



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Génie Electrique  
Électromécanique

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :  
**Dhahoua Chemess Eddine – Bali Mohamed Larbi**

Le :

## Commande D'un Système Hybride Autonome

---

### Jury :

M.	Boualaga Rabhi	Pr	Université de Biskra	Président
M.	Abdeddaim Sabrina	MCA	Université de Biskra	Examineur
M.	Charrouf Omar	MCB	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2021 - 2022

## ***REMERCEMENT***

*Nous remercions premièrement **Allah**, qui nous donné la capacité et la patience pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre superviseur, **Monsieur CHARROUF Omar**, pour l'assistance qu'il m'a apportée au cours de ce travail.*

*Nous remercions également tous les responsables de Laboratoire de Génie Electrique **LEGB** pour leurs efforts et leur aide dans notre recherche.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce modeste travail.*

# Dédicace

Je dédie ce travail : A  
mes chers parents (الله يرهم)

A mes grands-mères et

Mon frère

A toute ma famille

A tous mes amis

A tous mes enseignants

depuis le primaire

jusqu'à maintenant.

*Bali Mohamed Larbi.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce*

*travail :A mes*

*chers parents*

*A mon frère et mes sœurs*

*A ma famille*

*A tous mes amis*

*A tous mes enseignants*

*depuis le primaire*

*jusqu'à maintenant.*

*Dhahoua Chemess Eddine.*

## ملخص:

في هذا العمل، نقوم بمحاكاة نظام هجين مستقل، يتكون من لوحة شمسية وبطارية ومحولات، تمكنا من ادارة الطاقة بين اللوح الشمسي والبطارية لتلبية احتياجات الحمولة وتخزين الطاقة الزائدة في البطارية. وباستخدام الية الاضطراب والمراقبة استطعنا الوصول لأعلى قدرة من الاستطاعة المنتجة من اللوح الشمسي. وظهرت النتائج المحاكاة المقدمة الأداء السليم للبطارية مع دورات الشحن والتفريغ وتظهر كفاءة خوارزمية إدارة الطاقة لدينا.

الكلمات المفتاحية: (النظام الهجين – اللوحة الشمسية – البطارية – الاضطراب والمراقبة – المحول مستمر - مستمر).

## Résumé

Dans ce travail, nous simulons un système hybride autonome, composé d'un panneau solaire, d'une batterie et convertisseur DC/DC (Boost et Buck-Boost), Nous avons également gérer l'énergie entre GPV et la batterie pour répondre aux besoins de la charge et stocker l'énergie excédentaire dans la batterie. Et en utilisant le l'algorithme de perturbation et observation, nous avons atteindre la capacité la plus élevée de l'énergie produite par le GPV (MPPT). Les résultats de simulation présentés montrent le bon fonctionnement de batterie avec des cycles de charge et de décharge et montrent l'efficacité de notre algorithme de gestion de l'énergie.

**Mot clé : (System hybride – Panneau solaire – Batterie – Perturbation et observation – Convertisseurs DC/DC).**

## Abstract

In this work, we simulate an autonom hybrid system, consisting of a solar panel, a battery and DC/DC converter (Boost and Buck-Boost), we also manage the energy between GPV and battery to meet the load requirements and store the excess energy in the battery. And by using the perturbation and observation algorithm, we achieved the highest capacity of the energy produced by the GPV (MPPT). The presented simulation results show the good performance of the batteries with charge and discharge cycles and show the efficiency of our energy management algorithm.

**Keyword : (Hybrid system - Solar panel - Battery - Disturbance and observation - DC/DC converters).**

### Symboles et notations

$k_i$ : Coefficient de température de court-circuit de la cellule ( $A/K$ ).

$T_c$ : Température de la cellule en ( $K$ ).

$E$ : Eclairement absorbé par la cellule.

$E_{ref}$ : Eclairement de référence ( $1000 W/m^2$ ).

$I_0$ : Courant de saturation de la diode.

$V_t$ : Tension thermique.

$B$ : Facteur d'idéalité.

$K$ : Constant de Boltzman ( $1,38.10^{-23}J/K$ ).

$q$ : Charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}C$ ).

$I_{pv}$ : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

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

$I_d$ : Courant circulant dans la diode.

$I_{or}$ : Courant de court- circuit de la cellule à la température et l'éclairement de référence.

$P_{pv}$ : Puissance du générateur PV ( $W$ )

$T$ : Température de la jonction des cellules PV ( $K$ ).

$B$ : Facteur d'idéalité de la jonction.

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

$V_{pv}$ : Tension de sortie.

$I_p$ : Courant circulant dans la résistance  $R_p$ .

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

$E_m$ : Eclairement maximal du site ( $W/m^2$ ).

$t$ : Temps solaire en heure.

$t_0$ : Temps de la levée du soleil ( $6h$ ).

$I_m$ : Courant optimale (max).

$V_{oc}$ : Tension de circuit ouvert

$I_{cc}$ : Courant de court-circuit (A)

$V_m$ : Tension optimale (max).

$V_{opt}$ : La tension optimale (V)

$I_{opt}$ : Le courant optimal (A)

$d$ : diode.

# Liste des abréviations

<b><i>SEH</i></b>	Systeme Energie Hybride
<b><i>PV</i></b>	Photovoltaïque
<b><i>CC</i></b>	Courant Continu
<b><i>CA</i></b>	Courant Alternatif
<b><i>DC/DC</i></b>	Convertisseur Courant continu/ Courant continu
<b><i>DC/AC</i></b>	Convertisseur Courant continu/ Courant Alternatif
<b><i>Ah</i></b>	Ampère heure
<b><i>SOC</i></b>	State Of Charge
<b><i>GPV</i></b>	Générateur Photovoltaïque
<b><i>MPP</i></b>	Maximum Power Point
<b><i>MPPT</i></b>	Maximum Power Point Tracking
<b><i>P&amp;O</i></b>	Perturbation et Observation
<b><i>FC</i></b>	Fuel Cell
<b><i>PAC</i></b>	Pile A Combustible
<b><i>AFC</i></b>	Alcaline Fuel Cells (piles alcalines)
<b><i>PEMFC</i></b>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Piles à membrane échangeuse de protons)
<b><i>PAFC</i></b>	Phosphoric Acid Fuel Cells (piles à acide phosphorique)
<b><i>SOFC</i></b>	Solid Oxide Fuel Cells (piles à électrolyte solide)
<b><i>DMFC</i></b>	Direct-Methanol Fuel Cell (piles à méthanol direct)
<b><i>PVG</i></b>	PhotoVoltaic Generator
<b><i>PI</i></b>	Proportionnel intégrale
<b><i>PWM</i></b>	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)

**SOMMAIRE**

<b>Introduction Générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur le système Autonome Hybride</b>	
<b>I.1 Introduction :</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2 Système autonome hybride :</b> .....	<b>3</b>
I.2.1 Importance de l'hybridation : .....	3
<b>I.3 Systèmes Photovoltaïques :</b> .....	<b>4</b>
I.3.1 La cellule photovoltaïque : .....	6
I.3.2 Présentation de la technologie photovoltaïque : .....	7
I.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	9
I.3.4 Rayonnement solaire .....	12
<b>I.4 La Technologie De La Batterie :</b> .....	<b>14</b>
I.4.1 Concepts et composants de base : .....	14
I.4.2 Technologies de batterie actuellement disponibles .....	16
I.4.3 Batteries au plomb .....	17
I.4.4 Piles au lithium .....	19
I.4.5 Piles au nickel .....	19
<b>I.5 Système de stockage d'énergie par batterie .....</b>	<b>19</b>
<b>I.6 Conclusion .....</b>	<b>21</b>
<b>Chapitre II : Modélisation du système Autonome Hybride</b>	
<b>II.1 Introduction :</b> .....	<b>23</b>
<b>II.2 Présentation et modélisation du système autonome hybride :</b> .....	<b>23</b>
<b>II.3 Modèle du GPV :</b> .....	<b>24</b>
II.3.1 Cas idéal : .....	24
II.3.2 Cas réel : .....	25
II.3.3 Influence de l'association série des modules PV : .....	26
II.3.4 Influence de l'association parallèle des modules PV : .....	26
II.3.5 Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des modules PV :	27
II.3.6 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) : .....	27
II.3.7 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) : .....	28

II.3.8	Facteur de forme, FF : .....	29
II.3.9	Le rendement $\eta$ : .....	30
II.3.10	Influence de température sur le générateur PV : .....	30
II.3.11	Influence de l'irradiation sur le générateur PV: .....	31
<b>II.4</b>	<b>Les convertisseurs DC/DC .....</b>	<b>31</b>
II.4.1	Convertisseur élévateur (Boost) : .....	32
II.4.2	Convertisseur abaisseur - élévateur (Buck-boost) : .....	34
<b>II.5</b>	<b>Les batteries acides au plomb: .....</b>	<b>36</b>
II.5.1	Modélisation d'une batterie au plomb-acide : .....	37
<b>II.6</b>	<b>Conclusion : .....</b>	<b>41</b>

### Chapitre III : Approche de commande Résultats de simulation du système autonome hybride

<b>III.1</b>	<b>Introduction : .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2</b>	<b>Commande de GPV .....</b>	<b>43</b>
<b>III.3</b>	<b>Commande MPPT (Perturbe et observe).....</b>	<b>43</b>
<b>III.4</b>	<b>Gestionnaire d'énergie du système autonome hybride.....</b>	<b>45</b>
III.4.1)	Mode 1 : .....	47
III.4.2)	Mode 2 : .....	47
III.4.3)	Mode 3 : .....	47
III.4.4)	Mode 4 : .....	47
<b>III.5</b>	<b>Command du convertisseur réversible.....</b>	<b>47</b>
<b>III.6</b>	<b>Résultat et Simulation: .....</b>	<b>48</b>
III.6.1)	Résultat pour un éclairage constant et une charge constante : .....	49
III.6.2)	Résultat pour un éclairage variable et une charge Constante : .....	55
III.6.3)	Résultat pour un éclairage Constant et une charge variable : .....	61
III.6.4)	Résultat pour un éclairage variable et une charge variable : .....	68
III.6.5)	Simulation dans le cas de batterie est chargée à 100% .....	75
<b>III.7</b>	<b>Conclusion : .....</b>	<b>76</b>
<b>Conclusion Generale : .....</b>		<b>77</b>
<b>Références bibliographiques:.....</b>		<b>78</b>

# Introduction générale

D'après les statistiques de l'Agence Internationale de l'Energie, plus des trois-quarts de l'énergie mondiale consommée en 2010 étaient d'origine fossile. Cependant, ces sources d'énergie - gaz, pétrole, charbon - vouées à se tarir au cours des prochaines décennies, sont aujourd'hui également avérées être causes de pollution de l'air, et d'une augmentation de l'effet de serre provoquant le réchauffement climatique. Face à la demande mondiale croissante, cette même agence préconise donc le développement de sources d'énergies plus propres.

Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, surtout l'énergie électrique qui est un facteur essentiel pour ce développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie que sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Dans les pays développés, le défi du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies englobent de plus en plus la croissance nécessaire et légitime du développement rural, du logement, de la santé, de l'éducation puis des services énergétiques de base à long terme, l'industrie.

L'énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

L'Algérie comme tout autre pays a tracé sa feuille de route pour l'usage et la promotion des énergies renouvelables. Motivé par son engagement envers la communauté internationale pour la lutte contre le réchauffement climatique et sa possession de l'un des plus grands gisements solaires au monde.

Dans ce contexte le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la Simulation d'un système autonome hybride. Il est constitué d'un panneau photovoltaïque et des convertisseurs Boost et Buck-Boost est aussi des batteries et une charge. Le modèle du système a été développé à l'aide du logiciel de simulation Matlab/Simulink.

Nous avons structuré notre mémoire par trois chapitres avec une introduction et conclusion générale :

Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur les systèmes hybrides et les systèmes photovoltaïques. Le Principe de fonction d'une cellule solaire ainsi que les types de cellules et aussi des caractéristiques électriques avec les effets d'éclairement et de température de la cellule photovoltaïque. La technologie, les types et conception de base des batteries. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de notre système (système Photovoltaïque autonome). On présente le modèle générateur PV, le convertisseur DC/DC Boost et Buck-Boost. Finalement nous parlerons au modèle de batterie au plombe acide. Au troisième chapitre, nous exposerons et discuterons des résultats de simulation. La comparaison des résultats permettra d'énoncer une conclusion pour cette étude.

# Chapitre I

## Généralité sur le Système Autonome Hybride

## **I.1 Introduction :**

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques.

## **I.2 Système autonome hybride :**

De façon générale, un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. Par exemple, la combinaison éolien-diesel est un système hybride d'énergie.

D'après [1], de nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs au diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes.

### **I.2.1 Importance de l'hybridation :**

Aujourd'hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autres des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou

plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie.

D'après le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne de l'Université du Québec à Rimouski [1], la combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif.

De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle.

### **I.3 Systèmes Photovoltaïques :**

Chaque heure, suffisamment d'énergie solaire arrive sur Terre pour satisfaire la demande mondiale d'électricité pendant un an. Si nous pouvions exploiter seulement une petite partie de cette énergie, cela fournirait suffisamment de puissance pour l'ensemble de l'humanité. Avec des modules photovoltaïques fonctionnant à 10% d'efficacité, nous aurions besoin d'environ 0,4% de la surface de la Terre pour satisfaire la demande énergétique mondiale totale, ce qui est inférieur à ce qui est actuellement utilisé pour l'agriculture[2].

L'énergie solaire peut être convertie directement en électricité avec des modules photovoltaïques grâce à un phénomène appelé l'effet photovoltaïque. L'énergie solaire peut également être collectée sous forme de chaleur avec des capteurs solaires. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour le chauffage des habitations, ou de l'eau, ou elle peut également être convertie en électricité indirectement avec une turbine à vapeur (capteur de chaleur solaire à concentration). Cette thèse ne traite que des systèmes solaires fonctionnant avec des modules photovoltaïques.

Edmond Becquerel a découvert le premier dispositif photovoltaïque en 1839. Cependant, la théorie derrière ce phénomène et ses effets complets n'ont pas été entièrement compris jusqu'au développement de la mécanique quantique et de la technologie des semi-conducteurs au XXe siècle [3].

Les avantages des systèmes photovoltaïques sont décrits dans [2] et résumés ci-dessous :

- Le carburant est présent presque partout et il est infini
- Sans pollution ni rayonnement
- Faibles coûts d'exploitation et de maintenance
- Aucune pièce mobile et presque sans entretien
- Fiable les fabricants garantissent 25 à 30 ans de fonctionnement avec au moins 80 % de rendement énergétique
- Le rendement énergétique annuel est prévisible
- Modulaire ; peut être utilisé dans les petites et les grandes applications
- Peut être facilement intégré dans les infrastructures nouvelles et existantes
- Installation rapide.

Les principaux inconvénients des systèmes photovoltaïques [2] sont :

- Les systèmes sont (ou étaient) considérés comme coûteux
- La production d'électricité horaire et quotidienne est intermittente et imprévisible
- La production ne correspond pas toujours à la demande
- Les systèmes sont assez grands

Comme le montre la figure 1 (ci-dessous), les coûts des modules solaires diminuent tout le temps. Il y a dix ans, l'essentiel du coût d'un système PV (70 %) provenait des modules solaires, mais leur prix a chuté et aujourd'hui, près de la moitié du coût du système provient du coût de l'onduleur et d'autres dispositifs liés à l'équilibre du système (BOS) (Figure I-1).

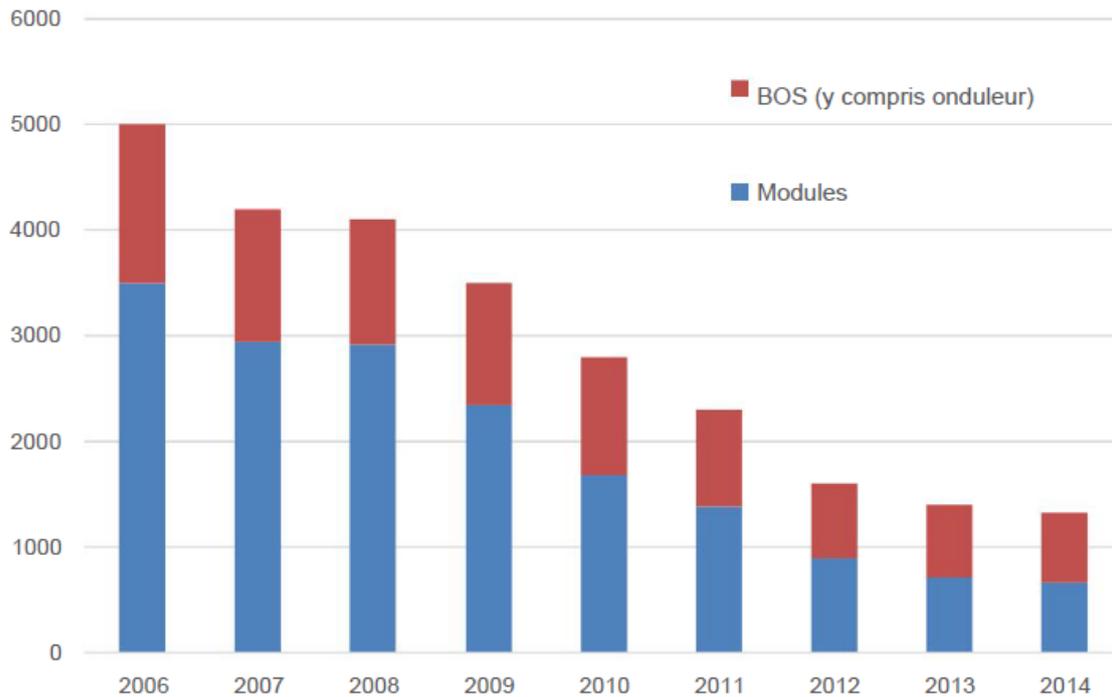


Figure I-1 Diminution du coût d'investissement des modules et du système PV (installés sur le toit d'une taille de 10 à 100 kW en Allemagne). Adapté de [4].

### I.3.1 La cellule photovoltaïque :

La première cellule photovoltaïque (photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés", principalement le bore et le phosphore. C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires pour s'orienter vers la production d'énergie dans les systèmes centralisés et décentralisés. Dès lors les photopiles sont vues comme une solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité dans plusieurs applications comme à bord des satellites, ou site isolé, ou bien raccordé au réseau [5].

L'association d'un nombre des cellules photovoltaïques forme un panneau et le regroupement de ces derniers en série et en parallèle forme ce qu'on appelle un champ photovoltaïque qui sont illustrés par la (Figure.I.2).



Figure I-2 un champ photovoltaïque

### I.3.2 Présentation de la technologie photovoltaïque :

Les cellules solaires les plus couramment utilisées dans les modules solaires sont à base de silicium monocristallin ou polycristallin. D'autres types de cellules solaires ont été développées, telles que les cellules au tellure de cadmium (CdTe), au silicium amorphe et au diséléniure de cuivre et d'indium (CIS).

Cependant, cette thèse se limitera à une discussion sur les cellules solaires à base de monocristallin ou silicium polycristallin. Les cellules solaires sont des dispositifs qui transforment le rayonnement solaire en électricité. Ce sont des semi-conducteurs, généralement de taille 156 x 156 mm, et ils génèrent une tension de 0,5 à 0,6 V. Une cellule PV typique avec tous ses composants est illustrée à la (Figure I.3).

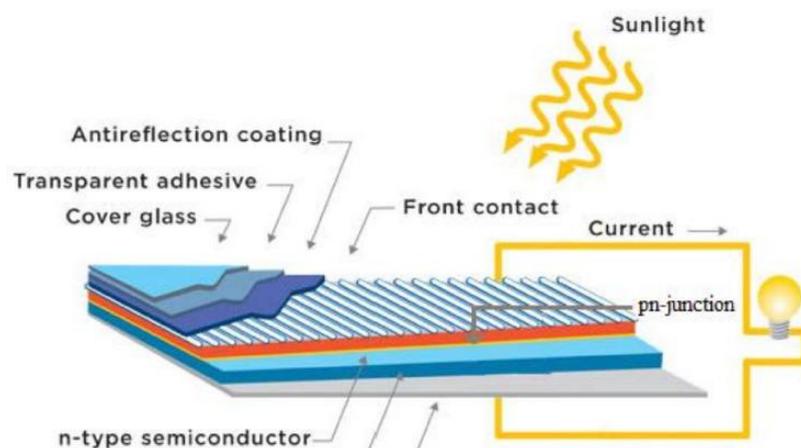


Figure I-3 Cellule PV et composants.

Une cellule solaire comprend une jonction pn, des collecteurs de courant avant et arrière et un revêtement antireflet. Le principe de fonctionnement de la cellule est assez simple. Lorsqu'une charge est attachée à la cellule et que l'irradiante solaire la frappe, des électrons commencent à circuler, ce qui produit un courant électrique.

La (figure I-4) montre deux cellules solaires à base de silicium. Celle de gauche est une cellule solaire polycristalline et celle de droite est monocristalline. Le silicium monocristallin a une structure cristalline ordonnée. Il est fabriqué à partir d'un cristal de silicium et développé à la taille de cellule requise. Ce processus de fabrication lent et minutieux le rend plus cher que la cellule polycristalline [3], de sorte que les cellules polycristallines sont de plus en plus utilisées par l'industrie, malgré le fait que leurs performances globales pourraient ne pas être aussi bonnes que celles d'une cellule monocristalline. Le grand avantage des cellules polycristallines est qu'elles sont plus faciles et moins chères à fabriquer. Le principal inconvénient des cellules solaires polycristallines est qu'elles comprennent différentes régions de silicium cristallin séparées par des joints de grains.

Ces frontières rendent la liaison entre les structures cristallines irrégulière et réduisent les performances de la cellule en bloquant les flux de porteurs. Ils augmentent également d'autres pertes dans la cellule solaire. Cependant, selon [3] des pertes importantes aux joints de grains peuvent être évitées si les tailles de grains peuvent être limitées à l'ordre de quelques millimètres.

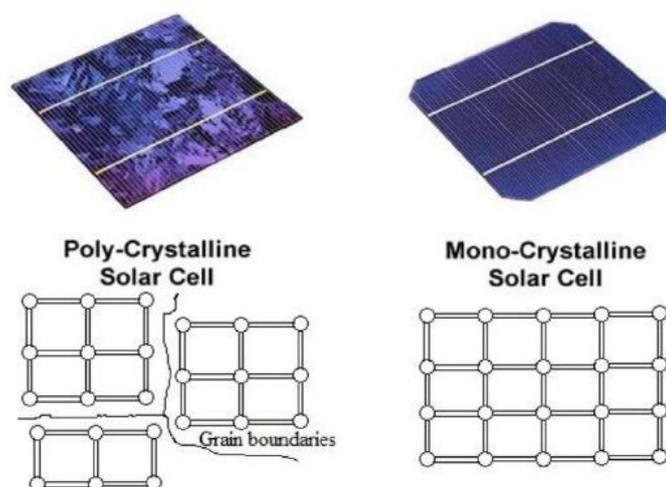


Figure I-4 Cellules solaires en silicium polycristalline et monocristallin.

Les cellules solaires individuelles sont rarement utilisées seules. Au lieu de cela, un certain nombre de cellules solaires aux caractéristiques similaires sont connectées les unes aux autres pour former un module solaire. Les cellules sont connectées en série de manière à obtenir la tension souhaitée. En plus des cellules solaires proprement dites, un module solaire comprend d'autres dispositifs tels que le câblage et les diodes de dérivation. Les diodes de dérivation sont des composants importants d'un module solaire. Ils sont utilisés pour diminuer les pertes de puissance causées par l'ombrage et les salissures. Des arbres, des bâtiments ou d'autres modules solaires pourraient faire de l'ombre au module. Sans diodes de dérivation, si une cellule est ombragée, la puissance de l'ensemble du module serait diminuée.

Les diodes de dérivation empêchent également la surchauffe et les dommages causés par l'ombrage et l'encrassement.

Un module solaire et un système PV résidentiel composé de 12 modules solaires sont présentés à la (Figure I-5).



*Figure I-5 Module solaire Naps et système PV résidentiel.*

La figure montre un système photovoltaïque résidentiel de 2,4 kW sur une maison individuelle située à Åland, en Finlande. En règle générale, un système solaire domestique résidentiel à petite échelle peut être installé sur un toit en moins d'une journée.

### **I.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

Les cellules solaires à base de silicium sont constituées de deux semi-conducteurs qui forment une jonction pn. Le semi-conducteur de type n est formé en dopant la structure cristalline du silicium avec du phosphore (ou tout autre élément du groupe V du tableau périodique). Tous les éléments du groupe V du tableau périodique ont cinq électrons dans leur enveloppe énergétique externe, alors que le silicium n'en a que quatre.

Par conséquent, chaque atome de phosphore ajouté produit un électron libre. Le semi-conducteur de type p est formé en dopant le cristal avec du bore (ou tout autre élément du groupe III du tableau périodique). Les éléments du groupe III du tableau périodique ont un électron de moins que le silicium dans leur enveloppe externe. Par conséquent, la liaison que forme le bore avec l'atome de silicium environnant crée une lacune électronique, ou "trou". Ce trou peut être considéré comme porteur de charge positive. L'idée de base du dopage du silicium est donc d'avoir des électrons en excès du côté n de la cellule, et des trous en excès du côté p.

Lorsque les semi-conducteurs de type p et n sont combinés, une jonction pn est formée. Près de la jonction des deux semi-conducteurs, les électrons en excès du côté n remplissent les trous du côté p en raison de l'effet de diffusion. Une zone où il y a très peu ou pas de porteurs de charge gratuits est appelée une région d'appauvrissement. Des ions chargés positivement sont formés du côté n de la région d'appauvrissement (où les électrons étaient initialement présents) et des ions chargés négativement sont formés du côté p de la région d'appauvrissement (où les trous étaient initialement présents).

Ceci, à son tour, crée une zone chargée positivement du côté n et une zone chargée négativement du côté p.

Il y a donc une différence de potentiel électrique à travers la zone, donc un champ électrique est formé. La direction du flux dans le champ électrique est du côté n vers le côté p. Une jonction pn et sa région d'appauvrissement sont illustrées à la (figure I-6).

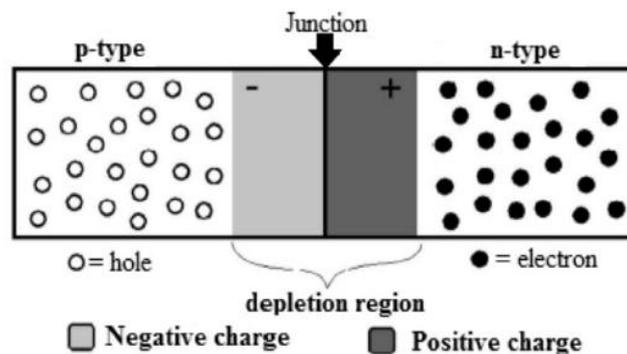


Figure I-6 Jonction Pn et région de déplétion

La région d'épuisement, comme son nom l'indique, épuise le nombre de porteurs de charge mobiles. En conséquence, la région d'appauvrissement est hautement résistive et se comporte maintenant comme s'il s'agissait de silicium cristallin pur. En d'autres termes, il agit comme un isolant électrique. La résistance de la région d'appauvrissement peut être modifiée en la connectant à un champ électrique externe. Si le champ électrique connecté est dans la même direction que le champ électrique dans la jonction pn, la résistance de la région

d'appauvrissement deviendra plus grande, et vice versa. Par conséquent, la région d'appauvrissement peut être utilisée comme une résistance commandée en tension.

Si une tension positive est connectée au côté p et une tension négative au côté n, alors la jonction est polarisée en direct.

Cela signifie que le champ externe et les champs électriques existants circulent dans des directions opposées.

Par conséquent, le champ résultant abaisse la résistance de la région d'appauvrissement. Si la tension connectée est suffisamment élevée (dans le silicium, environ 0,6 volt), la résistance de la région d'appauvrissement devient négligeable et le courant peut circuler sans interruption. La cellule solaire fonctionne grâce à l'effet photovoltaïque.

Ceci est mieux décrit en considérant le soleil comme transmettant le rayonnement dans certains paquets, ou quanta. Dans le rayonnement électromagnétique, ces quanta sont appelés photons. Lorsqu'un photon entre en collision avec un atome de la structure cristalline d'une cellule solaire, son énergie est utilisée pour ioniser un électron de la bande de valence de l'atome à la bande de conduction.

Cette ionisation ne se produit que si le photon a suffisamment d'énergie pour ioniser l'électron sur la bande interdite.

Lors de l'ionisation, les électrons normalement impliqués dans une liaison silicium sont excités par le photon, ce qui provoque la rupture de la liaison. La collision de photons est illustrée à la (figure I-7).

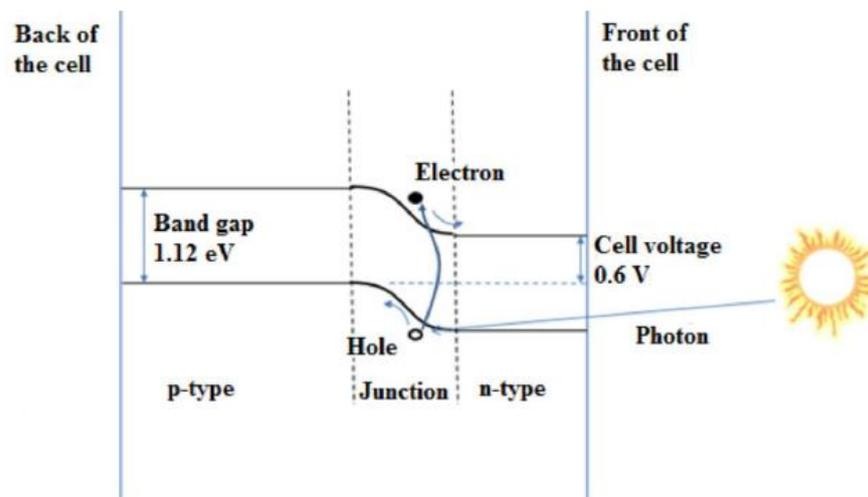


Figure I-7 Collision de photons

L'effet photovoltaïque se produit même si le silicium n'est pas dopé, mais en raison de l'effet massif de recombinaison, une cellule au silicium non dopée ne pourrait pas produire

suffisamment d'énergie pour être utile. Dans une jonction pn, cependant, une paire électron-trou libre est produite et, en raison du champ électrique dans la région d'appauvrissement, l'électron et le trou se séparent et se déplacent vers les côtés opposés de la jonction, comme le montre la (figure 9). Comme tant que la cellule solaire fait partie d'un circuit électrique, les porteurs de charge formeront un courant électrique. Les cellules solaires génèrent du courant continu, de sorte que les systèmes connectés au réseau ont besoin d'un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif.

