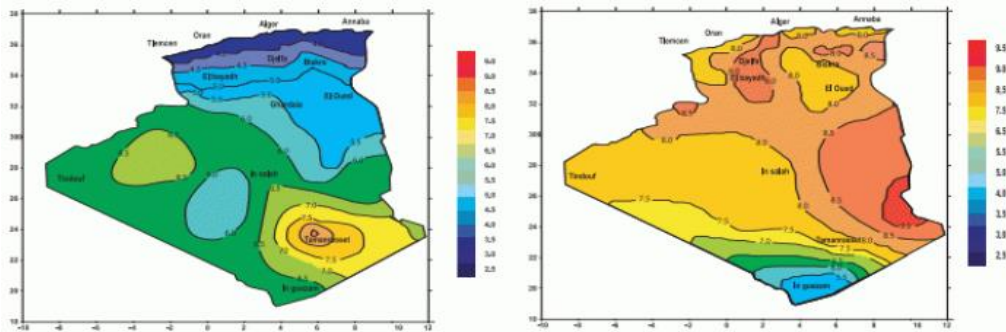
2263kwh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique [6].

Le Tableau I.1 indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.



Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de juillet

Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de Décembre



Irradiation globale journalière reçue sur plan normale au mois de Décembre

Irradiation globale journalière reçue sur plan normale au mois de juillet

Figure I.1– Potentiel solaire en Algérie [6].

Tableau I.1 – Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [6].

| Regions  | Regions cotières | Hauts plateaux | Sahara |
|--|------------------|----------------|--------|
| Superficie                                     | 4%               | 10%            | 86%    |
| Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)     | 2650             | 3000           | 3500   |
| Energie moyenne reçue (kwh/m <sup>2</sup> /an) | 1700             | 1900           | 2650   |

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental.

Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement [6].

## **I.3 Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque**

On distingue trois modes d'exploitation d'un panneau PV : autonome, connecté au réseau et hybride.

### **I.3.1 Mode autonome**

En mode autonome, le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau. En mode autonome, le système est constitué généralement des éléments suivants :

- Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement ;
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique ;
- Le régulateur de charge protège la batterie contre la surcharge de l'énergie produite par le champ de modules PV et inclut habituellement une protection contre les décharges profondes de la batterie ;
- Un convertisseur de charge permet l'utilisation d'appareil à courant continu ou à courant alternatif.

Il existe deux types de systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage et sans stockage,

#### **I.3.1.1 Système autonome avec stockage**

Le système autonome exigera des batteries d'accumulations pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile. Ce type de système nécessite un dimensionnement en tenant compte de la localisation, du besoin et de l'autonomie des batteries [7], [8].

#### **I.3.1.2 Système autonome sans stockage**

L'énergie électrique produite par les modules solaires est directement utilisée par le récepteur. Il n'y a pas de stockages électrochimiques. Généralement les générateurs « au fil

du soleil sont destinés à alimenter des moteurs électriques en courant continu ou en alternatif : pompage d'eau et le stocké dans des bassins.

### **I.3.2 Mode connecté aux réseaux**

Dans ce mode, le panneau PV est connecté au réseau électrique. Le système photovoltaïque est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV. Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau (accrochage au réseau).

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil. Donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie [7], [8].

### **I.3.3 Mode hybride**

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité tel que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc. Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/thermique, PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation [7], [8].

Dans notre étude, on s'intéresse au fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome avec stockage pour l'alimentation électrique d'une maison par ce que C'est le système le plus répandu vu leur capacité à couvrir la totalité de la demande énergétique. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit), et ainsi fournir une autonomie de fonctionnement.

Dans la plupart des systèmes photovoltaïque le coût du seul générateur représente plus de 50% du coût de l'installation. Il est judicieux de définir des stratégies de fonctionnement qui minimisent la puissance crête installée pour satisfaire le service requis par l'application dans les conditions de gisement solaire offertes par le site et qui permettent d'absorber à chaque instant la puissance optimale disponible au niveau du générateur avec une batterie qui permet de stocker la production d'un surplus de puissance éventuelle Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome [7], [8].

## I.4 Générateur photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [3].

### I.4.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

On appelle conversion photovoltaïque, la conversion de la lumière en électricité et cela se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le semi-conducteur le plus utilisé est disponible est le silicium (Si) présent dans le sable sous forme de silice et de silicates. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons (présence de trous), dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée alors entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée. Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont « bombardés » par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être 'arrachés/décrochés' : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons 'déchrochés' créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque [4].

La Figure I.3 illustre le principe de cellule PV :

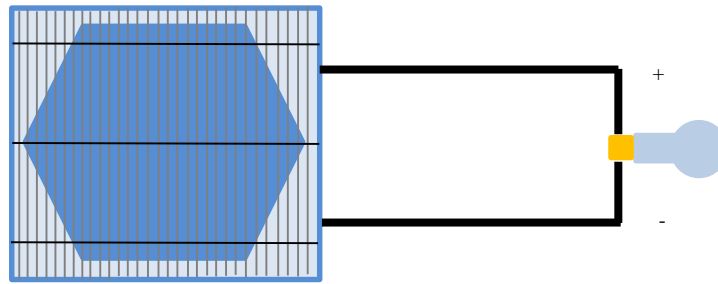


Figure I.2– Schéma block d'une cellule PV.

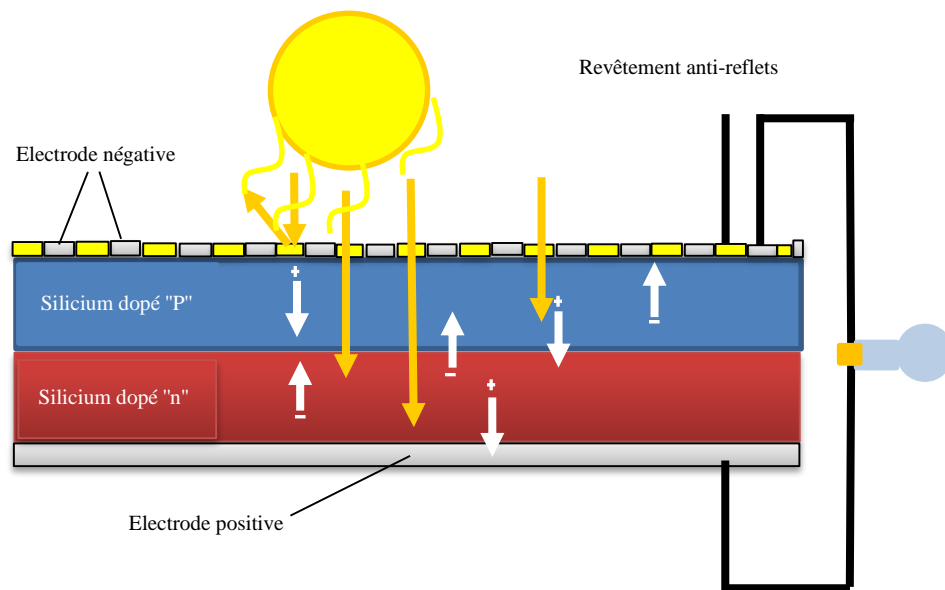


Figure I.3– Jonction PN d'un Cellule Photovoltaïque.

## I.4.2 Différents types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Les principaux types de cellules à l'heure actuellement utilisés sont :

- Les cellules monocristallines : ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12-16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), mais aussi celle qui ont le coup le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée :
- Les cellules poly cristallines : leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : 11% - 13% (18% en laboratoire) ;

- Les cellules amorphes : elles ont un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres [9], [10], [11].

### I.4.3 Association de cellules photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un module PV pratique.

#### I.4.3.1 Association de cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La Figure I.4 montre la caractéristique résultante ( $I_{CS}$ ,  $V_{CS}$ ) obtenue en a Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série [12], [13], [14].

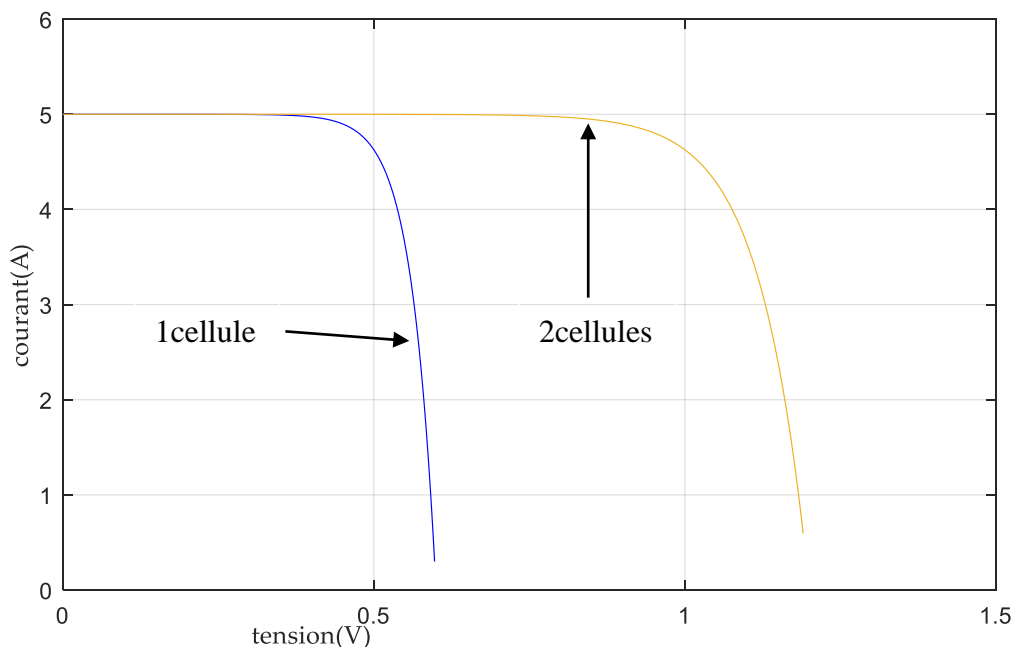


Figure I.4– Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

### I.4.3.2 Association de cellules photovoltaïques en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La Figure I.5 montre la caractéristique résultante ( $I_{CP}$ ,  $V_{CP}$ ) obtenue en associant en parallèle NP cellules identiques ( $I_C$ ,  $V_C$ ) [3], [12], [13], [14].

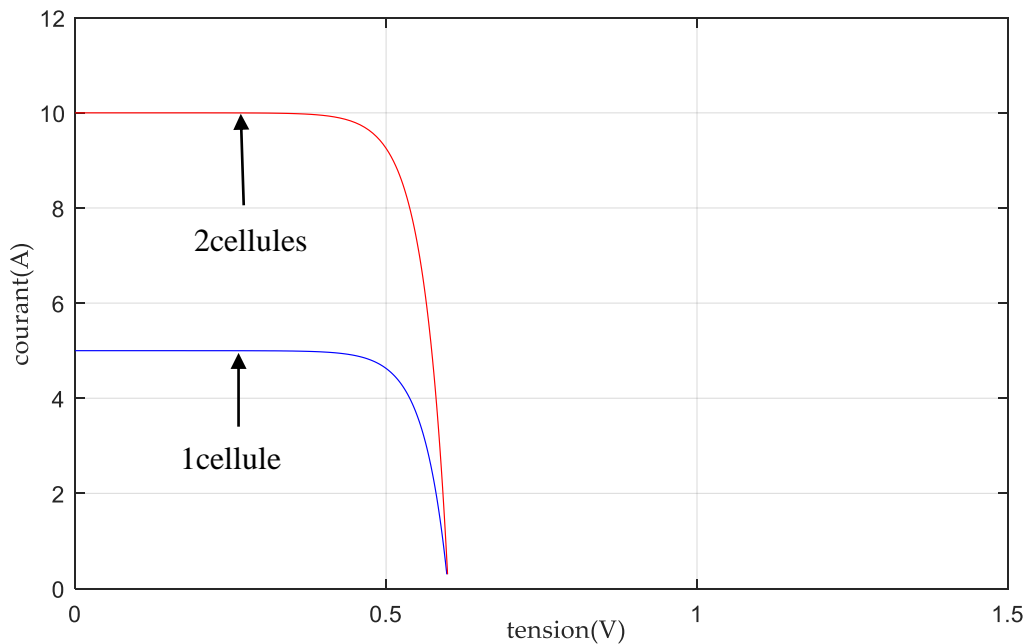


Figure I.5– Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

## I.4.4 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire.

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de ce document, on utilisera le terme GPV pour désigner un module ou un panneau PV.

La Figure I.6, représente une cellule, un module et un panneau PV.

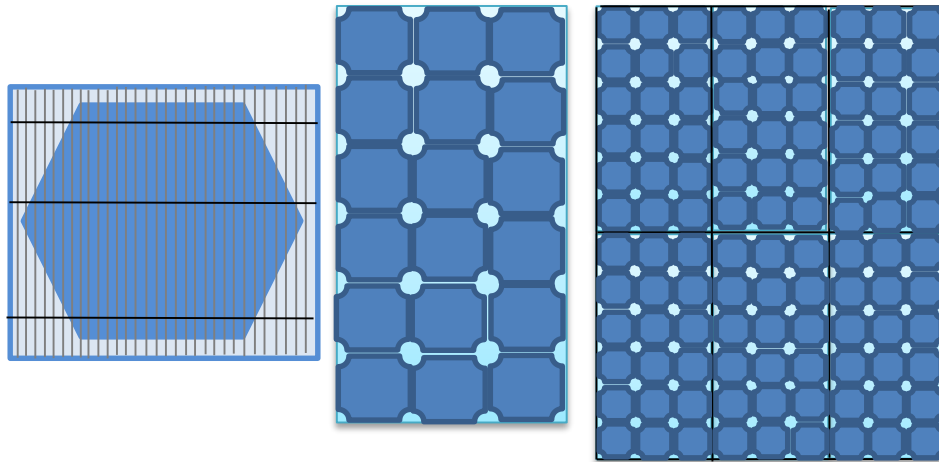


Figure I.6– Cellule, module et panneau PV.

Dans notre travail nous avons adopté le module photovoltaïque BP SX 3200 de BP Solaire. La série SX de BP Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 50 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 200W. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données par le fabricant (BP Solar's SX séries) dans le Tableau I.2.

Tableau I.2 – Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 200 [15].

| Electrical Characteristics <sup>2</sup>               | SX 3200                |
|---|------------------------|
| Puissance maximale ( $P_{max}$ ) <sup>2</sup>         | 200W                   |
| Tension à $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )                      | 24.5V                  |
| Courant à $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )                      | 8.16A                  |
| Minimum garanti ( $P_{max}$ )                         | 182.0W                 |
| Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )                 | 8.7A                   |
| Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )                | 30.8V                  |
| Coefficient de température de ( $I_{sc}$ )            | (0.065±0.015)%/°C      |
| Coefficient de température de ( $V_{oc}$ )            | -(111±10) mV/°C        |
| Coefficient de température de Puissance               | -(0.5±0.05)%/°C        |
| NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m <sup>2</sup> ; wind 1m/s) | 47±2°C                 |
| Calibre maximum des fusibles en série                 | 15A                    |
| Tension maximale du systeme                           | 600V (U.S. NEC rating) |

La caractéristique courant-tension illustrée dans la Figure I.7 décrit le comportement du module photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement  $G=1000$  et température ambiante  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

La courbe I-V du module photovoltaïque passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit  $I_{sc}$  en C ;
- La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  en S ;
- La puissance maximale  $P_{max}$  en M [9].

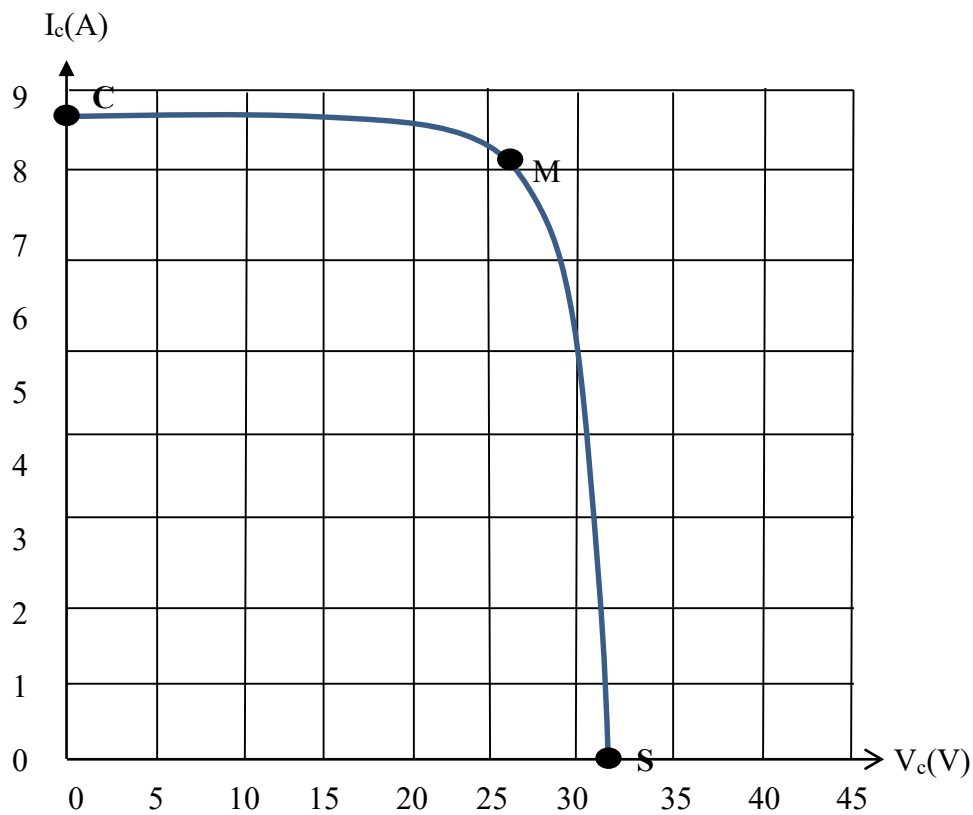


Figure I.7– Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque [9].

### I.4.5 Protections d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules photovoltaïques pour éviter les courants négatifs dans le générateur photovoltaïque (diode anti-retour) ;
- La protection lors de la mise en série de modules photovoltaïques permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

La Figure I.8 montre la schématique classiquement adoptée pour la protection du GPV élémentaire [11].

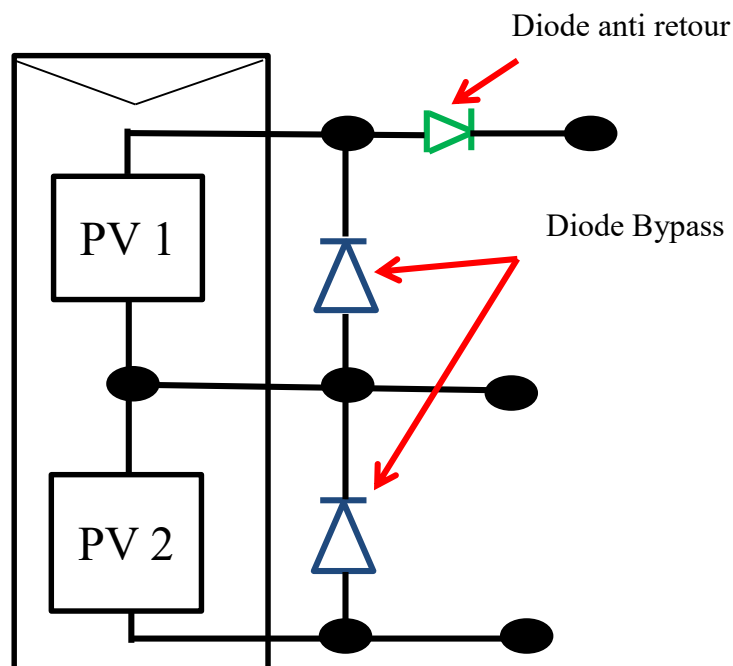


Figure I.8– Schématisation d'un générateur photovoltaïque élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [9], [11], [16].

## I.4.6 L'influence de la température et l'éclairement sur GPV

### I.4.6.1 L'influence de la température sur les panneaux

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. La Figure I.9 illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et différentes températures. On remarque que le courant du court-circuit  $I_{sc}$  reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la photopile

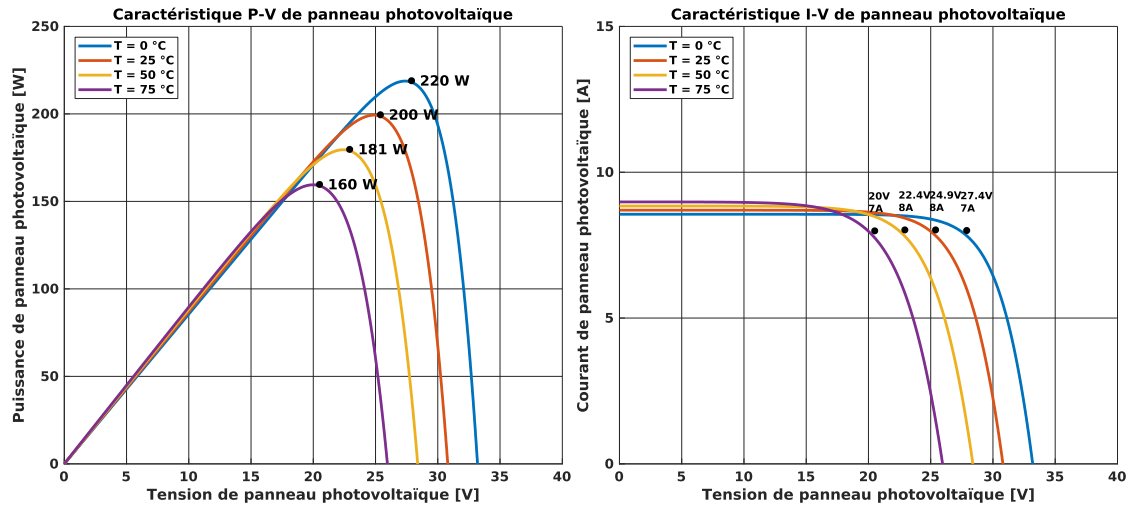


Figure I.9– Dépendance des caractéristiques du panneau PV de la température.

