

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
N° : ER-02



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE  
OPTION : ENERGIE RENOUEVELABLE

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

**Par:**  
**LAMARA Mohamed**

**Intitulé**

***Etude comparative des algorithmes P&O et Inc-Cond  
pour l'optimisation d'un système photovoltaïque (PV)  
autonome***

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr ZEMMIT Abderrahim	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr MAYOUF Messaoud	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Pr BENSLIMANE Tarak	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2021/ 2022**

# Remerciement

*Avant tout, je remercie le bon Dieu tout puissant qui a donné à la foi, du courage et de la patience afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens également à remercier mon promoteur Mr. **MAYOUF Messacud** pour avoir accepté mon encadrement et pour tous les efforts qu'il a déployés pour m'aider, conseiller et m'encourager avec une grande gentillesse durant toute cette période.*

*Je tiens à remercier les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et leur intérêt pour celui-ci.*

*Je n'oublie pas de remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Et enfin Je tiens à remercier l'ensemble des collègues de notre promotion.*

*Mohamed*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à mes très cher parents pour leurs  
soutient morale dans tous mes parcours de vie a tous les  
moments.*

*Je dédie ce travail*

*A mes frères Lakhdar, Toufik, Samir, Mustapha, et Mes sœurs*

*Je dédie ce travail,*

*A ma femme et mes enfants Ammar, Rayhane Fatima*

*Zahra et Youcef.*

*A tous mes tous amis*

*A toute la section énergie renouvelable 2022.*

*Mchamed*

# SOMMAIRE

---

## INTRODUCTION GENERALE

### Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques

1.1. Introduction.....	01
1.2. L'Energie solaire.....	01
1.2.1 L'énergie solaire thermique .....	02
1.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque.....	02
1.2.3 Le rayonnement solaire.....	02
1.2.4 Types de l'énergie solaire .....	04
1.2.4.1 Energie passive .....	04
1.2.4.2 Energie solaire thermique .....	05
1.2.4.3 Energie solaires photovoltaïque .....	05
1.2.4.4 Energie thermodynamique .....	05
1.3 Panneaux solaires photovoltaïques .....	06
1.3.1 Le module photovoltaïque .....	06
1.3.2 Cellules PV .....	07
1.3.2.1 Cellules poly cristallin .....	08
1.3.2.2 Cellules monocristallin .....	08
1.3.2.3 Les cellules amorphes .....	08
1.3.3 Association des cellules PV .....	08
1.3.3.1 Association en série .....	09
1.3.3.2 Association en parallèle .....	09
1.4 Installations photovoltaïques .....	10
1.4.1 Systèmes autonomes .....	10
1.4.2 Système PV raccordé au réseau électrique .....	11
1.4.2.1 : Systèmes PV décentralisés .....	12
1.4.2.2 : Systèmes PV centralisés.....	12
1.4.3 Système autonome hybride .....	13
Conclusion : .....	14
<b>Chapitre 2 : Etude et modélisation Convertisseurs DC/DC</b>	
2.1 Introduction.....	15
2.2. Les hacheurs directs .....	15
2.2.1 Hacheur série .....	16
2.2.2 Hacheur parallèle.....	18