### I.3.4 Rayonnement solaire

Toute irradiance solaire qui atteint la Terre provient de réactions nucléaires à l'intérieur du Soleil. Le Soleil émet depuis sa surface un rayonnement de haute intensité d'une puissance de  $3,8 \times 10^{26}$  W. En fin de compte, seulement 0,000000045 % de ce rayonnement atteint l'atmosphère terrestre. Néanmoins, cela équivaut à  $1,7 \times 10^{17}$  W [6].

Le rayonnement solaire est généralement mesuré par la puissance par unité de surface que le rayonnement incident inflige à un avion. Cette mesure est appelée irradiance, G. L'irradiance atteignant le bord extérieur de l'atmosphère terrestre est d'environ  $1368 \text{ W/m}^2$  [6]. Cette « constante solaire » se divise en : 8 % dans le domaine ultraviolet, 47 % dans le domaine de la lumière visible et 45 % dans le domaine infrarouge. La constante solaire dépend de l'activité solaire et de l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil, elle n'est donc pas réellement constante et peut varier de  $\pm 3,5$  % [6].

Seulement 49 % de l'énergie atteignant le sommet de l'atmosphère pénètre à la surface de la Terre. Le reste est soit réfléchi vers l'espace, soit absorbé dans la haute atmosphère terrestre. Par exemple, les nuages peuvent bloquer les rayons entrants et réduire la quantité d'irradiance atteignant la surface de la Terre de 80 à 90 %. La différence entre l'irradiance solaire par temps clair et ensoleillé et par temps nuageux est illustrée graphiquement à la (figure I-8).

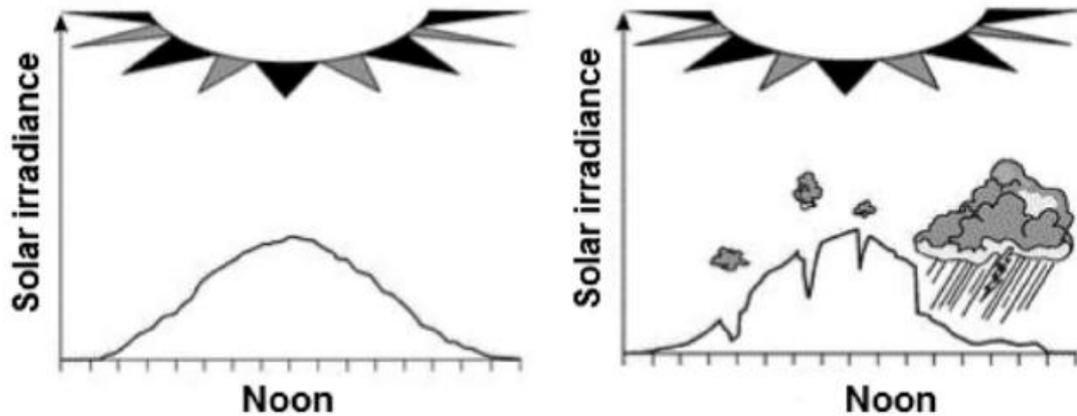


Figure I-8 Irradiance solaire lors d'une journée ensoleillée par rapport à une journée nuageuse.

Adapté de [7].

La masse d'air (AM) représente les effets d'une atmosphère sans nuages sur l'irradiance solaire et son spectre. La masse d'air est définie comme une division de la longueur de l'irradiance traversant l'atmosphère et de l'épaisseur de l'atmosphère, c'est-à-dire :

$$AM = \frac{\text{irradiance at the atmosphere}}{\text{atmosphère}} = \frac{\text{irradiance at the atmosphere}}{\text{irradiance at the atmosphere } \cos\theta} = \frac{1}{\cos\theta}$$

où  $\theta$  est l'angle d'incidence de l'irradiance solaire. La (figure I-9) illustre les variables affectant la masse d'air et présente également certaines valeurs de masse d'air.

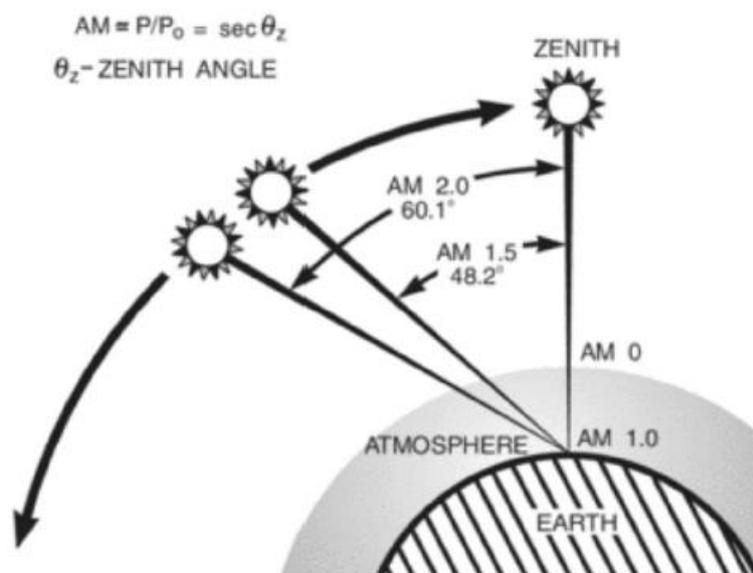


Figure : I-9 les variables affectant la masse d'air

La masse d'air est de 1 à la surface de la Terre lorsque le soleil est au zénith et la masse d'air est de 0 à le sommet de l'atmosphère. La masse d'air affecte l'intensité et le spectre de l'irradiance solaire atteignant la Terre, car les molécules de l'atmosphère se dispersent et réfléchissent le rayonnement. La valeur de masse d'air la plus importante est de 1,5, qui est utilisée comme condition de test standard pour les cellules solaires. Avec un AM de 1,5, l'angle zénithal est  $\theta = 48,2^\circ$ .

Les rayons solaires peuvent toucher le sol directement ou indirectement après avoir été réfléchis ou diffusés par l'atmosphère ou par des objets au sol. L'éclairement indirect est souvent appelé rayonnement diffus. La combinaison de l'irradiance directe et diffuse est la source de base de la production d'énergie solaire photovoltaïque. Le spectre solaire dans l'atmosphère et à la surface de la Terre est illustré à la (figure I-10). Ici, la masse d'air est AM1,5, et la figure montre également les différences entre le rayonnement direct et diffus.

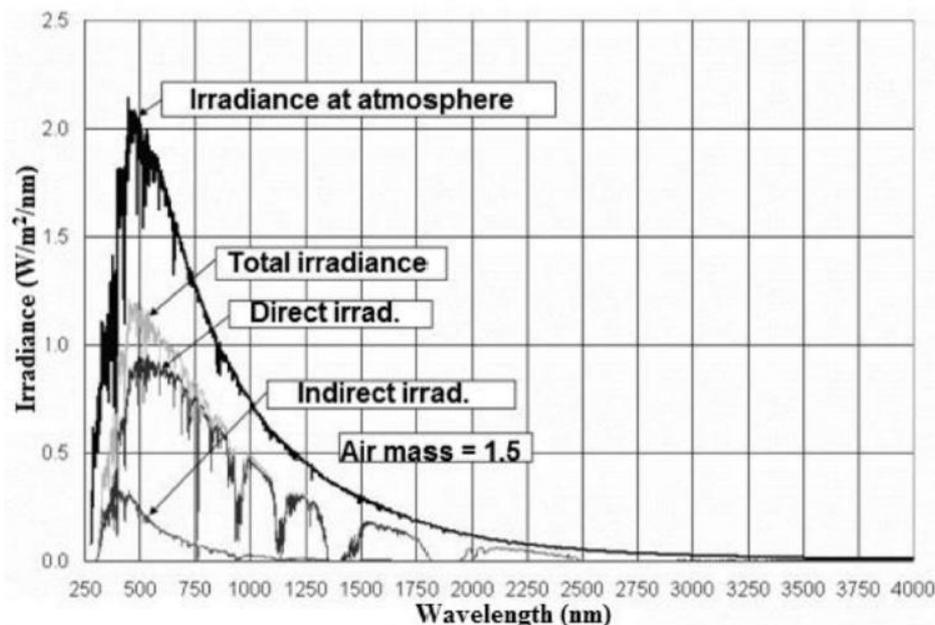


Figure I-10 Différences du spectre solaire entre l'atmosphère et la Terre surface.

Comme le montre la (figure I-10), une grande partie de l'irradiance est perdue dans l'atmosphère. Il faut aussi noter qu'à certaines longueurs d'onde, la quasi-totalité du rayonnement est absorbée car certaines molécules abondantes dans l'atmosphère absorbent une plus grande partie de l'énergie solaire à ces longueurs d'onde.

### I.4 La Technologie De La Batterie :

Il existe de nombreuses autres technologies de stockage d'énergie en plus des batteries conventionnelles. Par exemple, il existe des batteries à flux, des piles à combustible à hydrogène, des stockages d'énergie magnétique supraconducteurs (SMES), des super condensateurs, des volants d'inertie, des stockages d'énergie à air comprimé (CAES) ou des stockages hydrauliques pompés.

#### I.4.1 Concepts et composants de base :

Le principe de fonctionnement d'une batterie est qu'elle convertit l'énergie chimique en énergie électrique et inversement. Pour ce faire, il utilise une réaction électrochimique d'oxydo-réduction (redox). Ce type de réaction implique le transfert d'électrons d'un matériau à un autre via un circuit électrique [8]. Alors que le terme "batterie" est souvent utilisé, l'unité électrochimique de base est plus correctement connue sous le nom de "cellule". Une batterie se compose d'une ou plusieurs cellules, connectées en série, en parallèle ou les deux, en fonction de la tension et de la capacité de sortie souhaitées [8].

Une cellule de stockage électrochimique se compose d'un électrolyte (qui contient des ions dissous) et de deux électrodes contenant des matières actives différentes. La réaction électrochimique, qui se produit lorsque la cellule est déchargée, est la suivante : l'électrode négative cède des électrons au circuit extérieur et s'oxyde au cours de la réaction électrochimique. L'électrode positive accepte les électrons du circuit externe et est réduite lors de la réaction électrochimique. Lors de la charge de la cellule, la réaction électrochimique s'inverse et les électrons vont dans l'autre sens.

L'électrolyte est entre les deux électrodes, et est le milieu pour le transfert des ions entre les électrodes. L'électrolyte est typiquement un liquide, tel que l'eau, avec des sels, des acides ou des alcalis dissous pour conférer une conductivité ionique. Certaines batteries utilisent des électrolytes solides, qui sont des conducteurs ioniques à la température de fonctionnement de la cellule [8].

Le fonctionnement électrochimique d'une cellule est illustré à la (figure I-10). Le circuit de gauche se décharge tandis que celui de droite se charge. Dans l'industrie des batteries, l'électrode négative est souvent appelée anode et l'électrode positive, cathode. Cependant, cela est trompeuse car lorsque la batterie est en charge, l'anode et la cathode sont inversées. En effet, une anode est définie comme le lieu où se produit l'oxydation, ou l'électrode d'où partent les électrons.

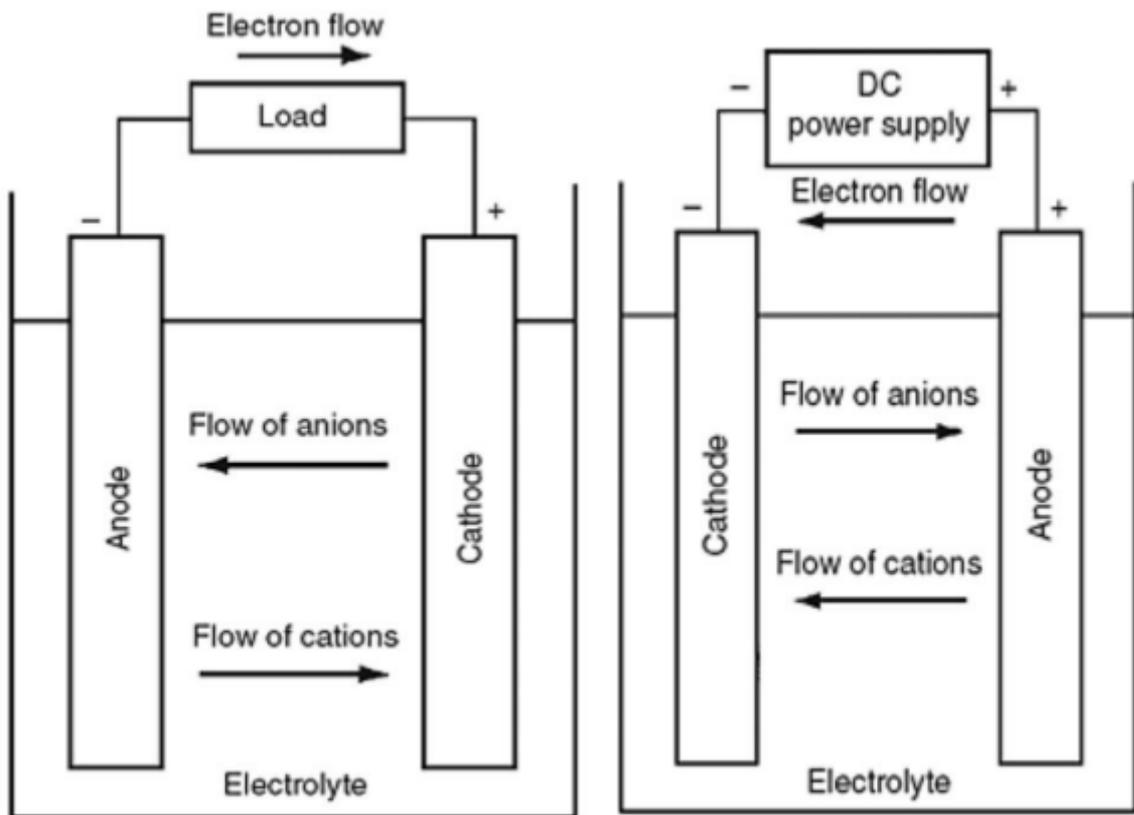


Figure I-11 Fonctionnement électrochimique d'une cellule. Décharge à gauche et charge à droite

Lorsque la cellule est connectée à une charge externe, les électrons circulent de l'électrode négative, qui est oxydée, à travers la charge externe vers l'électrode positive, où les électrons sont acceptés et l'électrode positive est réduite. Le circuit électrique est complété dans l'électrolyte par le flux d'anions et de cations vers les électrodes négative et positive, respectivement. Lors de la recharge d'une cellule, le flux de courant est inversé et une oxydation a lieu à l'électrode positive et une réduction à l'électrode négative.

## I.4.2 Technologies de batterie actuellement disponibles

Cette section passe en revue les technologies de batterie possibles pour une utilisation résidentielle PV. Chaque technologie de batterie peut être différenciée des autres par certains attributs tels que la capacité, la puissance nominale, le coût, la durée de vie, la durabilité du cycle, l'efficacité, le taux de réponse, la densité d'énergie et l'autodécharge. La durabilité du cycle (également appelée durée de vie du cycle) est une mesure du nombre de cycles complets (chargés de zéro à plein et de nouveau déchargés à zéro) que les batteries peuvent durer.

Le stockage d'énergie par batterie utilisé dans le système PV résidentiel doit avoir certaines caractéristiques. La capacité et la puissance nominale dépendent de la consommation et de la

production d'énergie. En raison du coût relativement élevé de l'installation et de l'électronique de puissance, il est préférable d'utiliser des batteries qui ont une longue durée de vie et une bonne résistance au cyclage. La batterie doit être efficace pour que l'énergie utilisée pour la charger ne soit pas perdue lorsque la batterie se décharge sous une charge.

Le taux de réponse de la batterie doit être rapide (de quelques secondes à quelques minutes) car la courbe de charge d'un client résidentiel peut être assez imprévisible. Cependant, il n'a pas besoin d'avoir un taux de réponse ultra-rapide de l'ordre de quelques millisecondes. Le taux d'autodécharge pour un usage résidentiel ne devrait pas être très supérieur à 1 %/j.

La densité énergétique est également un facteur important bien qu'elle soit moins importante pour un usage domestique que dans un véhicule électrique ou dans un appareil mobile. Si la densité d'énergie volumétrique est faible, le stockage d'énergie de la batterie nécessiterait beaucoup d'espace, ce qui est précieux dans un petit appartement urbain en Finlande. La densité énergétique du poids est également importante car le sol de la résidence devra pouvoir supporter ce poids. Les limites de température de la technologie de batterie choisie doivent également être prises en compte, en particulier si la batterie doit être installée dans un espace de stockage non chauffé en hiver.

Si la densité d'énergie est suffisamment élevée, les batteries de 2 kWh utilisées dans un BES pourraient être plus petites qu'un four à micro-ondes. Même un grand système BES résidentiel n'aurait pas besoin de beaucoup plus d'espace qu'un petit réfrigérateur, si des batteries à haute densité d'énergie étaient utilisées. Les sections suivantes passent en revue les trois technologies de batterie les plus couramment utilisées : les batteries au plomb, les batteries au lithium-ion et les batteries au nickel.

### **I.4.3 Batteries au plomb**

Les batteries au plomb ont été les premières batteries rechargeables et sont depuis lors la technologie de batterie la plus utilisée. Il a souvent été prévu qu'elles seront remplacées par une autre technologie de batterie, mais la batterie au plomb a conservé sa popularité. Outre de nombreux autres paramètres plausibles, le principal avantage concurrentiel de la batterie plomb-acide est son coût [9].

Comme pour les autres technologies de batterie, le fonctionnement de la batterie au plomb repose sur une réaction chimique. Il utilise du dioxyde de plomb comme électrode positive et du plomb comme électrode négative, et contient de l'acide sulfurique comme

électrolyte [9] .Les batteries au plomb peuvent être divisées en deux types, les batteries ouvertes et fermées.

La première batterie ouverte a été développée en 1859 par Gaston Plante. Il a fallu encore 40 ans avant que les batteries au nickel ne commencent à leur faire concurrence. Les batteries au plomb ouvert nécessitent un entretien, ce qui signifie ajouter de l'eau à la batterie de temps en temps. Les batteries au plomb ouvertes ont été largement remplacées par des batteries fermées, principalement pour des raisons de sécurité. Néanmoins, les batteries au plomb ouvertes sont toujours le type le plus rentable, avec une densité d'énergie plus élevée et une durée de vie plus longue, de sorte qu'elles peuvent toujours être envisagées pour des applications où il n'y a aucun risque de pulvérisation ou de déversement d'acide, ou d'hydrogène gazeux. Fuite. [9] La première batterie fermée au plomb n'a été développée que dans les années 1970, 100 ans après l'invention de la première batterie au plomb [10]. Les batteries au plomb fermées sont devenues très populaires dans les années 1980.

La principale différence entre les batteries au plomb ouvertes et fermées est qu'il n'y a pas d'électrolyte liquide dans les batteries fermées. Au lieu de cela, l'acide sulfurique se présente sous la forme d'un gel ou absorbé sur un mat de verre (AGM). Les réactions de décharge et de charge sont les mêmes que dans la batterie ouverte, mais comme l'oxygène et l'hydrogène ne s'échappent pas des batteries fermées, il n'est pas nécessaire de faire l'appoint d'eau. Pour des raisons de sécurité, des soupapes de décharge haute pression ont été ajoutées aux batteries [9].

L'un des inconvénients des batteries au plomb est qu'elles ont une très faible densité d'énergie, donc elles sont grandes. Un autre problème est que le plomb est très toxique pour les humains et les animaux, de sorte qu'il doit être éliminé d'une manière respectueuse de l'environnement. Les batteries au plomb conviennent particulièrement aux applications nécessitant une batterie robuste et économique, dont le poids et la taille ne posent aucun problème. Ils sont généralement utilisés dans les voitures, les bus et bateaux comme batteries de recharge, et certaines grosses machines industrielles, fauteuils roulants, voiturettes de golf et autres véhicules électriques, ainsi que pour l'éclairage de secours et les systèmes UPS (alimentation électrique ininterrompue) dans les services d'infrastructure vitaux tels que les hôpitaux. Ils sont également déjà largement utilisés dans les installations photovoltaïques hors réseau. [9 ; 10].

Les avantages des batteries au plomb comprennent leur coût relativement faible, la maturité de la technologie et leur plage de température de fonctionnement relativement large.

Les principaux inconvénients sont leur faible densité d'énergie et leur courte durée de vie [10 ; 11].

En bref, les batteries au plomb sont bon marché et fiables mais lourdes et encombrantes, elles pourraient donc avoir des problèmes en utilisation résidentielle.

### **I.4.4 Piles au lithium**

Le développement des batteries au lithium a commencé en 1912, mais les progrès ont été lents en raison de l'instabilité du lithium métallique. Près de 60 ans plus tard, lorsque les premières piles au lithium ont commencé à apparaître sur le marché, elles n'étaient pas rechargeables. Ainsi, les problèmes de sécurité et l'instabilité du lithium métallique signifiaient que les batteries au lithium n'étaient pas populaires au début. Une percée majeure s'est produite lorsqu'une batterie au lithium utilisant des ions lithium au lieu du lithium métallique a été développée. Sony a commercialisé les premières batteries lithium-ion en 1991, depuis quand les batteries lithium-ion sont devenues de plus en plus populaires. [12 ; 13]

Le principe de base du fonctionnement de la batterie lithium-ion est le même que pour la batterie plomb-acide. Il y a une anode, une cathode et un électrolyte comme médium. Lorsque les électrodes de la batterie lithium-ion sont connectées à une charge, les ions lithium positifs de l'anode traversent l'électrolyte vers la cathode. En même temps, les électrons traversent la charge de l'anode à la cathode. Lorsque la batterie est en charge, le flux d'électrons est inversé. [14]

### **I.4.5 Piles au nickel**

La première batterie au nickel a été développée en 1899 par Waldmar Jungner et il était immédiatement clair qu'elle présentait de nombreux avantages par rapport à la batterie au plomb. Le développement des batteries au nickel a été initialement lent en raison de la disponibilité limitée du matériau et de son coût élevé. Les premières batteries au nickel fermées ont été fabriquées en 1947, après quoi elles ont commencé à devenir plus populaires. [15]

Parmi les batteries au nickel, les batteries au nickel les plus connues sont les batteries nickel cadmium, nickel fer et nickel métal hydrure. Ce dernier est le dernier type, mais le principe de fonctionnement principal est le même pour toutes ces différentes technologies. Toutes les batteries ont de l'hydroxyde d'oxyde de nickel comme cathode et de l'hydroxyde de potassium comme électrolyte. L'anode, cependant, pourrait être en cadmium, en fer ou en hydrure métallique.[15]

## I.5 Système de stockage d'énergie par batterie

Un système domestique de stockage d'énergie par batterie stockera tout excédent d'énergie généré par le système PV du client lorsque celui-ci n'en aura pas besoin. Cette énergie stockée peut être utilisée le soir ou pendant la nuit. Un système de stockage intelligent peut ajuster la consommation d'énergie de sorte que la majeure partie de l'énergie solaire autoproduite soit à la disposition du client. Ce type de système intelligent est souvent également capable de tirer de l'énergie du réseau, de sorte qu'il peut profiter des prix plus bas de l'électricité du réseau lorsque la demande est faible et utiliser l'électricité stockée lorsque la demande, et donc le prix, est élevé. En plus des batteries, les systèmes domestiques de stockage d'énergie par batterie comprennent souvent un onduleur et d'autres composants électroniques de puissance, un gestionnaire d'énergie intelligent, une technologie de mesure et le logiciel pour faire fonctionner le système. Ces systèmes pourraient également offrir une gestion de l'énergie domestique et également la possibilité de surveiller et même de contrôler le système via une liaison Internet depuis son ordinateur ou son smartphone.

À moins que le problème ne soit traité maintenant, l'utilisation croissante de sources d'énergie renouvelables intermittentes, comme le solaire et l'éolien, causera des problèmes à n'importe quel réseau, par exemple en raison d'une surproduction et d'une fréquence variable. Outre l'extension du réseau et le développement de solutions de gestion de la demande, la capacité à stocker l'électricité devient de plus en plus importante dans la recherche d'un système énergétique décarboné. Bien que ce ne soit pas encore un problème pour le réseau finlandais, du point de vue du client, cela pourrait en devenir un. La production PV est intermittente et généralement mal adaptée à la courbe de charge de l'utilisateur résidentiel.

Avec les systèmes BES, la production PV excédentaire peut être consommée pendant les heures de forte demande, comme le montre la (Figure I-12).

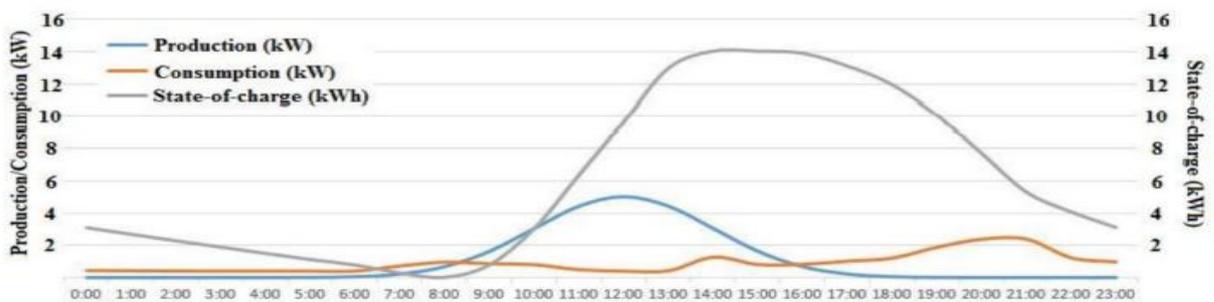


Figure I-12 : Production PV (système PV 5 kW), courbe de charge des clients résidentiels Production PV (système PV 5 kW), courbe de charge des clients résidentiels

Habituellement, la production PV est la plus élevée à midi, alors que la demande de l'utilisateur résidentiel est la plus élevée le matin et le soir. Il est clair que la production de pointe et la demande de pointe sont rarement adaptés, donc sans stockage d'énergie par batterie, l'énergie excédentaire doit être vendue à l'opérateur de réseau à bas prix.

Une batterie de système PV-BES connectée au réseau pourrait également être utilisée pour le « coupage des pics » et le décalage de « l'heure d'utilisation ». Décaler la durée d'utilisation signifie déplacer l'énergie prélevée sur le réseau des périodes de forte demande (et de prix) vers les périodes de faible demande. L'énergie que le consommateur domestique tire de son BES et l'énergie qu'il tire du réseau peuvent être ajustées au profit du client. Il va sans dire que dans les systèmes hors réseau, un système de stockage par batterie est une nécessité, car aucune énergie ne pourrait être utilisée la nuit sans elle. Des dizaines de milliers de systèmes hors réseau avec BES ont été installés en Finlande au cours des dernières décennies, mais un système en réseau avec stockage BES est une application relativement nouvelle. Traditionnellement, les systèmes photovoltaïques ont toujours été conçus pour minimiser la surproduction, en raison du faible prix de vente de l'électricité excédentaire. Avec un BES connecté au réseau, cependant, il pourrait être plus avantageux de sur dimensionner le système PV car il y aurait plus de possibilités d'autoconsommation.

### **I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition et l'importance du system autonome hybride et aussi les systèmes photovoltaïques, puis nous avons présenté le principe de fonction d'une cellule solaire, Rayonnement solaire, puis nous avons présenté la technologie des batteries et leur conception de base.

Le second chapitre sera consacré à la modalisation des composants de notre system formé de GPV, Batteries et convertisseurs.

# Chapitre II

## Modélisation du System autonome Hybride

### II.1 Introduction :

Pour sélectionner une stratégie de gestion adaptée, il est nécessaire de connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Ces informations passent par la modélisation de tous les éléments du système.

Le système proposé dans cette étude est un système hybride autonome, il se compose d'un générateur photovoltaïque associé à un convertisseurs (Boost) statique raccordé avec une charge et (Buck-Boost) raccordé avec batterie. La modélisation des différents composants sera détaillée dans ce chapitre.

### II.2 Présentation et modélisation du système autonome hybride :

Le système proposé est constitué de deux sources qui alimentent une charge DC. Il s'agit d'un GPV considéré comme source principal et des batteries pour le stockage et la restitution de l'énergie comme indique dans la (Figure II-1).

Les convertisseurs jouent un rôle pour la gestion de l'énergie lors du fonctionnement de système.