### I.4.6.2 L'influence de l'éclairement sur les panneaux

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. En effet, le photo-courant est proportionnel à l'éclairement, par contre le courant à travers la diode qui n'est que le photo-courant à l'obscurité, reste inchangé aux variations de ce dernier. La Figure I.10 présente respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous une température de référence de 25 °C et sous divers niveaux d'éclairements. On remarque que la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  reste très peu changée en faisant varier l'éclairement  $G$ , par contre le courant du court-circuit  $I_{sc}$  varie beaucoup en augmentant l'éclairement ce qui engendre une augmentation de la puissance photovoltaïque

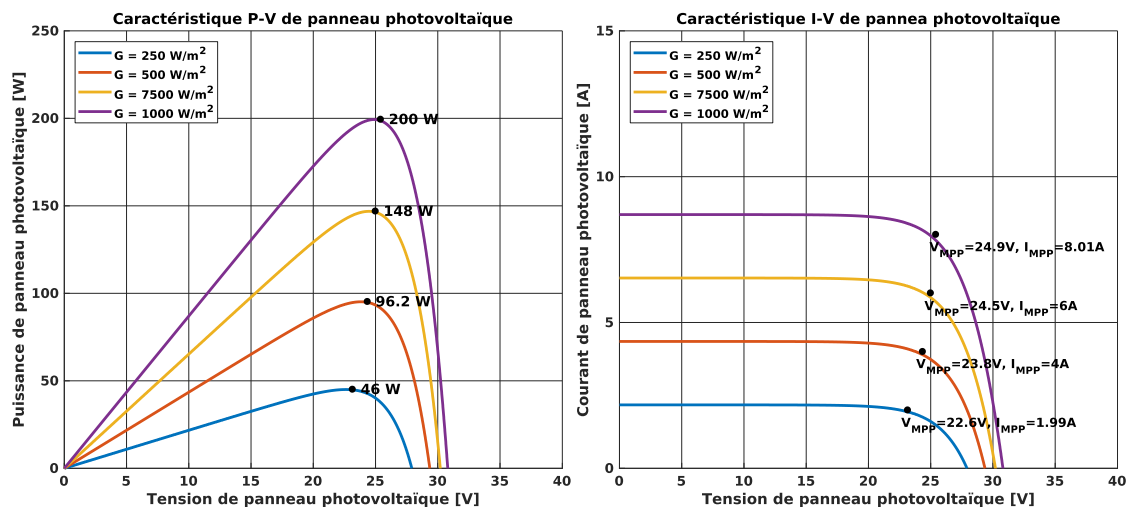


Figure I.10– Dépendance des caractéristiques du panneau PV de l'éclairement.

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelque notion sur l'énergie photovoltaïque, les types d'énergie photovoltaïque et le potentiel solaire en Algérie. Nous avons ensuite expliqué le mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque et en va commencer vert le générateur PV et d'effarants topologie d'un GPV.

## **Chapitre II. Modélisation d'un système photovoltaïque**

# Chapitre II. Modélisation d'un système photovoltaïque

## II.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. On a vu dans le chapitre précédent que les caractéristiques I-V et P-V du générateur dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ce convertisseur statique assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Dans ce chapitre l'étude sera focalisée principalement la modélisation sur un générateur photovoltaïque et le convertisseur DC-DC de type boost.

## II.2 Connexion directe GPV-Charge

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et au très haut degré de fiabilité.

La configuration d'une connexion directe du générateur photovoltaïque (GPV) et la charge par le biais d'une diode anti-retour est illustrée sur la Figure II.1. Dans le cas où, la charge est une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur. La batterie pourrait donc se décharger sur le GPV et entraîner par conséquent un endommagement irréversible. De ce fait, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. L'inconvénient de cette configuration, est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de  $P_{\max}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [9].

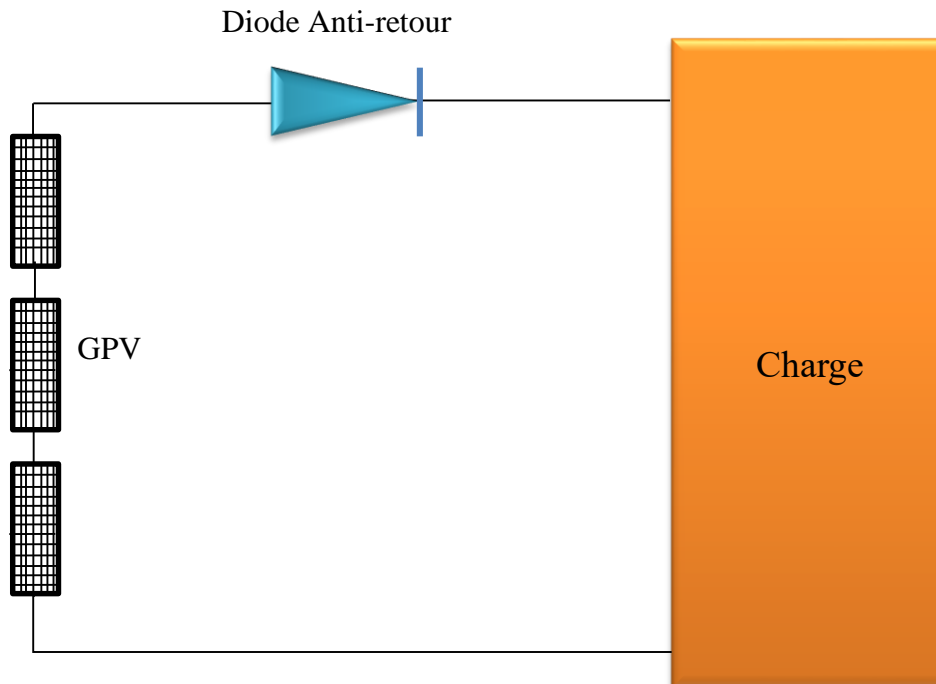


Figure II.1– Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour [9].

En effet, le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et la caractéristique I-V de la charge. Il est à noter que dans ce type de connexion directe la nature de la charge est continue (DC) car une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe du fait que le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage d'adaptation spécifique de type onduleur.

Trois types de charges DC existent à savoir : charge purement résistive, charge de type source de tension et charge de type source de courant.

Sur la Figure II.2, nous avons représenté les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV ainsi que les caractéristiques I-V pour les trois types de charges. Le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale ( $P_{\max}$ ) pour un courant optimal ( $I_{\text{opt}}$ ) et une tension optimale ( $V_{\text{opt}}$ ) est le point d'intersection entre les caractéristiques I-V du GPV et celles des trois types de charges :

- Point A pour une charge résistive ;
- Point B pour une charge de type source de tension ;
- Point C pour une charge de type source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement  $P_A'$ ,  $P_B'$  et  $P_C'$ , correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible  $P_{\max}$ . Ce qui nous permet de dire qu'une perte d'une partie de la puissance délivrable aux bornes du générateur PV entraînant à la longue des pertes de production énergétiques importantes [9].

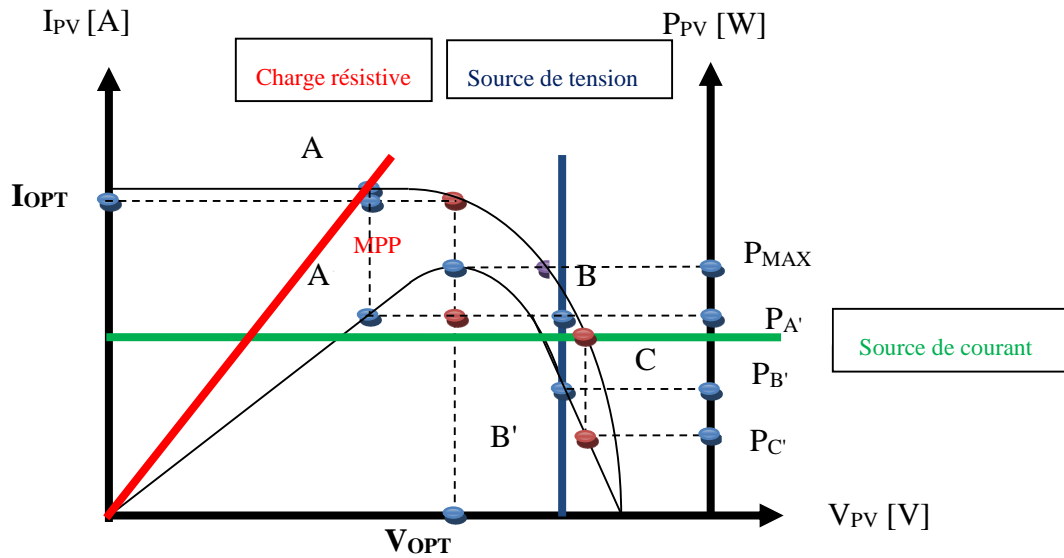


Figure II.2– Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe [9], [13], [16].

### II.3 Relation entre un GPV et une charge (étage d'adaptation)

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{max}$  disponible.

La Figure II.3 suivante représente l'étage d'adaptation dans le système PV :



Figure II.3– Connexion GPV-charge à travers un étage d'adaptation.

## II.4 Système PV étudié

Dans le but de ne pas compliquer les choses lors de la réalisation des travaux de cette thèse qui a pour objectif l'optimisation énergétique d'une chaîne de conversion PV, une configuration très simple a été choisie pour l'étude. Elle consiste en un GPV débitant sur une résistance par l'intermédiaire d'un convertisseur comme illustré sur la Figure II.4 [1].

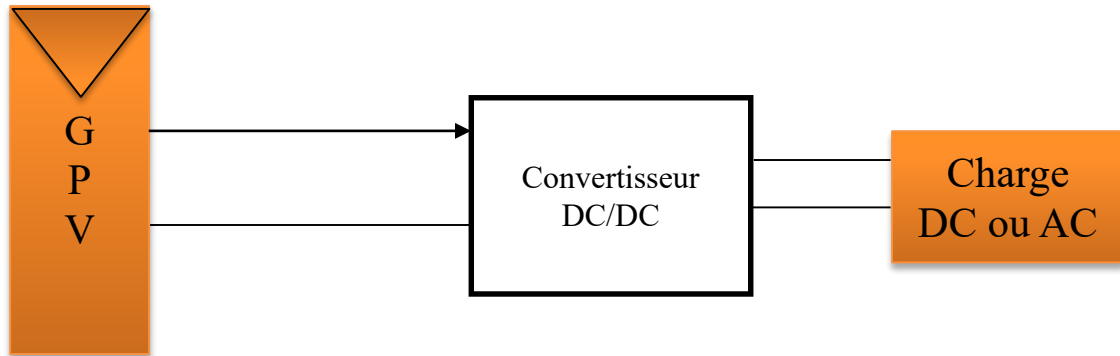


Figure II.4– Connexion GPV-charge à travers un convertisseur DC/DC.

## II.5 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)

Le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque est réduit en un simple schéma bloc dans la Figure II.5 à deux entrées (E : l'éclairement et T : la température de la cellule) et deux sorties (I : le courant et V : la tension) [2].

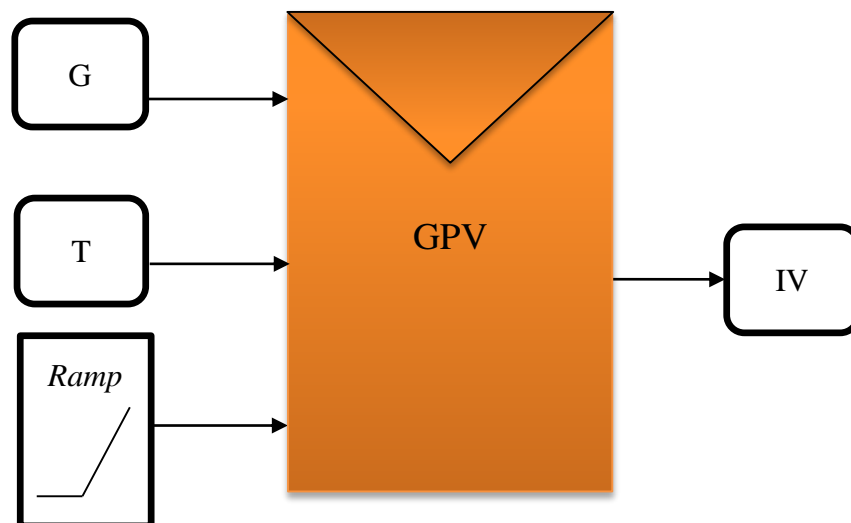


Figure II.5– Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

## II.5.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode. Ce générateur délivre un courant  $I_{PV}$  selon la Figure II.6, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [2].

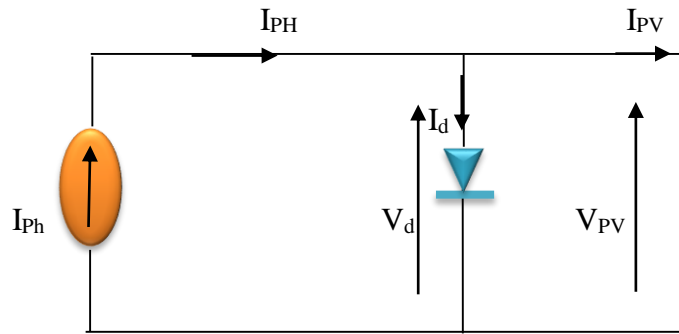


Figure II.6– Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Les équations retenues de ce modèle sont :

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

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

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{II.2})$$

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

$$V_t = \frac{nkT}{q} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

- $G$  : Éclairement absorbé par la cellule ;
- $G_{ref}$  : Éclairement de référence ( $1000 \text{ w/m}^2$ ) ;
- $I_o$  : Courant de saturation inverse de la diode ;
- $V_t$  : Tension thermique ;
- $n$  : Facteur d'idéalité de la photopile ;
- $k$  : Constant de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ) ;
- $q$  : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) [17].

## II.5.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la Figure II.7. Ce schéma équivalent est constitué d'une diode ( $d$ ) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ )

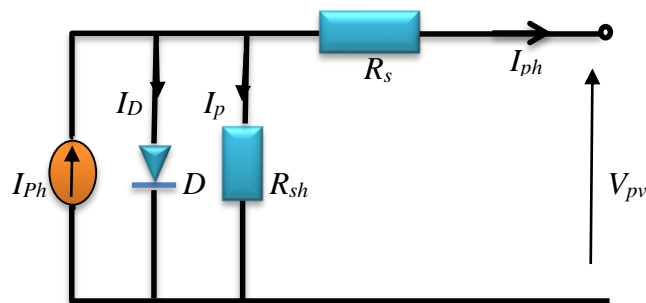


Figure II.7– Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [18].

Le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (\text{II.5})$$

Le courant photonique  $I_{ph}$  dépendant de l'ensoleillement  $G$  [ $W/m^2$ ] solaire et de la température  $T$  [ $^{\circ}K$ ].  $I_{ph}$  est donné par l'expression :

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} [I_{sc} + \alpha(T - T_r)] \quad (II.6)$$

Le courant de saturation  $I_{sat}$  est donné par :

$$I_{sat} = I_{rr} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{q \cdot E_g}{nK} \left[ \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right]} \quad (II.7)$$

Le courant de saturation  $I_{rr}$  de la diode pour la température  $T_r$  est calculé par l'équation suivante :

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - (V_{oc} / R_{sh})}{e^{\frac{qV_{oc}}{nkT_r}} - 1} \quad (II.8)$$

Avec :

- $V_{cell}$  : La tension aux bornes de la cellule ;
- $I_{cell}$  : Le courant fourni par la cellule ;
- $I_{sc}$  : Le courant de court-circuit ;
- $V_{oc}$  : La tension de circuit-ouvert ;
- $q$  : La charge de l'électron [ $1.602 \cdot 10^{-19}$  C] ;
- $n$  : Le facteur d'idéalité de la jonction ;
- $E_g$  : L'énergie du band gap ;
- $\alpha$  : Coefficient de température de  $I_{ph}$  ;
- $k$  : La constante de Boltzmann [ $1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K] [19].

### II.5.3 Cas d'un module photovoltaïque

Le modèle développé pour une cellule, peut être étendu au cas du raccordement des cellules en série et en parallèle afin d'obtenir le modèle d'un module photovoltaïque (en faisant l'hypothèse que toutes ces cellules sont identiques à l'intérieur du module).

Si on considère que le module photovoltaïque contient  $N_s$  cellules en série et  $N_p$  cellules en parallèle, le module est basé sur l'équation suivante :

$$I_M = I_{ph-M} - I_{D-M} - I_{p-M} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{ph-M} = I_{ph-cell} \cdot N_p \\ I_{D-M} = I_{D-cell} \cdot N_p = \left[ I_{sat} \cdot \left( e^{\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nkT}} - 1 \right) \right] \cdot N_p \\ I_{p-M} = I_{p-cell} \cdot N_p = \left[ \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right] \cdot N_p \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Alors le module photovoltaïque s'écrit comme :

$$I_M = I_{ph-cell} \cdot N_p - \left[ I_{sat} \cdot \left( e^{\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nkT}} - 1 \right) \right] \cdot N_p - \left[ \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right] \cdot N_p \quad (\text{II.11})$$

## II.5.4 Cas d'un générateur photovoltaïque

Un module photovoltaïque consiste en l'association de plusieurs cellules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est physiquement réalisé à partir de la mise en parallèle et/ ou série de plusieurs modules photovoltaïque. Le terme générateur photovoltaïque (GPV) est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier.

L'expression du courant débité par l'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle est définie par l'équation suivante :

$$I_{pv} = N_p \cdot \left( I_{ph} - I_{sat} \cdot \left( e^{\frac{qF}{nkT}} - 1 \right) - \frac{F}{R_p} \right), \text{ avec : } F = \frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

- $N_s$  : Le nombre de cellule connectées en série ;
- $N_p$  : Le nombre de cellule connectées en parallèle ;
- $V_{pv}$  : La tension aux bornes de GPV ;
- $I_{pv}$  : Le courant fournie par le GPV.

## II.6 Modélisation d'un convertisseur DC/DC :

La Figure II.8 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

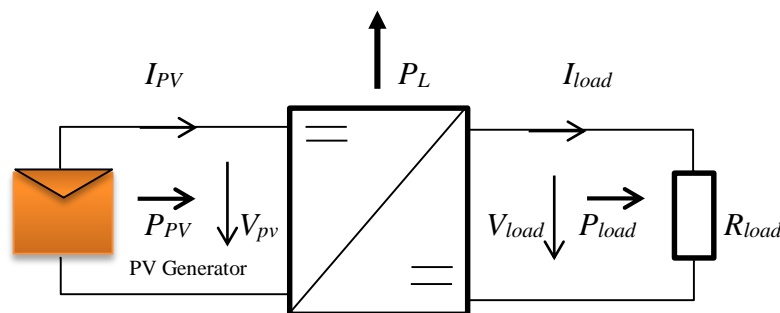


Figure II.8– Convertisseur DC/DC.

### II.6.1 Principe de fonctionnement

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le PF sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande.

Si les pertes internes  $P_L$  du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales. Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation  $f_s$  fixe et un rapport cyclique  $D$  variable. Dans ce qui suit, le principe de fonctionnement de quelques types de convertisseurs DC/DC est décrit [6].

## II.6.2 Le type des convertisseurs DC/DC :

Le Tableau II.1 représenté la complexité de chaque type de convertisseur. Dans ce chapitre, on s'intéresse particulièrement au convertisseur statique continu-continu de type boost, connu par son caractère élévateur de tension.

Tableau II.1 – Type des convertisseurs DC/DC.

| Type                | Fonction                | Interrupteur | Diode | Transformateur | Complexité |
|---------------------|-------------------------|--------------|-------|----------------|------------|
| <b>Buck</b>         | Abaisseur               | 1            | 1     | Non            | Faible     |
| <b>Boost</b>        | Elévateur               | 1            | 1     | Non            | Faible     |
| <b>Buck-boost</b>   | Abaisseur/<br>Elévateur | 1            | 1     | non            | Faible     |
| <b>Half Forward</b> | Abaisseur/<br>Elévateur | 1            | 1     | Oui            | Moyenne    |
| <b>Flyback</b>      | Abaisseur/<br>Elévateur | 1            | 1     | Oui            | Moyenne    |
| <b>Push pull</b>    | Abaisseur/<br>Elévateur | 2            | 2     | Oui            | Forte      |
| <b>Half bridge</b>  | Abaisseur/<br>Elévateur | 2            | 4     | Oui            | Forte      |
| <b>Full bridge</b>  | Abaisseur/<br>Elévateur | 4            | 4     | Oui            | Très forte |

## II.6.3 Convertisseur Boost (élévateur de tension)

### II.6.3.1 Modélisation d'un convertisseur Boost

Le hacheur élévateur est un convertisseur de l'électronique de puissance (DC/DC). Il permet l'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge afin d'extraire la puissance maximale du générateur et cela en agissant sur le rapport cyclique de l'interrupteur de puissance qui est calculé par une des techniques de maximisation de puissance [4].

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, montre sur la Figure II.9, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de

plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP.