# SOMMAIRE

---

2.2.3 Hacheur réversible .....	20
2.2.3.1 Hacheur réversible en courant .....	20
2.2.3.2 Hacheur réversible en tension .....	21
2.2.3.3 Hacheur réversible en tension et en courant (pont).....	22
2.3 Hacheurs à liaisons indirectes .....	24
2.3.1 Hacheur à stockage inductif .....	24
2.3.2 Hacheur à stockage capacitif .....	26
Conclusion.....	29
<b>Chapitre 3 : Modélisation et simulation du générateur PV</b>	
3.1 Introduction.....	30
3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	30
3.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	32
3.3.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) .....	32
3.3.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) .....	33
3.4 Modèle idéal avec une seule diode (ISDM).....	33
3.4.1 Identification des paramètres dans les conditions standards STC.....	34
3.4.2 Caractéristique (I-V) avec variations de l'éclairement et la température.....	36
3.4.3 Schéma bloc de simulation.....	38
3.4.4 Résultats de simulation.....	38
3.4.4.1 Influence de la température.....	38
3.4.4.2 Influence de l'éclairement.....	39
Conclusion.....	40
<b>Chapitre 4 : Etude comparative des algorithmes P&amp;O et INC du système PV autonome</b>	
4.1 Introduction.....	41
4.2 Système photovoltaïque autonome étudié .....	42
4.3 Dimensionnement du convertisseur DC/DC.....	42
4.3.1 Calcul de l'inductance L et le condensateur $C_{in}$ .....	43
4.3.2 Modélisation dynamique.....	44
4.4 Modélisation de la batterie.....	46
4.5. Régulation de la tension.....	47
4.6 Algorithme de maximisation de puissance (MPTT).....	48
4.6.1 La technique Perturbation & Observation (P&O).....	50
4.6.2 Technique d'Incremental Conductance (Inc-Cond).....	51

## ***SOMMAIRE***

---

4.7. Intégration du contrôle de charge de la batterie avec MPPT.....	53
4.8. Résultats de simulations.....	58
Conclusion.....	60
Conclusion Général	

# *Liste des Figures*

---

## Liste des Figures

<b>Figure 1.1</b> Le rayonnement solaire	<b>02</b>
<b>Figure 1.2</b> Différentes positions du soleil.	<b>03</b>
<b>Figure 1.3</b> : Les différents types du rayonnement solaire	<b>04</b>
<b>Figure 1.4</b> : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque	<b>06</b>
<b>Figure 1.5</b> : Présentation schématique d'une cellule solaire.	<b>07</b>
<b>Figure 1.6</b> : Association de $N_s$ cellules en série	<b>09</b>
<b>Figure 1.7</b> : Association de $N_p$ cellules en parallèle	<b>10</b>
<b>Figure 1.8</b> : Couplage direct générateur photovoltaïque-charge	<b>10</b>
<b>Figure 1.9</b> : Système photovoltaïque autonome alimentant des charges CC et CA	<b>11</b>
<b>Figure 1.10</b> : Système PV raccordé décentralisé	<b>12</b>
<b>Figure 1.11</b> : Système PV centralisé	<b>13</b>
<b>Figure 1.12</b> : Système hybride à bus continu	<b>13</b>
<b>Figure 2.1</b> : Convertisseur continu-continu	<b>15</b>
<b>Figure 2.2</b> : Schémas et caractéristique d'un hacheur série	<b>17</b>
<b>Figure 2.3</b> : Schémas et caractéristiques d'un hacheur parallèle	<b>19</b>
<b>Figure 2.4</b> : Hacheur réversible en courant	<b>21</b>
<b>Figure 2.5</b> : Hacheur réversible en tension	<b>22</b>
<b>Figure 2.6</b> : Hacheur en pont	<b>23</b>
<b>Figure 2.7</b> : Hacheur à stockage inductif	<b>25</b>
<b>Figure 2.7</b> : Hacheur à stockage inductif	<b>27</b>
<b>Figure 2.8</b> : Hacheur à stockage capacitif	<b>28</b>
<b>Figure 2.8</b> : Hacheur à stockage capacitif	<b>23</b>
<b>Figure 3.1</b> Schéma équivalent électrique de la cellule PV	<b>31</b>
<b>Figure 3-2.</b> Schéma équivalent d'une cellule idéale.	<b>33</b>
<b>Figure 3.3.</b> Organigramme itératif de la méthode Newton – Raphson	<b>36</b>
<b>Figure 3.4.</b> Schéma bloc de simulation du panneau PV	<b>38</b>
<b>Figure 3.5.</b> Influence de la température sur les caractéristique $I_{PV}=f(V_{PV})$ et $P_{PV}=f(V_{PV})$	<b>39</b>
<b>Figure 3.6.</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{PV}=f(V_{PV})$ et $P_{PV}=f(V_{PV})$	<b>40</b>
<b>Figure 4.1.</b> Circuit équivalent du système PV étudié	<b>42</b>
<b>Figure 4.2.</b> Tensions de la batterie en fonction de la capacité de décharge	<b>46</b>
<b>Figure 4.3</b> Schéma d'un système photovoltaïque avec MPPT	<b>49</b>
<b>Figure 4.4</b> Organigramme de la méthode P&O	<b>51</b>