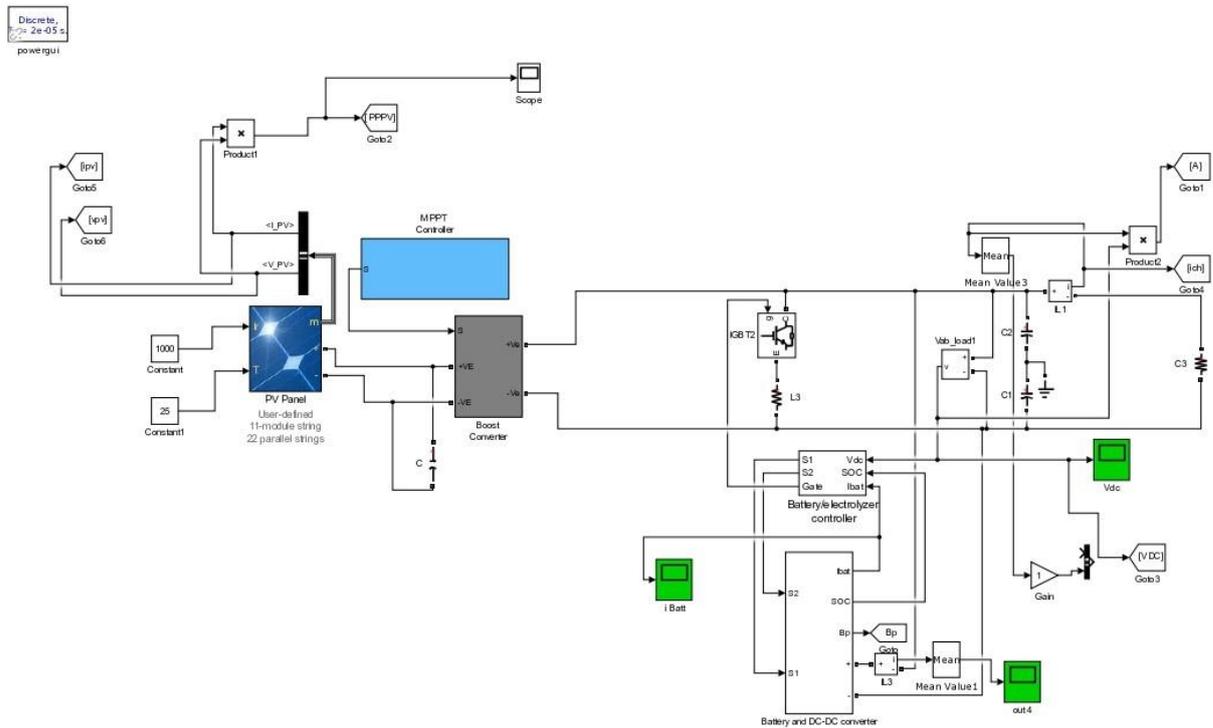


Figure II-2 Modèle Simulink de système autonome hybride

### II.3 Modèle du GPV :

Le GPV est une association de plusieurs modules PV. Chaque module est composé d'un certain nombre de cellules. Le cellule PV est modélisé par l'équivalent illustrer dans la (figure II-2).

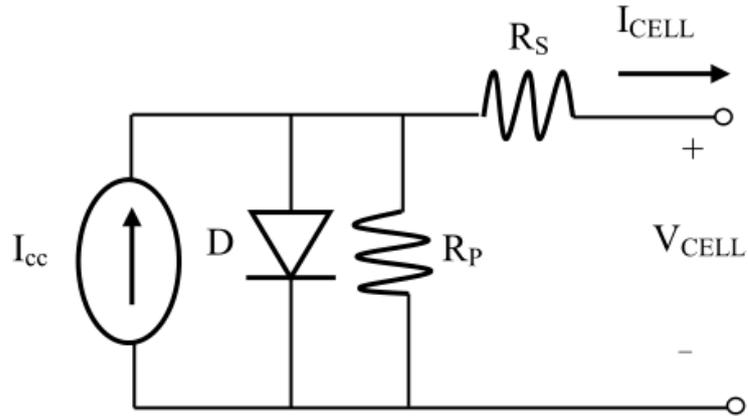


Figure II- 2 Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

#### II.3.1 Cas idéal :

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_D(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (II-1)$$

Sur la (figure II-3) est représenté le schéma du circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire où le courant  $I_{ph}$  généré par les photons est considéré comme source :

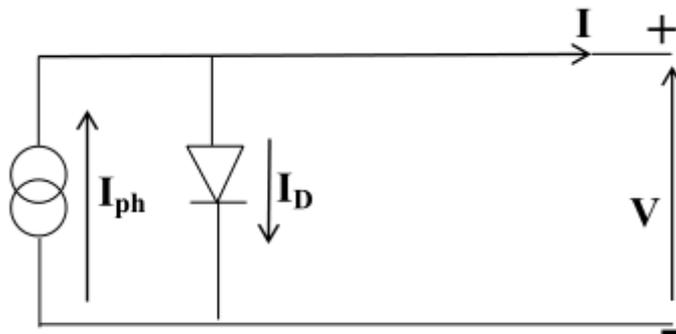


Figure II-3 Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

$I, V$  : Courant et tension fournis par la cellule.

$I_D$  : Courant de diode donnée par :

$$I_D = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (\text{II-2})$$

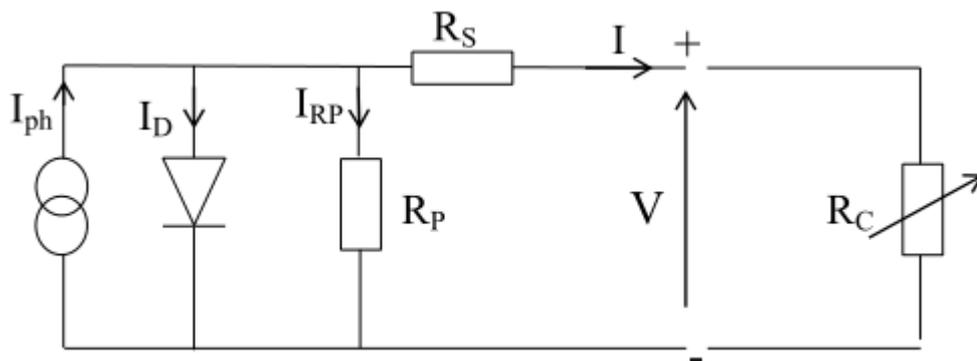
### II.3.2 Cas réel :

La performance d'une cellule solaire est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances ( $R_S$  et  $R_P$ ).

**$R_S$**  : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi-conducteur, électrodes).

**$R_P$**  : Résistance parallèle (Shunt), provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'au non idéalité de la jonction.

Le nouveau schéma équivalent qui fait intervenir les pertes est représenté par la (figure II-4).



*Figure II-4 Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle*

Après l'application de la loi de Kirchhoff, nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (\text{II-3})$$

Le courant  $I$  débité par la cellule est la somme algébrique de trois courant :

**$I_{Ph}$**  : photo courante, il est proportionnel au flux incident et s'écrit ainsi dont l'expression est :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rp} \quad (\text{II-4})$$

$I_{Rp}$  : courant traversant  $R_P$ , si  $R_P$  est très grande il devient très faible :

$$I_{Rp} = \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (\text{II-5})$$

$I_D$  : Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{II-6})$$

En remplaçant dans (II.4) les équations (II.6) et (II.7), l'équation résultante devient :

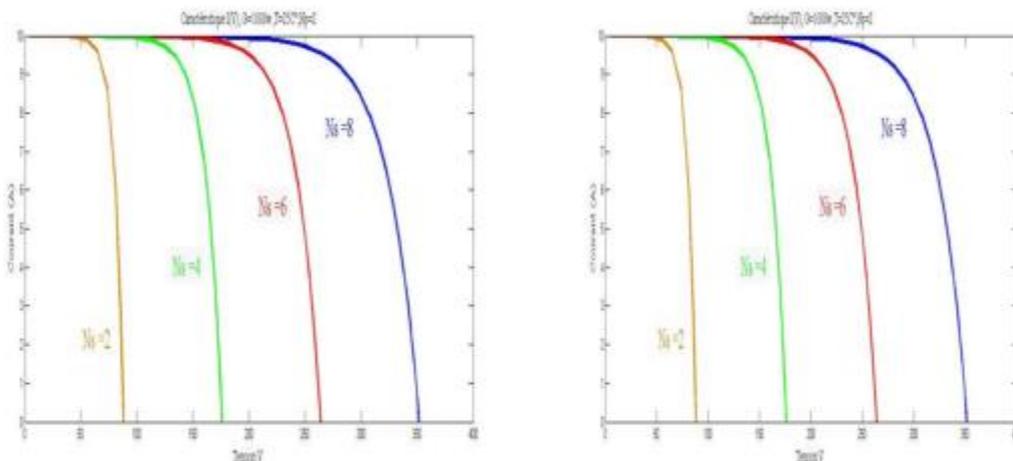
$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (\text{II-7})$$

### II.3.3 Influence de l'association série des modules PV :

Le module individuel ne produit qu'une puissance électrique dépendant du nombre de ses cellules. Pour produire plus de puissance, les modules sont assemblés en série et en parallèle pour former un GPV qui s'adapte à la puissance requise par la charge.

L'association en série des modules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module.

La caractéristique d'un groupement de  $N_s$  modules solaires en série de notre GPV est représentée par les (figure II- 5) suivante :

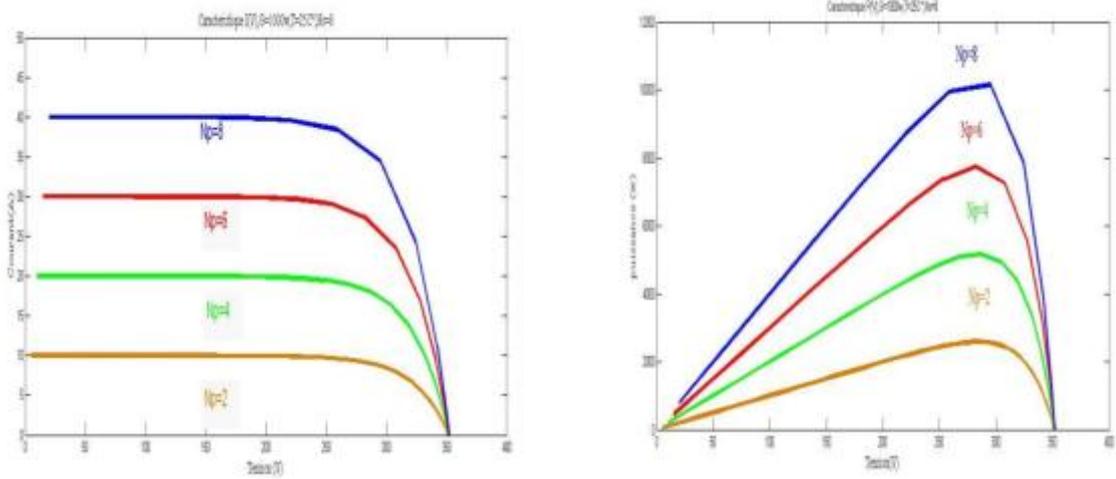


*Figure II-5 Caractéristique de nombre des modules en série*

### II.3.4 Influence de l'association parallèle des modules PV :

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celle d'un seul module.

La caractéristique d'un groupement de  $N_p$  modules solaires en parallèles de notre GPV est représentée par les (figure II- 6) suivante :

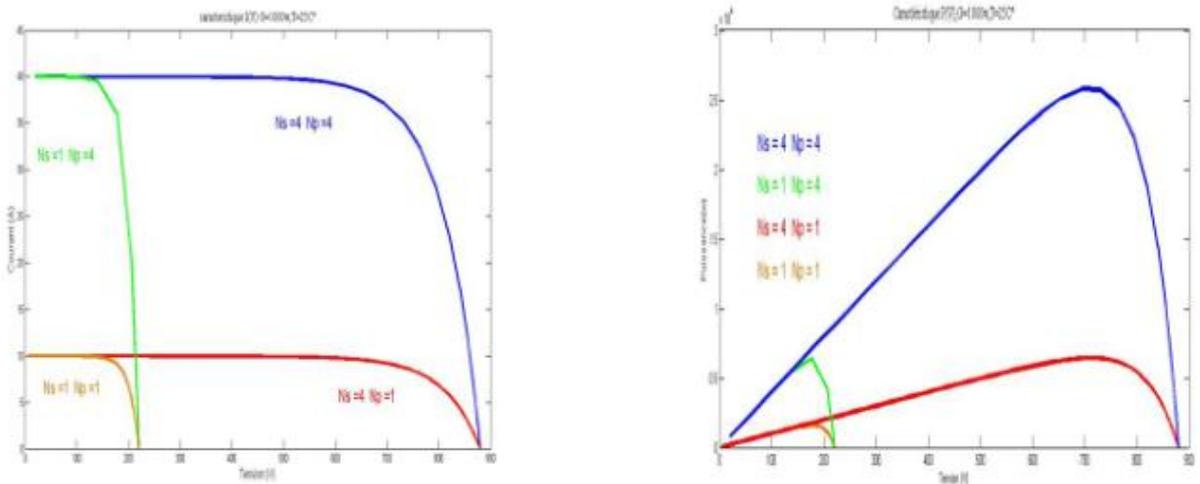


*Figure II-6 Caractéristique de nombre des modules en parallèles*

### II.3.5 Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des modules PV :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension relative à la charge, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série/Parallèle.

La caractéristique d'un groupement de  $N_p \times N_s$  modules solaires de notre GPV est représentée par la (figure II- 7) suivantes :



*Figure II- 7 Caractéristique de nombre des modules mixte (Série + Parallèle)*

### II.3.6 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

### II.3.7 Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) :

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [16].

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$\frac{KT_c}{q}$  Représentant le potentiel thermodynamique.

$T_c$  est la température absolue.

$q$  : la constante de charge d'électron,  $1.602 \cdot 10^{-23} \text{C}$ .

$K$  : la constante de Boltzmann,  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ .

$I_{ph}$  le courant photonique.

$I_s$  le courant de saturation.

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement (figure II-8) :

- Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas,  $I_{ph} \approx I_s$ , ce qui permet d'écrire :

$$\log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \approx \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II-9})$$

D'où

$$V_{co} \approx \frac{K \cdot T_c}{q} \cdot \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II-10})$$

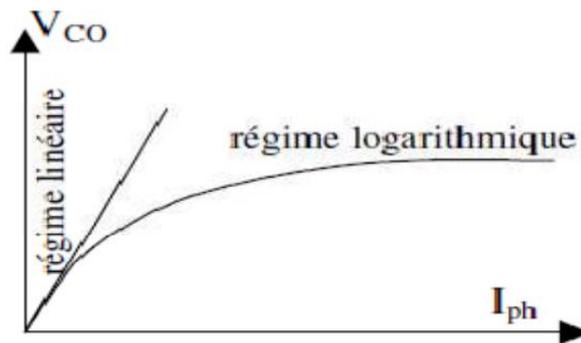
C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi  $V_{co} = R_0 \cdot I_{ph}$ , en posant  $R_0 = \frac{K \cdot T_c}{q \cdot I_s}$  :  $R_0$  est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux. Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que  $I_{ph} \gg I_s$ , soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (\text{II-11})$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (\text{II-12})$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.



*Figure II- 8 différents régimes selon la puissance d'éclairement.*

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de  $I_{ph}$ , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $\frac{KT_c}{q}$ . En effet, le courant de saturation  $I_s$  dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme  $\frac{KT_c}{q}$ . Donc la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [17].

### II.3.8 Facteur de forme, FF :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [18]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-13})$$

### II.3.9 Le rendement $\eta$ :

Les paramètres caractérisant le module sont les mêmes que ceux de la cellule individuelle. L'intensité du rayonnement (l'éclairement) solaire reçu à la surface de la terre est une valeur dépendante de plusieurs facteurs en particulier de l'altitude, de la saison et des conditions météorologiques [19]. La puissance fournie par la cellule PV dépend aussi des mêmes paramètres. Les performances d'un GPV utilisé ne produit en réalité qu'une puissance inférieure à celle indiquée dans les conditions standards de test (1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, 25°C). En général, le rendement d'un module PV, fourni par le fondeur, est donné par la relation suivante :

$$\eta = (P_{max} / S_m) / P_{sol} = (V_{opt} * I_{opt} / S M) / P_{sol} \quad (\text{II-14})$$

Où,  $P_{max}$  : Puissance crête électrique fournie par le module dans les CST.

$S_m$  : surface du module.

l'éclairement : l'éclairement qui est en moyenne égale à 1000W/m<sup>2</sup>.

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

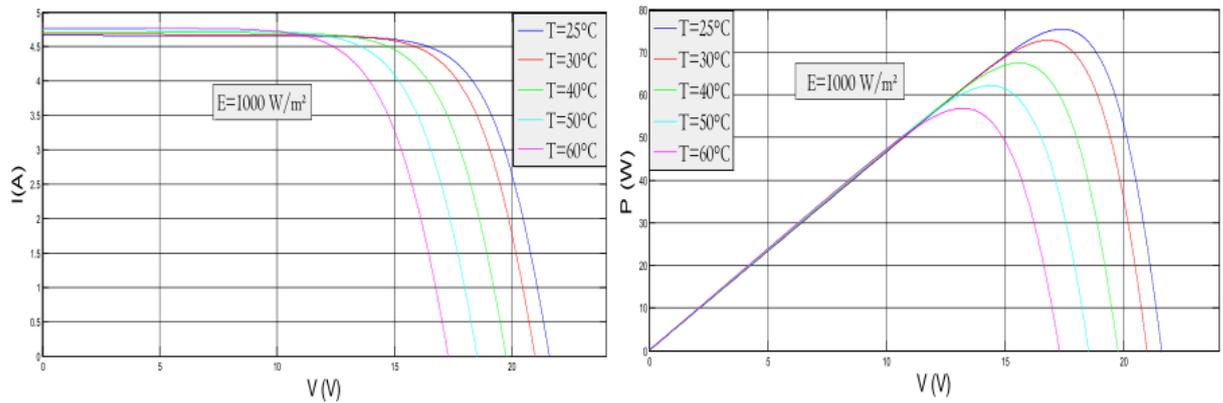
En réalité, le rendement  $\eta$  du module est le rendement d'une cellule ( $\eta_{cellule}$ ) diminué des pertes dues aux connexions ( $\eta_{connexion}$ ) des cellules entre elles, à la transparence des matériaux de capsulage ( $\eta_{encapsulation}$ ) et éventuellement à la chute de tension dans les diodes {anti-retour} ( $\eta_{diodes}$ ) lorsqu'il faut protéger le panneau contre une éventuelle décharge nocturne de la batterie lorsque celle-ci existe [20]. Il est donné par :

$$\eta = \eta_{cellule} * \eta_{conexion} * \eta_{encapsulation} * \eta_{diodes} \quad (\text{II-15})$$

A titre d'exemple le rendement d'un module composé de cellules au silicium poly cristallin d'un rendement de 10% vaut approximativement 9.23%. La différence de l'ordre de 0.77% est attribuée aux connexions, encapsulation et à la diode anti-retour.

### II.3.10 Influence de température sur le générateur PV :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques. (La figure II-9) montre l'effet de la température sur les propriétés de la cellule PV. En changeant la température de 0 ° C à 60 ° C, les caractéristiques I-V et P-V sont données dans la (figures II- 9) suivantes :

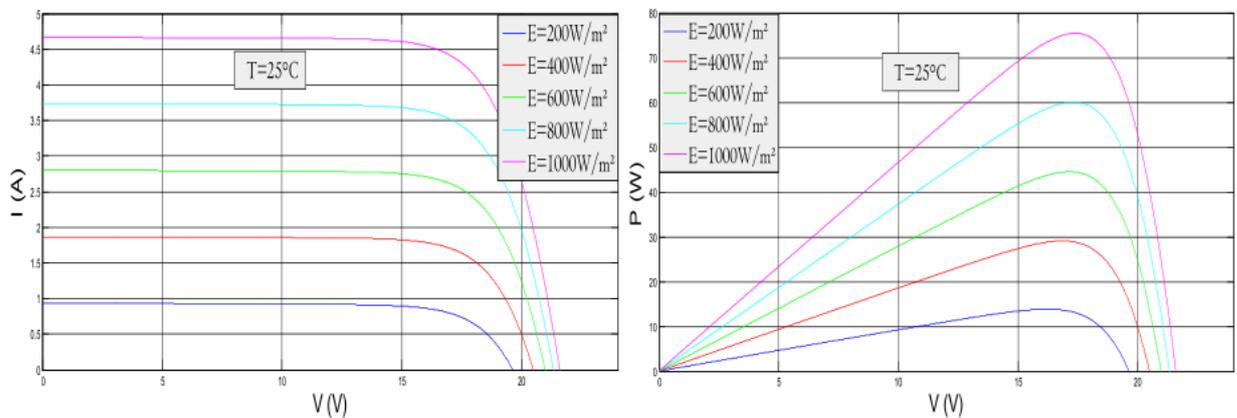


*Figure II- 9 Caractéristiques  $I(V)$   $P(V)$  pour différentes valeurs de température.*

Nous avons remarqué que la température des cellules est toujours supérieure à la température ambiante, Parce que les modules PV ne fournissent qu'une petite partie de l'énergie absorbée et La différence entre ces deux forces (absorbée et fournie) correspond au relâchement L'énergie sous forme de chaleur.

### II.3.11 Influence de l'irradiation sur le générateur PV:

La (figure II- 10) illustrent l'éclairement sur le panneau à une température  $T = 25^{\circ}\text{C}$ . En changeant l'éclairage entre  $200 \text{ w} / \text{m}^2$  et  $1000 \text{ w} / \text{m}^2$ .



*Figure II- 10 Caractéristiques  $I(V)$   $P(V)$  pour différentes valeurs du rayonnement.*

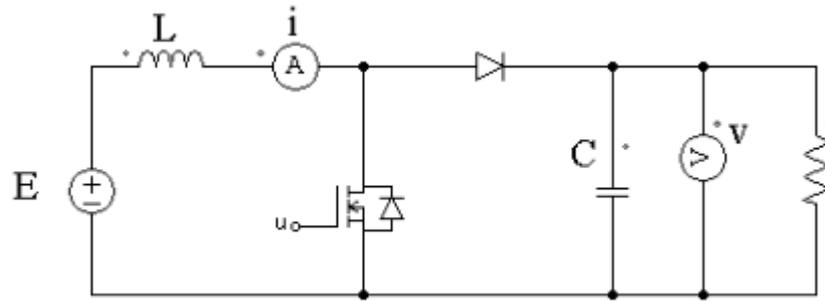
## II.4 Les convertisseurs DC/DC

La modélisation des convertisseurs DC-DC de puissance est un domaine de recherche très actif. L'augmentation de la complexité des convertisseurs, pour répondre aux besoins industriels, nécessite des modèles mathématiques capables de représenter les comportements statiques et dynamiques [21].

### II.4.1 Convertisseur élévateur (Boost) :

L'hacheur parallèle est un convertisseur statique permettant de convertir une tension continue constante a une autre tension continue réglable de valeur moyenne plus grande. Il est constitué d'un interrupteur en parallèle avec le générateur, d'une diode, d'une inductance pour lissage de courant et d'un condensateur pour le filtrage de la tension [22].

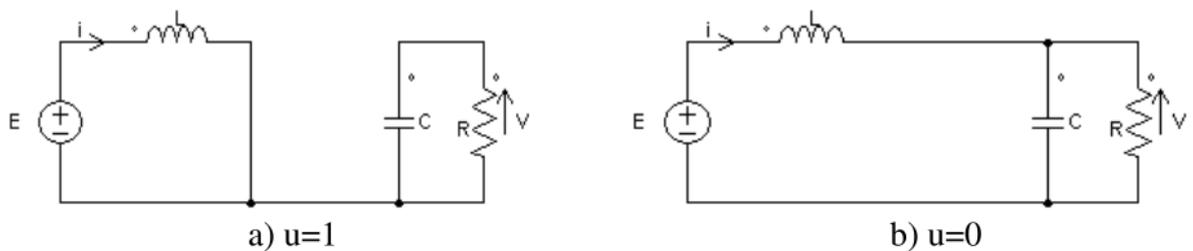
Le circuit du convertisseur Boost (élévateur) est montré sur la (figure II-11).



*Figure II- 11 Convertisseur Boost*

#### II.4.1.1 Modèle du convertisseur :

L'équation différentielles du convertisseur sont obtenues en appliquant les lois de Kirchhoff à chacune des topologies possibles qui résulte d'une position donnée de l'interrupteur.



*Figure II-12 Topologies du Convertisseur Boost*

Lorsque la fonction de commutation est  $u=1$ , et appliquant les lois de Kirchhoff au circuit qui en résulte (Figure II-12 (a)). On obtient la dynamique suivante :

$$L \frac{dy}{dt} = E \quad (\text{II-16})$$

$$C \frac{dv}{dt} = - \frac{v}{R} \quad (\text{II-17})$$

## Chapitre 2 : Modélisation du System autonome hybride

Lorsque la diode est passante alors l'interrupteur est en position  $u=0$  (Figure II-12 (b)) ce nous donne :

$$L \frac{dy}{dt} = E - v \quad (\text{II-18})$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R} \quad (\text{II-19})$$

Alors la dynamique du convertisseur est décrite par le système bilinéaire suivant :

$$L \frac{dy}{dt} = E - v(1 - u) \quad (\text{II-20})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} + i(1 - u) \quad (\text{II-21})$$

Alors lorsque  $u=1$  ou  $u=0$  on retrouve le modèle (II-16 – II-17) ou le modèle (II-18-II-19). Le modèle (II-20-II-21) est souvent appelé modèle commuté avec la fonction binaire de commutation  $u \in \{0, 1\}$ .

### II.4.1.2 Modèle moyen :

Le modèle moyen du convertisseur est exactement le même que (II-20-II-21) avec la variable de contrôle  $u$  remplacée par une variable continue  $u_{av}$  qui prend ses valeurs dans l'intervalle  $\{0, 1\}$ .

Le modèle moyen du convertisseur Boost est décrit par :

$$L \frac{di}{dt} = E - v(1 - u_{av}) \quad (\text{II-22})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} + i(1 - u_{av}) \quad (\text{II-23})$$

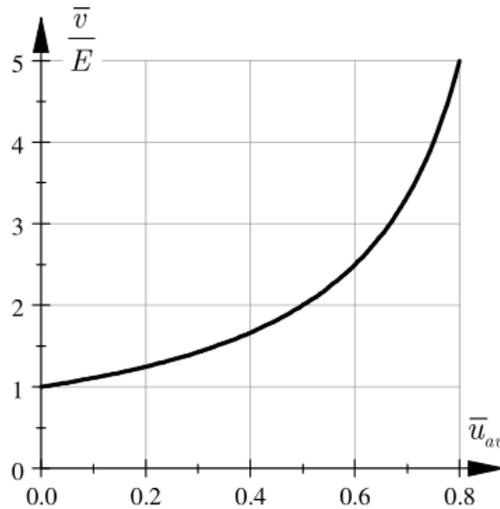
### II.4.1.3 Point d'équilibre :

En utilisant la représentation (II-22 – II-23) et on notant les valeurs moyennes équilibrées du courant et de la tension comme  $\bar{x}_1$  et  $\bar{x}_2$  on obtient en équilibre :

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-U)}{L} \\ \frac{(1-U)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

On solvant le système d'équations (II-24), on obtient les états équilibre du système :

$$\bar{x}_2 = \frac{E}{1-U} \quad \bar{x}_1 = \frac{E}{(1-U)^2} \quad (\text{II-25})$$

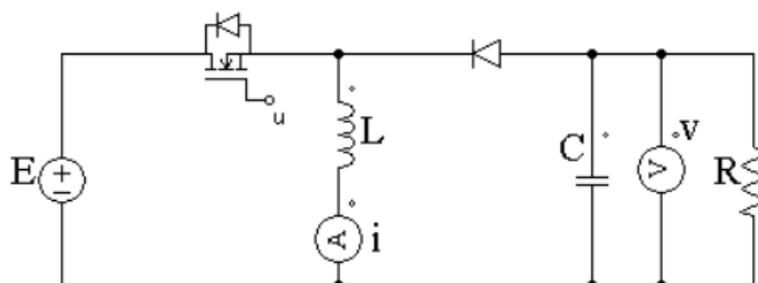


*Figure II-13 Fonction de transfert statique du convertisseur Boost*

### II.4.2 Convertisseur abaisseur - élévateur (Buck-boost) :

L'hacheur série parallèle ou inverseur est un convertisseur indirect DC-DC. Son rôle principal est de convertir la tension constante d'entrée à une tension supérieure ou inférieure mais de polarité inverse. La source d'entrée est de type tension continue montée en parallèle avec un condensateur et une charge résistive (Figure II-14) [23].

#### II.4.2.1 Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost :



*Figure II-14 Schéma du convertisseur Buck-boost*

Les circuits équivalents du convertisseur Buck-boost sont montrés sur la (Figure II-15)

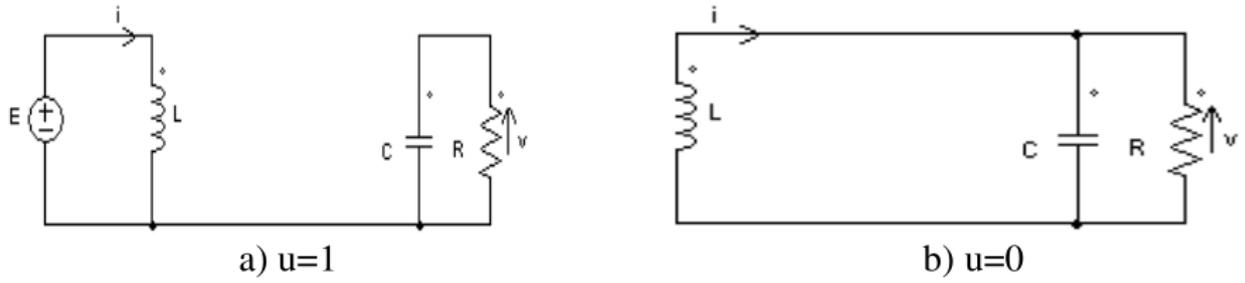


Figure II-15 Circuits équivalents du convertisseur Buck-boost : (a) S fermé, (b) S ouvert

Lorsque la fonction de commutation est  $u=1$ , et appliquant les lois de Kirchhoff au circuit qui en résulte (Figure II-15) (a) On obtient la dynamique suivante :

$$L \frac{di}{dt} = E \quad (\text{II-26})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \quad (\text{II-27})$$

Lorsque la diode est passante alors l'interrupteur est en position  $u=0$  (Figure II-15 (b)), ce nous donne :

$$L \frac{di}{dt} = v \quad (\text{II-28})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -i - \frac{v}{R} \quad (\text{II-29})$$

Alors la dynamique du convertisseur est décrite par le système bilinéaire suivant :

$$L \frac{di}{dt} = Eu + v(1 - u) \quad (\text{II-30})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} - i(1 - u) \quad (\text{II-31})$$

Alors lorsque  $u=1$  ou  $u=0$  on retrouve le modèle (II-26-II-27) ou le modèle (II-28-II-29). Le modèle (II-30-II-31) est souvent appelé modèle commuté.