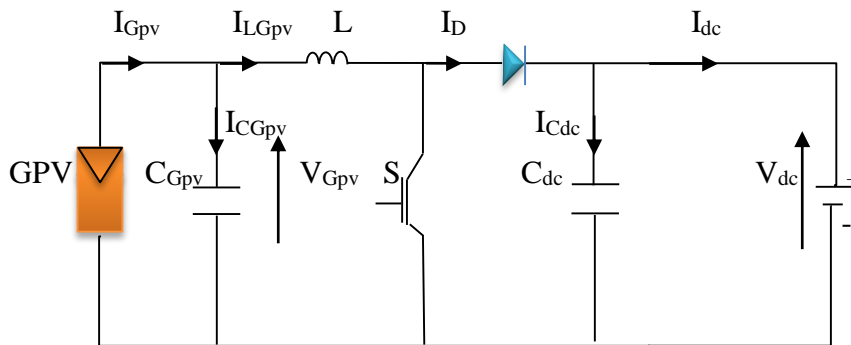


Figure II.9– Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.

### II.6.3.2 Principe de fonctionnement d'un convertisseur survolteur

Le principe de fonctionnement d'un boost est basé sur la position du commutateur S ouvert/fermé. Pendant l'intervalle de temps  $T_{ON} = D T_s$ , où D est le rapport cyclique l'interrupteur fermé connecte l'entrée (à travers l'inductance) à la masse, et donc la puissance stockée dans la bobine augmente (par l'augmentation du courant la traversant). La diode est alors bloquée, ainsi aucun courant ne peut charger la batterie comme le montre la Figure II.10.

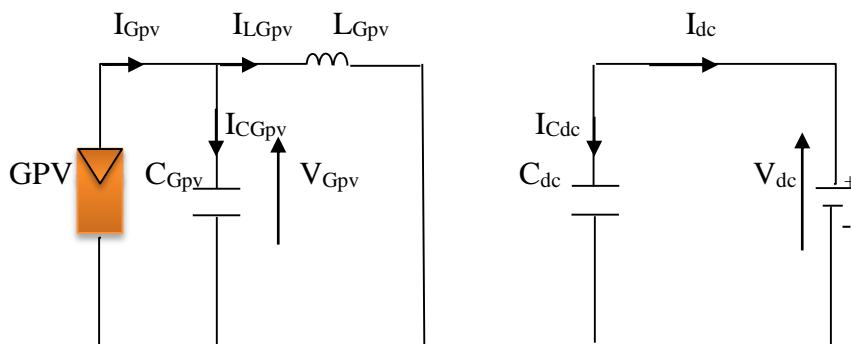


Figure II.10– Circuit équivalent du convertisseur boost avec S fermé.

Lorsque l'interrupteur est ouvert sur l'intervalle  $T_{OFF} = (1-D) T_s$ , l'étage de sortie reçoit l'énergie emmagasinée dans la bobine ainsi que celle provenant directement de l'entrée (du module photovoltaïque). En régime établi, le condensateur de sortie est supposé avoir une capacité suffisante pour assurer une tension de sortie constante  $V_{dc}$  (et donc le courant traversant le condensateur de sortie est supposé nul) comme il est illustré dans la Figure II.11.

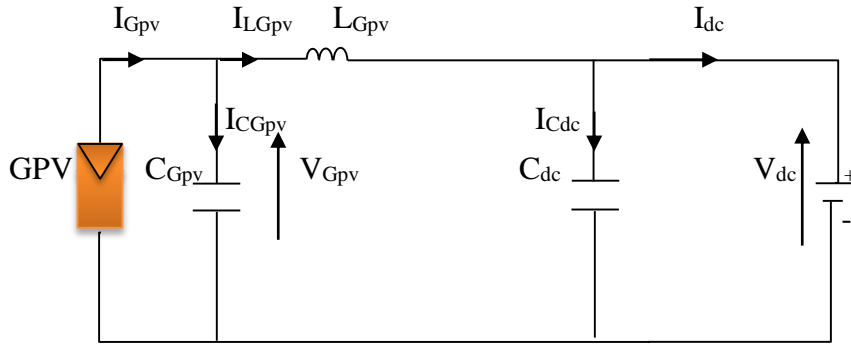


Figure II.11– Circuit équivalent du convertisseur boost avec S ouvert.

### II.6.3.3 Fonctionnement en mode de conduction continu (MCC)

En régime établi, ce mode se caractérise par le fait d'avoir en permanence ( $I_{LGpv} > 0$ ).

Lorsque l'interrupteur est fermé nous avons :

$$V_{LGpv} = V_{Gpv} \quad (II.12)$$

Tandis que lorsque l'interrupteur est ouvert, la loi des mailles fournit :

$$V_{LGpv} = V_{Gpv} - V_{dc} \quad (II.13)$$

La tension aux bornes de la bobine est donnée par :

$$V_{LGpv} = L_{Gpv} \frac{dI_{LGpv}}{dt} \quad (II.14)$$

Donc le courant de la bobine s'écrit comme :

$$I_{LGpv} = \int_0^{DT_s} \frac{V_{LGpv}}{L_{Gpv}} dt + \int_{DT_s}^{T_s} \frac{V_{LGpv} - V_{dc}}{L_{Gpv}} dt \quad (II.15)$$

Le tracé représentatif du courant qui traverse la bobine et la tension à ces bornes est donné par la Figure II.12.

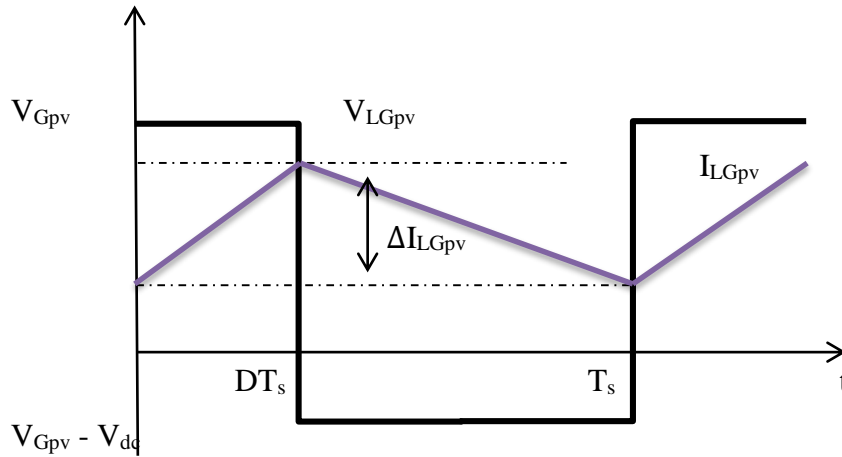


Figure II.12– Fonctionnement de boost en mode continu [9].

Où :  $\Delta I_{LGpv}$  représente l'ondulation du courant  $I_{LGpv}$ .

Nous supposons plus tard que notre commande travaillera toujours en mode continu, alors il est nécessaire de faire fonctionner le convertisseur dans ce mode.

La tension moyenne aux bornes de l'inductance  $L_{Gpv}$  étant nulle, ce qui en résulte :

$$V_{Gpv} T_{ON} = T_{OFF} (V_{dc} - V_{Gpv}) \quad (\text{II.16})$$

Ceci conduit à :

$$V_{dc} = \frac{1}{1-D} V_{Gpv} \quad (\text{II.17})$$

En supposant que les pertes sont négligeables, nous obtenons :

$$V_{Gpv} I_{Gpv} = V_{dc} I_{dc} \quad (\text{II.18})$$

D'où, d'après l'équation II.14 on trouve :

$$I_{dc} = I_{Gpv} (1-D) \quad (\text{II.19})$$

#### II.6.3.4 Calcul de la valeur de l'inductance de la bobine assurant un fonctionnement en mode continu

A la frontière entre le mode continu et le mode discontinu le courant traversant l'inductance part de, et revient à, 0 sur une période  $T_s$  comme le représente la figure II.13

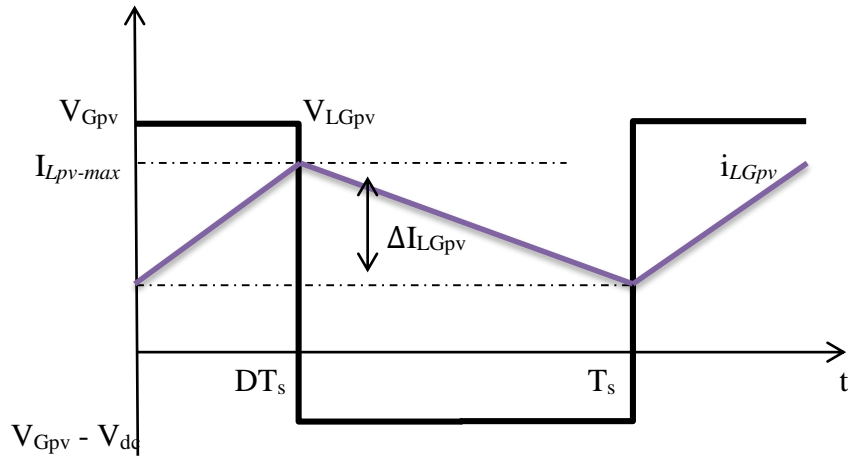


Figure II.13– Frontière entre le mode continu et discontinu [18].

Dans cette situation, le courant moyen à la frontière parcourant la bobine vérifie :

$$I_{LGpv} = \frac{I_{Lpv-max}}{2} \quad (\text{II.20})$$

Ce qui revient à écrire :

$$I_{LGpv} = \frac{DT_s V_{Gpv}}{2L_{Gpv}} \quad (\text{II.21})$$

A partir de (II.17) et (II.21) on trouve :

$$I_{LGpv} = \frac{D(1-D)T_s V_{dc}}{2L_{Gpv}} \quad (\text{II.22})$$

Sachant qu'en régime permanent le courant moyen parcourant le condensateur d'entrée est nul, il vient donc :

$$I_{Gpv} = I_{LGpv} \quad (\text{II.23})$$

Et à partir de (II.19), (II.22), et (II.23), on trouve :

$$I_{dc} = \frac{D(1-D)^2 T_s V_{dc}}{2L_{Gpv}} \quad (\text{II.24})$$

En considérant  $V_{dc}$  comme constant, il est alors possible de tracer l'évolution du courant de sortie et celui traversant la bobine dans le cas frontière en fonction du rapport cyclique :

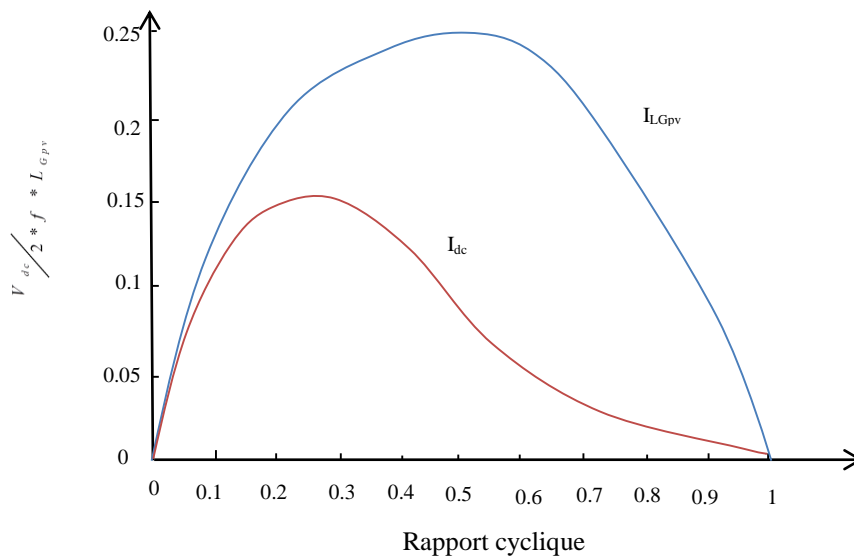


Figure II.14– Courant de sortie et celui de la bobine à la frontière ( $V_{dc}$  constant).

La figure II.14 illustre que pour un rapport cyclique  $D$  donné, à  $V_{dc}$  constant, si le courant moyen de sortie descend en dessous de la courbe de  $I_{dc}$  (ou si le courant moyen dans la bobine passe en dessous de la courbe de  $I_{LGpv}$ ), alors le convertisseur passera en mode discontinu.

Ce tracé est important dans le sens où il donne, le courant limite pour être en mode continu, qui est le mode dans lequel on espère de faire fonctionner le convertisseur DC-DC.

Le calcul des dérivées des équations (II.22) et (II.24) permet de calculer les valeurs maximales des courants  $I_{dc}$  et  $I_{LGpv}$  respectivement à  $D = 1/3$ ,  $D = 1/2$ , ce qui donne :

$$I_{dc-\max} = \frac{2T_s V_{dc}}{27L_{Gpv}} \quad (\text{II.25})$$

$$I_{LGpv-\max} = \frac{T_s V_{Gpv}}{8L_{Gpv}} \quad (\text{II.26})$$

Les équations (II.25), (II.26) peuvent être utilisées pour calculer la valeur d'inductance minimale qui permet de fonctionner le convertisseur en mode de conduction continue. La valeur de cette inductance peut être calculée par l'une des deux équations suivantes :

$$L_{Gpv-\min} = \frac{2T_s V_{dc}}{27I_{dc-\max}} \quad (\text{II.27})$$

$$L_{Gpv-\min} = \frac{T_s V_{Gpv}}{8I_{Gpv-\max}} \quad (\text{II.28})$$

### II.6.3.5 Formes d'ondes

La figure (II.10) donne les formes d'ondes du convertisseur boost en mode de conduction continue.

### II.6.3.6 Ondulation du courant

L'ondulation de courant  $\Delta I_{LGpv}$  vérifie la loi d'ohm aux bornes de  $L_{Gpv}$  pendant le temps  $T_{ON}$  ce qui revient à écrire :

$$V_{LGpv} T_{ON} = L_{Gpv} \Delta I_{LGpv} \quad (\text{II.29})$$

Soit donc :

$$\Delta I_{LGpv} = \frac{V_{Gpv} D}{L_{Gpv} f_s} \quad (\text{II.30})$$

### II.6.3.7 Ondulation de la tension

A partir de la figure (II.15) on peut calculer l'ondulation de la tension comme suit :

$$\Delta V_{dc} = \frac{\Delta Q}{C_{dc}} = \frac{I_{dc} D T_s}{C_{dc}} \quad (\text{II.31})$$

Et à partir (II.19) et (II.31) on trouve :

$$\Delta V_{dc} = \frac{I_{Gpv} D (1-D)}{f_s C_{dc}} \quad (\text{II.32})$$

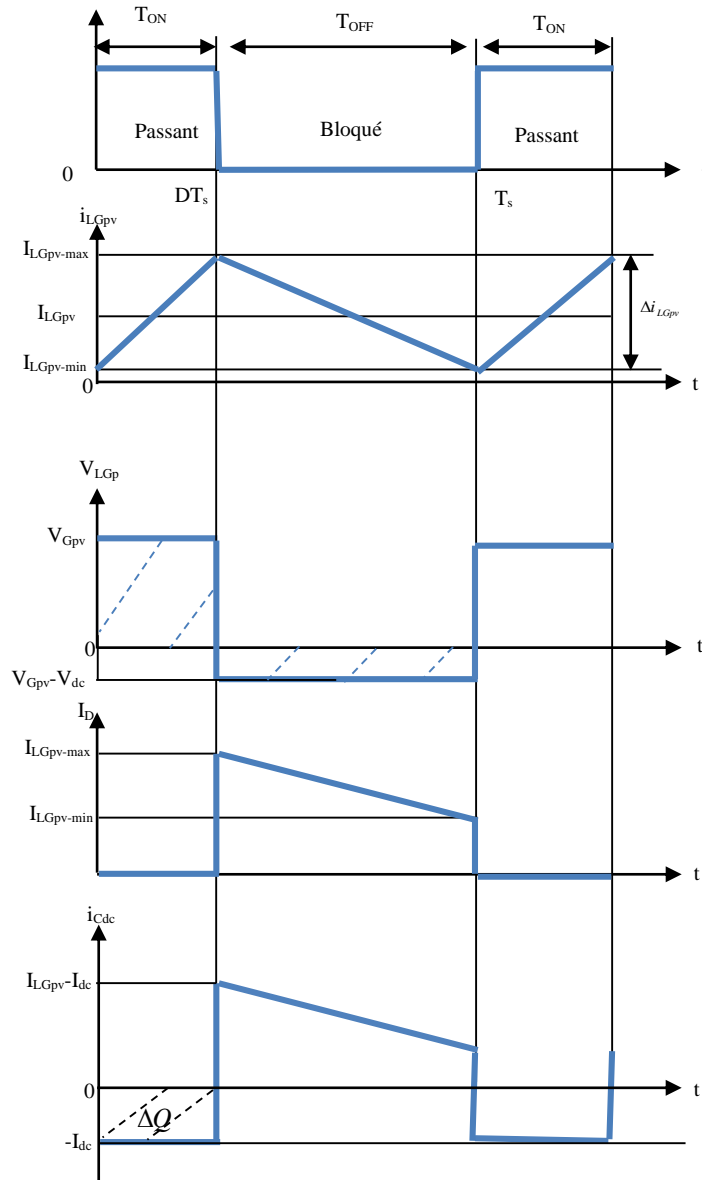


Figure II.15– Formes d'ondes courants/tensions d'un convertisseur boost en mode continu.

## II.6.4 Dimensionnement des composants

De la Figure II.9 le convertisseur boost est alimenté par la tension du générateur photovoltaïque. Cette tension est égale la tension d'un module au point de puissance maximale multipliée par le nombre des modules en série  $M_s$ .

### II.6.4.1 Calcul de l'inductance

On peut calculer la valeur de l'inductance pour une ondulation donnée pour le courant dans la bobine [9] :

$$L_{Gpv} = \frac{DV_{Gpv}}{\Delta I_{LGpv} f_s} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

- $L_{Gpv}$  : L'inductance du générateur photovoltaïque ;
- $V_{Gpv}$  : La tension du GPV ;
- $\Delta I_{LGpv}$  : L'ondulation de courant du GPV ;
- $f_s$  : La fréquence du système PV ;
- $D$  : Rapport cyclique.

### II.6.4.2 Calcul de la capacité du condensateur de sortie

On peut calculer la valeur de la capacité  $C_{dc}$  pour une ondulation imposée à la tension aux bornes du condensateur de sortie, tel que [9] :

$$C_{dc} = \frac{I_{Gpv\_moy} D (1-D)}{f_s \Delta V_{dc}} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

- $I_{Gpv\_moy}$  : Le courant moyenne du GPV ;
- $\Delta V_{dc}$  : L'ondulation de tension de la sortie ;
- $C_{dc}$  : Condensateur de sortie du hacheur DC/DC.

### II.6.4.3 Calcul de la capacité du condensateur d'entrée

La valeur de la capacité du condensateur d'entrée est donnée par [9] :

$$C_{Gpv} = \frac{DI_{Gpv\_moy}}{\Delta V_{Gpv} f_s} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

- $\Delta V_{Gpv}$  : L'ondulation de tension du GPV ;
- $C_{dc}$  : Condensateur de sortie du hacheur DC/DC.

L'ondulation du courant est maximale pour  $D = 1/2$ . Avec  $V_{Gpv} = 299$  V,  $I_{LGpv} = 136$  A et en imposant une ondulation  $\Delta I_{LGpv} = 1\% I_{LGpv}$ . En choisissant  $\Delta V_{dc}$  et  $\Delta V_{Gpv} = 5\% V_{dc}$ . La fréquence  $f_s = 50$  kHz. Pour  $M_s = 12$ , et par l'application numérique on trouve :

La valeur de l'inductance de GPV  $L_{Gpv} = 0.0022$  H.

La valeur de la capacité du condensateur de sortie  $C_{dc} = 16 \cdot 10^{-6}$  F.

La valeur de la capacité du condensateur d'entrée est  $C_{Gpv} = 100 \cdot 10^{-5}$  F [9].

$$L_{Gpv} = \frac{(0.5)(299)}{(0.01)(135)(50 \cdot 10^3)} = 0.0022 \text{ H} \quad (\text{II.36})$$

$$\Rightarrow L_{Gpv} = 0.0022 \text{ H}$$

$$C_{dc} = \frac{(135)(0.5)(1 - 0.5)}{(50 \cdot 10^3)(0.05 \cdot 900)} = 15 \cdot 10^{-6} \quad (\text{II.37})$$

$$\Rightarrow C_{dc} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

$$C_{Gpv} = \frac{(0.5)(135)}{(0.05 \cdot 900)(50 \cdot 10^3)} = 100 \cdot 10^{-5} \quad (\text{II.38})$$

$$\Rightarrow C_{Gpv} = 100 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

## II.7 Principe du MLI (PWM)

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Une méthode pour réguler la tension de sortie afin d'obtenir une tension moyenne fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de D sans modifier  $T_s$ .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique D et une tension en dents de scie  $V_{DS}$ .

- Lorsque  $D > V_{DS}$  :  $S = 1$ , l'interrupteur S est commandé à la fermeture (état ON) [9].
- Lorsque  $D < V_{DS}$  :  $S = 0$ , l'interrupteur S est commandé à l'ouverture (état OFF) [9].