## *Liste des Figures*

---

<b>Figure 4.5 :</b> Principe de la méthode Inc-Cond	<b>52</b>
<b>Figure 4.6</b> Organigramme de la méthode Inc-Cond	<b>53</b>
<b>Figure 4.7.</b> Intégration du contrôle de charge de la batterie avec MPPT	<b>54</b>
<b>Figure 4.8.</b> Modèle de simulation du system PV autonome	<b>55</b>
<b>Figure 4.9.</b> Variation de l'éclairement solaire en fonction du temps	<b>56</b>
<b>Figure 4.10.</b> Courbes des puissances de PVG	<b>57</b>
<b>Figure 4.11.</b> Courbes des tensions aux bornes du générateur PVG	<b>58</b>
<b>Figure 4.12.</b> Tension de la batterie	<b>58</b>
<b>Figure 4.13.</b> Courant de charge de la batterie	<b>59</b>
<b>Figure 4.14.</b> Etat de la charge de la batterie	<b>59</b>

# *INDEX DES NOTATIONS*

---

## INDEX DES NOTATIONS

G	Eclairement solaire, $W/m^2$
$I_M$	Courant instantané du point maximum MPP, A
$i_{ph}$	Courant photonique de la cellule PV, A
$i_{pv}$	Courant de sortie de la cellule PV, A
$I_d$	Courant de la diode, A
$I_{ss}$	Courant de saturation de la diode, A
$T_C$	Température de la cellule PV, K
$V_D$	Tension de la diode, V
$V_M$	Tension instantanée du point maximum MPP, V
$V_{OC}$	Tension du circuit ouvert, V
$V_{PV}$	Tension aux bornes de la cellule PV, V
$V_t$	Tension aux bornes de la jonction p-n, V
$\alpha_T$	Coefficient de température sur le courant PV
$\beta_T$	Coefficient de température sur la tension PV
$\lambda_T$	Coefficient d'éclairement sur la puissance PV
$A_n$	Facteur d'idéalité de la diode
$I_{MS}$	Courant PV au point MPP dans les conditions STS, A
$I_{ph}$	Courant photonique PV dans les conditions STC, A
$I_{SCS}$	PV short-circuit current at the STC, A
$P_{MPP}$	Puissance PV au point MPP dans les conditions STC, W
$R_s$	Résistance en série, $\Omega$
$R_h$	Résistance en parallèle, $\Omega$
$V_{MS}$	Tension PV au point MPP dans les conditions STC, V
$V_{OCS}$	La tension PV du circuit ouvert dans les conditions STC, V



***Introduction générale***

# *INTRODUCTION GENERALE*

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

Depuis le début de l'humanité, l'homme a toujours cherché à obtenir les sources d'énergie dont il a besoin dans sa vie quotidienne, comme la nourriture et l'eau, et au cours des siècles passés, il a trouvé plusieurs sources d'énergie fossile qui répondaient à ses besoins énergétiques.