### II.4.2.2 Modèle moyen :

Le modèle moyen du convertisseur est exactement le même que (II-30-II-31) avec la variable de contrôle  $u$  remplacée par une variable continue  $u_{av}$ .

Le modèle moyen du convertisseur Buck-Boost est décrit par :

$$L \frac{di}{dt} = Eu_{av} + v(1 - u_{av}) \quad (\text{II-32})$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} - i(1 - u_{av}) \quad (\text{II-33})$$

### II.4.2.3 Point d'équilibre:

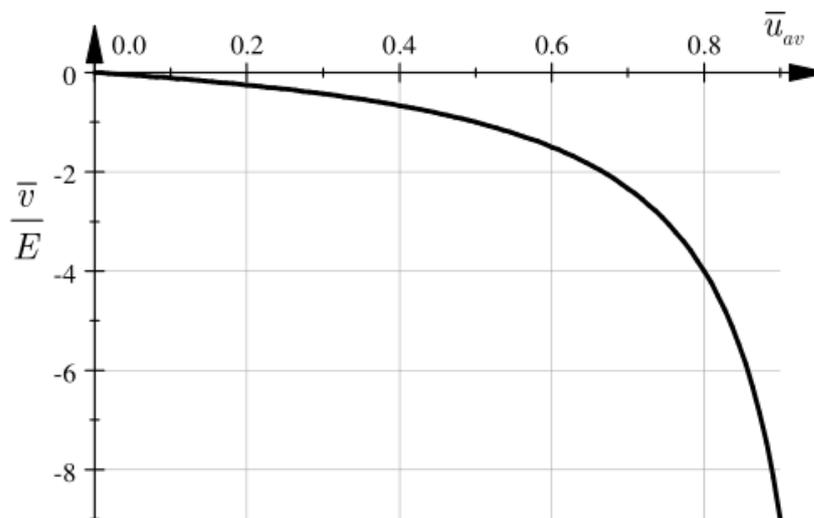
En équilibre, les dérivées des états moyens sont nulles et la commande moyenne  $u_{av}$  est égale à une valeur constante  $U$ . Comme résultat, on obtient un système linéaire d'équations pour les valeurs en régime permanent des états moyens non normalisés.

En utilisant la représentation (II-32-II-33) et on notant les valeurs moyennes équilibrées du courant et de la tension comme  $\bar{x}1$  et  $\bar{x}2$  on obtient en équilibre :

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-U)}{L} \\ \frac{-(1-U)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}1 \\ \bar{x}2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{UE}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-34})$$

On solvant le système d'équations (II.34), on obtient les états équilibre du système comme indique dans la (Figure II-16) :

$$\bar{x}2 = \frac{E}{1-U} \quad \bar{x}1 = \frac{E}{(1-U)^2} \quad (\text{II-35})$$



*Figure II-16 Fonction de transfert statique du convertisseur Buck-Boost*

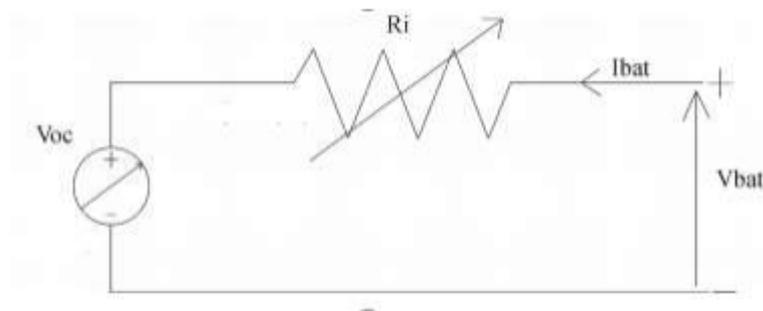
### II.5 Les batteries acides au plomb:

Les batteries acides sont des dispositifs de stockage d'énergie communs pour les systèmes PV. Les batteries au plomb peuvent être de 6V ou 12V dans un conteneur en plastique résistant du type à cellule noyée ou du scellé / gel. Ces batteries ont une forme immobilisée d'électrolyte. Les batteries au plomb-acide sans entretien et scellées sont également appelées

batteries au plomb-acide à régulation de soupape ou batteries au plomb-acide captives à électrolyte. Les batteries scellées sont de deux types, à savoir de type électrolyte gélifié et de type mat de verre absorbé. Les batteries à électrolyte immobilisées auront moins d'électrolyte comparé aux batteries à électrolyte noyées. Au cours du processus de charge, les gaz hydrogène et oxygène sont produit à partir de l'eau en raison de réactions chimiques négatives et des plaques positives. Ces gaz se recombinent pour former de l'eau, ainsi, le besoin d'ajout d'eau est éliminé [24].

### II.5.1 Modélisation d'une batterie au plomb-acide :

Le model dynamique et statique de notre batterie est basé sur une amélioration du modèle proposé par l'étude de t. copetti et Al qui a été développé dans le centre ciemat en Espagne. Ce modèle est basé sur l'approche électrique montré dans la figure, talque la batterie est représentée par une source de tension « Voc », représentant son comportement en circuit ouvert formée par l'énergie électrochimique, et une chute de tension due à sa résistance interne. On note que la source de tension en circuit ouvert varie en fonction de l'état de charge de la batterie Voc (EDC), la tension aux bornes de la batterie Vbat est exprimée par l'équation (II-36) [25,26].



*Figure II-17 Circuit équivalent de base pour la batterie*

$$V_{bat} = R_i \cdot I_{bat} + V_{oc} \begin{cases} V_{oc} = f(EDC) \\ R_i = f(EDC, T, I_{bat}) \end{cases} \quad \text{(II-36)}$$

Nous présentons une relation empirique obtenue grâce à des tests pratiques du modèle qui teste la résistance interne en tant que fonction non linéaire de l'état de charge/décharge du courant de charge  $I_{bat}$  (EDC) et de la température de fonctionnement  $T$ , équation (II-37).

$$R_b = \left( \frac{P1}{1+I(t)^{P2}} + \frac{P3}{(1+EDC(t))^{P4}} + P5 \right) (1 - \alpha T(T - T_{ref})). \quad \text{(II-37)}$$

$R_b$  = résistance interne /  $T$  = température / EDC = courant de charge

### II.5.1.1 L'état de charge (SOC) :

La batterie peut être considérée comme un stockage d'énergie avec une énergie en évolution constante. Par conséquent [27], son état de charge est identifié comme la capacité contenue dans la batterie ; il est affecté par les conditions de fonctionnement (courant, température, etc.). Pour une batterie complètement chargée, l'unité SOC est 100% ou 1 ; pour une batterie dite vide, l'unité SOC est 0% ou 0

$$SOC\% = SOC \times 100 \quad (\text{II-38})$$

$$= \frac{(La\ capacit\acute{e}\ actuele\ (Ah))}{C_x(Ah)}$$

Comme solution simple, l'évolution du SOC peut être traquée selon l'équation :

$$\Delta SOC = SOC(t) - SOC(t_0) = \frac{1}{capacit\acute{e}(Ah)} \int_{t_0}^t ib(\tau) d\tau \quad (\text{II-39})$$

### II.5.1.2 Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par :

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t)/\eta_{inv}) \cdot \eta_{bat} \quad (\text{II-40})$$

$C_{bat}(t)$  et  $C_{bat}$  sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et (t-1) respectivement, est le taux horaire de la charge spontanée,  $P_{PV}$  est la puissance du générateur PV,  $P_L$  est la charge demandée au temps t,  $\eta_{inv}$  et  $\eta_{bat}$  sont les rendements de l'onduleur et de la batterie successivement. Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0.65'0.85 selon le chargeant courant), par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1[28].

### II.5.1.3 Modèle de la décharge de la batterie :

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suite [28]:

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_L(t)/\eta_{inv} - P_{pv}(t)) \quad (\text{II-41})$$

À tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{batmin} \leq C_{bat}(t) \leq C_{batmax} \quad (\text{II-42})$$

## Chapitre 2 : Modélisation du System autonome hybride

La capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ( $C_{batmin} = C_{batmax}$ ) et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) [29] :

$$C_{batmin} = DOD \cdot C_{bat.N} \quad (\text{II-43})$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge.

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50% [30].

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie.

Elle peut être estimée par la relation suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{bat} \cdot f_{dish} \cdot DOD} [Wh] \quad (\text{II-44})$$

$$C_{bat} [Ah] = \frac{C_{bat}}{V_b} \quad (\text{II-45})$$

Avec :

C bat : La capacité de stockage de la batterie

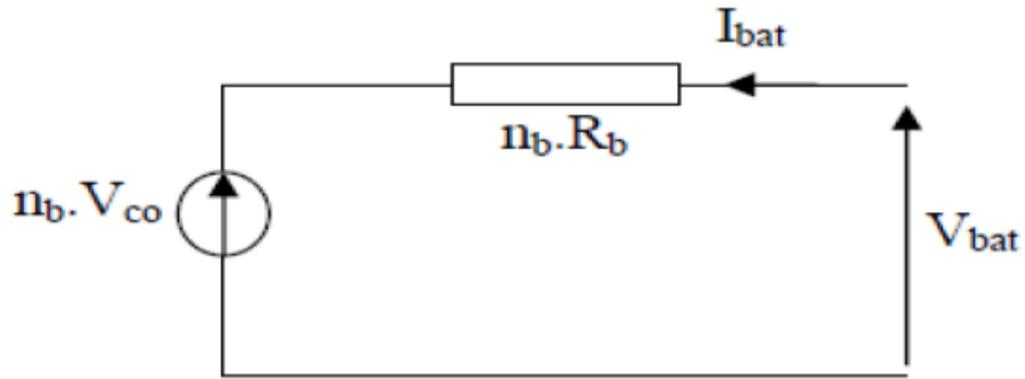
N a : Le nombre de jours d'autonomie

V b : La tension du système

DOD : la profondeur de décharge

### Tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Le schéma électrique de la batterie est représenté dans la (figure II-18) [31].



*Figure II-18 le schéma électrique de la batterie*

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_b \cdot R_{bat}(t) \quad (\text{II-46})$$

Où  $V_{bat}$  est la tension de circuit ouvert au temps t, et  $R_{bat}$  est la résistance interne de batterie, la tension de circuit ouvert est exprimée comme la fonction de l'état de charge.

Tel que :

$$V_{co}(t) = V_F + b \cdot \log SOC(t) \quad (\text{II-47})$$

$V_f$  est la force électromotrice.

b est un constant empirique.

### II.5.1.4 Courant de batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grand que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par :

$$I_{bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} \quad (\text{II-48})$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas rencontrer la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est :

$$I_{bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} - \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (\text{II-49})$$

### II.5.1.5 Rendement de la Batterie :

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

$$\eta_{bat} = \frac{P_{fourni}}{P_{incid}} \quad (\text{II-50})$$

Avec :

$P_{incid}$  : Puissance du générateur.

### II.5.1.6 La profondeur de décharge (DOD) :

Le DOD est la quantité de capacité supprimée pendant la phase de décharge lors du cycle à partir d'une batterie complètement chargée. Elle est exprimée en pourcentage (%) par rapport à la capacité maximale pouvant être délivrée par cette batterie.

$$DOD\% = \left( \frac{\text{la capacité retiré d'une batterie chargé (Ah)}}{C_x(\text{Ah})} \right) \times 100 \quad (\text{II-51})$$

Aussi, selon l'équation II-38 et II-51 la profondeur de décharge est le complément de l'état de charge :

$$DOD\% = (1 - SOC) \times 100 \quad (\text{II-52})$$

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation Modèle GPV et Influence de l'association série et parallèle des modules PV et aussi L'effet de la température et du l'éclairement Nous avons présenté aussi les des deux convertisseurs DC-DC (Boost et le Buck Boost), ainsi que. L'étude du régime établi, a permet d'établir les fonctions de transfert statiques des convertisseurs, et de comprendre leurs relations entrée-sortie. Le modèle moyen est utilisé pour calculer la commande moyenne du convertisseur. La linéarisation autour d'un point d'équilibre désiré, a permet d'établir les caractéristiques locales, Dans la troisième partie, nous avons présenté la modalisation de batterie au plomb-acide, Nous avons également mis en évidence modèle de la charge et décharge de la batterie, l'état de Charge, tension et courant et le rendement de la batterie et aussi La profondeur de décharge.

Dans le Chapitre suivant, nous allons faire La simulation et mettre les résultats.

# **Chapitre III:**

# **Approche de commande Résultats de simulation du système autonome hybride**

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous détaillons l'approche de commande de system autonome hybride basé sur l'algorithme MPPT et aussi le gestionnaire d'énergie pour assurer la continuité de la puissance, et aussi nous présent les résultats des Simulation du système en utilisant des profils d'éclairément différents.

### III.2 Commande de GPV

Afin de maximiser la puissance générée par le GPV, il faut adopter un command basé sur les techniques MPP comme illustre dans la figure.

Dans cette étude nos proposant une commande basée sur l'algorithme Perturbe et observe du cote GPV la (Figure III.1).

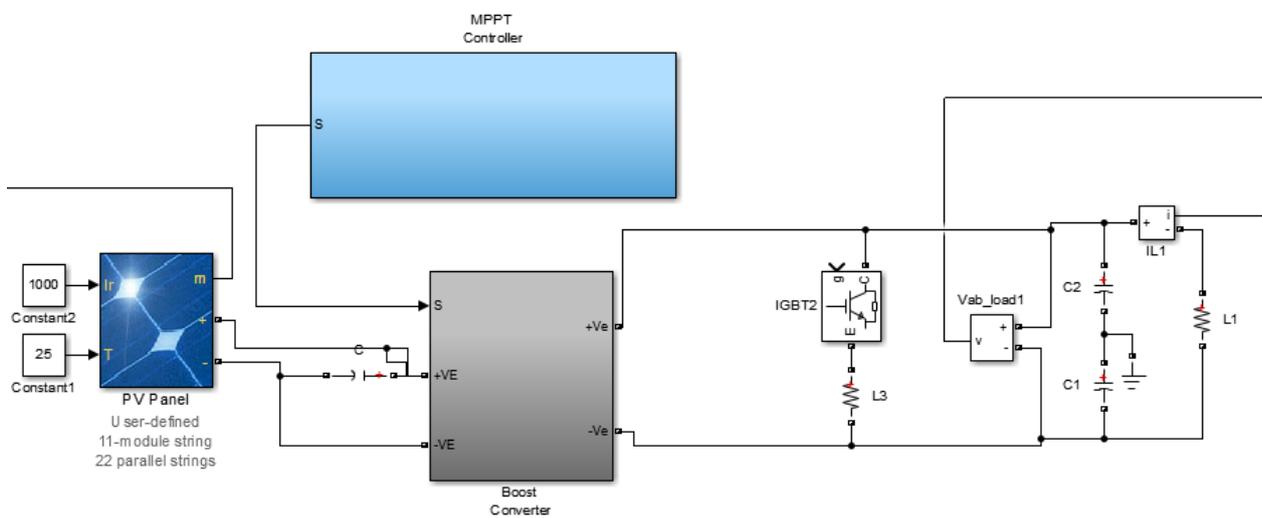


Figure III.1 Modèle Simulink de contrôleur MPPT basé sur l'algorithme Perturbe and Observe

### III.3 Commande MPPT (Perturbe et observe)

Maximum Power Point Tracker (MPPT) est un dispositif de contrôle utilisé pour suivre le MPP en constante évolution.

Ce dispositif de contrôle ou contrôleur se compose de deux parties principales, un microcontrôleur pour suivre le MPP et un convertisseur pour convertir la tension générée à un niveau souhaité pour la charge. Et pour suivre le MPP, il existe de nombreux algorithmes la plus utilisé est algorithme perturbe et observer (P et O) .La (Figure III.2) présenté le modèle Simulink de P et O.

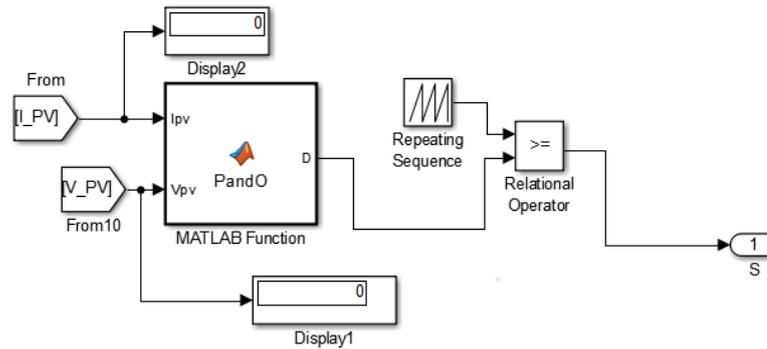


Figure III.2 model Simulink de P et O

Cette méthode consiste à perturber l'un des paramètres d'entrées du convertisseur statique (généralement la tension  $V_{pv}$ ), et d'observer l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du système.

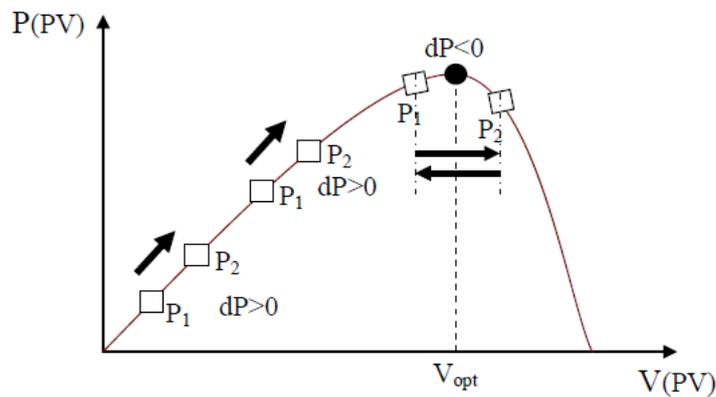


Figure III.3 Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.

La (Figure III.3) présenté la variation de la puissance en fonction de la tension on remarque que la courbe P-V du  $G_{pv}$  montre un seul point de puissance maximal, L'objectif de l'algorithme est fonctionné constamment au ce point.

Pour expliquer le principe de cette commande extrémale, partant d'une commande avec un rapport cyclique petit, et à chaque cycle, en ajustant  $\alpha$  régulièrement,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurée afin de calculer  $P(K)$ , la valeur obtenue est comparée avec la valeur  $P(K-1)$  calculée au cycle précédent, selon cette comparaison,  $V_{pv}$  est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit dans une direction opposée. De cette manière, la puissance va alors augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer ; dès détection d'une diminution de la puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé... Finalement, le système se place en oscillation autour du maximum. Comme est illustre par l'organigramme (Figure III.4) suivant:

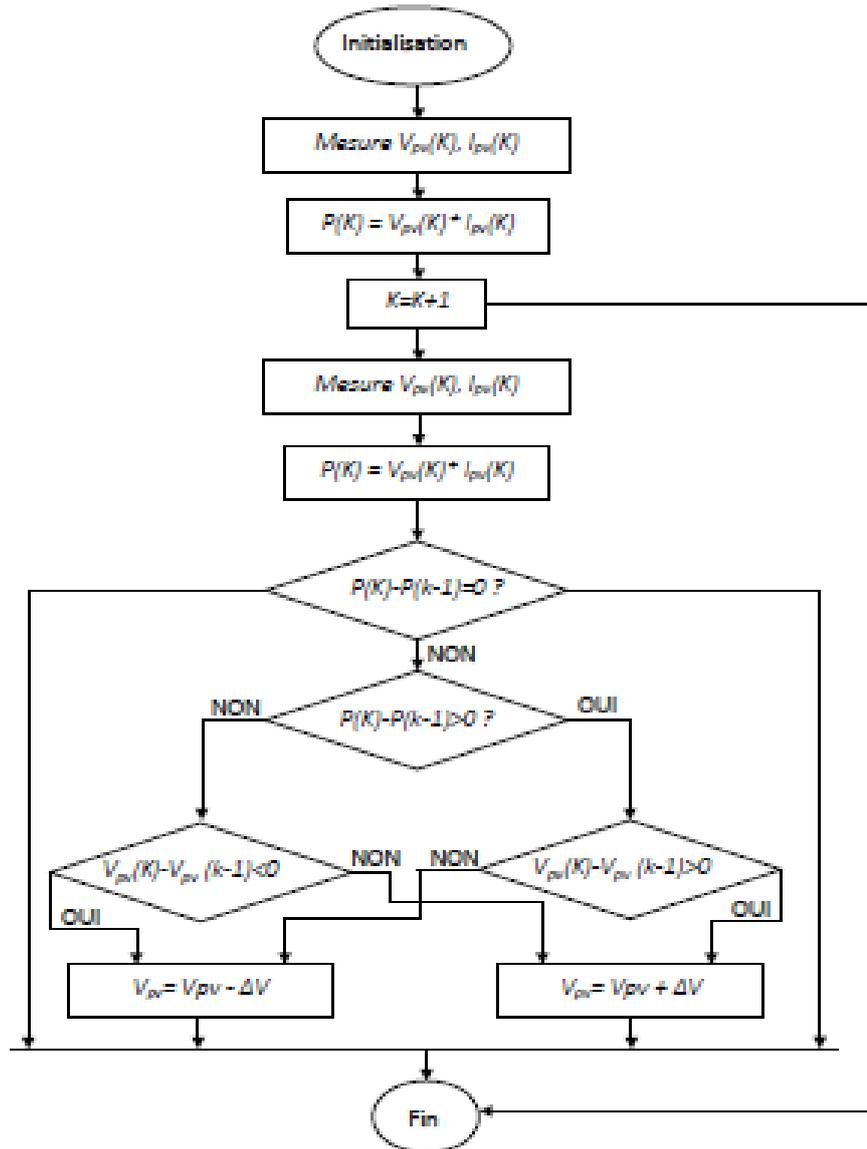


Figure III.4 Organigramme de la méthode P&O.

Cette oscillation permet au système de pilotage de vérifier que le maximum ne s'est pas déplacé et dans le cas échéant de le suivre mais elle entraîne une perte de rendement qui augmente avec le pas d'incrémention de la perturbation, le point de fonctionnement moyen étant en dessous du maximum. Si ce pas d'incrémention est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. Le rendement de cette technique est d'environ 85%.

### III.4 Gestionnaire d'énergie du système autonome hybride

Le system hybride étude utilisé deux sources d'énergies un générateur photovoltaïque et des batteries.

Le générateur photovoltaïque est une source principale commandé par MPPT pour fournir la puissance maximale fournie par le rayonnement solaire.

Quant aux batteries, elles jouent deux rôles :

- Le premier rôle est de stocker l'énergie excédentaire émise par le panneau solaire du système
- Le deuxième rôle, il est de donner l'énergie stockée au système dans le cas où le système a besoin de plus d'énergie que l'énergie émise par le panneau solaire

La gestionner d'énergie proposé est présenté par la (Figure III.5) est basé sur 4 modes :

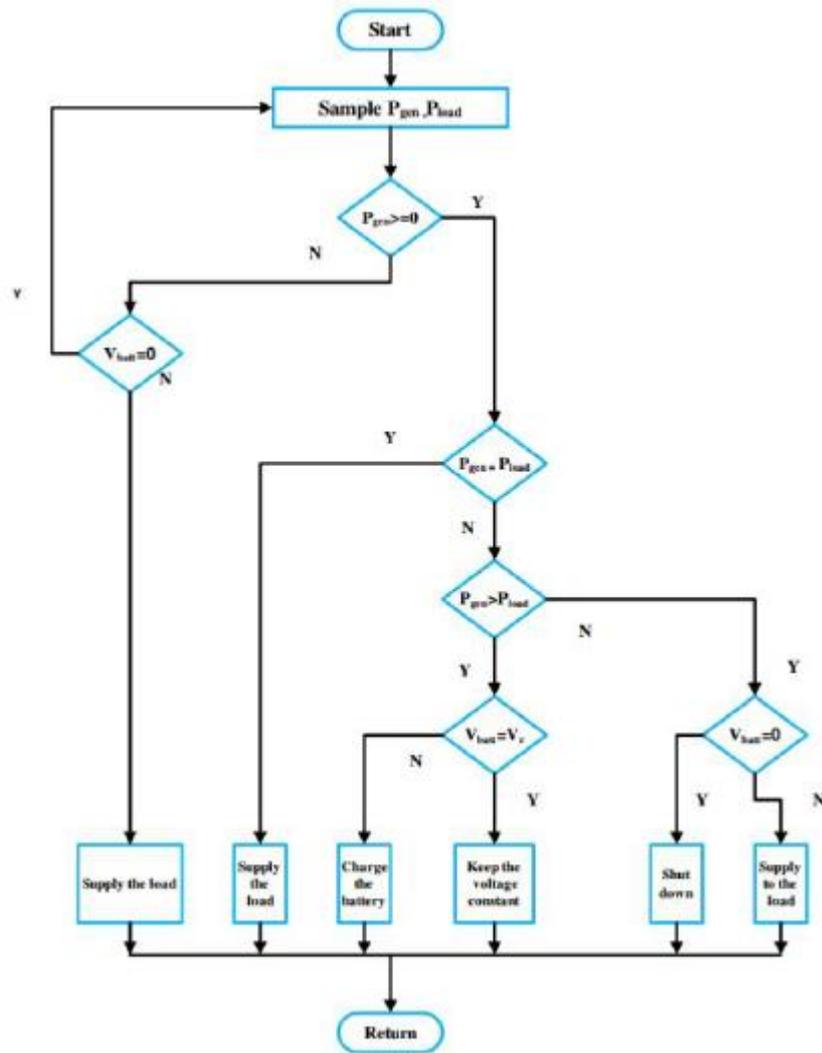


Figure III.5 Organigramme des différents modes de fonctionnement du système photovoltaïque avec stockage sur batterie.

#### III.4.1) Mode 1 :

Le premier mode de fonctionnement est déclenché lorsque la puissance générée par le système PV est inférieure à la puissance demandée par la charge qui peut être une simple charge résistive ou une charge ou un réseau triphasé (c'est-à-dire  $PPV < P_{charge}$ ) et que le système de batterie est également profondément déchargé, alors tout le système est arrêté.

#### III.4.2) Mode 2 :

Le deuxième mode de fonctionnement est activé lorsque  $PPV < P_{load}$  mais la batterie est chargée et peut également fournir de l'énergie. À ce point de fonctionnement, la batterie fournit une alimentation de secours avec l'alimentation PV tant que la batterie n'est pas complètement déchargée. Les panneaux PV alimentent la charge autant que possible avec l'algorithme MPPT activé.

Tandis que la batterie fournit une puissance complémentaire en fonctionnant en mode boost de fonctionnement du convertisseur buck/boost bidirectionnel.

#### III.4.3) Mode 3 :

Lorsque  $PPV > P_{load}$  et que la batterie n'est pas complètement chargée, ce mode est activé. Au cours de ce mode de fonctionnement, les panneaux PV alimentent non seulement la charge sous le contrôle activé du point de puissance maximale, mais également l'énergie excédentaire produite par les panneaux PV est utilisée pour charger la batterie. Pendant ce mode, la batterie est chargée via le mode de fonctionnement buck du convertisseur buck/ boost bidirectionnel.

#### III.4.4) Mode 4 :

Dans ce mode de fonctionnement  $PPV > P_{load}$  et la batterie est également complètement chargée. Pendant ce mode, les panneaux PV alimentent la charge sous contrôle activé par le point de puissance maximale et il est également garanti que les batteries restent à l'état complètement chargé grâce à une charge à tension constante afin que la batterie n'ait aucune sorte d'autodécharge. Ces modes de fonctionnement ont été illustrés à l'aide de l'organigramme de la (Figure III.4)

### III.5 Commande du convertisseur réversible

Le command de convertisseur réversible associe aux la batterie est base sur le régulateur de la tension de bus continu comme indique dans la (Figure III.6).