Le schéma de principe est donné par la Figure II.16

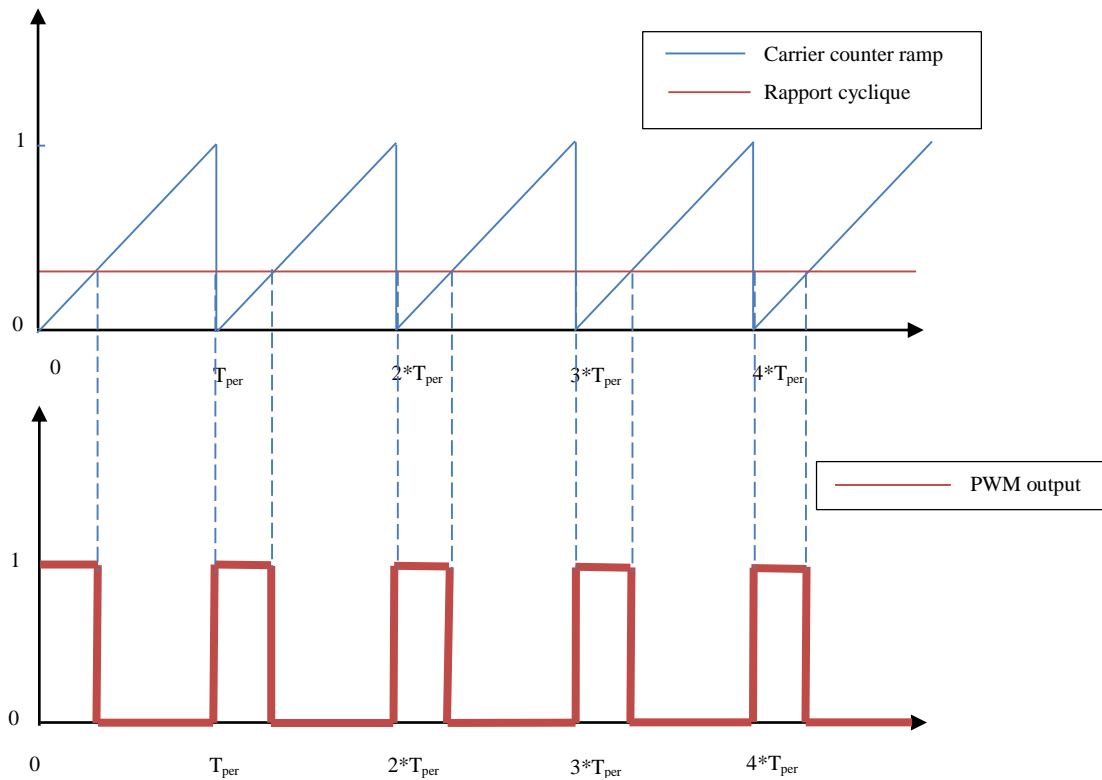


Figure II.16– Principe de la commande MLI.

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque tout en extra tant les caractéristiques du module photovoltaïque. Puis, nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente l'étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

**Chapitre III. Commande D'un Système**  
**Photovoltaïque**

# Chapitre III. Commande d'un système photovoltaïque

## III.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Cependant, la caractéristique I-V et P-V du générateur dépend de variations climatiques comme l'éclairement solaire et la température. Ces variations entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de le hacheur.

La technique de suivi du point à puissance maximal (Maximum Power Point Tracking : MPPT) a été développée depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

Dans ce chapitre, on va présenter et étudier par la suite deux algorithmes de commande celui de la méthode « perturbation et observation » et la méthode « d'optimisation de l'essaim de particules ».

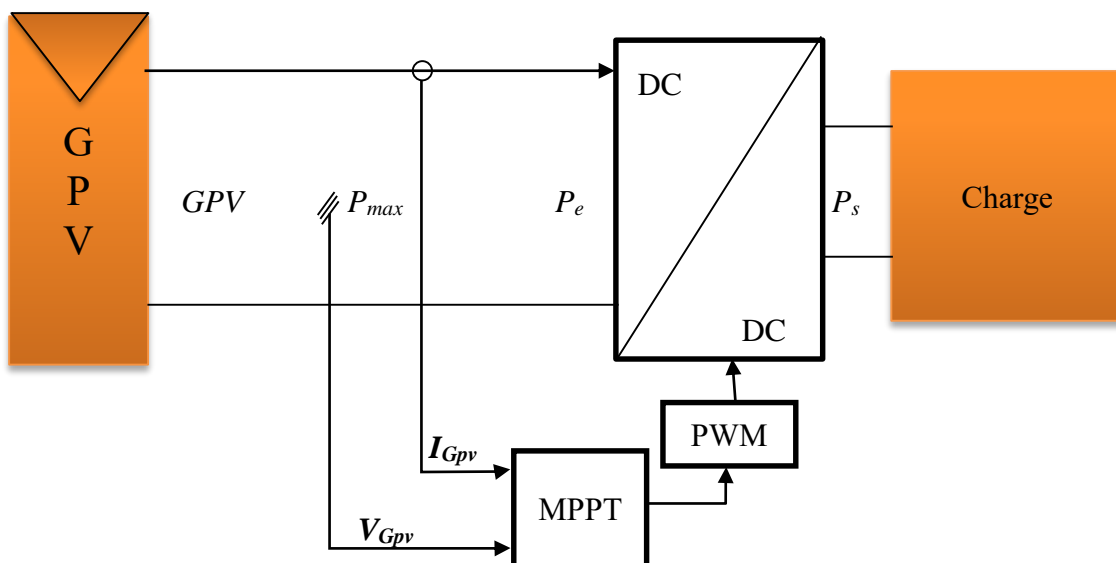


Figure III.1– Chaîne de conversion d'énergie solaire à base d'une commande MPPT [12], [20].

## III.2 Techniques de commande MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation et / ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres.

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes

### III.2.1 Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{cc}$  ou  $V_{co}$ ), 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. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.... [21]

### III.2.2 Méthodes directes

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. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), la méthode d'optimisation de l'essaim de particules (PSO), etc.... [21].

### III.3 Méthode de perturbation et observation (P&O)

#### III.3.1 Méthode de perturbation et observation (P&O)

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

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

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

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

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

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau  $V_{PV}$  avec un  $\Delta V$  et on observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

- Si  $\Delta P > 0$  alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la

même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

- Si  $\Delta P < 0$  le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP [9].

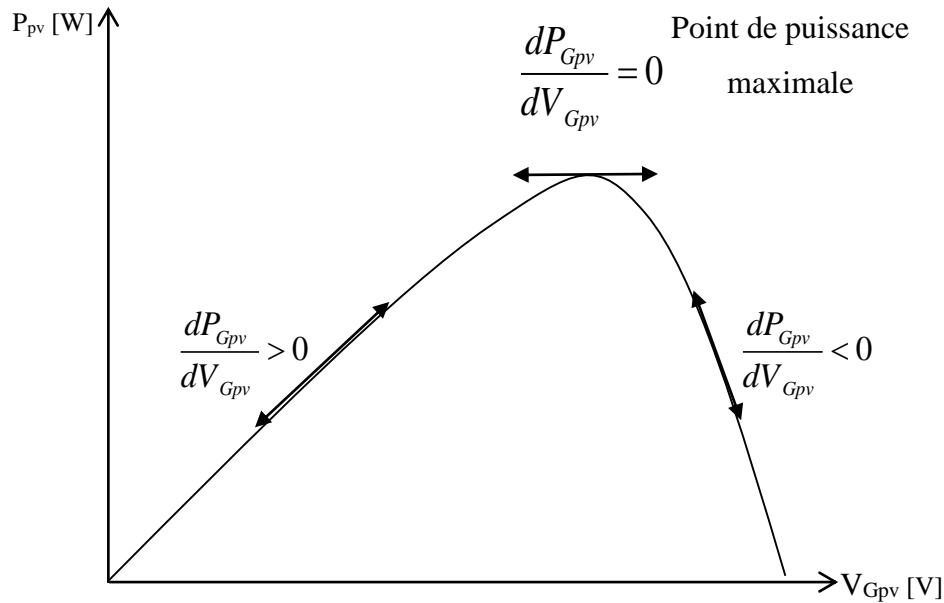


Figure III.2– Caractéristiques de fonctionnement de la méthode Perturbation-Observation [9], [22].

La Figure III.3 représente l'organigramme de la méthode de P&O récapitulé dans le Tableau III.1

Tableau III.1 – Signes des perturbations [9].

| Perturbation de la tension | Observation de la puissance | Prochaine Perturbation |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Positive(+)                | Positive(+)                 | Positive(+)            |
| Positive(+)                | Négative(-)                 | Négative(-)            |
| Négative(-)                | Positive(+)                 | Négative(-)            |
| Négative(-)                | Négative(-)                 | Positive(+)            |

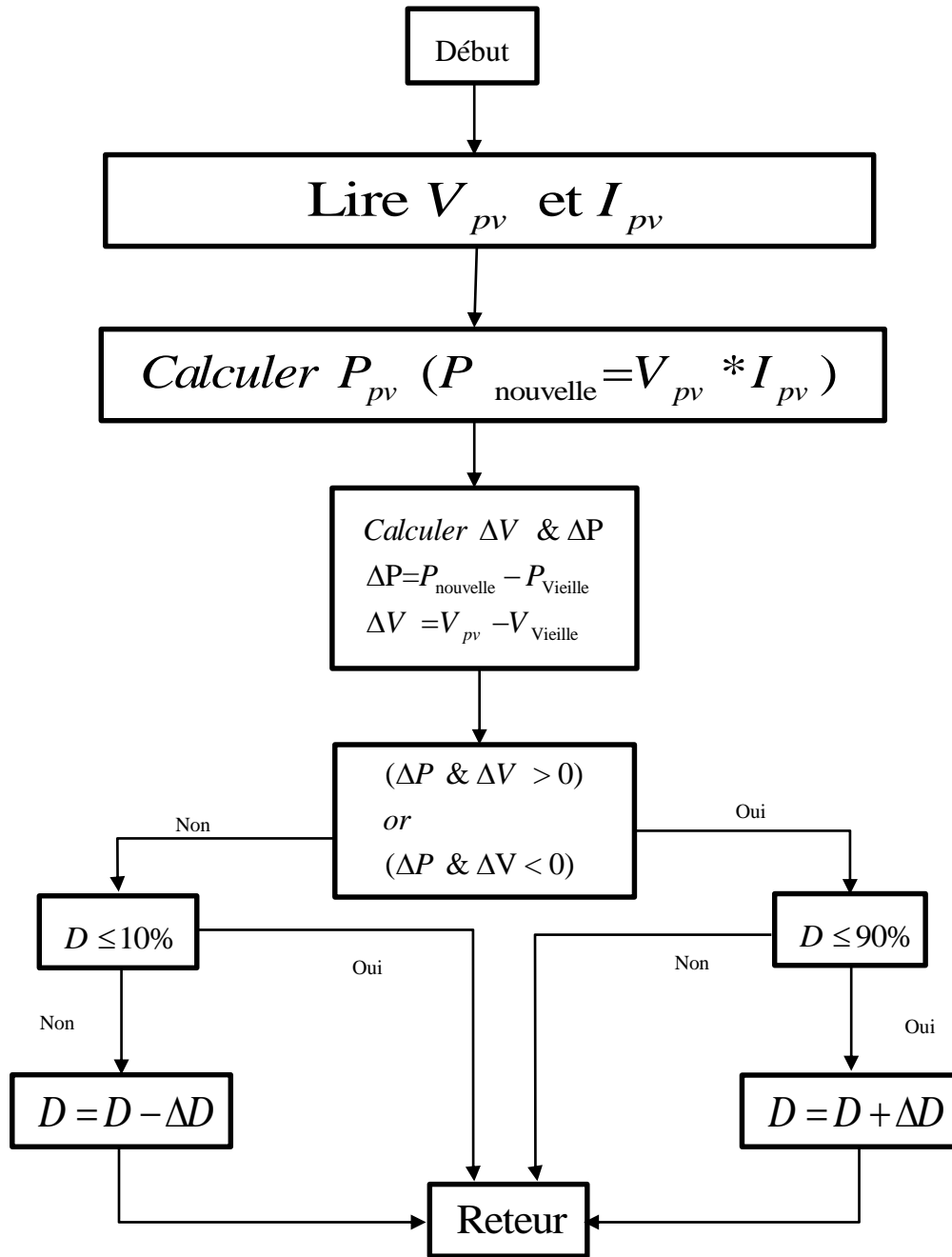


Figure III.3– Algorithme de la méthode de Perturbation et Observation [23].

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

On perturbe la tension de fonctionnement avec ( $\Delta V_{Gpv}$ ) et on observe la variation ( $\Delta P_{Gpv}$ ) de la puissance électrique. Si ( $\Delta P_{Gpv}$ ) est positif, alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP. D'autres perturbations

successives de la tension dans la même direction (c'est-à-dire avec le même signe algébrique) devraient déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP. Dans le cas où  $(\Delta P_{Gpv})$  est négatif, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP, et donc le signe algébrique de la perturbation de la tension devrait être inversé pour déplacer de nouveau le point de fonctionnement vers le MPP [9].

Sur la Figure III.4 on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP, du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe P(V) du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce qui nous amène à  $\Delta P > 0$  avec  $[\Delta P = P(i) - P(i-1)]$  le MPPT continue à perturber les tensions dans la même direction c-à-d vers le point B2.

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

A partir des points  $A \rightarrow B1 \rightarrow C1 \rightarrow C2$  l'algorithme P&O continue à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminue [4], [10].

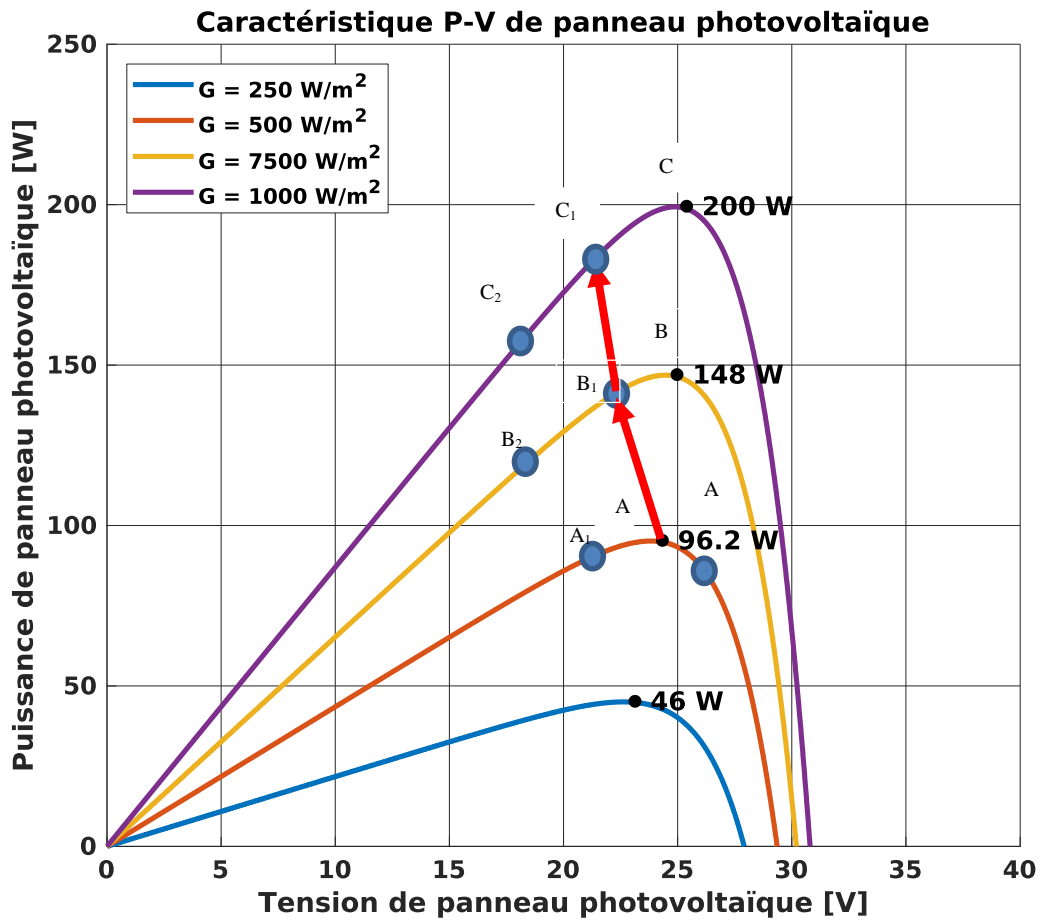


Figure III.4– Comportement de l’algorithme P&O sous un changement de l’éclairement.

Dans la Figure III.5 suivante en va représenter le modelé de simulation de la méthode perturbation et observation.

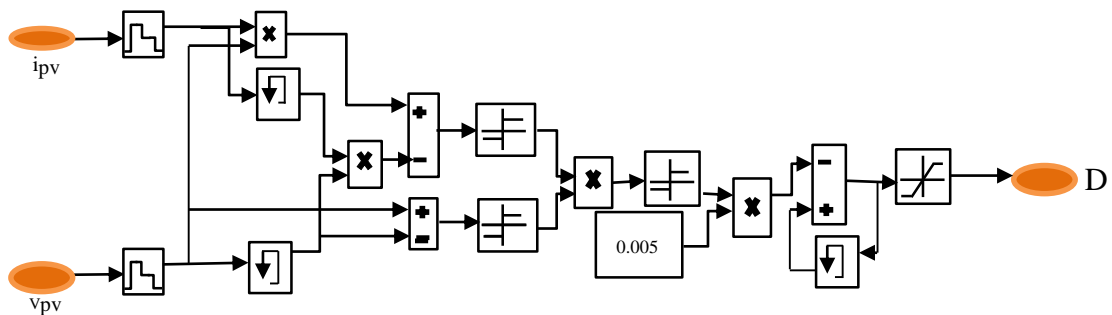


Figure III.5– Modèle de simulation de la méthode P&O [24].

## III.4 Optimisation par essais particuliers OEP

### III.4.1 Origines

L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization (PSO) est une méthode d'optimisation stochastique, pour les fonctions non-linéaires, basée sur la reproduction d'un comportement social et développée par le Dr.EBERHART et le Dr. KENNEDY en 1995. L'origine de cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de REYNOLD, HEPPNER ET GREANDER. Ces simulations ont mis en valeur la capacité des individus d'un groupe en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage. D'autre part, ces simulations ont également révélé l'importance du mimétisme dans la compétition qui oppose les individus à la recherche de la nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersés de façon aléatoire dans un espace de recherche, et dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont alors chercher à le reproduire. Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus. Les essaims de particules sont essentiellement utilisés afin de trouver l'optimum de fonctions non-linéaires. Pour cette raison, cette méthode est utile pour optimiser l'entraînement des réseaux de neurones [25].

### III.4.2 Principe

L'optimisation des essaims de particules (PSO) est une méthode de recherche d'EA stochastique basée sur la population, modélisée d'après le comportement des troupes d'oiseaux. L'algorithme PSO maintient un essaim d'individus (appelés particules), chaque particule représentant une solution candidate. Les particules suivent un comportement simple : imiter le succès des particules voisines et ses propres succès [26].

La position d'une particule est donc influencée par la meilleure particule du voisinage  $P_{best}$ , ainsi que par la meilleure solution trouvée par toutes les particules de la population entière,  $g_{best}$ . La position de la particule,  $x_i$ , est ajustée en utilisant :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (III.1)$$

Où la composante de vitesse,  $V_i$ , représente la taille du pas. La vitesse est calculée par :

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 \cdot (P_{best, i} - x_i^t) + c_2 r_2 \cdot (g_{best} - x_i^t),$$

$$i = 1, 2, \dots, N,$$
(III.2)

Avec :

$N$  : Nombre des particules.

Où  $x_i$  désigne la position de la particule pour  $i$  ; la vitesse de la particule en  $i$  est représentée par  $V_i$  ; le nombre d'itérations est noté  $t$  ; le poids d'inertie est représenté par  $\omega$  ;  $r_1$  et  $r_2$  sont des variables aléatoires uniformément réparties dans  $[0, 1]$  ; et le coefficient cognitif et social sont respectivement notés  $C_1$ ,  $C_2$ . La meilleure position pour le stockage de la  $i$  particule trouvée jusqu'à présent est désignée par la variable  $P_{best}$ , et le stockage de la meilleure position de toutes les particules est représentée par  $g_{best}$ . La figure III.6 illustre le mouvement de particule dans le processus d'optimisation [26].

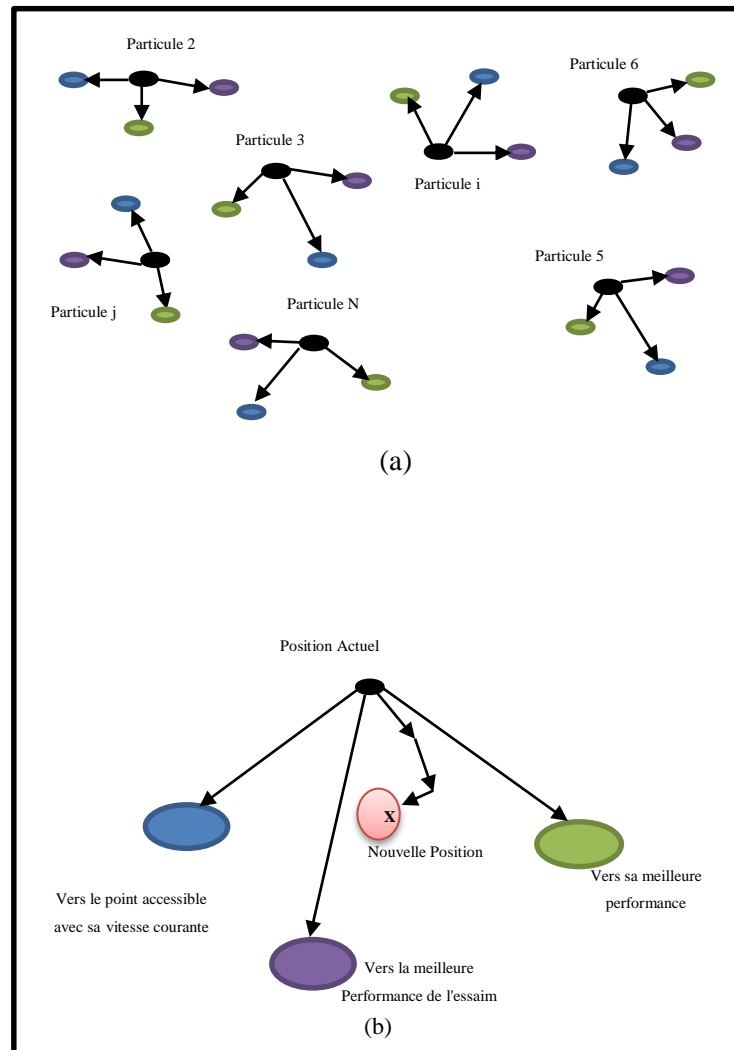


Figure III.6– Mouvement de particule dans le processus d'optimisation [27].