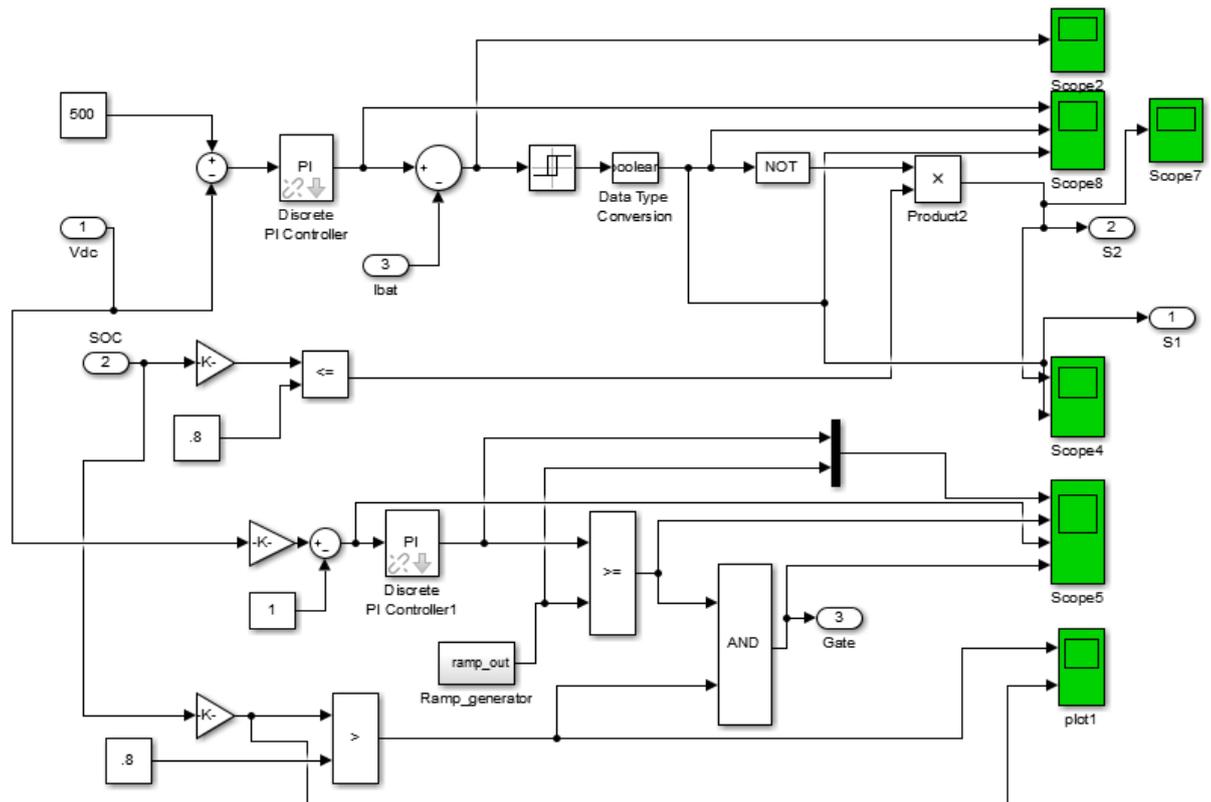


Figure III.6 Schéma Simulink d'un command convertisseur réversible

### III.6 Résultat et Simulation:

Le modèle photovoltaïque utilisé dans cette étude consiste en (33) panneaux photovoltaïques qui produisent 1.44 KW. Les caractéristiques du modèle du panneau utilisé sont représentées dans le (Tableau III.1) suivant :

Eclairement standard E	1000 W/m <sup>2</sup>
Température standard T	25C°
Puissance maximale P max	59.85W
Tension à P max ou tension optimale Vopt	17.1V
Courant à P max ou courant optimale Iopt	3.5A
Courant de court- circuit ICC	3.8A
Tension à circuit ouvert Voc	21.1V
Nombre des modules en séries	11
Nombre des modules en parallèle	22

Tableau III.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans les Condition

La (Figure III.7) ci-après montre la caractéristique (I-V) de notre GPV le point optimal représente la courbe correspondre aux valeurs  $I_{op}=76.53V$  et  $V_{op}=190.9V$ . (Figure III.8) représente la caractéristique (P-V) de GPV

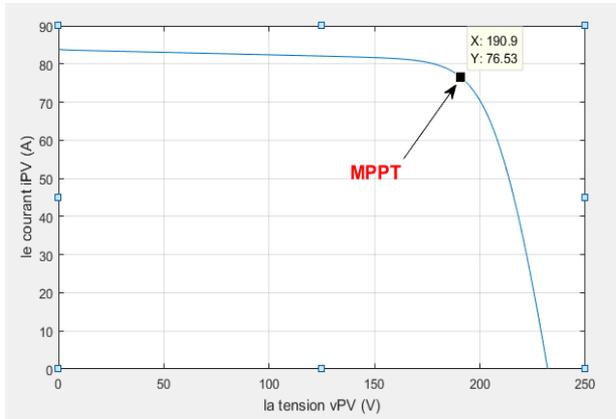


Figure III.7 Présente le point de puissance maximal

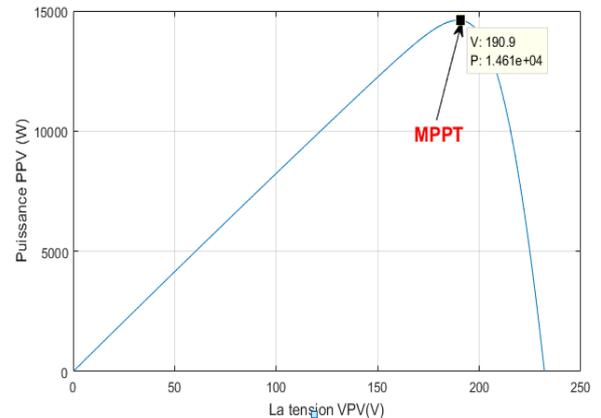


Figure III.8 Présente le point de puissance maximal

### III.6.1) Résultat pour un éclairement constant et une charge constante :

Dans ce cas, nous simulons le système pour un éclairement standard d'une valeur de  $1000 \text{ W/m}^2$  comme indique dans la Figure III.9,  $R= 10\Omega$ .

#### Profil d'éclairement

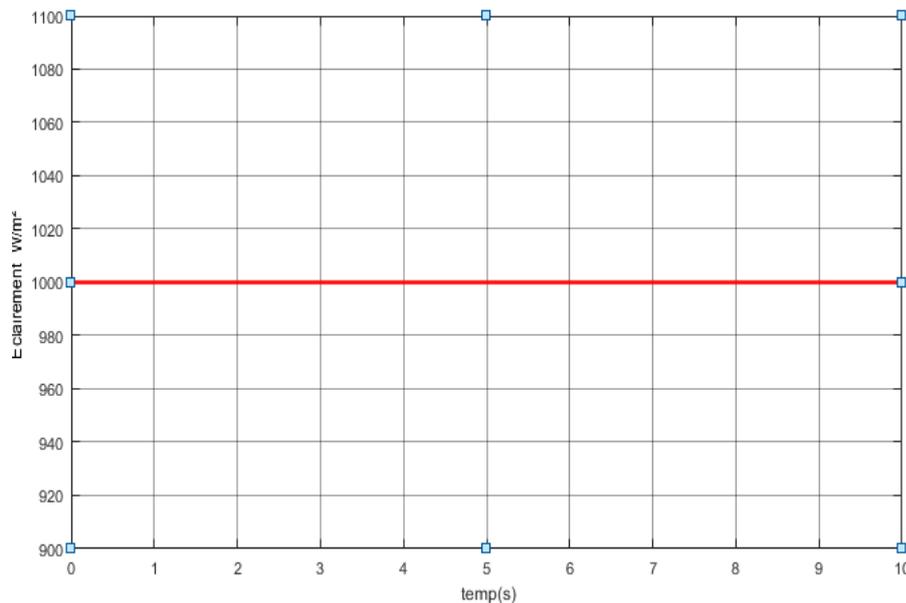


Figure III.9 éclairements Constant  $1000 \text{ W/m}^2$

### A) Résultat de Simulation de GPV :

La (Figure III.10) représente l'allure de la puissance à la sortie de GPV. Après le régime transitoire la puissance se stabilisé à la valeur de  $1.734 \text{ KW}$  qui correspond à la puissance

optimale du GPV On note également l'absence de toutes les perturbations, et c'est ce qui donne l'efficacité au système

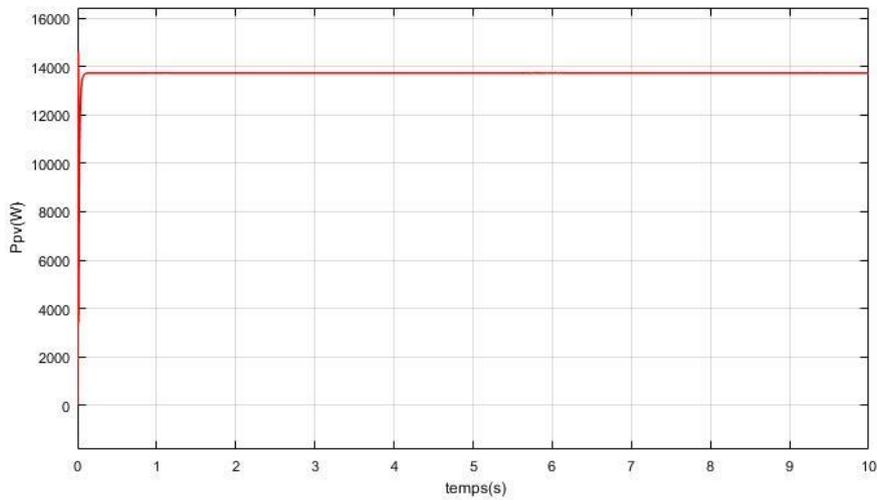


Figure III.10 la puissance à la sortie de GPV pour un éclairement et charge constant

La (Figure III.11) représente la valeur de tension à la sortie de Gpv en fonction du temps. On peut voir que la valeur de tension après la phase transitoire se stabilise à la valeur de 200V.

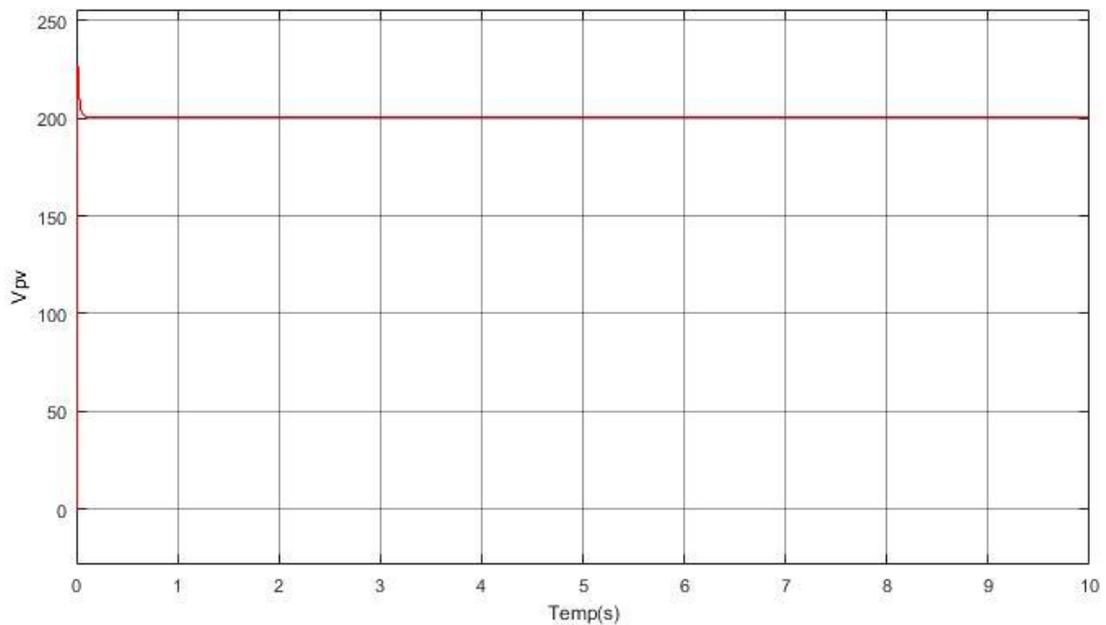


Figure III.11 l'allure de la tension mesurée de  $V_{pv}$ .

On peut voir sur la (Figure III.12) que l'allure de la courant de Gpv est proche de la valeur 68A après le régime transitoire.

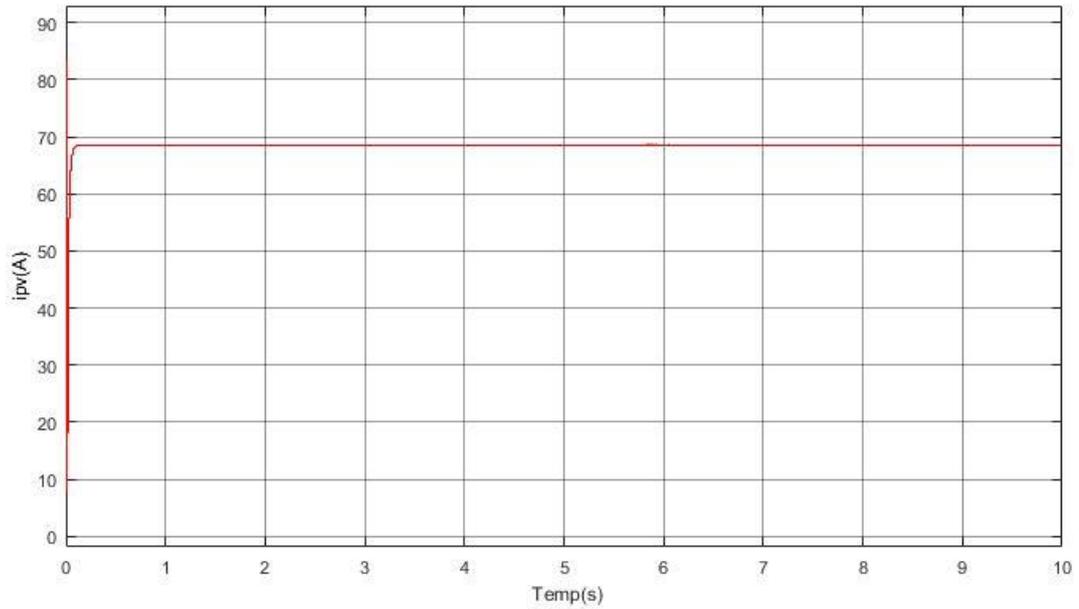


Figure III.12 l'allure de la courant de la Gpv.

**B) Résultat de Simulation de la Charge :**

La (Figure III.13) montre l'allure de la puissance de la charge. On remarque que la charge consommé 2.5kW,

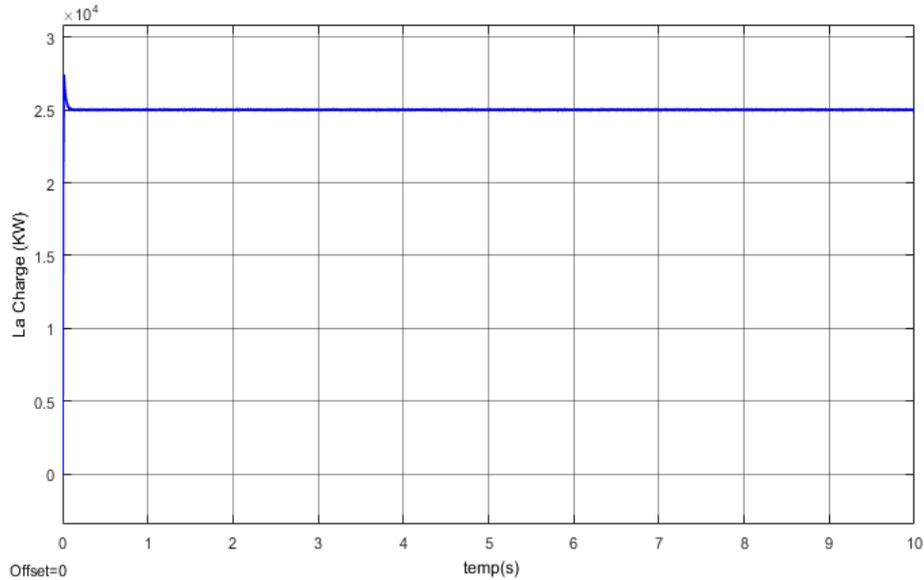
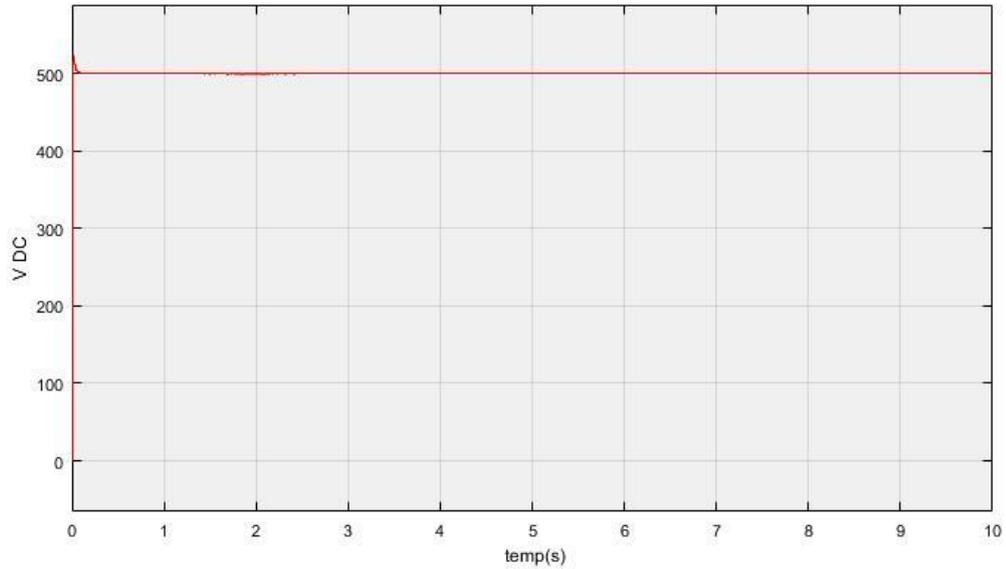


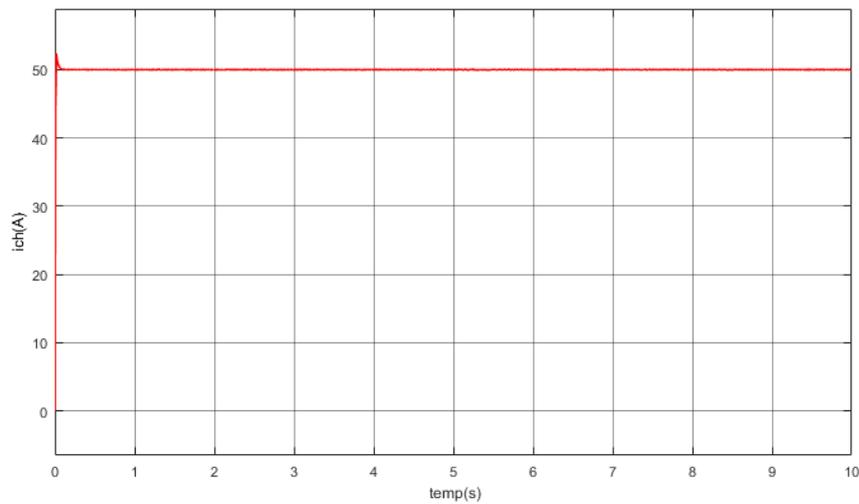
Figure III.13 l'allure de la puissance de la charge

La (Figure III.14) montre l'allure de la tension de bus continu. On remarque un bon suivi de la valeur réelle et sa proximité avec la valeur 500V, ce qui est une convergence raisonnable.



*Figure III.14 l'allure de la tension de bus continu*

La (Figure III.15) représente l'allure de la valeur de courant de la charge, Il est remarquable que le courant a une valeur de 50A en fonction du temps.



*Figure III.15 l'allure de la valeur de courant de la charge*

**C) Résultat de Simulation de la Batterie :**

La (Figure III.16) représente l'allure de la valeur de tension de la batterie, nous remarquons que la tension diminue progressivement pour atteindre la valeur de 282V en raison du processus de déchargement de la batterie.

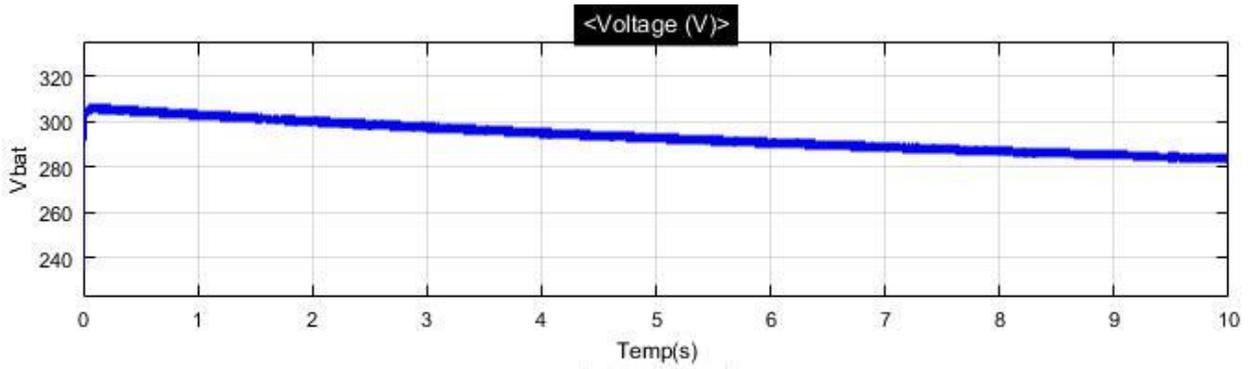


Figure III.16 l'allure de la tension de la batterie

La (Figure III.17) représente l'allure de la valeur de courant de la batterie, Il est remarquable que le courant a une valeur de 39 A en fonction du temps.

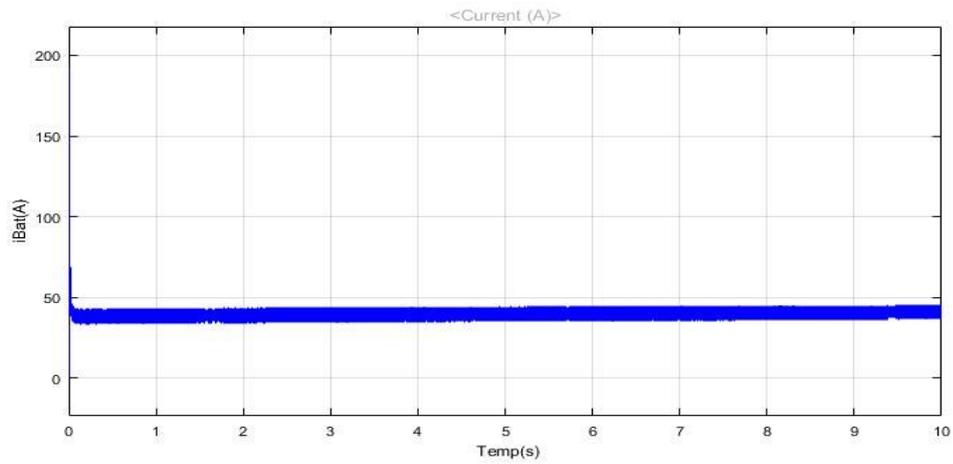


Figure III.17 l'allure de la valeur de courant de la batterie

La (Figure III.18) représente l'allure de l'état de charge de la batterie, Il est remarquable que la batterie est dans un état de décharge vers la charge.

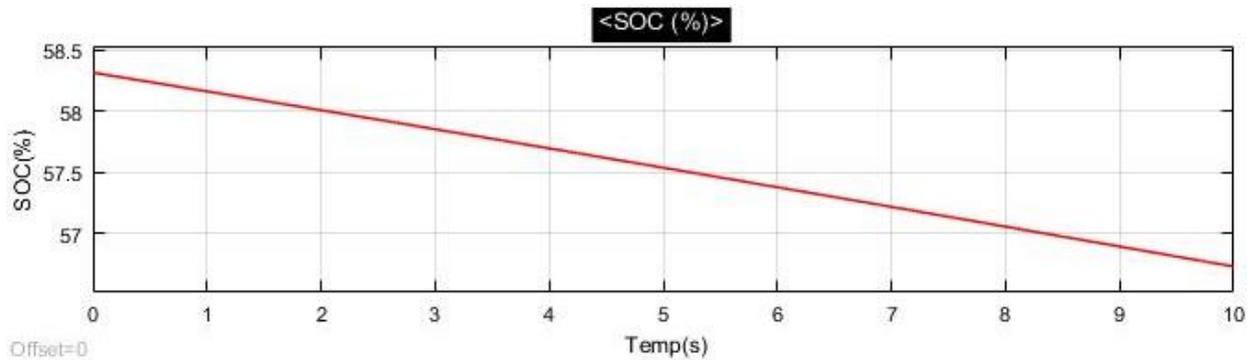
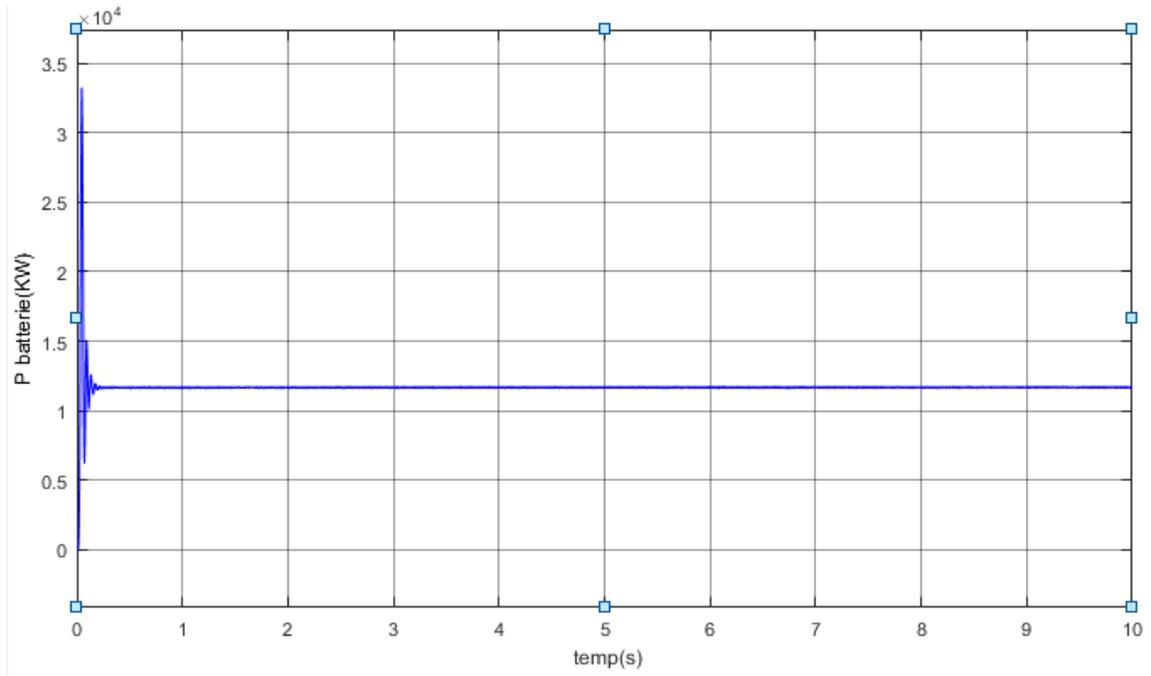


Figure III.18 Etat de charge de la batterie (Mode Décharge)

La (Figure III.19) représente l'allure de la puissance de la batterie , On note que la batterie à l'état déchargé donne 1,172 kW pour répondre aux besoins du la charge.



*Figure III.19 l'allure de la puissance de la batterie (Mode Décharge)*

La (Figure III.20) représente les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie en fonction du temps. On remarque que la puissance de la charge stabilisée à la valeur de 2.51KW et égale la somme de la puissance de GPV et la puissance de batterie

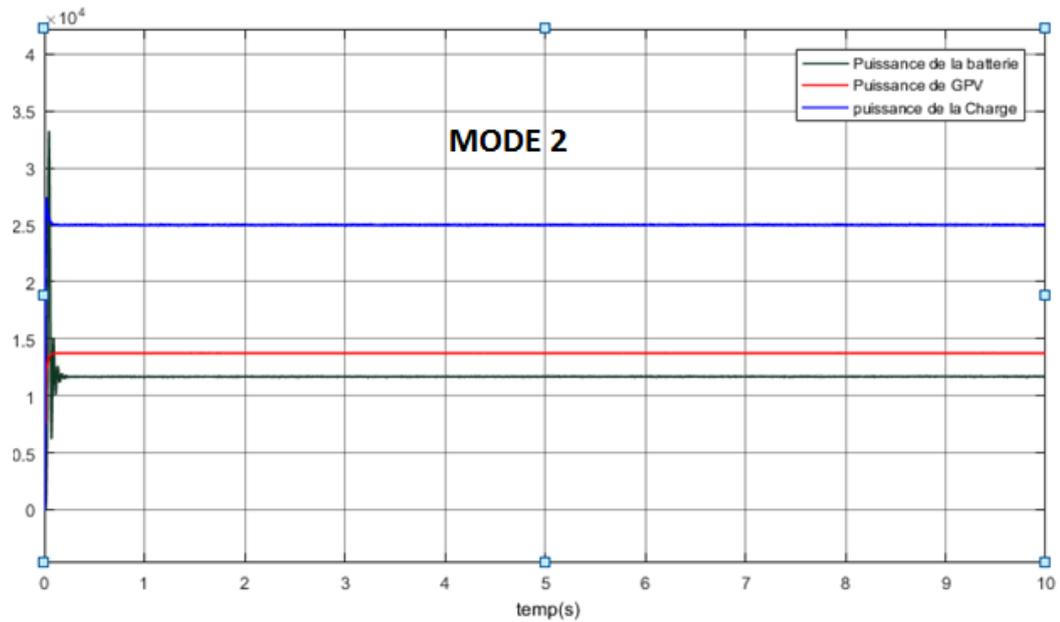


Figure III.20 les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie

**III.6.2) Résultat pour un éclairement variable et une charge Constante :**

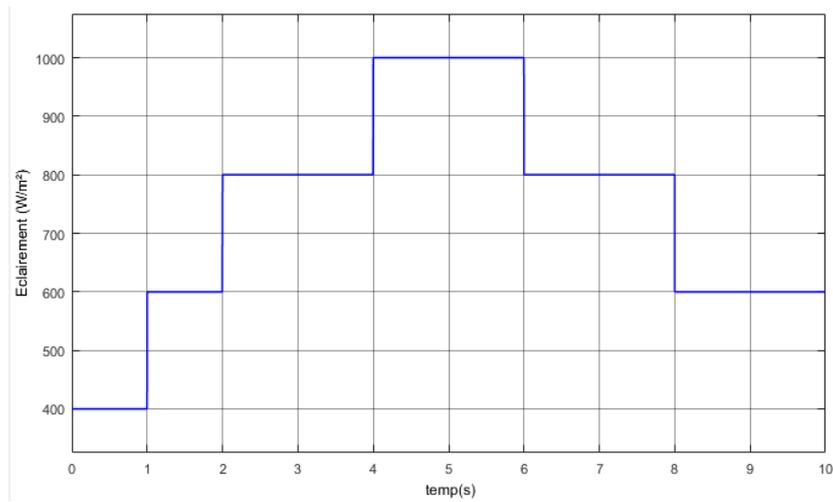
Dans cette partie, nous simulons le système pour un éclairement variable et une charge constante  $R=10\Omega$

Nous varions l'éclairement comme indiqué sur Tableau III.2:

Temps(s)	Eclairement (W/m <sup>2</sup> )
0	400
2	600
4	800
6	1000
8	800
10	600

Tableau III.2 profile d'éclairement

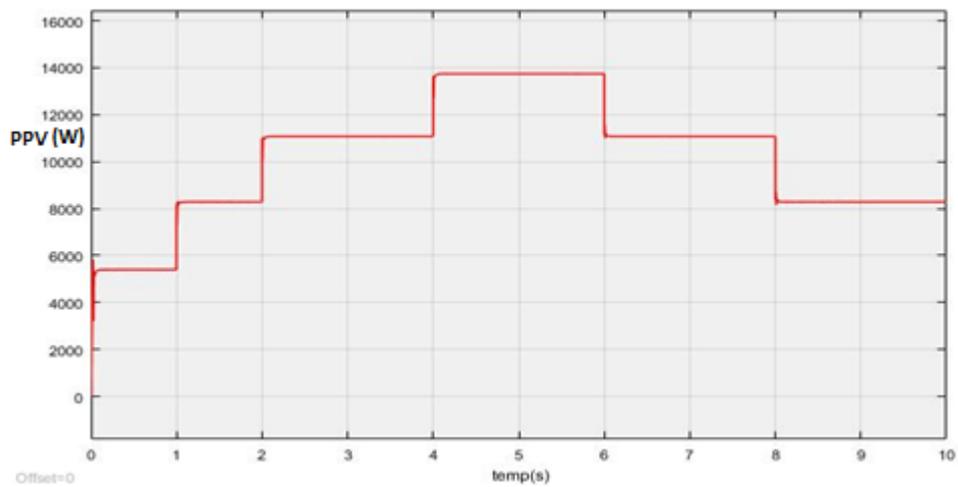
**Profile de Eclairment**



*Figure III.21 Profile d'éclairment*

**A) Résultat de Simulation de la Gpv :**

La (Figure III.22) représente l'allure de la puissance de la GPV , Nous remarquons un changement de puissance lorsque la valeur de l'irradiance changé, On note également que plus le l'irradiance lumineux est élevée, plus la puissance est élevée dans la période du t=1s au t=5s, Ensuite, nous avons remarqué une diminution de la valeur de puissance dans la période du t=5s au t=10s.



*Figure III.22 l'allure de la puissance de la GPV*

On peut voir sur la (**Figure III.23**) que l'allure de la tension de  $G_{pv}$  est constante à la valeur 200A après le régime transitoire. Avec des petites perturbations à cause des variations des paramètres du système.

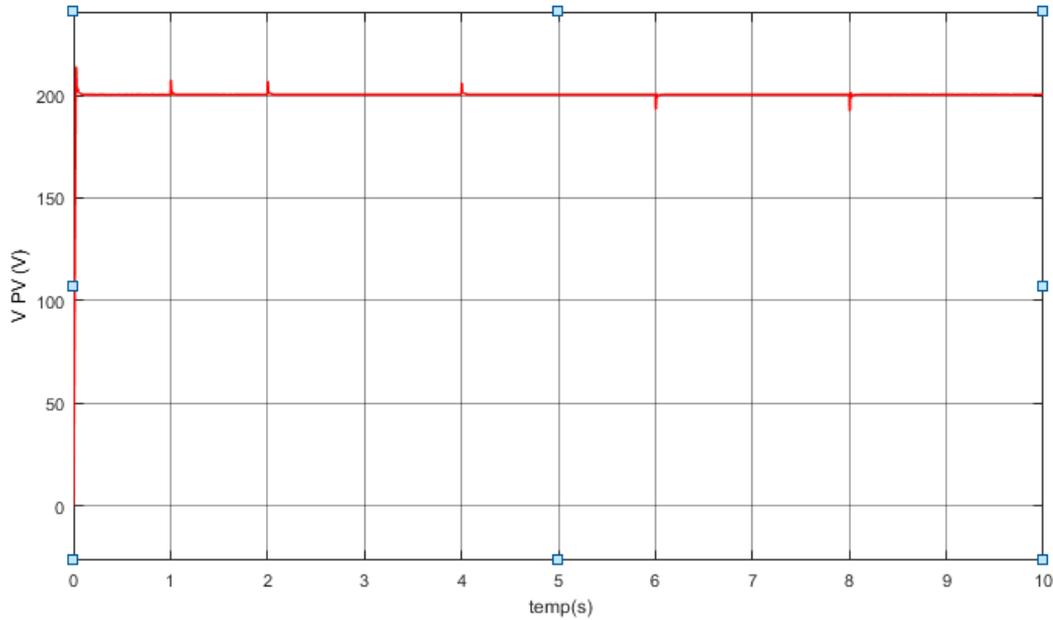


Figure III.23 l'allure de la tension de  $G_{pv}$

La (**Figure III.24**) représente l'allure de courant de la GPV , On constate que la valeur du courant augmente progressivement avec l'augmentation de la valeur du l'irradiance jusqu'à atteindre une valeur maximale 68A en  $t=5s$ , Ensuite, il diminue à la valeur 42A en  $t=8s$

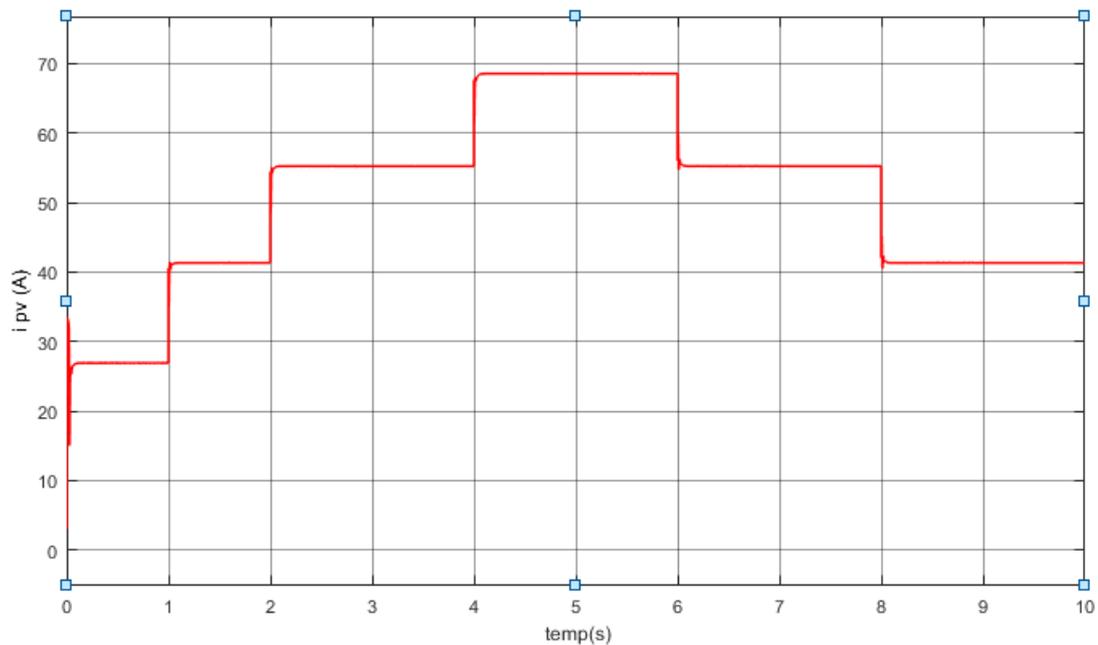
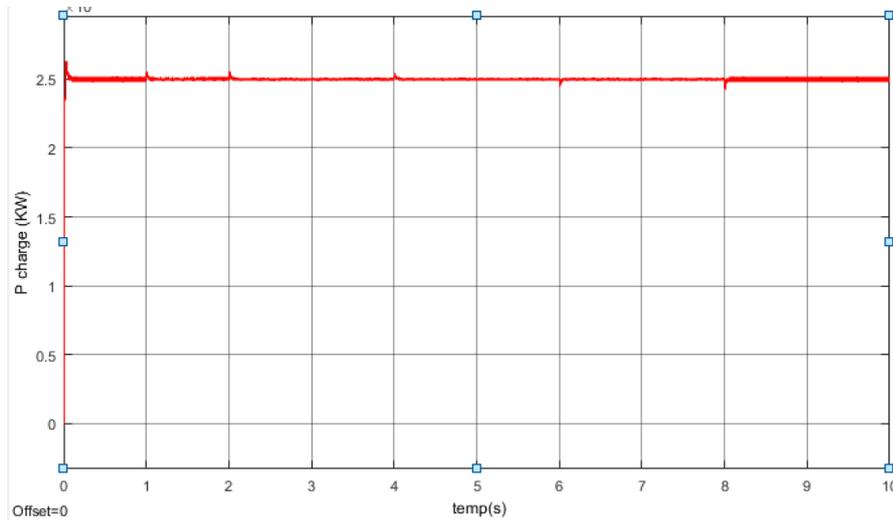


Figure III.24 l'allure de courant de la GPV

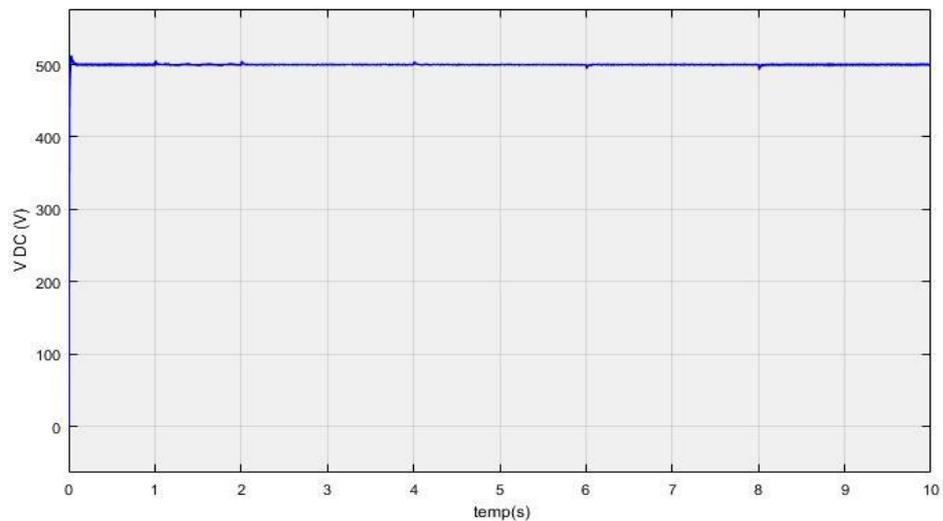
**B) Résultat de Simulation de la charge :**

La (Figure III.25) représente l'allure de la puissance de la charge, Il est remarquable que la puissance a une valeur de 2.5kW A en fonction du temps. Avec quelques perturbations dus au changement de l'irradiance.



*Figure III.25 l'allure de la puissance de la charge*

La (Figure III.26) représente l'allure de la tension de bus continu VDC, Il est remarquable est stable a une valeur de 500V A en fonction du temps. Avec quelques perturbations dus au changement de l'irradiance.



*Figure III.26 l'allure de la tension de bus continu VDC*

La (Figure III.27) représente l'allure de la valeur de courant de la charge, On a observé que le courant a une valeur de 50A en fonction du temps. Avec quelques perturbations dus au changement de l'irradiance.

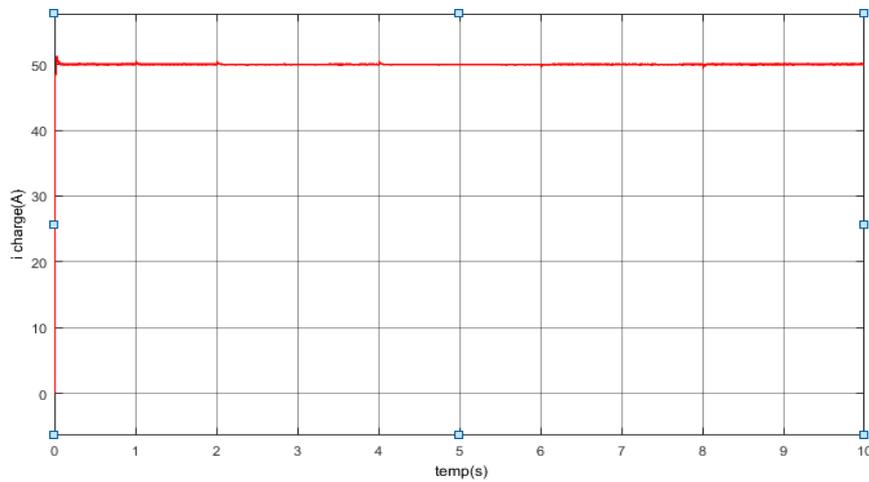


Figure III.27 l'allure de la valeur de courant de la charge

**C) Résultat de Simulation de la batterie :**

Dans la (Figure III.28), on remarque des changements dans puissance donnée par la batterie, on remarque que de la période  $t=0.3s$  à  $t=5s$  il y a une diminution de puissance donnée au la charge due à une augmentation de la valeur de puissance donnée par le GPV. Et on note aussi dans entre  $t=5s$  et  $t=10s$  une augmentation de la valeur de puissance donnée due à une diminution de la valeur de puissance donnée par le GPV.

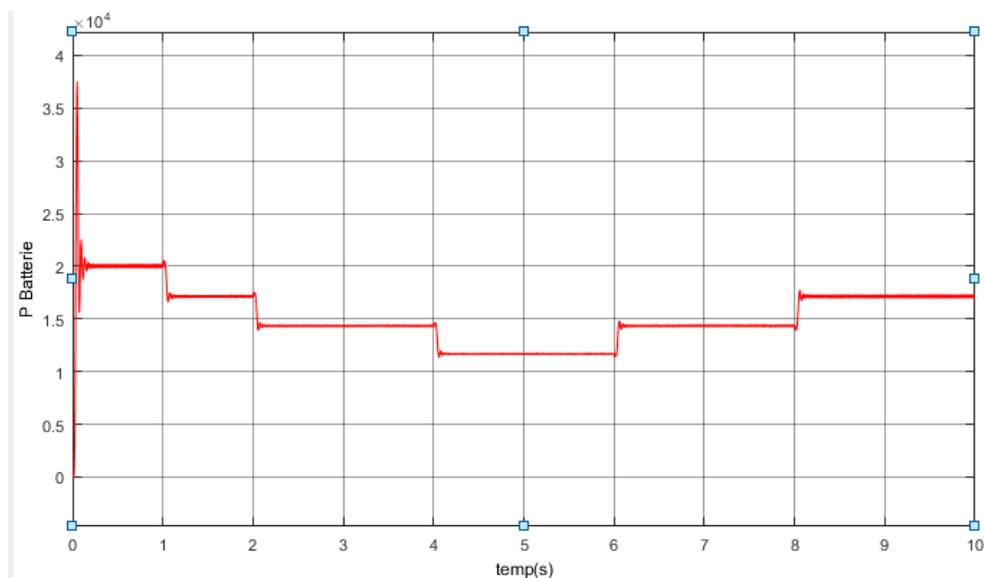


Figure III.28 Puissance donnée par la batterie

La (Figure III.29) représente l'allure de la valeur de tension de la batterie, On a observé que la valeur de la tension décroît jusqu'à la valeur 262V t=10s en fonction du temps. Avec quelques perturbations dus au changement de l'irradiance.

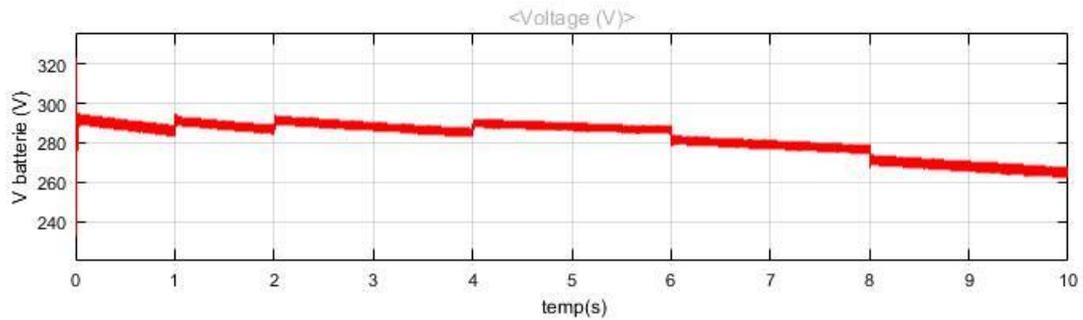


Figure III.29 l'allure de la valeur de tension de la batterie

La (Figure III.30) représente l'allure de la valeur de courant de la batterie, On a observé que la valeur de la tension décroît jusqu'à la valeur 38A au t=5s en fonction du temps. En suit Il augmente alors jusqu'à la valeur 64A t=10s Avec quelques perturbations dus au changement de l'irradiance.

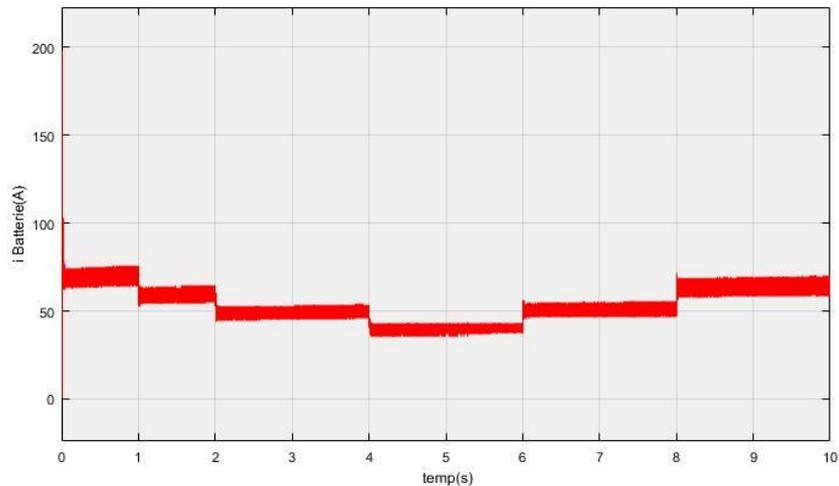


Figure III.30 l'allure de la valeur de courant de la batterie

La (Figure III.31) représente les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donner par la batterie en fonction du temps. On remarque que la puissance de la charge stabilisée à la valeur de 2.51KW et égale la somme de la puissance de GPV et la puissance de batterie.

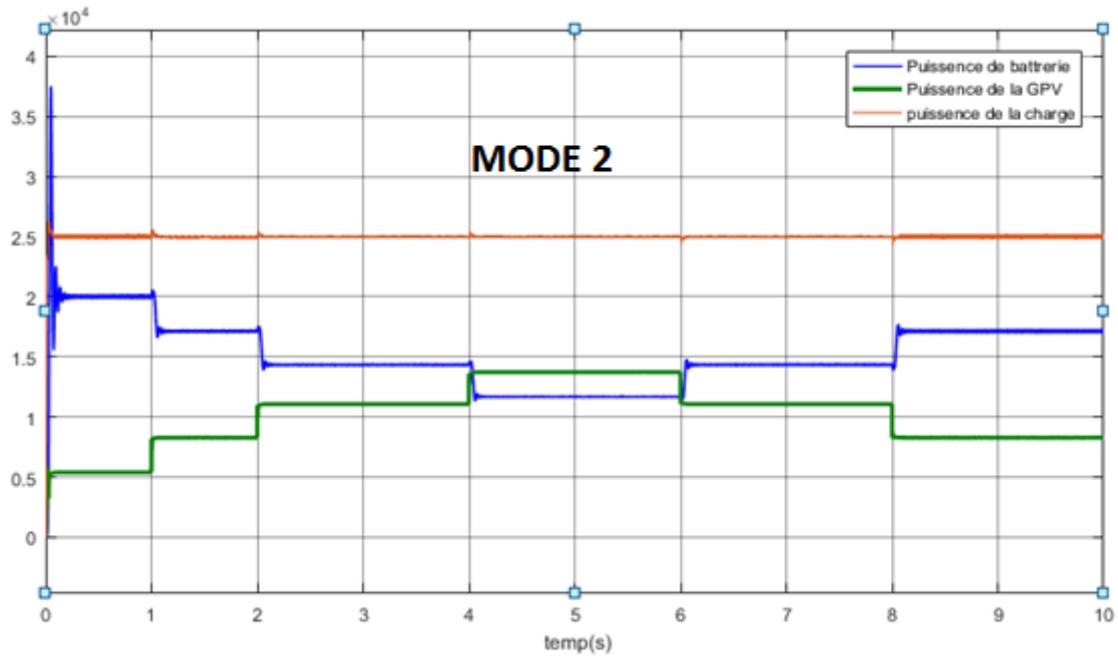


Figure III.31 les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie

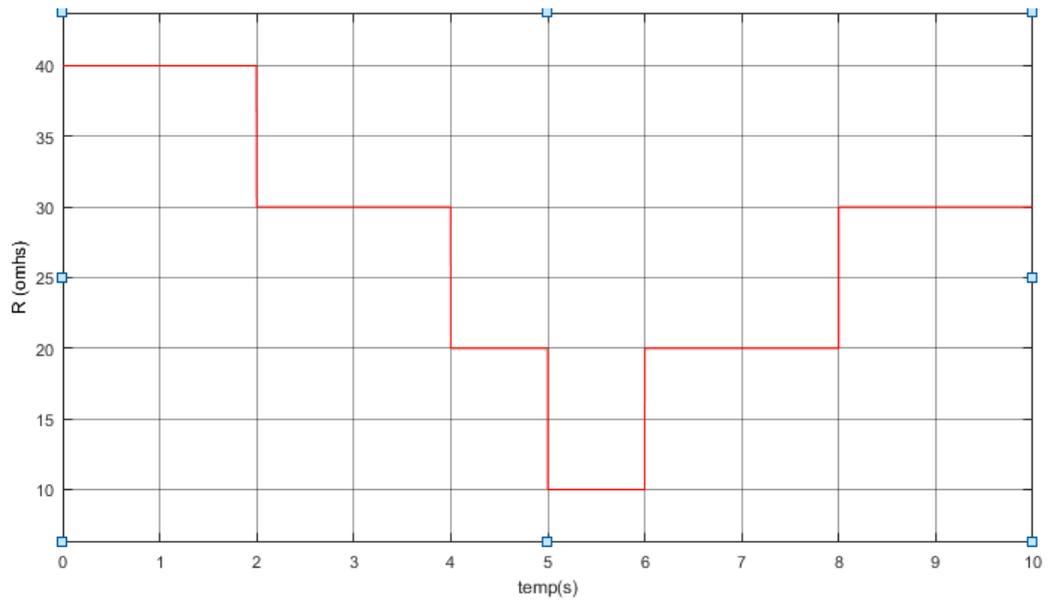
### III.6.3) Résultat pour un éclairement Constant et une charge variable :

Dans cette partie, nous simulons le système pour un éclairement constant et une charge variable. Comme indiqué sur la (figures III-32) et (Tableau III.), Le profil de d'éclairement est constant de la valeur 1000W/m<sup>2</sup>.

Temps(s)	R( $\Omega$ )
0	40
1	40
2	30
4	20
5	10
6	20
8	30
10	40

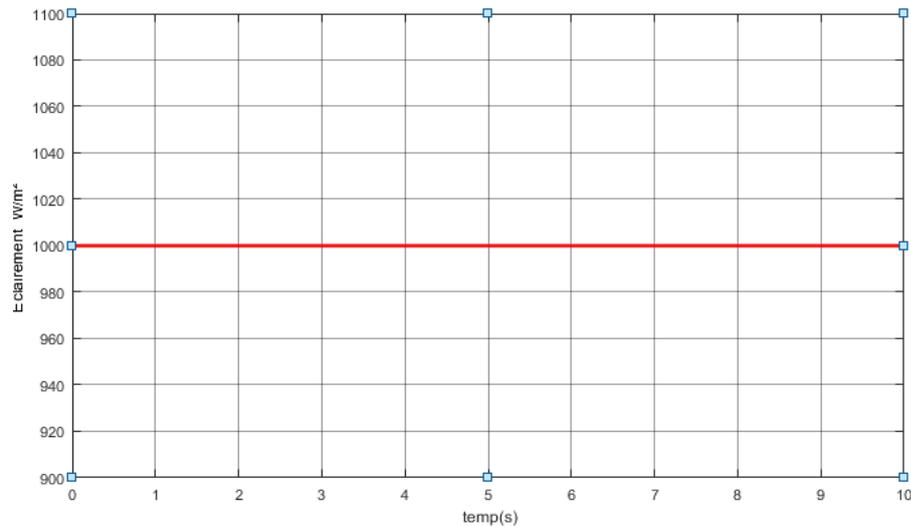
Tableau III.3 profile de R( $\Omega$ )

**Profile de charge :**



*Figure III.32 Profile de charge*

**Profile D'éclairement :**



*Figure 3.33 profile d'éclairement*

**A) Résultat de Simulation de la GPV :**

La (Figure III.34) représente l'allure de la puissance à la sortie de GPV. Après le régime transitoire la puissance se stabilisé à la valeur de 1.734KW qui correspond à la puissance optimale du GPV On note également quelques perturbations dus au changement de valeur de la charge.

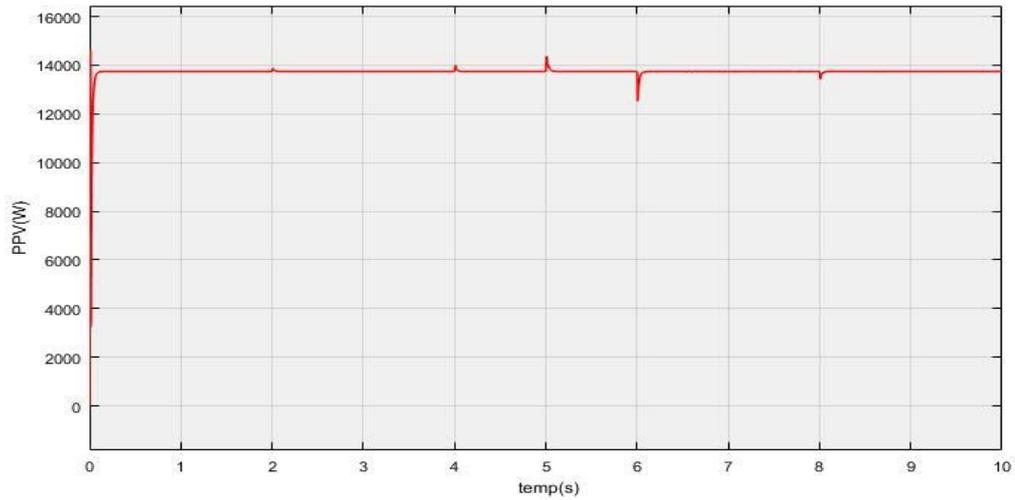


Figure III.34 l'allure de la puissance à la sortie de GPV

La (Figure III.35) représente la valeur de tension à la sortie de Gpv en fonction du temps. On peut voir que la valeur de tension après la phase transitoire se stabilise à la valeur de 200V.

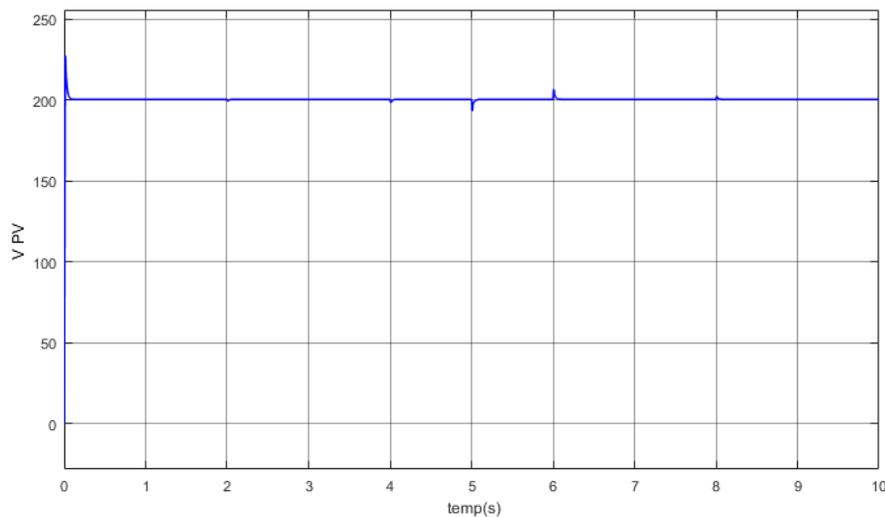


Figure III.35 allure de la tension à la sortie de GPV

On peut voir sur la (Figure III.36) que l'allure de la courant de Gpv est approché à la valeur 68A et constant là après le régime transitoire avec quelques perturbations.

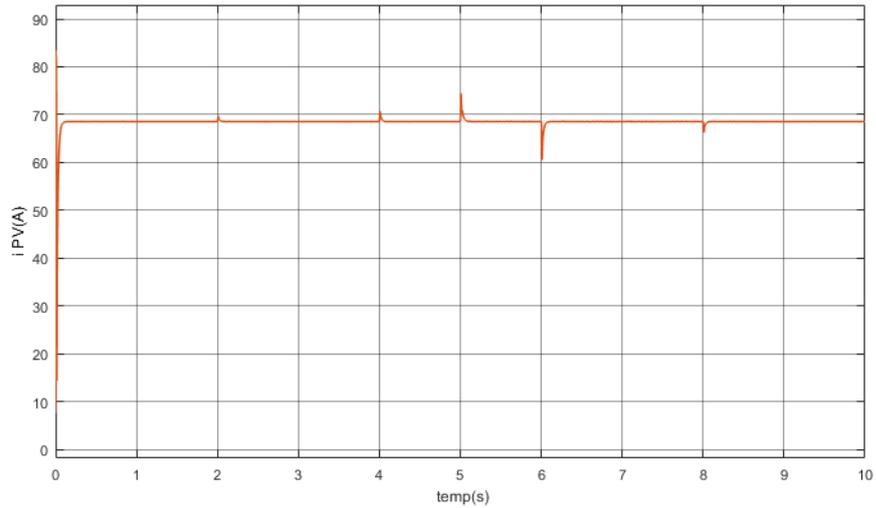


Figure III.36 l'allure de la courant de  $G_{pv}$

**B) Résultat de Simulation de la Charge :**

La (Figure III.37) représente la valeur de tension de bus continue en fonction du temps. On peut voir que la valeur de tension après la phase transitoire se stabilise à la valeur de 500v.