PSO conventionnel est rapide et précis lors de la recherche de la caractéristique de sortie courbes de matrices de PV modules avec des valeurs de crête simples. Ainsi, Le MPPT conventionnel basé sur PSO doit être modifié lorsque certains modules d'un réseau de modules photovoltaïques sont ombrés.

### III.4.3 Principales caractéristiques

Ce modèle présente quelques propriétés intéressantes, qui en font un bon outil pour de nombreux problèmes d'optimisation, particulièrement les problèmes fortement non linéaires, continus ou mixtes (certaines variables étant réelles et d'autres entières) :

- il est facile à programmer, quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué.
- il est robuste (de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution).

### III.4.4 Configuration de la méthode

#### III.4.4.1 Nombre de particules

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres : la taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à appréhension de ce paramètre.

#### III.4.4.2 Topologie du voisinage

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre-elles. Différents voisinages ont été étudiés (Kennedy, 1999) et sont considérés en fonction des identificateurs des particules et non des informations topologiques comme les distances euclidiennes dans l'espace de recherche :

- Topologie en étoile Figure III.7 (a) : le réseau social est complet, chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée  $g_{best}$  et communique avec les autres.
- Topologie en anneau Figure III.7 (b) : chaque particule communique avec  $n$  ( $n = 3$ ) voisines immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée  $p_{best}$ .

- Topologie en rayon Figure III.7 (c) : une particule "centrale" est connectée à tous les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres

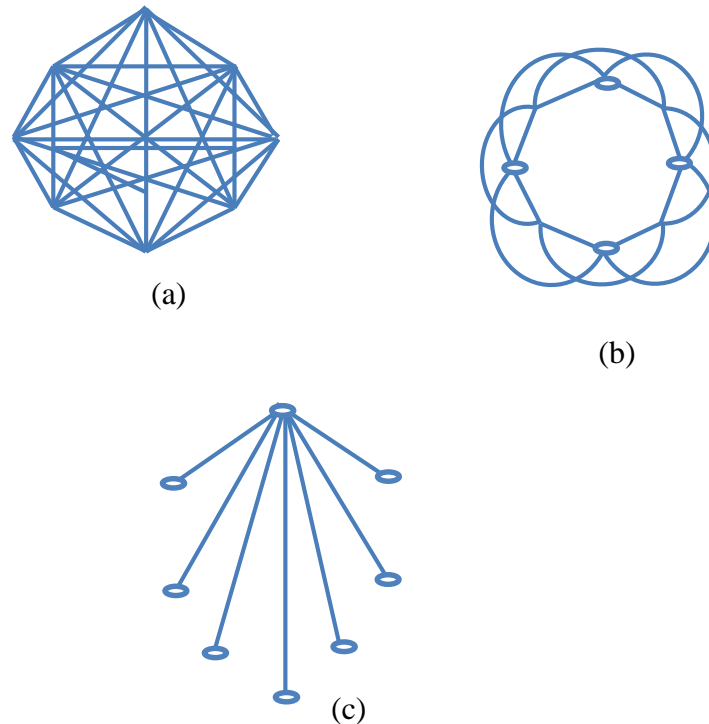


Figure III.7– trois topologies différentes a)Etoile b) Anneau c) Rayon [25].

### III.4.5 Technique MPPT basée sur PSO

Pour le système MPPT basé sur PSO conçu, la position de la particule est désignée comme le rapport cyclique du convertisseur de puissance, alors que la fonction d'évaluation de l'aptitude physique a été choisie en tant que puissance produite  $P_{PV}$  pour l'ensemble du système photovoltaïque. Dans l'aperçu de la méthode proposée, MPP plus précis le suivi est réalisé malgré les conditions environnements complexes avec le plus petit nombre de particules et où un plus grand nombre des particules entraînent un temps de calcul long. Par conséquent, pour bonne rapidité de suivi et précision à assurer [28].

Pour l'étape d'initialisation de l'optimisation de l'essaim de particules, les particules pourraient être établies dans la plage aléatoire ou être placé en position immobile. Généralement, cela à plus de sens d'initialiser les particules autour s'il y a des données disponibles en ce qui concerne la position du point global de puissance maximale dans la plage de recherche. Les auteurs indiquent que le minimum le déplacement entre les pics successifs est proche de 80% du  $V_{OC}$  et aussi les pics sur la courbe P-V se produisent presque à des multiples 80% de la tension ouverte du module  $V_{OC}$ . Ainsi, le nombre des particules N

est sélectionné dans le système photovoltaïque comme numéros aléatoires. Les espaces de recherche des particules qui couvrent [0 1] sont initialisées sur un point défini. 0 et 1 sont la valeur cycle minimum et maximum du convertisseur continu-continu utilisé, respectivement.

L'objectif de cette méthode MPPT basée sur PSO était de extraire la puissance maximale  $P_{PV}$  du photovoltaïque. À évaluer la valeur de fitness qui est la puissance générée, après la sortie du contrôleur, la modulation de largeur d'impulsion agit en ligne à la position de la particule qui indique l'état du cycle de service, et la tension photovoltaïque  $V_{PV}$  et le courant  $I_{PV}$  peuvent être mesurés. Pour calculer la valeur de fitness  $P_{PV}$  de la particule, ces des valeurs peuvent alors être utilisées. Cependant, pour obtenir les bons échantillons Il convient de noter que le temps de stabilisation du convertisseur de puissance doit être moindre que les intervalles de temps d'évaluation entre particules suivantes.

Pour résoudre ces problèmes, la linéaire divergence diminue avec l'augmentation les nombres d'itérations ont été adoptés dans cette étude pour la pondération des formules PSO. La signification physique de cette formule de pondération modifiée est que les tailles de pas plus grandes sont utilisées pour augmenter la vitesse de recherche de particules au cours de la recherche initiale parce que la distance à l'optimum global est Relativement large. Cela évite une taille de pas excessivement petite de faire des pièges optimums locaux inévitables. Cependant, diminue progressivement à mesure que le nombre d'itérations augmente. Parce que les particules approchent maintenant du MPP, celles-ci diminution de  $w$  provoque les pas dans les mouvements de particules réduire, permettant aux particules de suivre le MPP plus avec précision.

En (III.2), afin de maintenir l'accélération des particules dans le même sens, il bougeait à l'origine, le premier le terme  $\omega(t) V_i(t)$  est donc utilisé, où la convergence le comportement de l'optimisation de l'essaim de particules est contrôlé. Le poids d'inertie sera choisi afin d'accélérer convergence, telle que l'effet de  $V_i(t)$  s'estompe par le processus de l'algorithme. Le choix de réduire la valeur de  $\omega$  avec le temps est pris en compte. Pour obtenir des solutions raffinées, une option typique consiste à régler le poids d'inertie initialement sur une plus grande valeur et réduisez-la lentement pour une meilleure exploration. Pour cette raison, ici, le terme  $w$  a été utilisé comme décroissant linéairement, comme illustré ci-dessous :

$$\omega(t) = \omega_{\max} - \frac{t}{t_{\max}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (\text{III.3})$$

Dans (III.3) les limites minimale et maximale de étaient noté  $\omega_{\min}$  et  $\omega_{\max}$ , alors que le maximum autorisé pour le nombre d'itérations est noté  $t_{\max}$ . De même, le social et les termes cognitifs peuvent être remodelés. La capacité d'optimisation d'essaims de particules peut être affectée par les valeurs de  $C_1$  et  $C_2$  en modifiant la direction de la particule. En sélectionnant

$C_1 > C_2$  échantillonnage par rapport au relèvement de  $P_{best}$ , serait biaisé, tout en sélectionnant  $C_1 < C_2$  dans le cas contraire, l'échantillonnage relatif au relèvement de  $g_{best}$  sera préféré.

Pour ces raisons, ces deux termes sont définis comme fonctions continuellement croissantes et décroissantes, comme dans (III.5) et (III.6) respectivement :

$$c_1(t) = c_{1,max} - \frac{t}{t_{max}}(c_{1,max} - c_{1,min}) \quad (III.4)$$

$$c_2(t) = c_{2,max} - \frac{t}{t_{max}}(c_{2,max} - c_{2,min}) \quad (III.5)$$

Deux critères de convergence sont utilisés dans cette étude. La méthode MPPT proposée basée sur PSO va s'arrêter et donner la meilleure solution, si le nombre maximum d'itérations est atteint ou si toutes les vitesses des particules deviennent inférieures à un seuil. Fondamentalement, les algorithmes d'optimisation des essaims de particules sont utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation lorsque le résultat optimal est invariant dans le temps. Cependant, dans ce cas, la valeur de fitness qui est le point de puissance maximale global varie parfois ou dépend de facteurs environnementaux ainsi que des états de charge. Pour rechercher à nouveau le nouveau MPP global dans ces cas, les particules doivent être réinitialisées. Compte tenu du changement d'ensollement à détecter, la contrainte suivante est utilisée. Dans la technique proposée basée sur PSO, les particules seront réinitialisées chaque fois que la condition suivante est remplie :

$$\frac{|P_{PVnew} - P_{PVold}|}{P_{PVold}} \geq \Delta P(\%) \quad (III.6)$$

Où  $P_{PVnew}$ , est la nouvelle puissance photovoltaïque,  $P_{PVold}$ , est la puissance photovoltaïque au point maximal global du dernier point de fonctionnement et  $\Delta P$  (%) est défini par 3%. [28]

La Figure III.8 représente l'organigramme complet de l'algorithme du technique MPPT basée sur PSO.

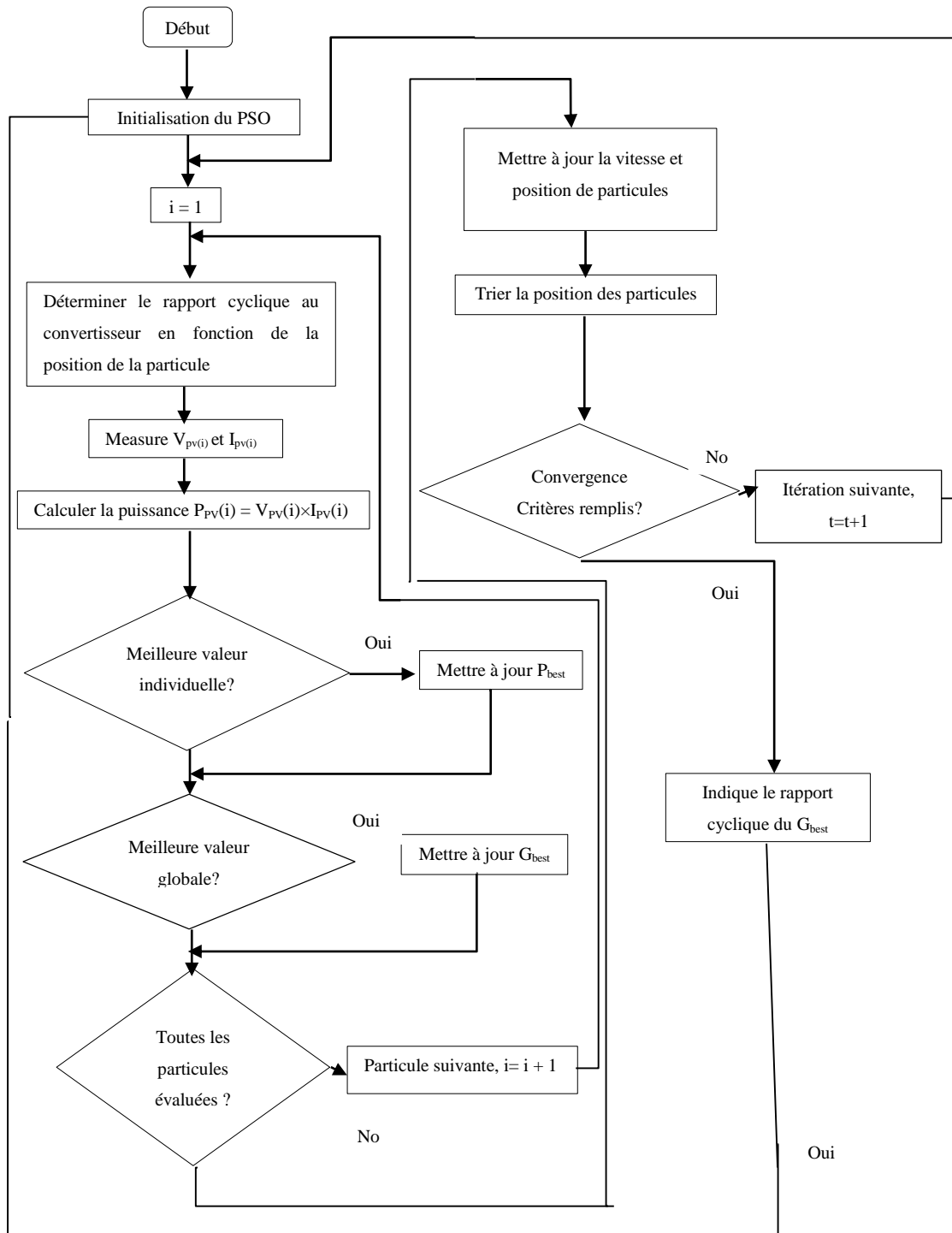


Figure III.8– Organigramme de l'algorithme MPPT proposé basé sur PSO [28].

L'algorithme de cette méthode peut être décrit comme suit :

- 1<sup>ère</sup> étape : Initialisation des coefficients  $C_1$  et  $C_2$ , le coefficient d'inertie ( $w$ ).
- 2<sup>ème</sup> étape : la création de la population initiale aléatoirement et le calcul de la fitness de chaque particule ( $P_{best}$ ) : la meilleure position de la particule  $i$  dans la population actuelle ; ( $P_{gbest}$ ) : la meilleure position dans toutes les populations (la meilleure des meilleures).
- 3<sup>ème</sup> étape : calcul de la nouvelle vitesse et nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules (III.5) et (III.6).
- 4<sup>ème</sup> étape : calcul de la meilleure aptitude de la population actuelle et comparer par la précédente pour trouver la meilleure de toutes les populations ( $P_{gbest}$ ).
- 5<sup>ème</sup> étape : incrémentation du nombre d'itération  $t = t+1$ .
- 6<sup>ème</sup> étape : si un critère d'arrêt est satisfait aller à la 7<sup>ème</sup> étape. Autrement, aller à la 3<sup>ème</sup> étape.
- 7<sup>ème</sup> étape : la position enregistrée dans ( $P_{gbest}$ ) est la solution optimale [25].

Génération aléatoire de la population initiale

Calcul de la fonction sélective

**Répéter**

Calcul de la meilleure fitness de la population actuelle

Les populations calcul de la meilleure aptitude de toutes

Calcul de la vitesse de chaque particule

Calcul de la position de chaque particule

Calcul de la fonction sélective

**Jusqu'à** satisfaction du critère d'arrêt

Figure III.9– Pseudo-code de l'algorithme MPPT proposé basé sur PSO.

### III.5 Résultats de simulation

Les simulations de l'ensemble du système étudié et sa commande ont été réalisées dans l'environnement MATLAB/Simulink, afin de valider l'efficacité de l'algorithme MPPT adoptée dans ce chapitre.

Le champ photovoltaïque est constitué de 17 branches mises en parallèle, dont chaque branche est constituée de 12 modules en série. Dans les conditions nominales ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ$ ), le champ photovoltaïque génère une puissance de 40 kW correspondant à une tension optimale  $V_{\text{mpp}}$  de 299 V et un courant optimal  $I_{\text{mpp}}$  de 136 A, comme illustré sur la Figure III.10.

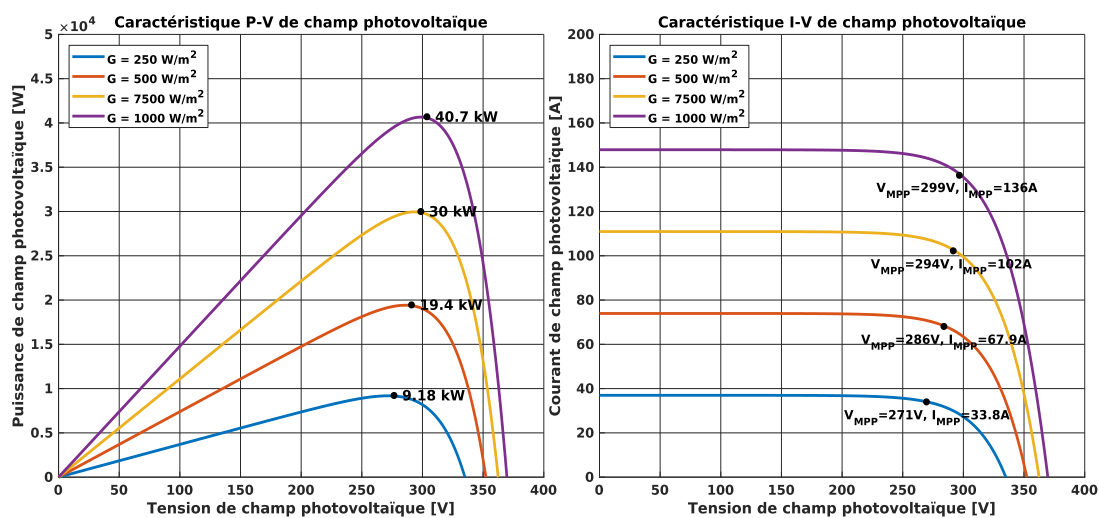


Figure III.10– Caractéristiques P–V et I–V de champ photovoltaïque.

Les paramètres électriques du système étudié sont consignés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2 – Paramètres du système photovoltaïque étudié.

| Paramètre                         | Valeur  |
|-----------------------------------|---|
| Paramètres du GPV                 | $M_s = 12, M_p = 17, V_{Gpv} = 299 \text{ V}$   |
| Paramètres du convertisseur boost | $f_s = 50 \text{ kHz}, C_{Gpv} = 1000 \mu\text{F}$<br>$C_{dc} = 60 \mu\text{F}, L_{Gpv} = 2 \text{ mH}$ |
| La charge                         | $R_{Ch\_Gpv} = 20 \Omega$   |

La figure III.11 représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié.

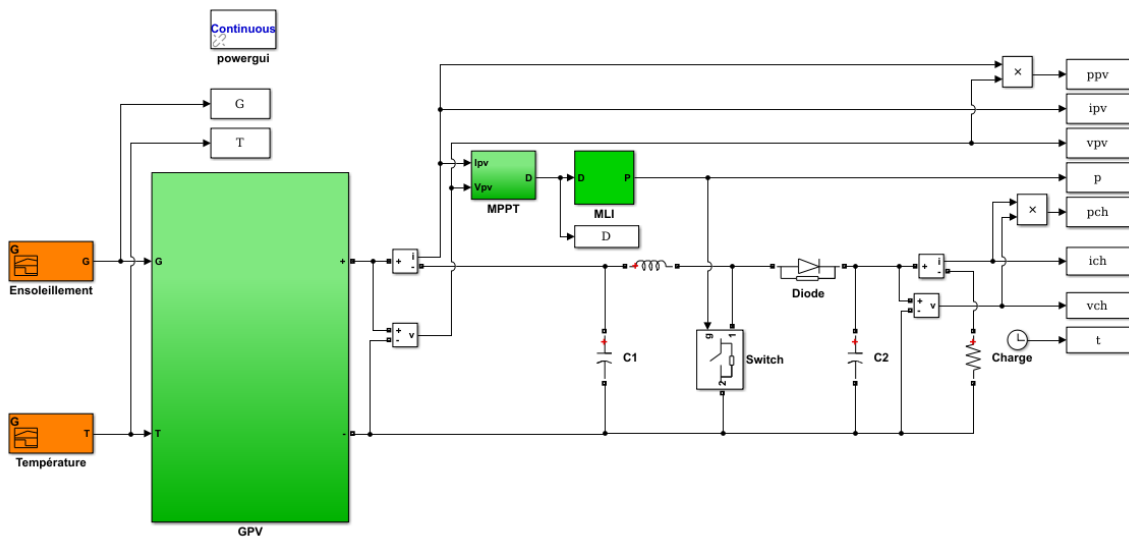


Figure III.11– Schéma bloc du système photovoltaïque sous Simulink.

La figure III.12 représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié sous Matlab/Simulink.

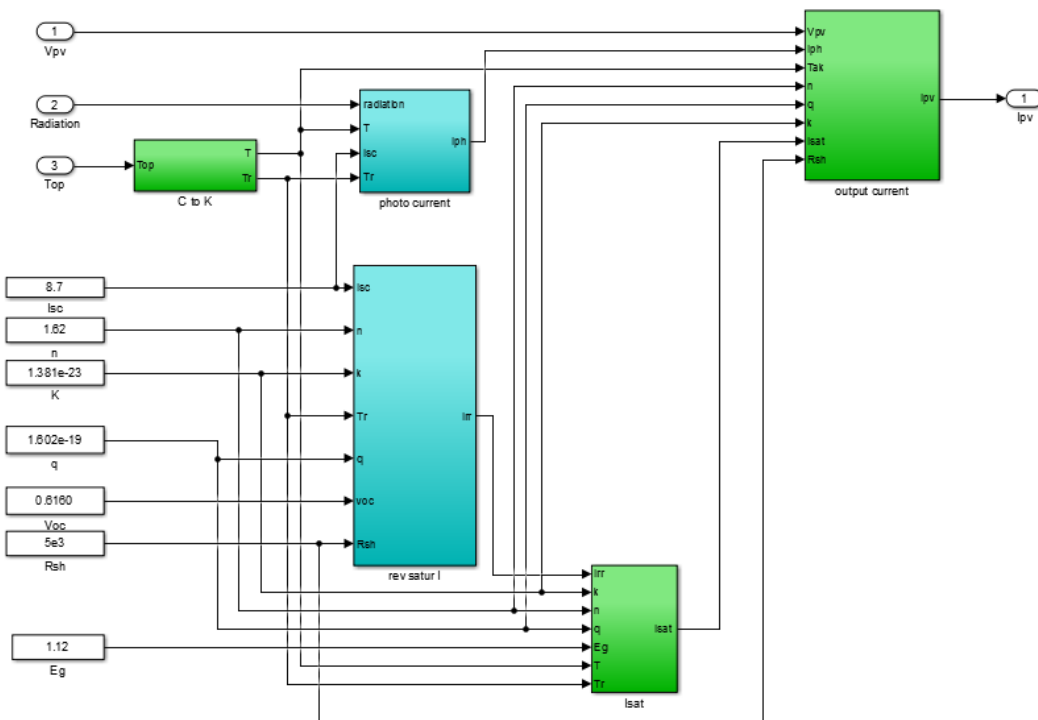


Figure III.12– Schéma bloc du GPV sous Simulink.

### III.5.1 Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O

La Figure III.13 représente le modèle de simulation de la commande MPPT-P&O, en utilisant l'organigramme illustré sur la Figure III.3.

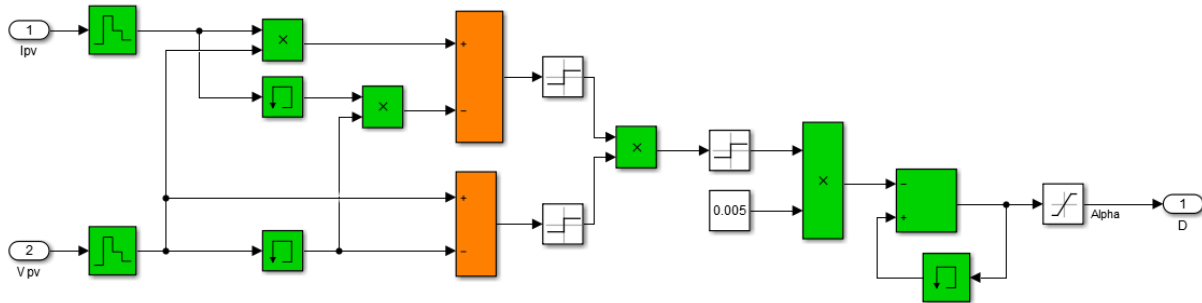


Figure III.13– Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT-P&O.

Pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales, on effectue les tests suivants :

- Ensoleillement variable et température constante ;
- Température variable et ensoleillement constante.

#### III.5.1.1 Variation de l'ensoleillement avec température fixe

Pour présenter l'effet de l'ensoleillement  $G$  sur la puissance, on maintient la température à une valeur constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et on varie rapidement l'ensoleillement. Le profil de l'ensoleillement considéré est montré sur la Figure III.14. Il est à noter que pendant la durée de 2s, cette courbe comprend des variations rapides entre  $500 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O.

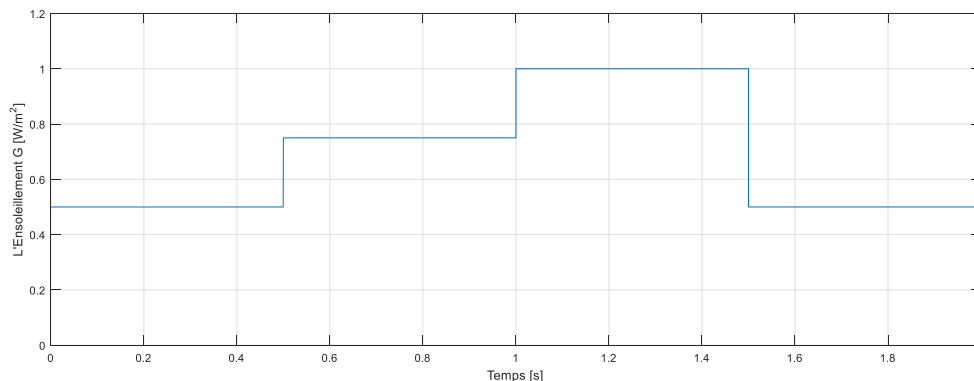


Figure III.14– Profil de l'ensoleillement.

La Figure III.15 présente les résultats de simulation obtenus pour la commande MPPT de type P&O appliquée au GPV. Pour un ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  durant l'intervalle de temps  $t = [1.2\text{s} ; 1.4\text{s}]$ , le point de fonctionnement optimale du champ photovoltaïque

correspondre à la puissance de  $40,664 \text{ kW}$ , la tension varie autour de sa valeur optimale  $V_{mpp}$  de  $299 \text{ V}$  et le courant varie autour de sa valeur optimale  $i_{mpp}$  de  $136 \text{ A}$ , ce qui est compatible avec les caractéristique du champ présentées sur la Figure III.10. Cela démontre que la commande MPPT fonctionne efficacement.

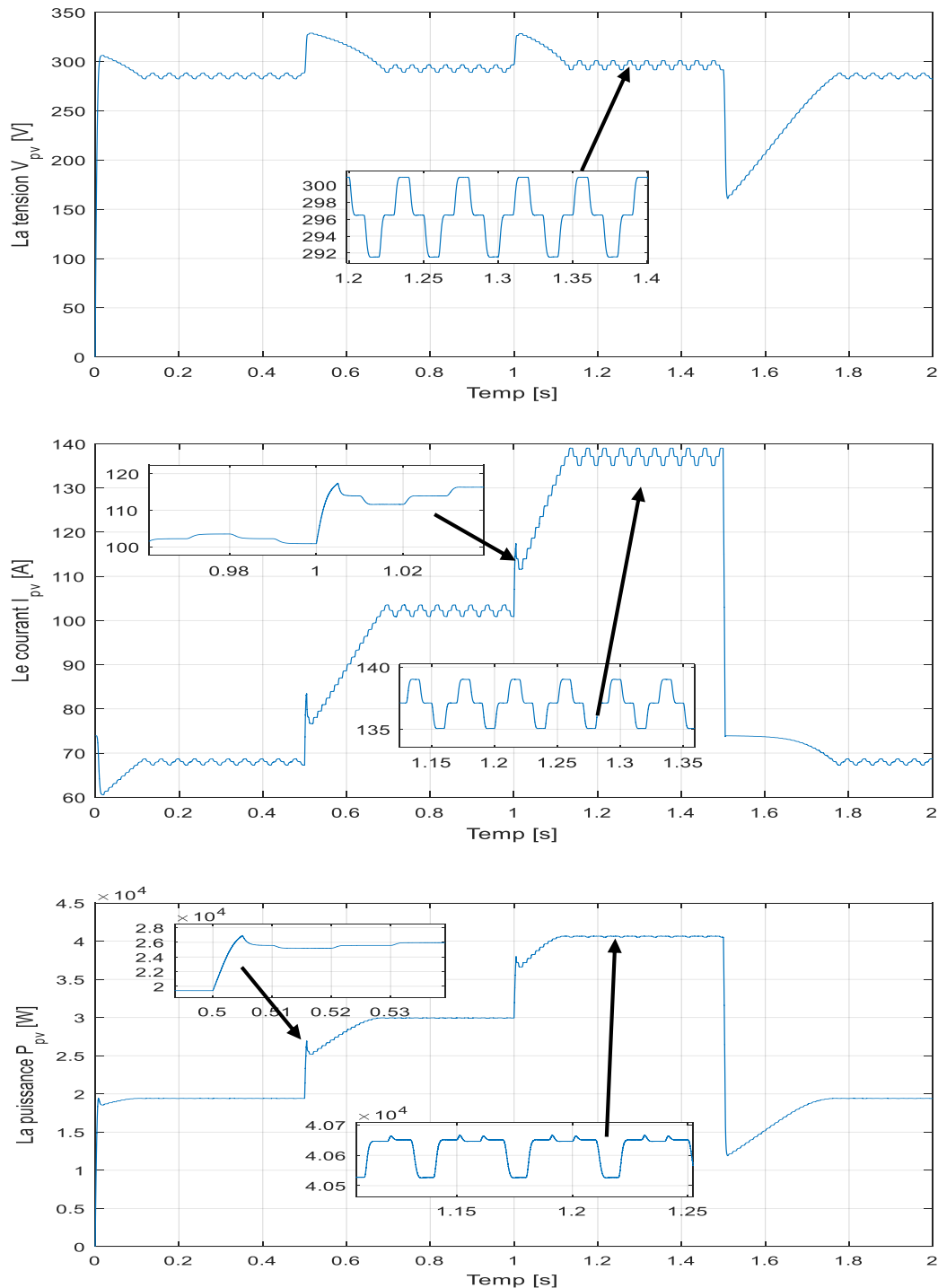


Figure III.15– Présente l'évolution de tension, courant et puissance du GPV pour un ensoleillement variable.

La Figure III.16 présente le rapport cyclique D en fonction du temps.

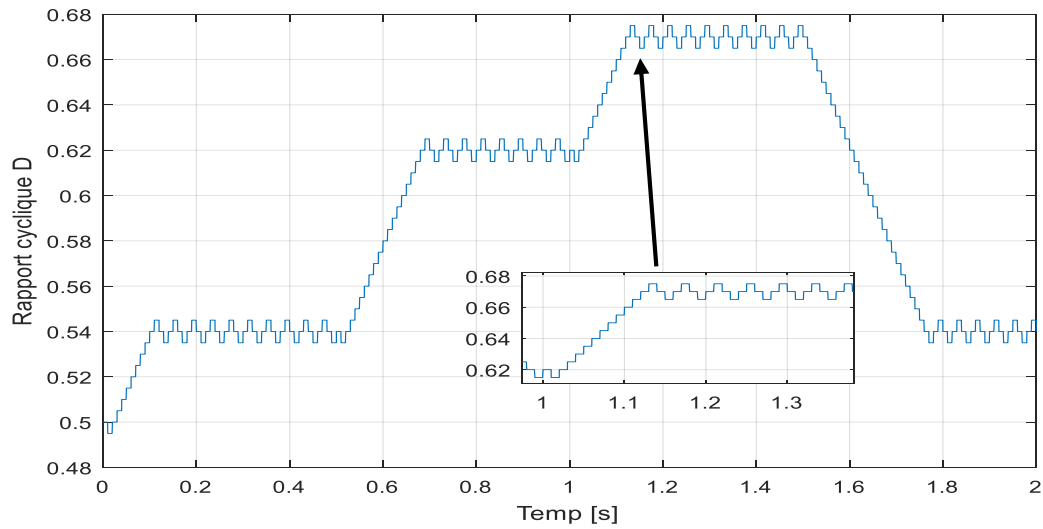


Figure III.16– Rapport cyclique du convertisseur boost.

La Figure III.17 présente les 'impulsions de la gâchette du transistor (IGBT).

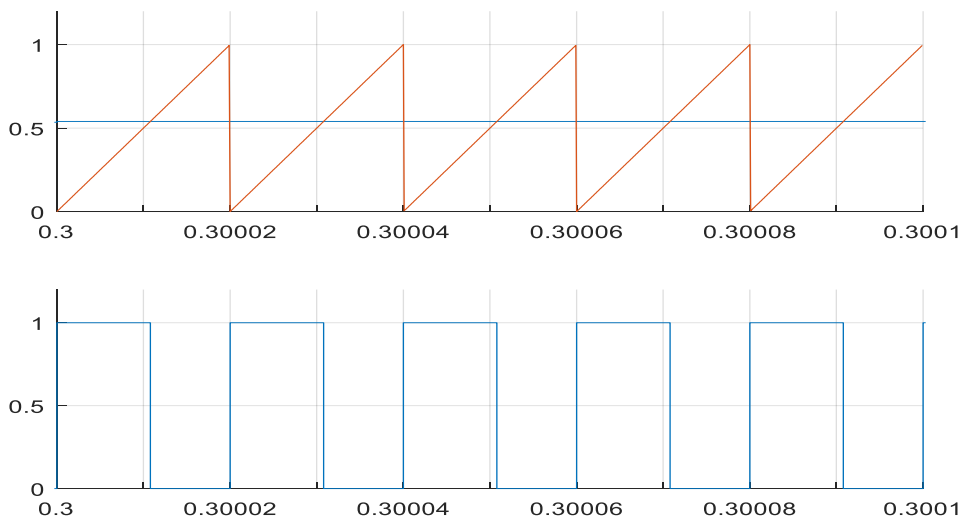


Figure III.17– Impulsion de la gâchette du transistor (IGBT)

La Figure III.18 présente l'évolution de la tension, du courant et de la puissance de la charge pour un ensoleillement variable.

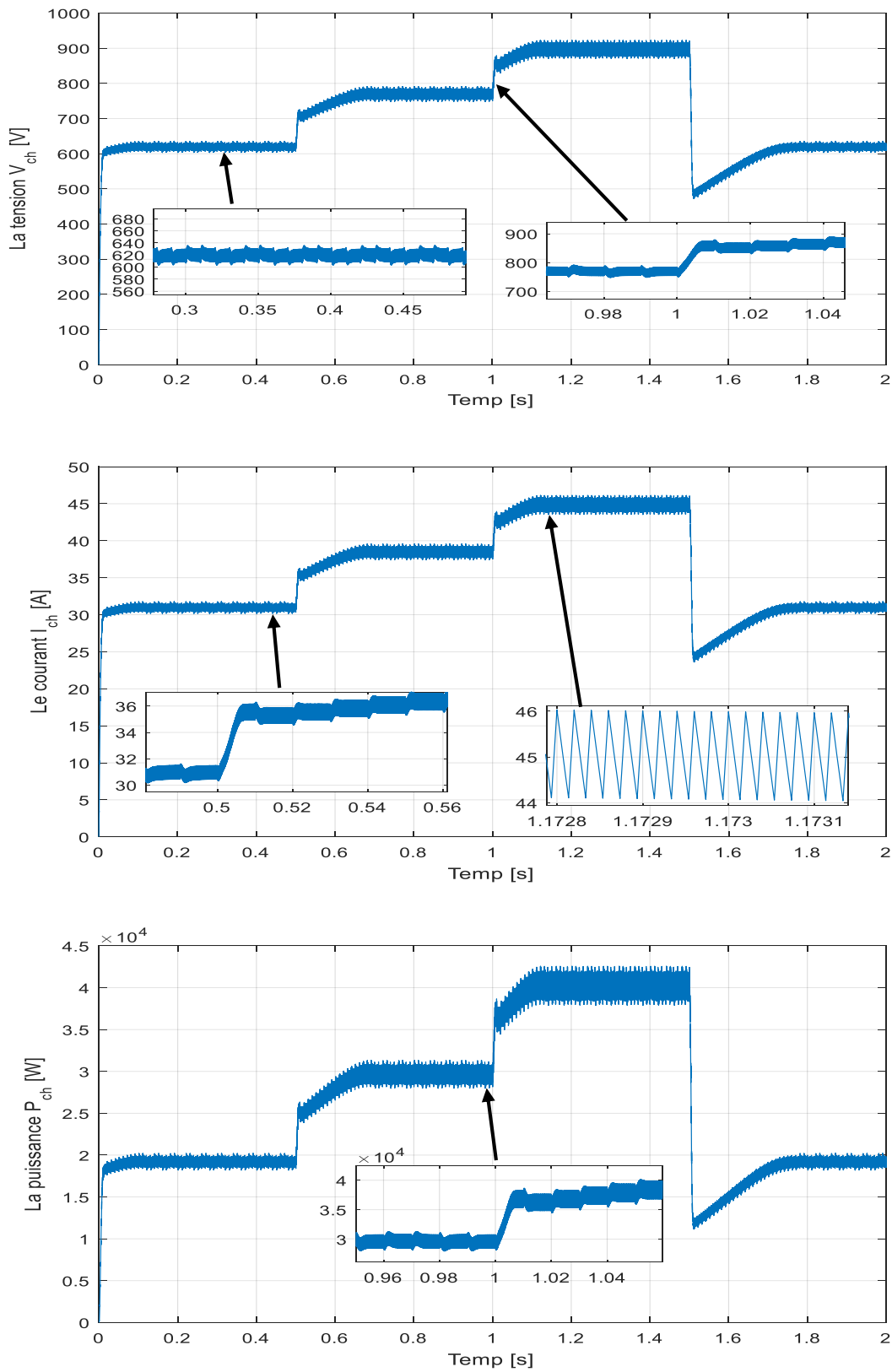


Figure III.18– Evolution de tension, de courant et de puissance de charge pour un ensoleillement variable.

### III.5.1.2 Variation de la température avec ensoleillement fixe

Pour présenter l'effet de la température ( $T$ ) sur la puissance, on fait maintenir l'ensoleillement à une valeur constante ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ) et on varie rapidement l'ensoleillement. Le profil de température considéré est montré sur la Figure III.19. Il est à noter que pendant la durée de 2s, cette courbe comprend des variations rapides entre  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O.

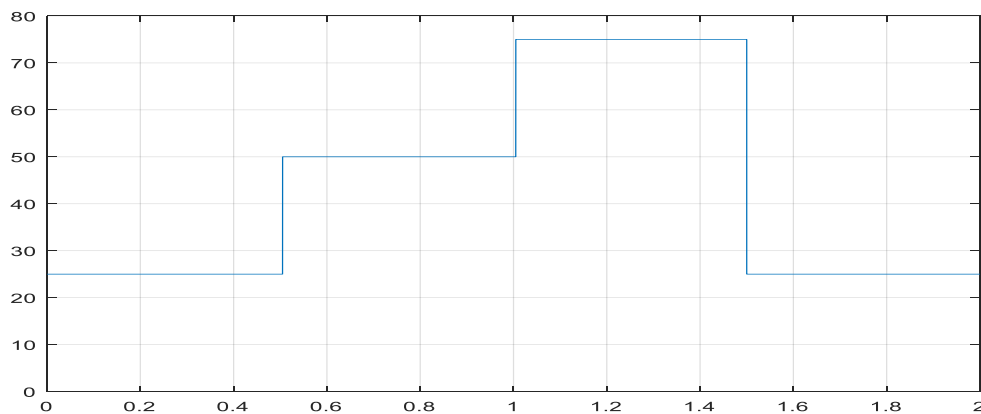


Figure III.19– Profil de la température.

La Figure III.20 présente les résultats de simulation obtenus pour la commande MPPT de type P&O appliquée au GPV. Pour une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  durant l'intervalle de temps  $t = [0,2s ; 0,4s]$ , le point de fonctionnement optimale du champ photovoltaïque correspond à la puissance de  $40,664 \text{ kW}$ , à une tension qui varie autour de sa valeur optimale  $V_{mpp}$  de  $299 \text{ V}$  et à un courant qui varie autour de sa valeur optimal  $i_{mpp}$  de  $136 \text{ A}$ , ce qui est compatible avec les caractéristique du champ présentées sur la Figure III.10. Cela démontre que la commande MPPT fonctionne efficacement.

L'augmentation de la température à son tour influence l'efficacité du système. Cette augmentation va provoquer une diminution de la tension comme l'illustre la figure III.20. Ceci même se traduit par une diminution de la puissance fournie par le générateur. Les résultats obtenus dans la figure III.20 montrent que l'influence de la température sur les performances du générateur photovoltaïque est moins importante par rapport à celle de l'éclairement.