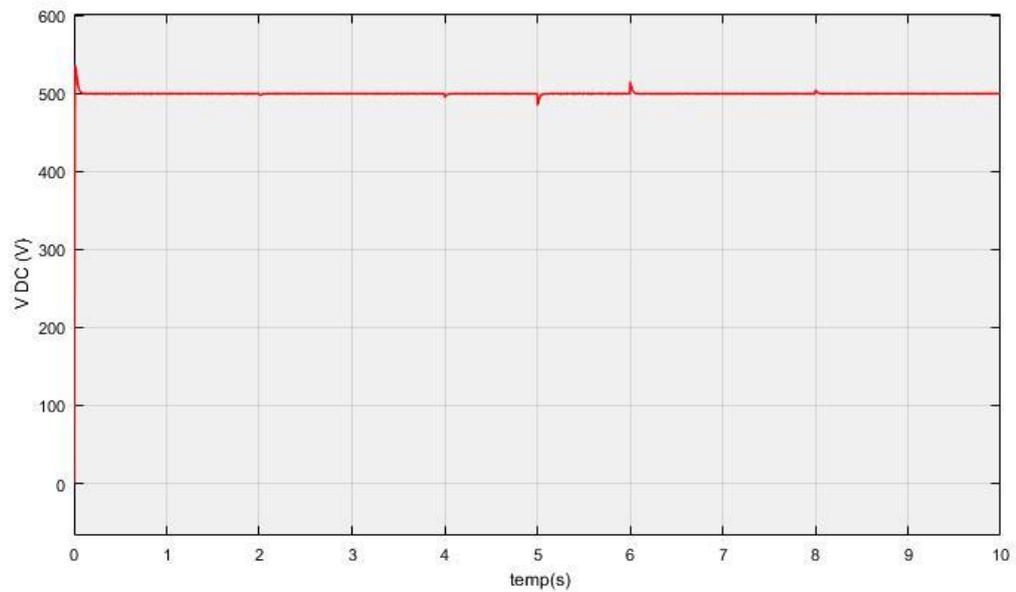


Figure III.37 l'allure de VDC

La (Figure III.38) représente la valeur de courant de la charge en fonction du temps. On remarque que la courbe de courant est variable, partant de la valeur la plus basse de 13A  $t=1$ s à la valeur maximale de 50A  $t=6$ s puis redescendant vers des valeurs inférieures.

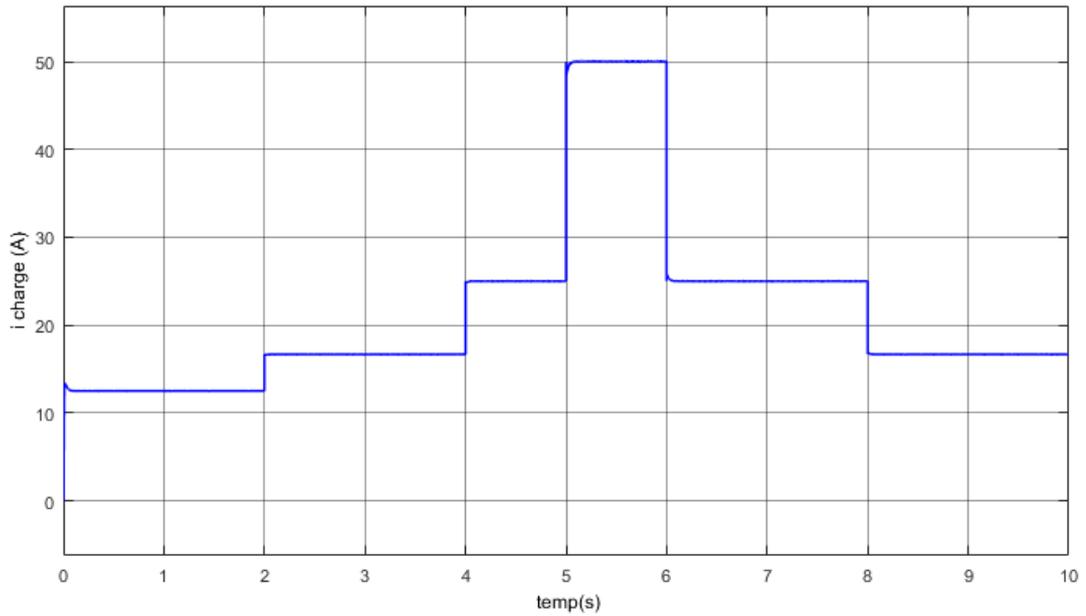


Figure III.38 l'allure de courant de la charge

**C) Résultat de Simulation de la Batterie :**

La (Figure III.39) représente la valeur de la puissance de la charge en fonction du temps. On remarque du  $t=0s$  à  $t=5s$  que la courbe de la batterie est inférieure à 0, ce qui signifie que la batterie est en état de recevoir de l'énergie.

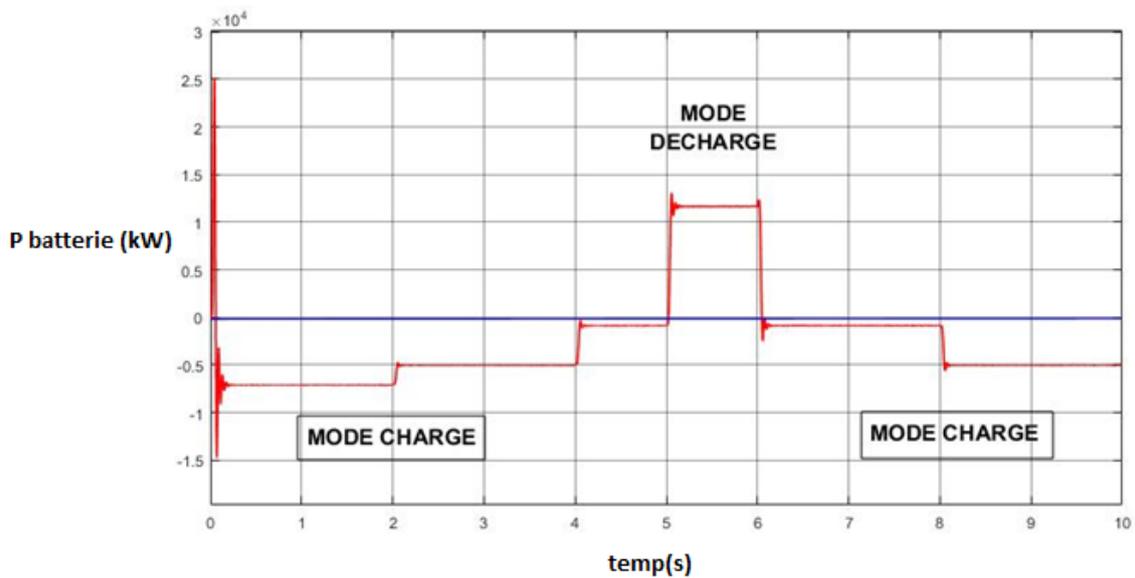


Figure III.39 l'allure de la puissance de la charge

La (Figure III.40) représente la valeur de la tension de batterie en fonction du temps. Nous remarquons que la tension augmente progressivement jusqu'à la valeur de 380V dans la

période comprise entre  $t=0s$  et  $t=5s$  puis diminue jusqu'à la valeur de 310V volts pendant la période de décharge  $t=5s - t=6s$ . Ensuite, il s'intensifie progressivement entre la période et la période de charge  $t=6s - t=10s$

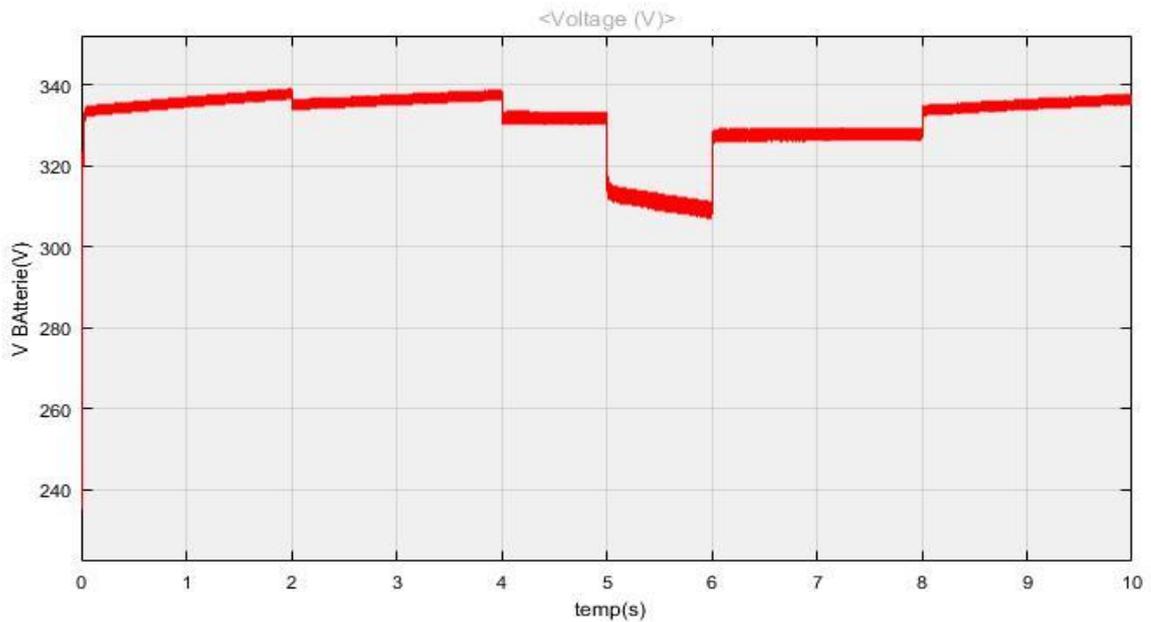


Figure III.40 l'allure de la tension de batterie

La (Figure III.41) représente la valeur de la courant de la batterie en fonction du temps, Nous notons que la courbe de courant dans la période de charge prend des valeurs négatives, ce qui signifie que la batterie est dans un état de réception d'énergie dans la période comprise entre  $t=0s$  et  $t=5s$  Pendant la période de  $t=5s$  à  $t=6s$ , elle monte jusqu'à une valeur maximale de 48A. Dans la période comprise entre  $t=6s$  et  $t=10s$ , il diminue jusqu'à des valeurs négatives pendant la période de charge

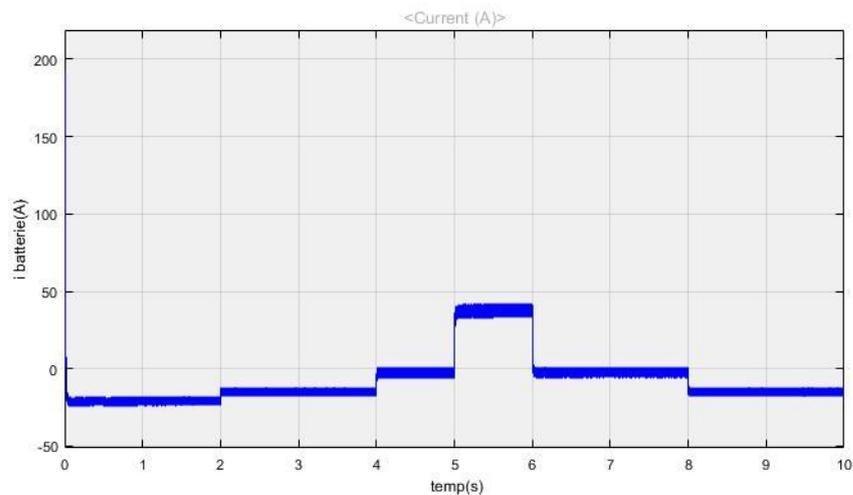


Figure III.41 l'allure de la courant de la batterie

La (Figure III.42) représente l'état de charge de la batterie en fonction du temps, Nous remarquons sur ce graphique que la batterie dans la première période entre  $t=0s$  à  $t=5s$  se charge d'une valeur de 58,4% à environ 58.62%.

Dans la deuxième période, on constate que la batterie se décharge entre la période  $t=5s$  à  $t=6s$  de la valeur 58.62% à 58.47%. Dans la troisième période, on constate que la batterie se ré-charge.

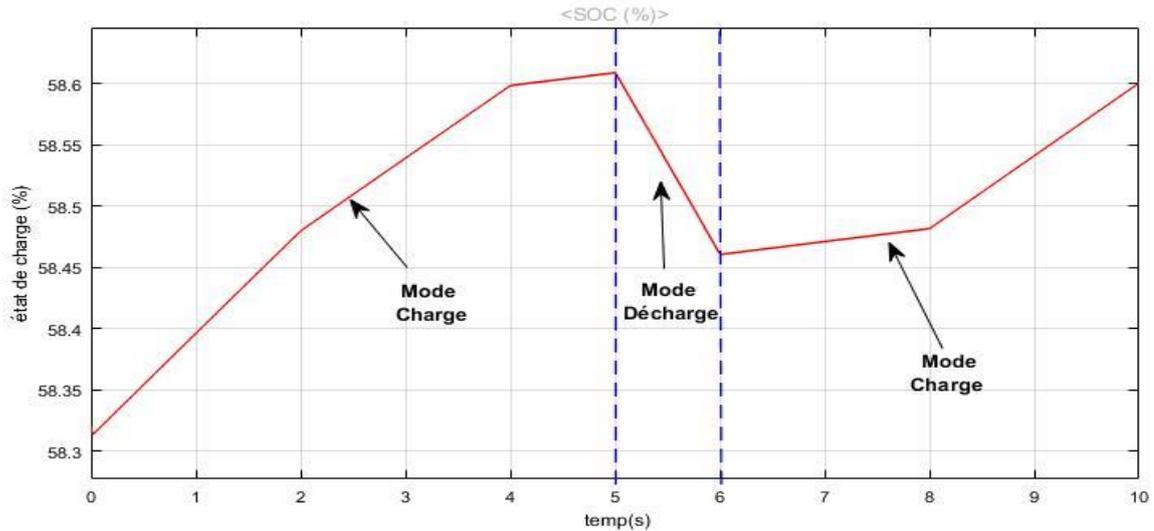


Figure III.42 l'état de charge de la batterie

La (Figure III.43) représente les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie en fonction du temps.

Dans la première période  $t=0s$  à  $t=5s$ , on remarque que la GPV fournit plus puissance que la demande de la charge, ce qui explique la courbe de batterie qui prend une valeur négatif MODE 3. Dans la deuxième période  $t=5s$  à  $t=6s$ , on remarque que la charge consomme plus puissance que l'énergie fournie par le GPV, alors que la batterie est en état de décharge MODE 2. Dans la troisième période on constate le MODE 3.

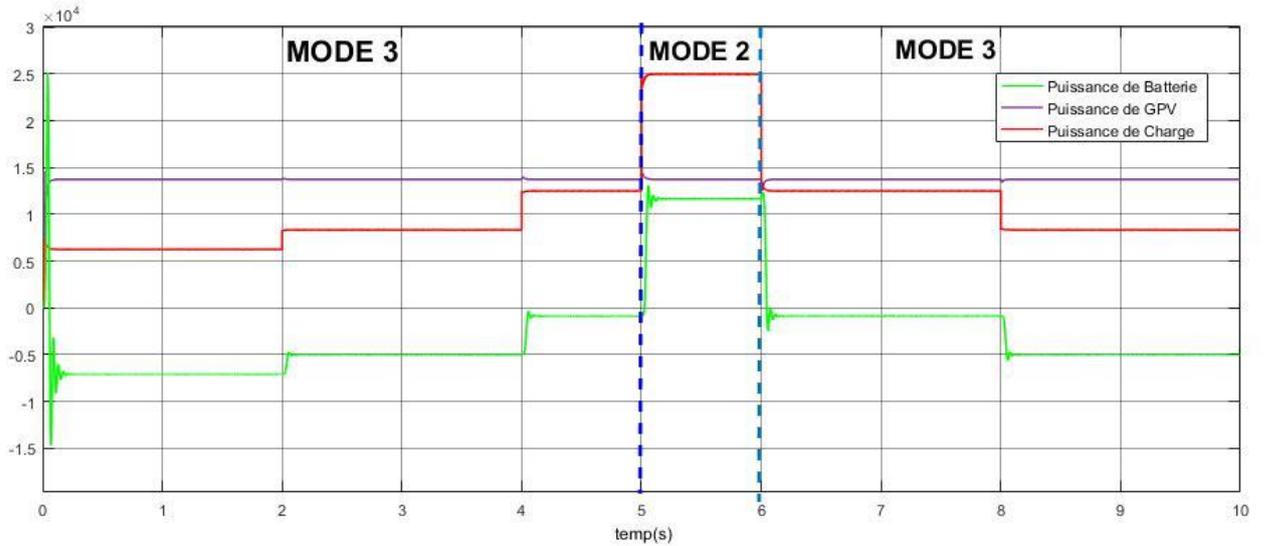


Figure III.43 les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée en fonction du temps.

#### III.6.4) Résultat pour un éclairement variable et une charge variable :

Dans cette partie, nous simulons le système pour un éclairement variable et une charge variable. Comme indiqué sur les figures III-44 et III-45.

##### Profil de L'éclairement :

Temps(s)	Eclairement (W/m <sup>2</sup> )
0	400
2	600
4	800
6	1000
8	800
10	600

Tableau III-4 Profil d'éclairement

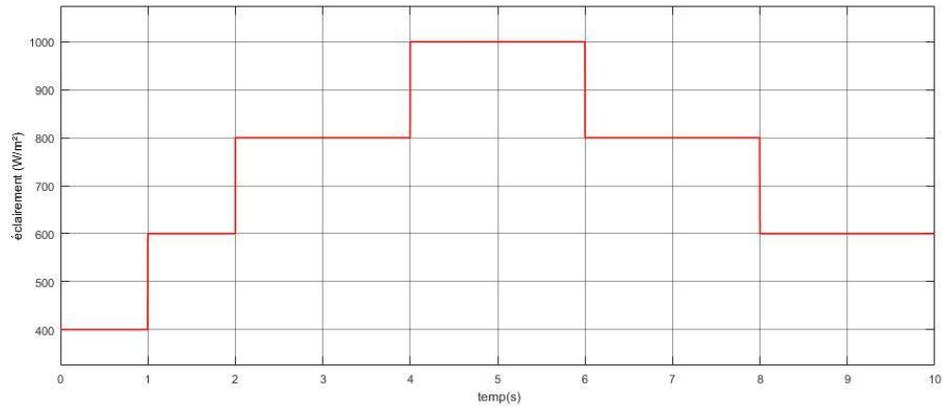


Figure III.44 Profile d'éclairément

Profil de la charge :

Temps(s)	R( $\Omega$ )
0	40
1	40
2	30
4	20
5	10
6	20
8	30
10	40

Tableau III.5 Profile de R( $\Omega$ )

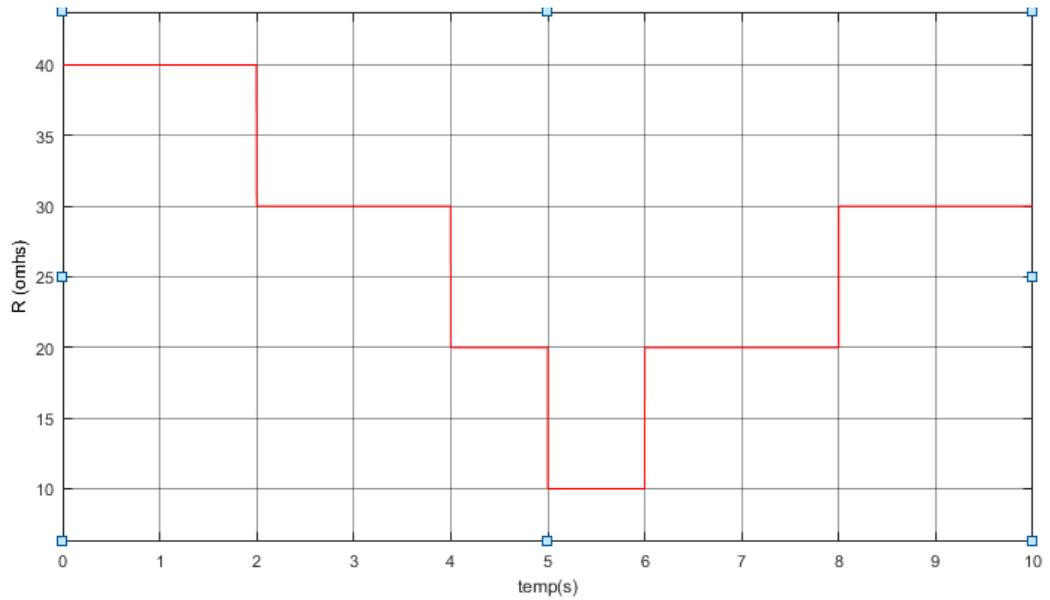


Figure III.45 Profile de Charge

**A) Résultat de Simulation de la GPV :**

La (Figure III.46) représente l'allure de la puissance du GPV , Nous remarquons un changement de puissance lorsque la valeur de l'irradiance changé, On note également que plus le l'irradiance est élevée, plus la puissance est élevée dans la période du  $t=1s$  au  $t=5s$ , Ensuite, nous avons remarqué une diminution de la valeur de puissance dans la période du  $t=5s$  au  $t=10s$ .

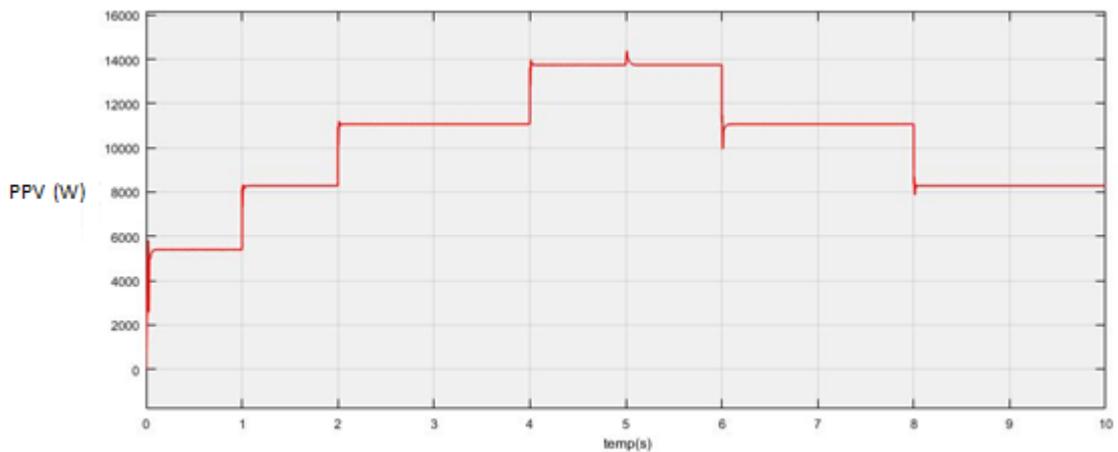


Figure III.46 l'allure de la puissance de la GPV

La (Figure III.47) représente l'allure de la tension de la GPV , On remarque que la tension du GPV est approximativement constante dans la valeur 200V sur la période comprise entre  $t=0s$  à  $t=10s$  .

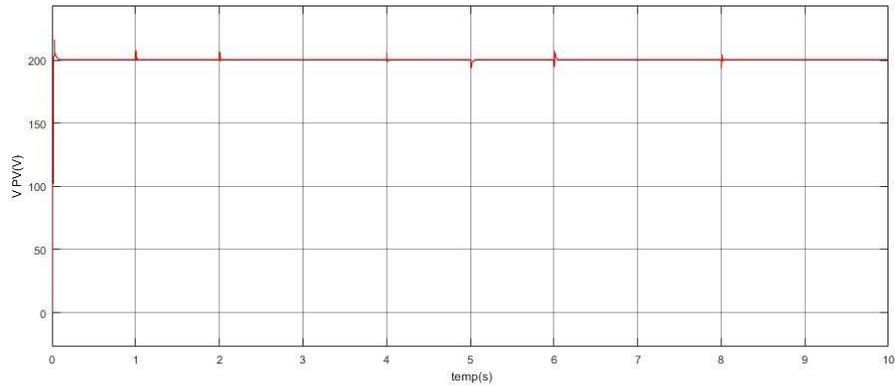


Figure III.47 l'allure de la tension de la GPV

La (Figure III.48) représente l'allure de courant de la GPV , On note que la valeur du courant augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale 68A en t=5s, Ensuite, il diminue 42A en t=8s

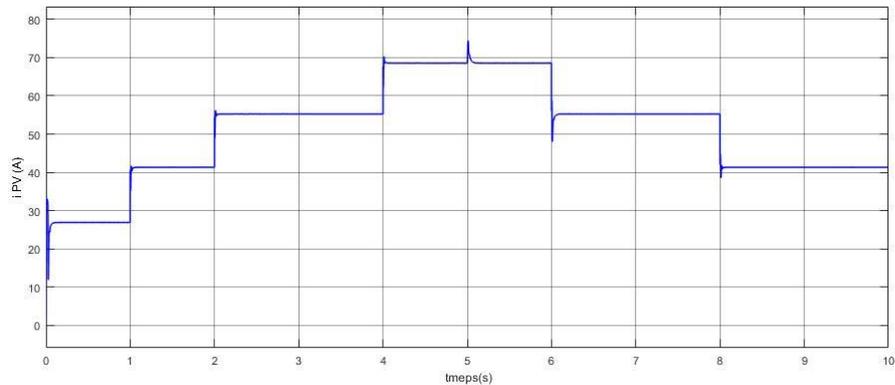


Figure III.48 l'allure de courant de la GPV

**B) Résultat de Simulation de la Charge :**

La (Figure III.49) représente l'allure de la Puissance de la Charge , Où nous avons donné des valeurs au système et nous avons remarqué la tendance suivante :

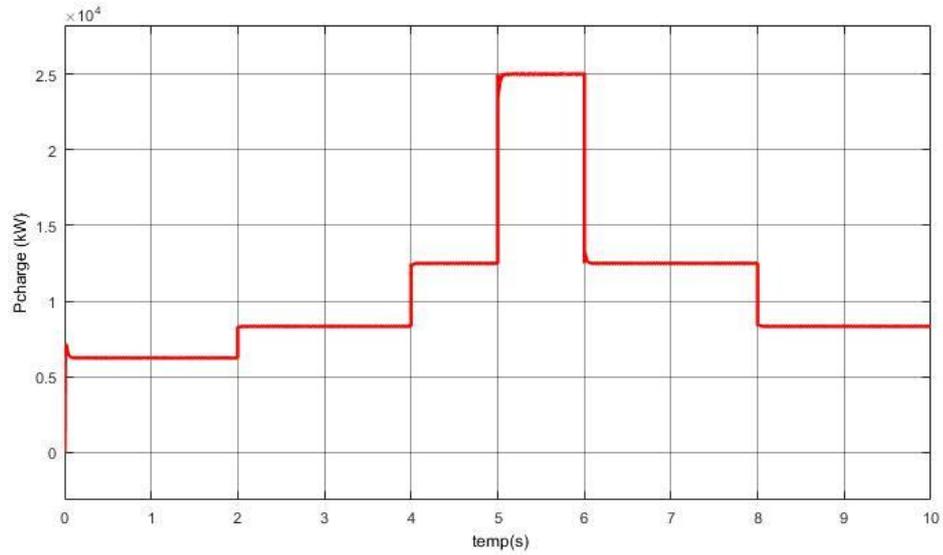


Figure III.49 l'allure de la Puissance de la Charge

La (Figure III.50) représente l'allure de la tension VDC , On note la stabilité de la valeur de tension de t=0s a t=10s dans le valeur 500V.

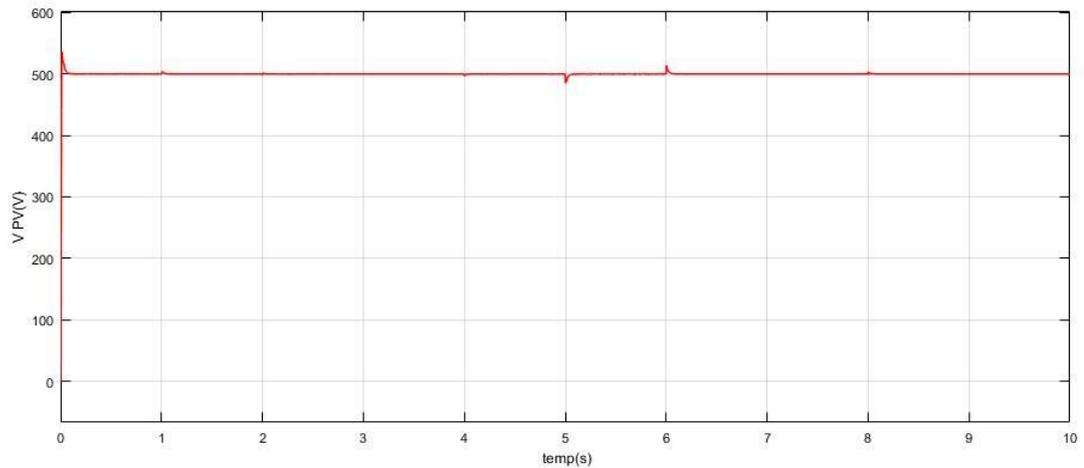


Figure III.50 l'allure de la tension VDC

La (Figure III.51) représente la valeur de courant de la charge en fonction du temps. On remarque que la courbe de courant est variable, partant de la valeur la plus basse de 13A t=1s à la valeur maximale de 50A t=6s puis redescendant vers des valeurs inférieures.

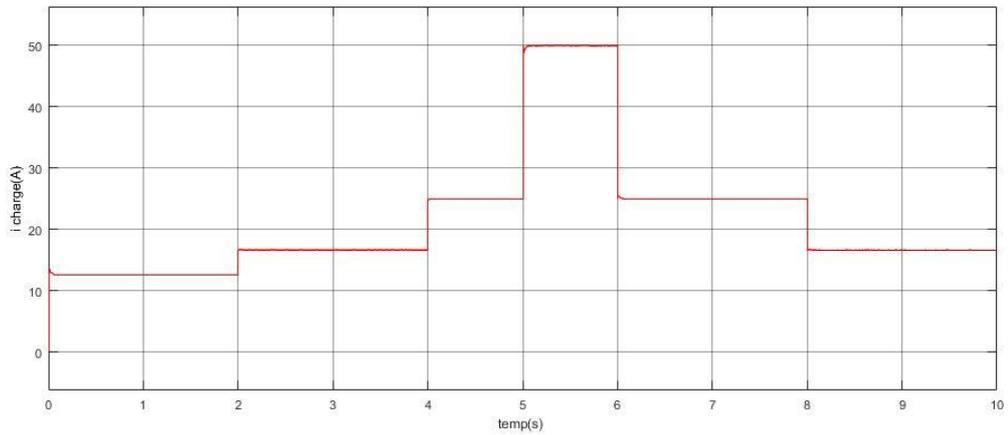


Figure III.51 l'allure de courant de la charge

**C) Résultat de Simulation de la batterie :**

La (Figure III.52) représente le courbe de la puissance de batterie en fonction du temps. Nous constatons que la batterie dans la première période de  $t=0s$  à  $t=1.2s$  prend une valeur positive, c'est-à-dire qu'elle est dans un état de décharge, dans la deuxième période entre  $t=1.2s$  à  $t=5s$ , elle prend une valeur négative, c'est-à-dire qu'elle est dans un état de charge. Dans la troisième période de  $t=5s$  à  $t=10s$ , on voit que la puissance prend des valeurs positives, c'est-à-dire qu'elle est dans un état de décharge.

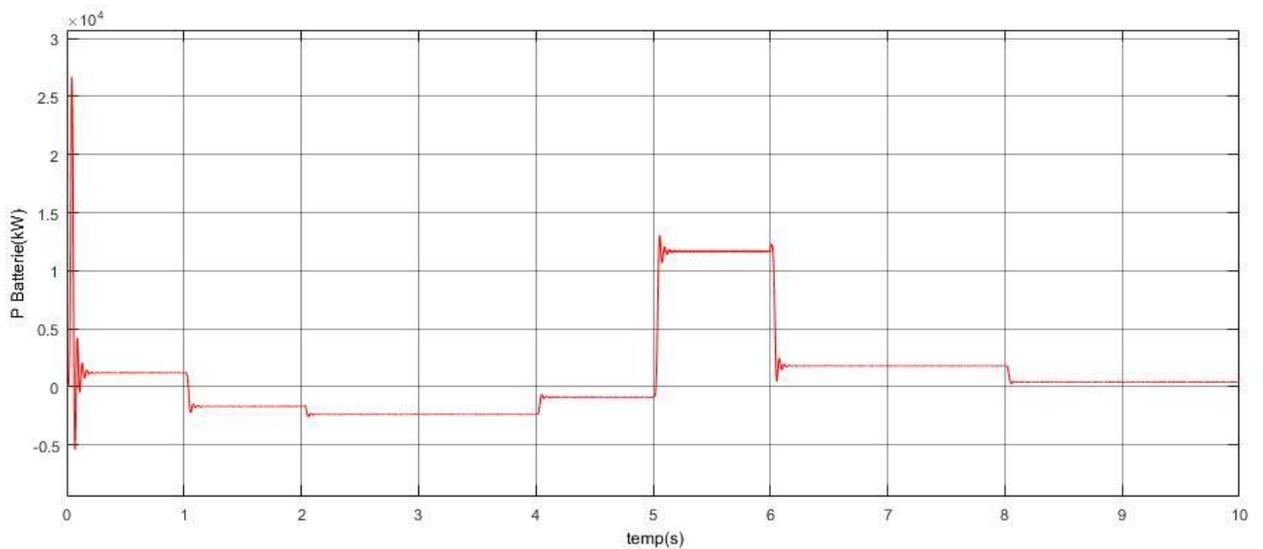


Figure III.52 le courbe de la puissance de batterie

La (Figure III.53) représente le courbe de la tension de batterie en fonction du temps. On remarque que la tension de la batterie prend une valeur constante de 200V dans le temps.

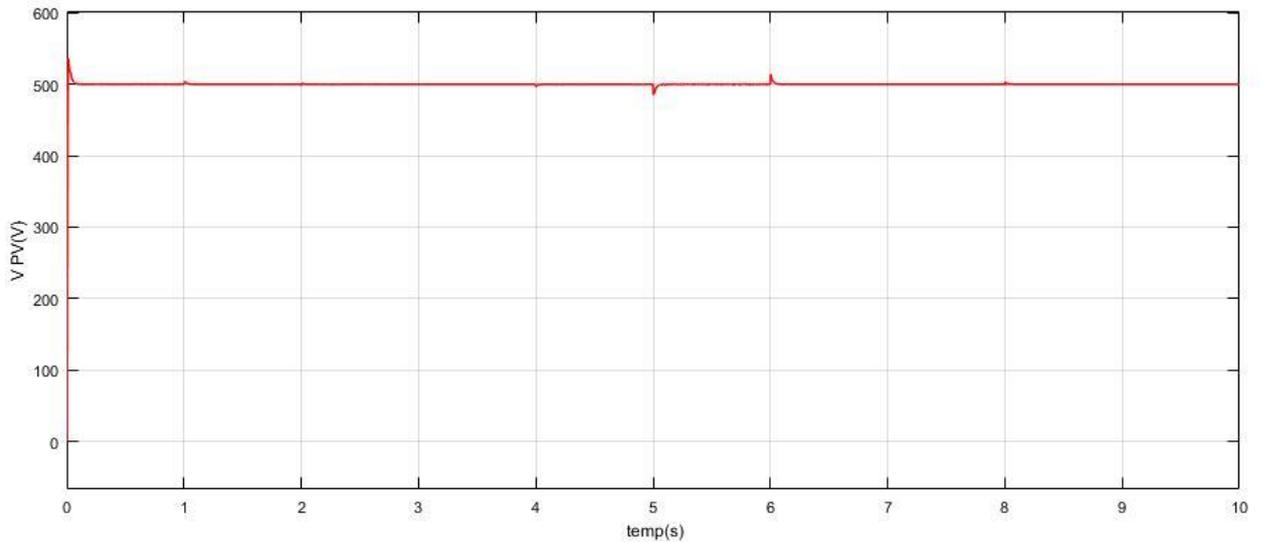


Figure III.53 le courbe de la tension de batterie

La (Figure III.54) représente le courbe de la tension de batterie en fonction du temps,

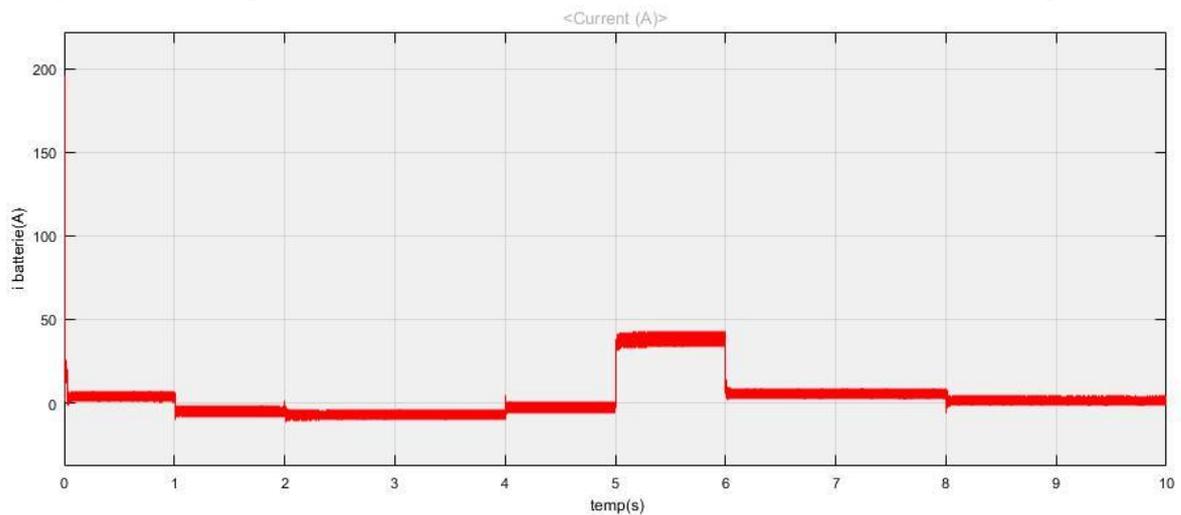


Figure III.54 le courbe de la tension de batterie

La (Figure III.55) représente les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge e aussi la puissance donnée par la batterie en fonction du temps.

Dans la première période  $t=0s$  a  $t=1s$ , on remarque que la charge consomme plus puissance que l'énergie sortant du GPV, ce qui explique la courbe de batterie qui prend une valeur positive MODE 2

Dans la deuxième période  $t=1s$  a  $t=5s$ , on remarque que le système consomme moins puissance que l'énergie fournie par le GPV, alors que la batterie est en état de charge MODE 3.

Dans la troisième période on constate le MODE 2

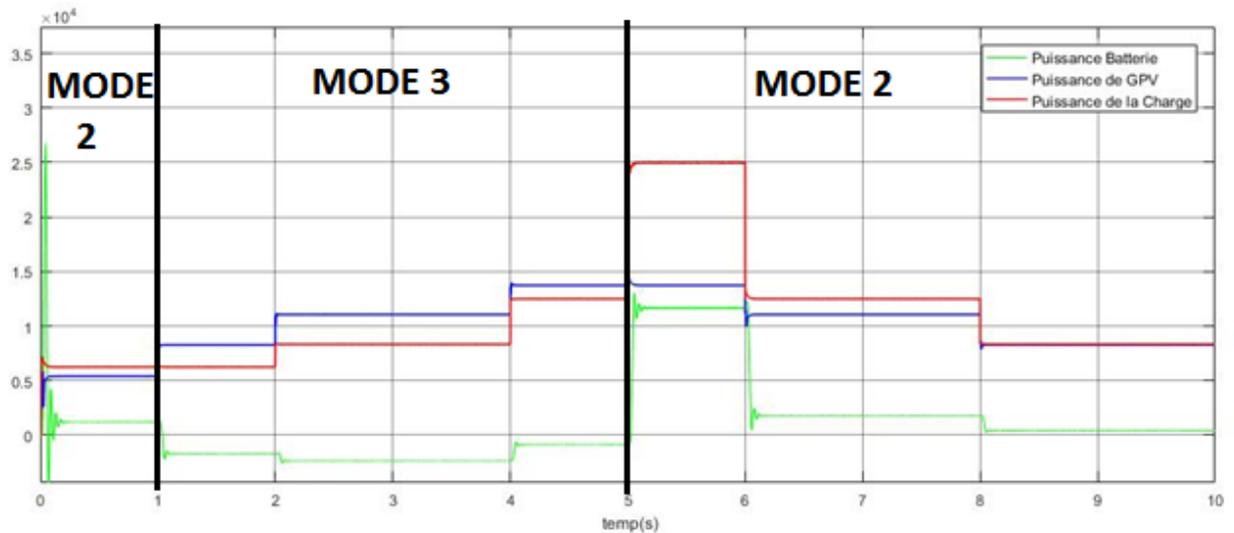


Figure III.55 les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie

### III.6.5) Simulation dans le cas de batterie est chargée à 100%

Dans ce cas, nous avons simulé dans le cas de  $PPV < P_{charge}$  et que le système de batterie est également chargé complétement  $SOC=100\%$  comme illustré dans la (Figure III.56)

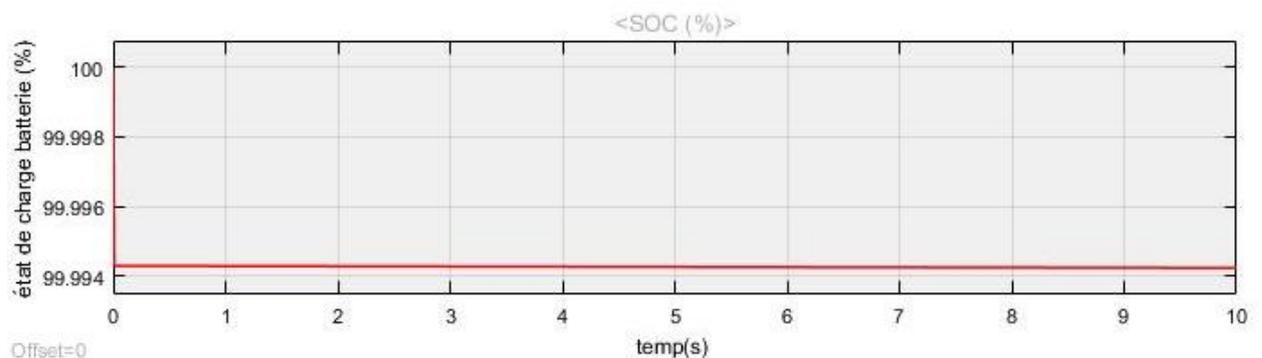
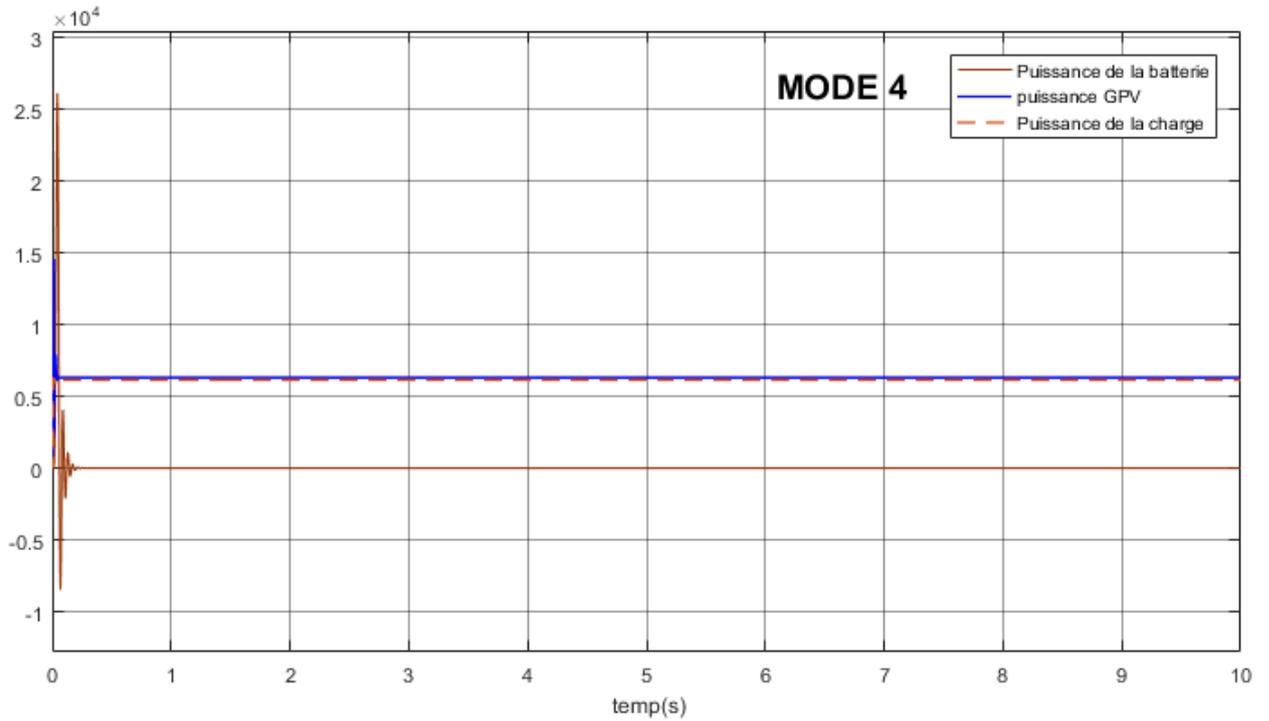


Figure III.56 état de charge de batterie

On remarque dans la (Figure III.57) que le GPV prend la valeur  $PPV=6321kW$  et la charge  $P_{charge}=6175kW$ , alors que l'on note que la batterie prend la valeur approximative de zéro.

MODE 4



*Figure III.57 les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie*

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'approche de commande et les résultats de simulation de la commande du système autonome hybride, Nous avons fait cela en utilisant MPPT et la méthode de perturbe et observe pour trouver le point de puissance maximal de la GPV, et pour gestionné l'énergie enter GPV, La charge et batterie on a utilisé le gestionnaire d'énergie avec 4 modes ce qui permet l'acheminement de la énergie selon tout en respectant les limitation de fonctionnement des sources du système.

# Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était l'étude de la modélisation et simulation d'un système autonome hybride. Les résultats obtenus ont permis de montrer une bonne simulation en ce qui concerne le panneau photovoltaïque et l'élément de stockage.

Dans le premier chapitre, on a présenté un aperçu sur les systèmes hybrides de production d'énergie électrique et le principe de fonctionnement des cellules solaire et aussi les différents types des batteries.

Ensuite on a introduit une modélisation des composant d'un système hybride GPV – Convertisseur Boost et Buck-Boost et aussi La modélisation de la batterie de stockage, l'état de charge et décharge des batteries dans le deuxième chapitre,

Enfin on a présenté une simulation de notre système hybride basant sur la modélisation d'un panneau photovoltaïque et sur le modèle de batterie au plomb dans des profils d'éclairage fixe et variable, Pour la recherche de point de puissance maximale (MPPT) on a utilisé la méthode P et O (perturbation et observation). Les résultats de simulation présentés montrent le bon fonctionnement des batteries avec des cycles de charge et de décharge et montrent l'efficacité de notre Algorithme de gestion d'énergie.

En fin, on propose quelques perspectives pour l'avenir :

- Utilisé le régulateur *MPPT* floue pour un suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.
- Gérer ce systèmes hybride en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle.
- Ajouté un autre système production d'énergie.

### Références et biographiques

- [1] H. Ibrahim, A. Ilinca and I. Perron, Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre 2008.
- [2] A. Luque, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, deuxième édition, John Wiley & Sons (Royaume-Uni), 2011, 1162 p.
- [3] S. Wenham, M. Green, M. Watt, R. Corkish, Applied photovoltaics, 2e édition éd. UNSW Center for Photovoltaic Engineering, Bibliothèque nationale d'Australie, 2006, 313 p.
- [4] Fraunhofer ISE, Rapport sur le photovoltaïque, Munich, Allemagne, 2014.
- [5] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [6] M. Tahkokorpi, Solar Energy in Finland, 1ère éd. Into Kustannus, Helsinki, 2016, 207 p
- [7] S. Vampoulas, Examen de l'adéquation et de l'économie de la technologie des panneaux solaires dans les applications industrielles, Master of Science Thesis, 2014.
- [8] D. Linden, TB Reddy, Linden's Handbook of batteries, 4e éd. McGraw Hill, New York, 2011.
- [9] E. Hämeenoja, Battery Guide, 1ère édition éd. Erkki Ahlavuo Oy, Espoo, 1993.
- [10] Battery University, Batteries au plomb, page Web.:  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/lead\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries).
- [11] Battery University, Tableau de comparaison des batteries secondaires, page Web.:  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/secondeire\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondeire_batteries).

[12] Battery University, Lithium-based Batteries, page web.:

[http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries)

[13] RJ Brodd, Commentaires sur l'histoire des batteries lithium-ion, page Web :

<http://www.electrochem.org/dl/ma/201/pdfs/0259.pdf>.

[14] S. Vaurio, Mémoire de maîtrise, Protection contre les courts-circuits d'une batterie lithium-ion dans une machine hybride, Université Aalto, page web :

[https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/11107/master\\_Vaurio\\_Sampsa\\_2013.pdf?sequence=1](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/11107/master_Vaurio_Sampsa_2013.pdf?sequence=1).

[15] Battery University, Batteries à base de nickel, page Web. :

[http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries).

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

[17] Zouache Foudil « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques ». Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.

[18] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009

[19] <http://fr.wikipedia.org/>

[20] A.AZIZ, K.KASSMI, F.OLIVIE, G.SARRABAYROUSE « Synthèses bibliographiques sur les chaines photovoltaïques » Rapport LAAS N°04348,27p, Juin2004

[21] A.Jaafar, «Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance», thèse de doctorat, physique, Ecole Doctorale Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes, N° d'ordre : 2011-17-TH.

- [22] VALERIE LEGER, « physique appliquée. Les bases et l'électronique de puissance », Ellipses 2004.
- [23] FUNG LIN LUO, HONG YE, MUHAMED RASHID, « Digital Power Electronics and Applications».
- [24] CHAMI KAWTHER. Modélisation d'une batterie liée à un système photovoltaïque. 2019. .
- [25] N. Achaiboua, M. Haddadib, A. Maleka, Modeling of lead Acid batteries in PV systems, Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, Energy Procedia, 2012
- [26] El Mehdi Laadissi<sup>1</sup>, Anas El Filali<sup>2</sup>, Malika Zazi<sup>3</sup> and Abdessamad El Ballouti, COMPARATIVE STUDY OF LEAD ACID BATTERY MODELLING, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,15, AUGUST 2018
- [27] R. Semmache et A. Smahi, « Modélisation et Réalisation d'un chargeur de batterie basée sur la commande MPPT Photovoltaïque » Memoire de Master, Département de Génie électrique et Electronique, Université Abou Bekr Belkaïd , Tlemcen, Algérie, Juin 2015.
- [28] Bogdan S Borowy and Ziyad M Salameh. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and pv array in a wind/pv hybrid system. IEEE Transactions on energy conversion, 11(2):367–375, 1996. .
- [29] M Chikh. Étude analytique conceptuelle des systèmes PV de puissance adopté aux site isolés de L'Algérie. PhD thesis, thèse de magister, CDER, 1994.
- [30] Ai Bin, Yang Hongxing, Shen Hui, and Liao Xianbo. Computer aided design for pv/wind hybrid system. In 3rd World Conference onPhotovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of, volume 3, pages 2411–2414. IEEE, 2003.
- [31] A Chaurey and S Deambi. Battery storage for pv power systems: an overview. Renewable Energy, 2(3):227–235, 1992.

# Liste des figures

Figure :	N° Page
<b>Chapitre I :</b>	
<b>Figure I-1</b> : Diminution du coût d'investissement des modules et du système PV (installés sur le toit d'une taille de 10 à 100 kW en Allemagne)	<b>6</b>
<b>Figure I-2</b> : un champ photovoltaïque	<b>7</b>
<b>Figure I-3</b> : Cellule PV et composants.	<b>7</b>
<b>Figure I-4</b> : Cellules solaires en silicium polycristalline et monocristallin.	<b>8</b>
<b>Figure I-5</b> : Module solaire Naps et système PV résidentiel.	<b>9</b>
<b>Figure I-6</b> : Jonction Pn et région de déplétion	<b>10</b>
<b>Figure I-7</b> : <i>Collision</i> de photons	<b>11</b>
<b>Figure I-8</b> : Irradiance solaire lors d'une journée ensoleillée par rapport à une journée nuageuse. Adapté de [7].	<b>12</b>
<b>Figure I-9</b> : les variables affectant la masse d'air	<b>13</b>
<b>Figure I-10</b> : Différences du spectre solaire entre l'atmosphère et la Terre surface.	<b>14</b>
<b>Figure I-11</b> : Fonctionnement électrochimique d'une cellule. Décharge à gauche et charge à droite	<b>16</b>
<b>Figure I-12</b> : Production PV (système PV 5 kW), courbe de charge des clients résidentiels	<b>20</b>
<b>Chapitre II :</b>	
<b>Figure II-1</b> : Modèle Simulink de système autonome hybride	<b>23</b>
<b>Figure II- 2</b> : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV	<b>24</b>
<b>Figure II-3</b> : Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale	<b>24</b>
<b>Figure II-4</b> : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle	<b>25</b>
<b>Figure II-5</b> : Caractéristique de nombre des modules en série	<b>26</b>
<b>Figure II- 7</b> : Caractéristique de nombre des modules mixte (Série + Parallèle)	<b>27</b>

<b>Figure II- 8</b> : différents régimes selon la puissance d'éclairement.	<b>29</b>
<b>Figure II- 9</b> : Caractéristiques I(V) P(V) pour différentes valeurs de température.	<b>31</b>
<b>Figure II- 10</b> : Caractéristiques I(V) P(V) pour différentes valeurs du rayonnement.	<b>31</b>
<b>Figure II- 11</b> : Convertisseur Boost	<b>32</b>
<b>Figure II-12</b> : Topologies du Convertisseur Boost	<b>32</b>
<b>Figure II-13</b> : Fonction de transfert statique du convertisseur Boost	<b>34</b>
<b>Figure II-14</b> : Schéma du convertisseur Buck-boost	<b>34</b>
<b>Figure II-15</b> : Circuits équivalents du convertisseur Buck-boost : (a) S fermé, (b) S ouvert	<b>35</b>
<b>Figure II-16</b> : Fonction de transfert statique du convertisseur Buck-Boost	<b>36</b>
<b>Figure II-17</b> : Circuit équivalent de base pour la batterie	<b>37</b>
<b>Figure II-18</b> : le schéma électrique de la batterie	<b>40</b>
<b>Chapitre III :</b>	
<b>Figure III.1</b> Modèle Simulink de contrôleur MPPT basé sur l'algorithme Perturbe and Observe	<b>43</b>
<b>Figure III.2</b> : model Simulink de P et O	<b>44</b>
<b>Figure III.3</b> : Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.	<b>44</b>
<b>Figure III.4</b> : Organigramme de la méthode P&O.	<b>45</b>
<b>Figure III.5</b> : Organigramme des différents modes de fonctionnement du système photovoltaïque avec stockage sur batterie.	<b>46</b>
<b>Figure III.6</b> : Schéma Simulink d'un convertisseur réversible	<b>48</b>
<b>Figure III.7</b> : Présente le point de puissance maximal	<b>49</b>
<b>Figure III.8</b> : Présente le point de puissance maximal	<b>49</b>

<b>Figure III.9</b> : éclairements Constant 1000W W/m <sup>2</sup>	<b>49</b>
<b>Figure III.10</b> : la puissance à la sortie de GPV pour un éclairement et charge constant	<b>50</b>
<b>Figure III.11</b> : l'allure de la tension mesurée de V <sub>pv</sub> .	<b>50</b>
<b>Figure III.12</b> : l'allure de la courant de la Gpv.	<b>51</b>
<b>Figure III.13</b> : l'allure de la puissance de la charge	<b>51</b>
<b>Figure III.14</b> : l'allure de la tension de bus continu	<b>52</b>
<b>Figure III.15</b> : l'allure de la valeur de courant de la charge	<b>52</b>
<b>Figure III.16</b> : l'allure de la tension de la batterie	<b>53</b>
<b>Figure III.17</b> : l'allure de la valeur de courant de la batterie	<b>53</b>
<b>Figure III.18</b> : Etat de charge de la batterie (Mode Décharge)	<b>53</b>
<b>Figure III.19</b> : l'allure de la puissance de la batterie (Mode Décharge)	<b>54</b>
<b>Figure III.20</b> : les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie	<b>55</b>
<b>Figure III.21</b> : Profile d'éclairement	<b>56</b>
<b>Figure III.22</b> : l'allure de la puissance de la GPV	<b>56</b>
<b>Figure III.23</b> : l'allure de la tension de Gpv	<b>57</b>
<b>Figure III.24</b> : l'allure de courant de la GPV	<b>57</b>
<b>Figure III.25</b> : l'allure de la puissance de la charge	<b>58</b>
<b>Figure III.26</b> : l'allure de la tension de bus continu VDC	<b>58</b>
<b>Figure III.27</b> : l'allure de la valeur de courant de la charge	<b>59</b>
<b>Figure III.28</b> : Puissance donnée par la batterie	<b>59</b>
<b>Figure III.29</b> : l'allure de la valeur de tension de la batterie	<b>60</b>
<b>Figure III.30</b> : l'allure de la valeur de courant de la batterie	<b>60</b>
<b>Figure III.31</b> : les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance	<b>61</b>

consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie	
<b>Figure III.32</b> : Profile de charge	<b>62</b>
<b>Figure 3.33</b> : profile d'éclairement	<b>62</b>
<b>Figure III.34</b> : l'allure de la puissance à la sortie de GPV	<b>63</b>
<b>Figure III.35</b> : l'allure de la tension à la sortie de GPV	<b>63</b>
<b>Figure III.36</b> : l'allure de la courant de Gpv	<b>64</b>
<b>Figure III.37</b> : l'allure de VDC	<b>64</b>
<b>Figure III.38</b> : l'allure de courant de la charge	<b>65</b>
<b>Figure III.39</b> : l'allure de la puissance de la charge	<b>65</b>
<b>Figure III.40</b> : l'allure de la tension de batterie	<b>66</b>
<b>Figure III.41</b> : l'allure de la courant de la batterie	<b>66</b>
<b>Figure III.42</b> : l'état de charge de la batterie	<b>67</b>
<b>Figure III.43</b> : les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée en fonction du temps.	<b>68</b>
<b>Figure III.44</b> : Profile d'éclairement	<b>69</b>
<b>Figure III.45</b> : Profile de Charge	<b>70</b>
<b>Figure III.46</b> : l'allure de la puissance de la GPV	<b>70</b>
<b>Figure III.47</b> : l'allure de la tension de la GPV	<b>71</b>
<b>Figure III.48</b> : l'allure de courant de la GPV	<b>71</b>
<b>Figure III.49</b> : l'allure de la Puissance de la Charge	<b>72</b>
<b>Figure III.50</b> : l'allure de la tension VDC	<b>72</b>
<b>Figure III.51</b> : l'allure de courant de la charge	<b>73</b>
<b>Figure III.52</b> : le courbe de la puissance de batterie	<b>73</b>

<b>Figure III.53</b> : le courbe de la tension de batterie	<b>74</b>
<b>Figure III.54</b> : le courbe de la tension de batterie	<b>74</b>
<b>Figure III.55</b> : les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie	<b>75</b>
<b>Figure III.56</b> : état de charge de batterie	<b>75</b>
<b>Figure III.57</b> : les allures des puissances à la sortie de GPV et la puissance consommée par la charge et aussi la puissance donnée par la batterie	<b>76</b>

# Liste des Tableaux

Tableau :	N° Page
<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans les Condition	48
<b>Tableau III.2</b> : profile d'éclairement	55
<b>Tableau III.3</b> : profile de R( $\Omega$ )	61
<b>Tableau III-4</b> : Profil d'éclairement	68
<b>Tableau III.5</b> : Profile de R( $\Omega$ )	69