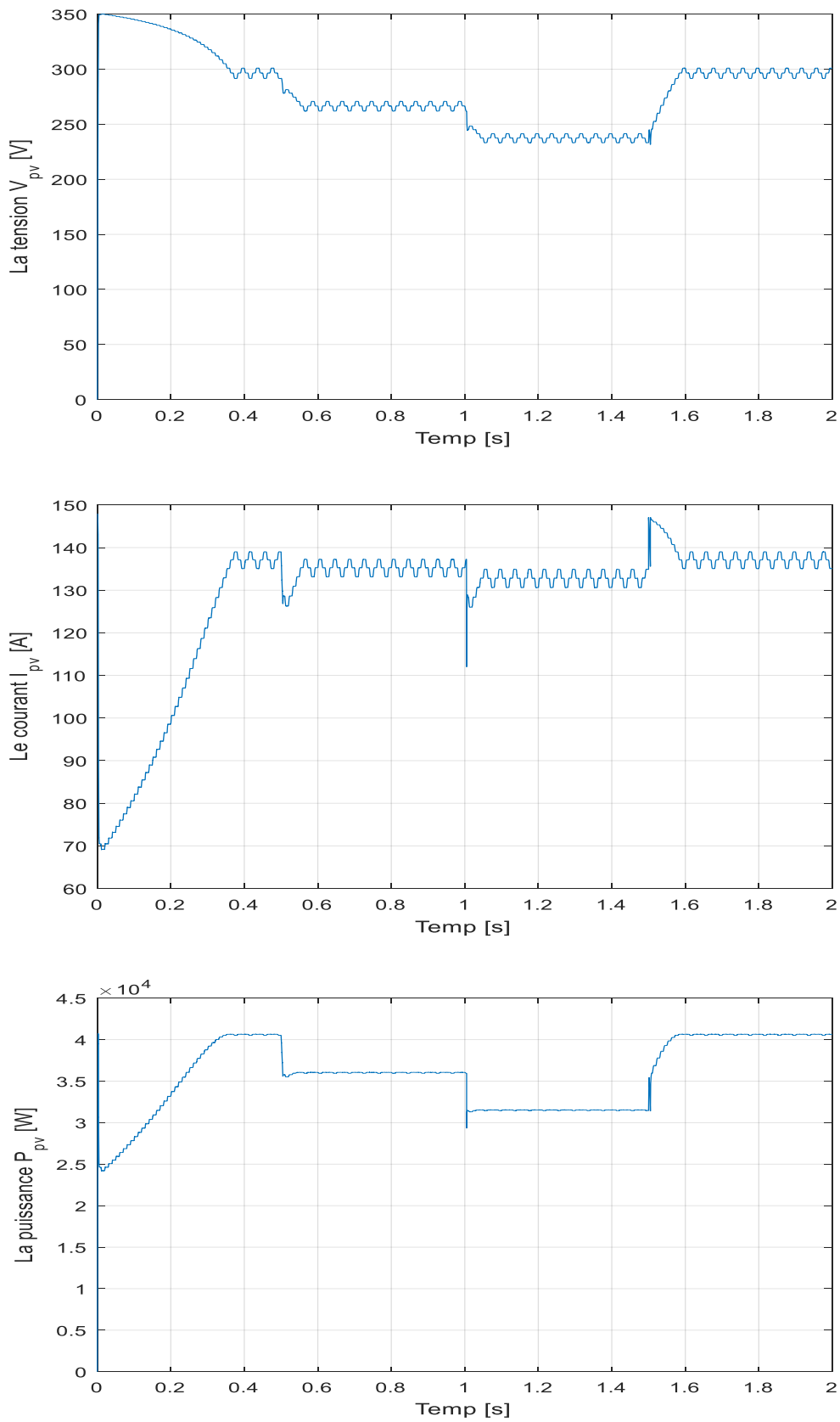


Figure III.20– Evolution de tension, de courant et de puissance du GPV pour une température variable.

La Figure III.21 présente le rapport cyclique D en fonction du temps.

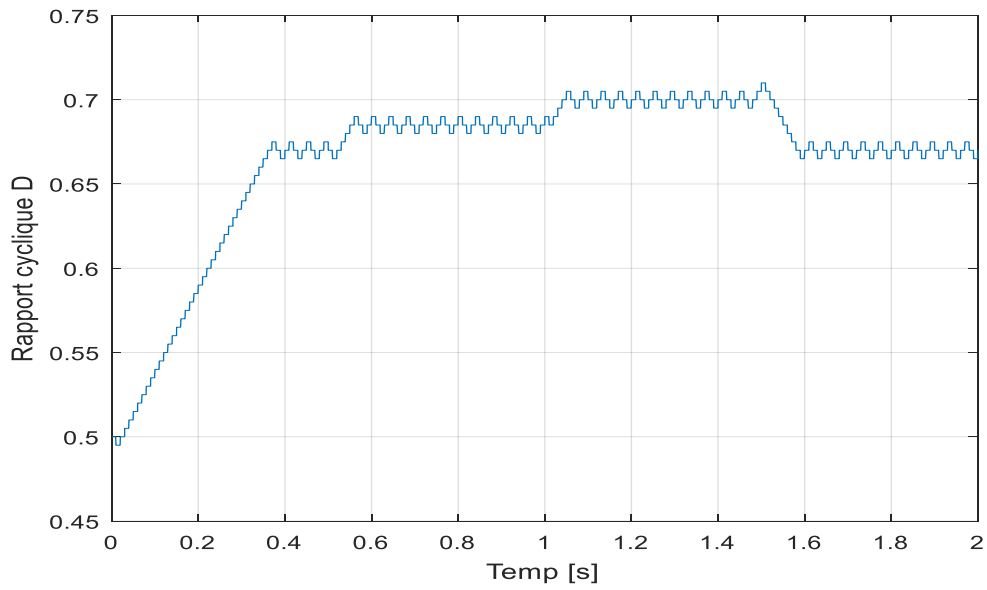


Figure III.21– Rapport cyclique D.

La Figure III.22 présente l'impulsion de la gâchette du transistor.

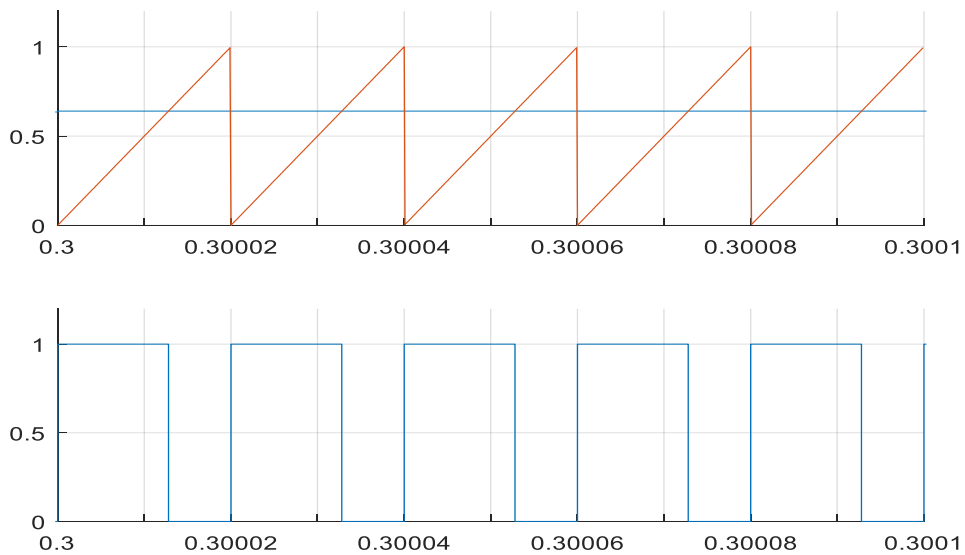


Figure III.22– Impulsion de la gâchette du transistor

La Figure III.23 présente l'évolution de tension, de courant et de puissance de charge pour une température variable.

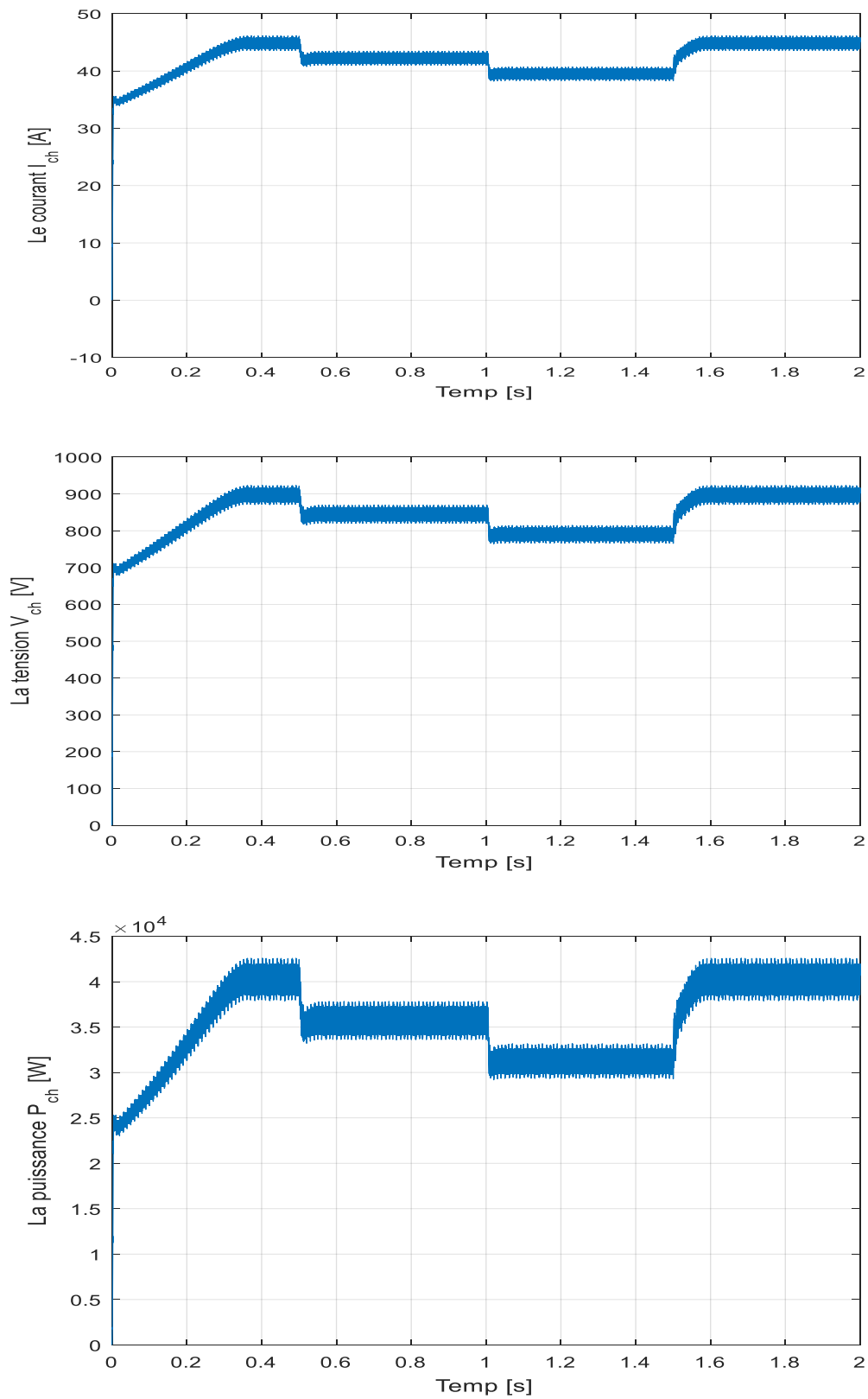


Figure III.23– Evolution de tension, de courant et de puissance de charge pour une température variable

### III.5.2 Résultat de simulation de OEP (PSO)

La Figure III.24 représente le modèle de simulation de l'algorithme OEP, en se basant sur l'organigramme illustré sur la Figure III.8.

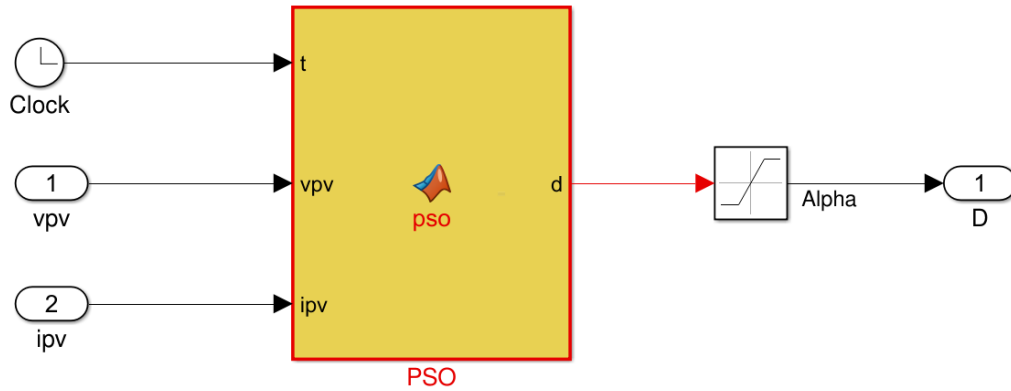


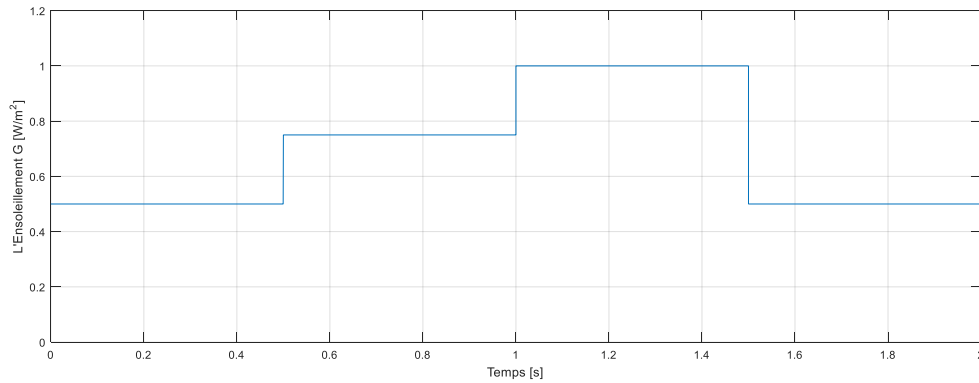
Figure III.24– Modèle SIMULINK de l'algorithme MPPT OEP.

Les paramètres de simulation du système PV étudié sous la commande en MPPT basé sur PSO sont consignés dans le Tableau III.3.

Tableau III.3 – Paramètres de simulation du système PV commandé en MPPT basé sur PSO

| Paramètre            | Valeur |
|----------------------|--------|
| Nombre de particules | 3      |
| Itérations maximales | 7      |
| $C_{1min}$           | 1.5    |
| $C_{2min}$           | 2.5    |
| $W_{min}$            | 0.1    |
| $C_{1max}$           | 0.1    |
| $C_{2max}$           | 1.0    |
| $W_{max}$            | 0.7    |

Le profil de l'ensoleillement considéré est montré sur la Figure III.25. Il est à noter que pendant la durée de 2s, cette courbe comprend des variations rapides entre  $500 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  afin de tester l'algorithme MPPT de type OEP avec  $T = 25^\circ\text{C}$ .



**Figure III.25– Profil de l'ensoleillement.**

La Figure III.26 présente les résultats de simulation obtenus pour la commande MPPT de type P&O appliquée au GPV. Pour un ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  durant l'intervalle de temps entre  $t = [1.2s ; 1.4s]$ , le système atteint le point de fonctionnement optimale du champ photovoltaïque correspondant à la puissance de  $40,692 \text{ kW}$ , à la tension optimale  $V_{mpp}$  de  $299 \text{ V}$  et au courant optimal  $i_{mpp}$  de  $138 \text{ A}$ ; ce qui est compatible avec les caractéristique du champ présentées sur la Figure III.10. Cela démonte que la commande MPPT fonctionne efficacement.

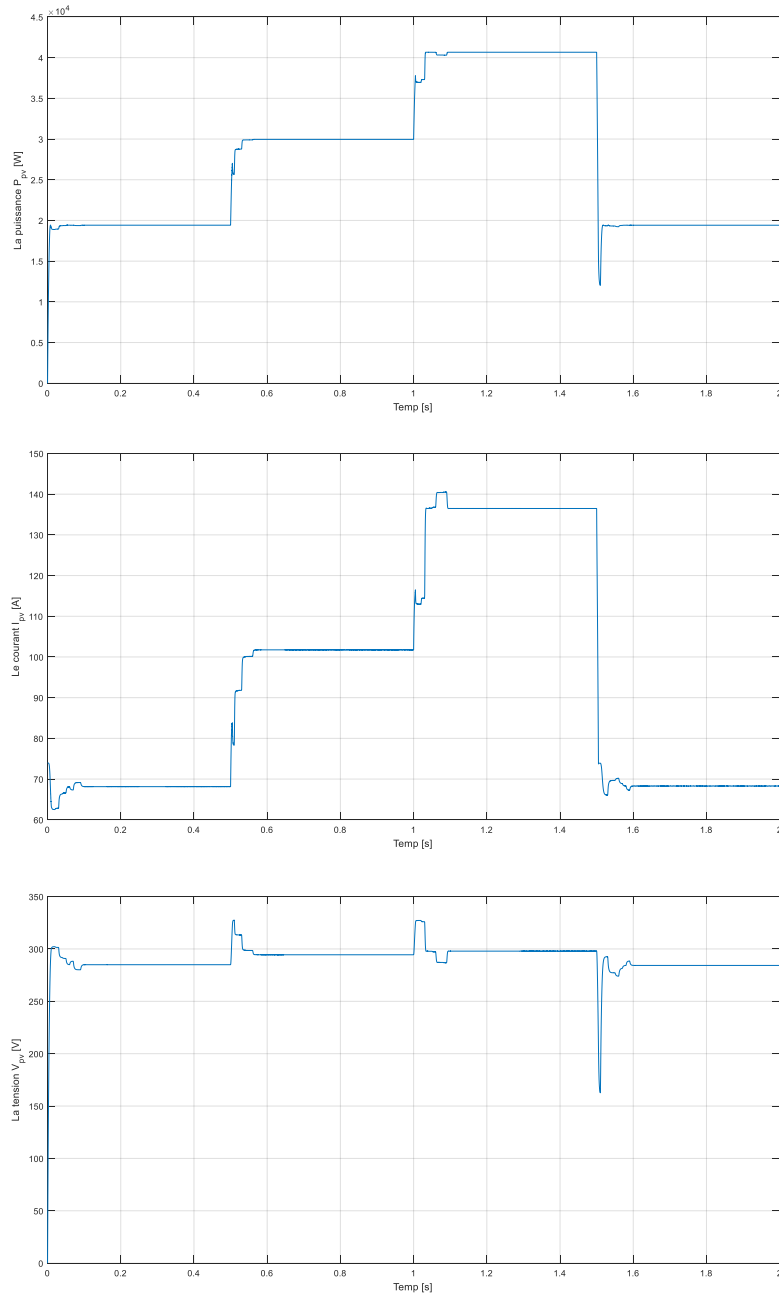
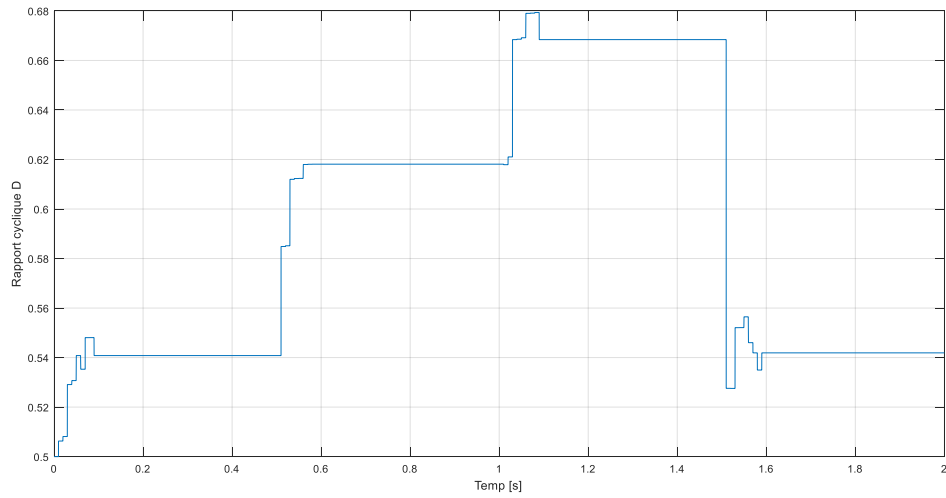


Figure III.26– Evolution de tension, de courant et de puissance du GPV pour un ensoleillement variable.

La Figure III.27 présente le rapport cyclique D en fonction du temps.



**Figure III.27– Rapport cyclique du convertisseur boost**

La Figure III.28 présente l'évolution de tension, de courant et de puissance de charge avec système PV commandé en MPPT-OEP pour un ensoleillement variable.

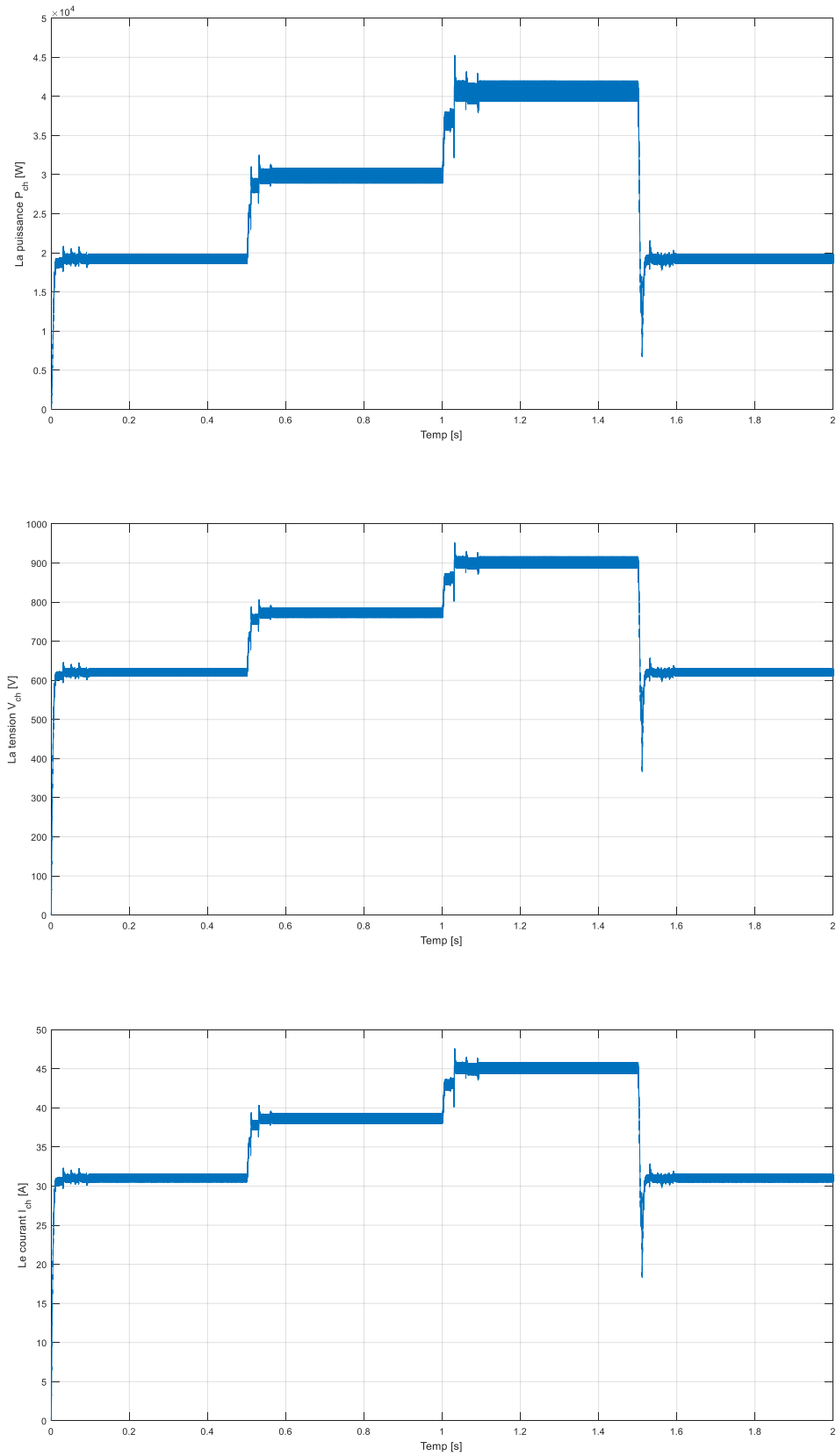


Figure III.28– Présente l'évolution de tension, de courant et de puissance de charge avec système PV commandé en MPPT-OEP pour un ensoleillement variable.

### III.5.3 Comparaison par simulation des commandes MPPT-OEP et MPPT-P&O

Pour comparer les performances des deux commandes MPPT vis-à-vis différentes conditions environnementales notamment l'ensoleillement, nous avons varié ce dernier entre  $500 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  dans les deux sens de variation (augmentation et diminution) avec une température  $T = 25^\circ\text{C}$ . Le profil de l'ensoleillement considéré est montré sur la Figure III.29.

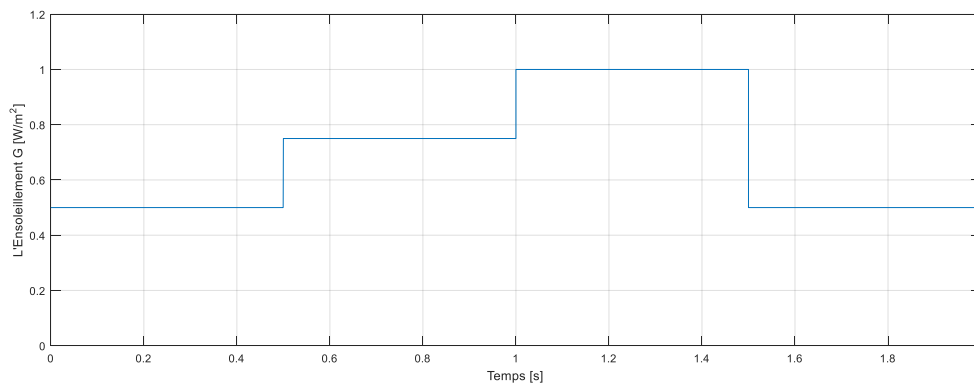
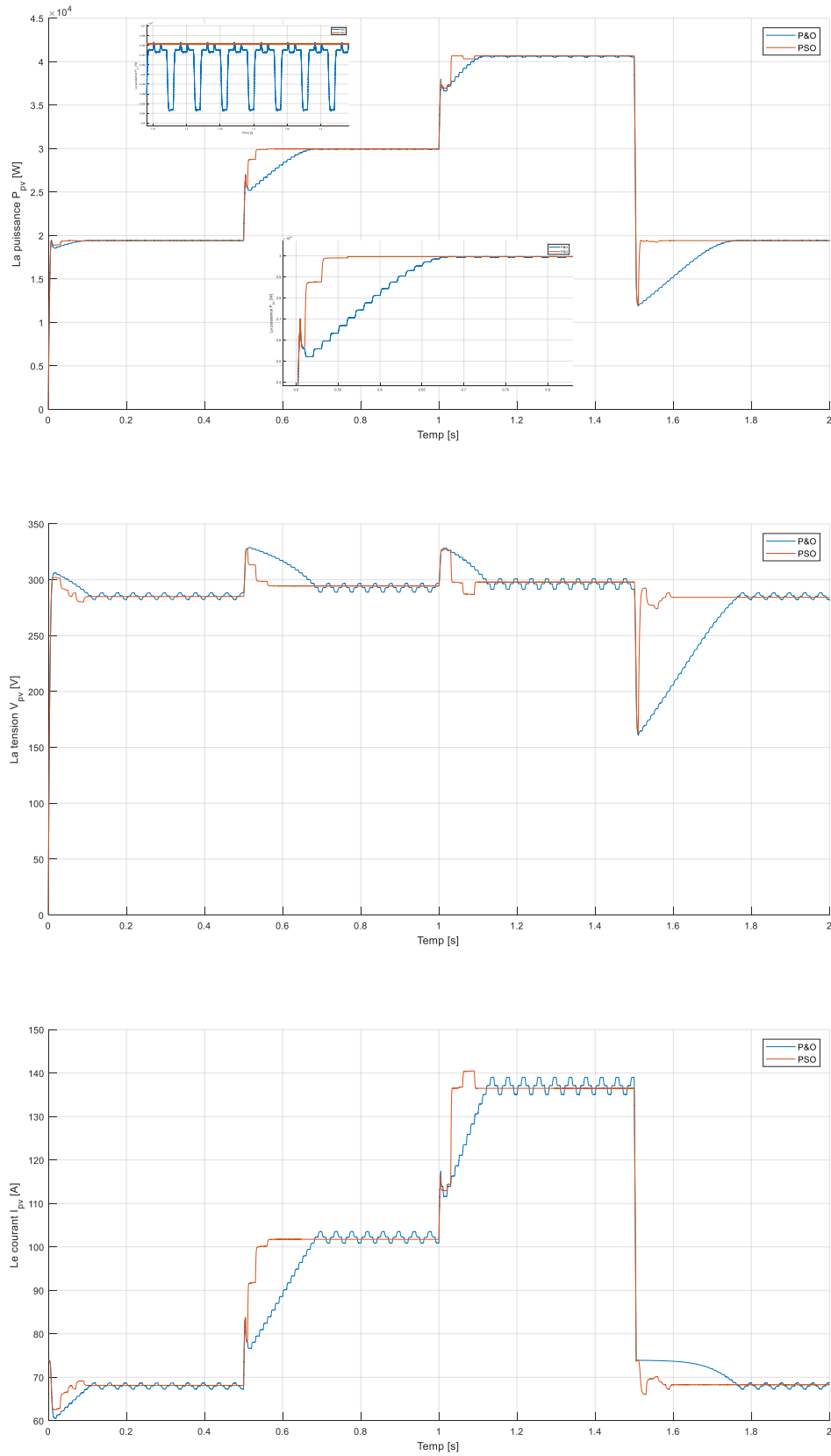


Figure III.29– Profil de l'ensoleillement.

La Figure III.30 présente les résultats de simulation obtenus pour la commande MPPT de type P&O et de type OEP appliquée au GPV. On remarque que :

- Selon les courbes de puissance du GPV ( $P_{\text{GPV}}$ ), la commande MPPT-PSO permet un temps de réponse moins que la commande MPPT-P&O, donc une bonne dynamique du système PV en régime transitoire dû aux variations climatiques.
- Selon les mêmes courbes de puissance du GPV ( $P_{\text{GPV}}$ ), la commande MPPT-PSO permet moins d'ondulation de la puissance en régime permanent que la commande MPPT-P&O, donc une bonne stabilité du système PV en régime statique.

De là, nous concluons que la commande MPPT-PSO est de meilleures performances, en régime statique et en régime dynamique, que la commande MPPT-P&O.



**Figure III.30– Présente l'évolution de tension, de courant et de puissance de GPV avec système PV commandé en MPPT-OEP pour un ensoleillement variable.**

La Figure III.31 présente le rapport cyclique D en fonction du temps.

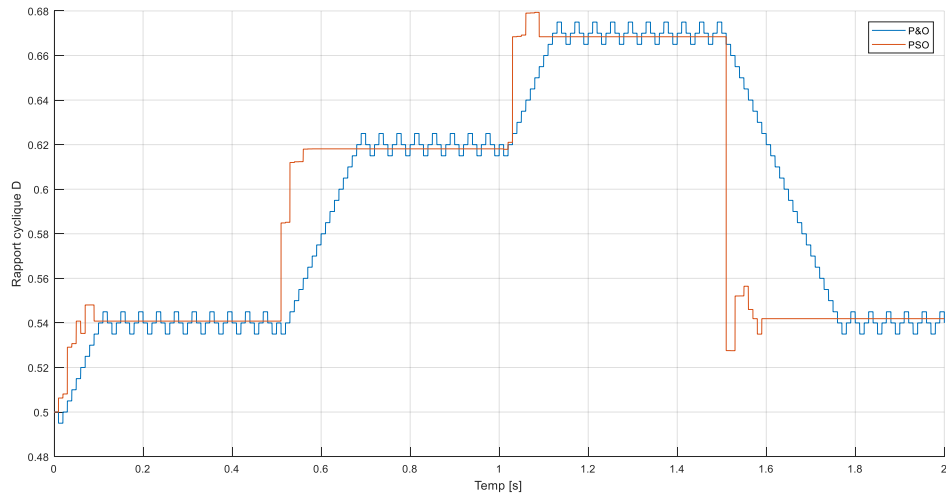


Figure III.31– Rapport cyclique du convertisseur boost

La Figure III.32 présente l'évolution de tension, courant et puissance de la charge pour un ensoleillement variable.

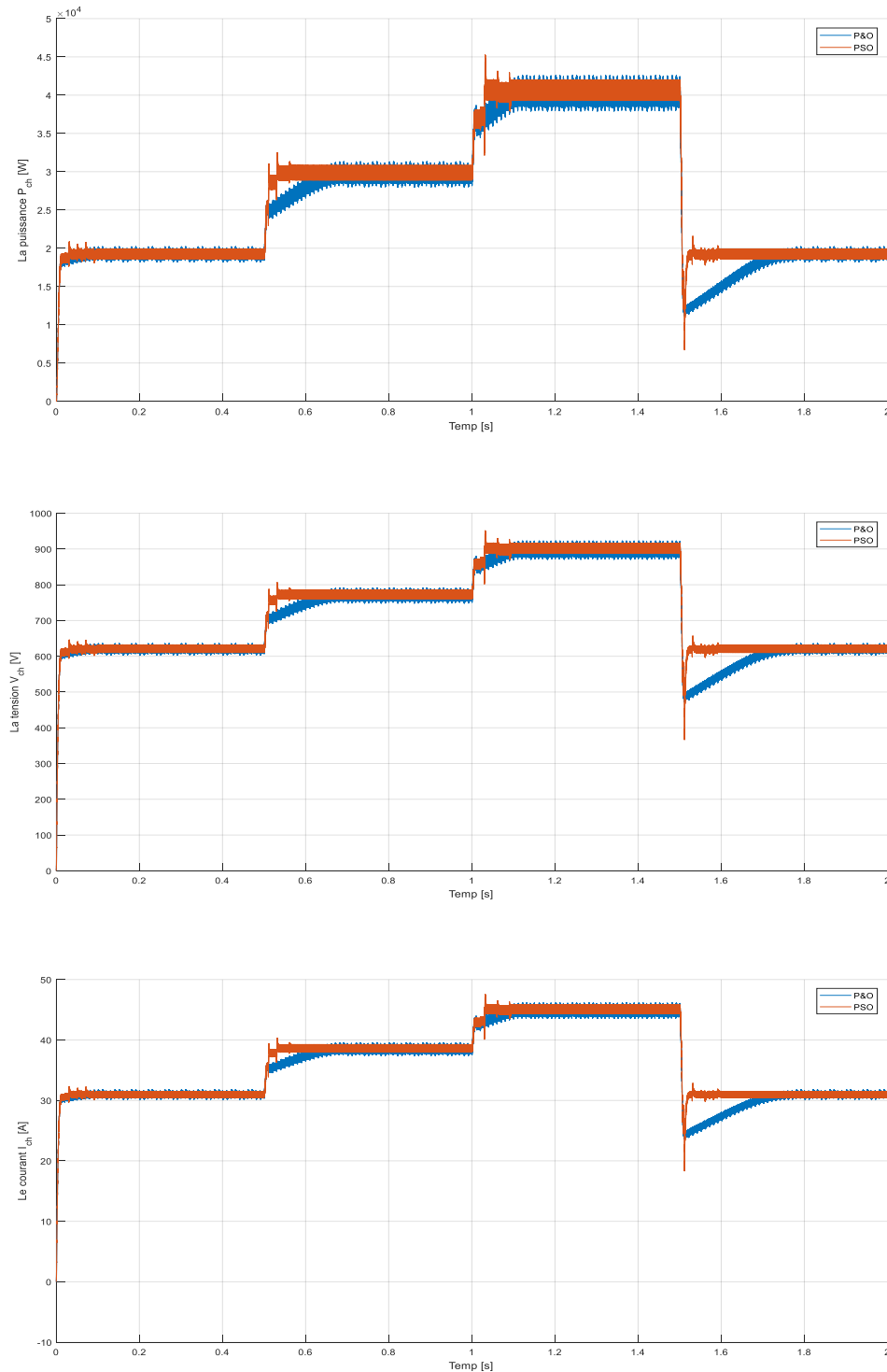


Figure III.32– Présente l'évolution de tension, courant et puissance de la charge pour un ensoleillement variable.

## III.6 Conclusion

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion de convertisseurs statiques (généralement un convertisseur DC-DC) entre le générateur et la charge. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (MPP), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs minimisent l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux commandes MPPT (MPPT-P&O et MPPT-OEP) au système PV associant panneau PV – hacheur – charge. Nous avons ensuite présenté les résultats de simulation pour une variation de la température et de l'éclairement. Les résultats de simulation montre un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV est atteint en utilisant la commande MPPT-P&O. Cependant, la commande MPPT-PSO offre de meilleures performances, en régime statique et en régime dynamique, que la commande MPPT-P&O.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est sur l'amélioration des performances du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) commandé par la technique MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le champ PV. La simulation du fonctionnement du générateur photovoltaïque GPV, nous ont permis de visualiser l'effet de la température dont l'augmentation conduit à une baisse de la puissance générée et de même la diminution de l'éclairement la réduit aussi. En effet, nous avons pu visualiser les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour une température et un éclairement fixe. Ensuite nous avons étudié l'effet de la variation d'éclairement à température fixe, ce qui nous a permis de conclure que la puissance et le courant augmente avec l'accroissement de l'éclairement, et inversement l'augmentation de la température à un effet inverse.

Après la présentation des modèles du GPV, le hacheur élévateur et sa stratégie de commande MLI, On a résumé l'aspect théorique de deux techniques pour le suivie du point de fonctionnement à puissance maximale du système PV. Nous avons commencé par la méthode la plus utilisée, MPPT par perturbation et observation (P&O), qui a un organigramme simple à implémenter et qui assure une convergence acceptable. La deuxième méthode présentée, qui est l'optimisation par essaim particules (MPPT-OEP), a un organigramme plus complexe, dont la convergence est influencée par le pas de simulation.

En dernier, nous avons appliqué les deux techniques de commande MPPT précédemment choisies au système PV associant un panneau PV, un hacheur Boost et une charge résistive. Nous avons ensuite visualisé les résultats pour une variation de la température et de l'éclairement. Ces derniers montrent un fonctionnement satisfaisant.

Nous pouvons aussi, conclure que :

- Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'éclairement.
- Le convertisseur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV.
- Un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV est atteint en utilisant la commande MPPT-P&O.
- La commande MPPT-OEP offre de meilleures performances, en régime statique et en régime dynamique, que la commande MPPT-P&O.

Comme perspectives nous recommandons la réalisation pratique et l'utilisation d'autres techniques hybrides de maximisation de puissances MPPT.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Belkaid Abdelhakim, " Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome", thèse de doctorat, Université Farhat Abbas –Setif, 2015.
- [2] Yassine Lasmi, " Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Farhat Abbas 1–Sétif, 2013.
- [3] Benadel Faiza, "Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV", Memoir de master, Université de Msila, 2016.
- [4] Hamidouche Macylia, "Etude d'un System Photovoltaïque", Mémoire de master, Université A.MIRA de Bejaïa, 2016.
- [5] Ahlam LITIM, " Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque", Mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2017.
- [6] Boukli-hacen Omar, "Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique", thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2011.
- [7] Merahi Reda, "Modalisation d'un Dispositif MPPT pour L'étude de l'augmentation de la puissance Produite par les Générateur Photovoltaïque", Mémoire de master, Universite Badji Mokhtar –Annaba, 2010.
- [8] Moussane Souhila, "Gestion d'énergie d'un Système Photovoltaïque avec batterie", Mémoire de master, Université A.MIRA de Bejaïa, 2014.
- [9] Abedelmalik Zorig, "Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé ", Mémoire de master, Université de Msila, 2011.
- [10] Belarbi M.Mustapha, "Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome", Thèse de Doctorat, Université Oran Mohammed Boudiaf, 2015.
- [11] Fateh.M.Salma, "Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnectes aux réseaux électrique", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, 2011.
- [12] Alain Bilbao Learreta, " Réalisation de Commandes MPPT Numériques", Mémoire de master, Université Rovira I Virgili, 2006.
- [13] Bensmail Samia, " Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïques", Mémoire de Magister, Université A.MIRA de Bejaïa, 2012.
- [14] Larbi Degla Mohammed, Bachir Ben Ahmed, "Dimensionnement D'un Système De Pompage Photovoltaïque", Mémoire de Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ourgla, 2017.
- [15] BP Solar, SX3200"200 Watt Photovltlaic Module", 2007.

- [16] M. Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Module Photovoltaïque Electronique", thèse de doctorat, Hal Archives-Ouvertes, 2006.
- [17] Touil Nacer Eddine, "Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque", mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [18] Zeineb Belgasmi, "Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté à un réseau électrique", Mémoire de master, 2017.
- [19] Bilal Boudjllal, "Caractérisation des défauts des convertisseurs statiques intégrés dans un système électrique a énergie renouvelable", Thèse de doctorat, Université de Msila, 2017.
- [20] Hananou Fatiha, "Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque", Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ourgla, 2014.
- [21] Djallal Leila Imemne & Dib Yasmina, " Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque, Mémoire de master, Université de Tlemcen, 2017.
- [22] Cédric Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", université Toulouse III-Paul Sabatier, Thèse de doctorat, 2008.
- [23] B. Boudjelel, T. Benslimane, "Open-Switch Fault-Tolerant Control of Power Converter in a Grid-Connected Photovoltaic System", International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 7, No. 4, pp. 1294-1308, December 2016.
- [24] S. Nasir Hussein, M. Jawad Radhi, "Comparison Between Perturb & Observe, Incremental Conductance and Fuzzy Logic MPPT Techniques at Different Weather Conditions ", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 5, No. 7, pp. 12556-12569, July 2016.
- [25] Barka Nour-Eddine, "Amélioration des Performances de Contrôle D'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Métaheuristiques", Mémoire de Magister, Université d'El-oued, 2013.
- [26] Benayad Abdelmoumene, "Modélisation des Panneaux Photovoltaïque par les Méthodes de soft Computing", Mémoire de Magister, Université A.MIRA de Bejaïa, 2011.
- [27] Amin Sallem, "Optimisation des Installations PV par l'Algorithme d'Optimisation par Essais Particulaires", Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, April 2017.
- [28] M. Abdulkadir, A. H. Yatim and S. T. Yusuf, "An Improved PSO-Based MPPT Control Strategy for Photovoltaic Systems", International Journal of Photoenergy, Volume 2014, 2014.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE  
SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUE**

**Proposé et dirigé par :**

**Dr. BOUDJELLAL Bilal**

**Pr. BENSLIMANE Tarak**

**Présenté par :**

**BENZAOUI Khaled**

**DELALDJA Ayoub**

**Thème :**

**Etude comparative des commandes MPPT pour une chaine de  
conversion photovoltaïque**

**Résumé :**

L'énergie des éléments plus fondamentaux et nécessaires à la vie, en raison de la hausse continue de la demande d'énergie est devenue nécessaire de trouver d'autres sources de production d'énergie grâce à l'utilisation des énergies renouvelables et des sources plus importantes de l'utilisation de l'énergie solaire en raison de leurs nombreux avantages.

Dans cette mémoire, nous avons étudié un système de production de l'énergie photovoltaïque. Plusieurs simulations ont été étudiées à savoir la maximisation de puissance MPPT par les deux techniques "perturbe et observe" (P&O) et "l'optimisation par essaim particulaires" (OEP) pour assurer la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. Les résultats de la simulation obtenue sont très encourageants.

**Mots clés :**

**Système photovoltaïque, Convertisseur boost, Commande MPPT, Modélisation, P&O, OEP.**

**N° d'ordre : 052**