Bien qu'il répondait à ses exigences et présentait un certain nombre d'avantages, il présentait un ensemble d'inconvénients et d'obstacles qui l'obligeaient à rechercher une alternative plus sûre à tous égards. Parmi ces inconvénients, nous mentionnons :

La détérioration accélérée de l'environnement liée aux émissions des ressources énergétiques utilisées, L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, le cout des cours du brut, les émissions de gaz à effet de serre Les problèmes climatiques et la nécessité de réduire les émissions des gaz, la raréfaction des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon),

Pour cela, beaucoup de recherches scientifiques ont été réalisées afin de trouver une source d'énergie illimitée, économique et peu polluante telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, puisque la protection de l'environnement est devenue on première degré.

Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque est la plus utilisée. Elle comporte l'avantage de s'intégrer facilement à l'habitation (façades de bâtiments, toits). L'absence des organes mécaniques mouvants qui réduit l'entretien de ces systèmes et leur fiabilité. De plus, cette énergie semble la plus prometteuse, non polluante et inépuisable.

Bien que, la production de cette énergie est non linéaire et elle varie en fonction de l'éclairement et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque, ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale,. On utilise alors des algorithmes qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, qui nommé 'maximal power point tracking', (MPPT afin que la puissance maximale soit générée en permanence)

On a présenté dans ce mémoire, une étude comparative des algorithmes P&O et Inc-Cond avec modélisation et la simulation pour l'optimisation et le contrôle de la tension du batterie d'un système photovoltaïque autonome.

# *INTRODUCTION GENERALE*

---

*L*e mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

*D*ans le premier chapitre on va présenter des généralités sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les générateurs PV, leurs performances et les technologies des cellules PV et les installations photovoltaïques.

*L*e deuxième chapitre est consacré à étudier les types des convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

*N*ous introduisons dans le troisième chapitre la modélisation des cellules photovoltaïques qui passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, Après avoir fait la modélisation sous MATLAB-Simulink du GPV, nous présentons les résultats de simulations des caractéristiques courant-tension et puissance-tension du GPV en fonction de la variation des paramètres météorologiques (température et ensoleillement).

*L*e chapitre 4 est destiné à l'étude et la modélisation du système photovoltaïque autonome complet, composé d'un générateur PV raccordé à la charge à travers un hacheur abaisseur de tension qui charge la batterie mise aux bornes de la charge. Ce chapitre explique les étapes nécessaires pour spécifier, concevoir, simuler et évaluer les circuits de conditionnement d'énergie et accessoires ainsi que l'analyse en régime permanent et la vérification par simulation de notre application autonome d'énergie photovoltaïque par l'utilisation de la méthode de Perturbation Observation «P&O » et la méthode d'incrémentation de la conductance «Inc-Cond» a fin de réaliser une comparaison entre les deux méthodes pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque.

A decorative border resembling a scroll, with a black outline and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved, and there are small circular details at the corners that suggest the scroll is unrolled.

***Chapitre 1:***  
***Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques***

**Chapitre 1*****Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques*****1.1 Introduction**

Le besoin humain durable en énergie lui a toujours poussé à l'obtenir et à rechercher ses sources et les méthodes de l'extraire, notamment l'énergie solaire. Le mérite de la découverte de l'effet photovoltaïque revient au physicien français ALEXANDRE BECKERT en 1839, qui a découvert la possibilité de transformer l'énergie lumineuse en électricité. Ce phénomène repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il compte sur l'utilisation de l'énergie des photons pour libérer les électrons qui engendrent une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui devient une source de courant électrique continu. Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés.

Dans ce chapitre on fait appel à quelques notions de base indispensables dans le domaine photovoltaïque, nous aborderons ainsi les notions sur la source d'énergie photovoltaïque et les installations photovoltaïques.

**1.2 Energie solaire**

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le soleil disparaîtra un jour). Le soleil envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [1].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

### 1.2.1 Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique produit de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi générer la vapeur à partir de la chaleur du soleil, puis l'exploiter dans des turbines thermiques pour produire l'énergie électrique.

### 1.2.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [2].

### 1.2.3 Rayonnement solaire

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367\text{W/m}^2$  [2]. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser Figure 1.1. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

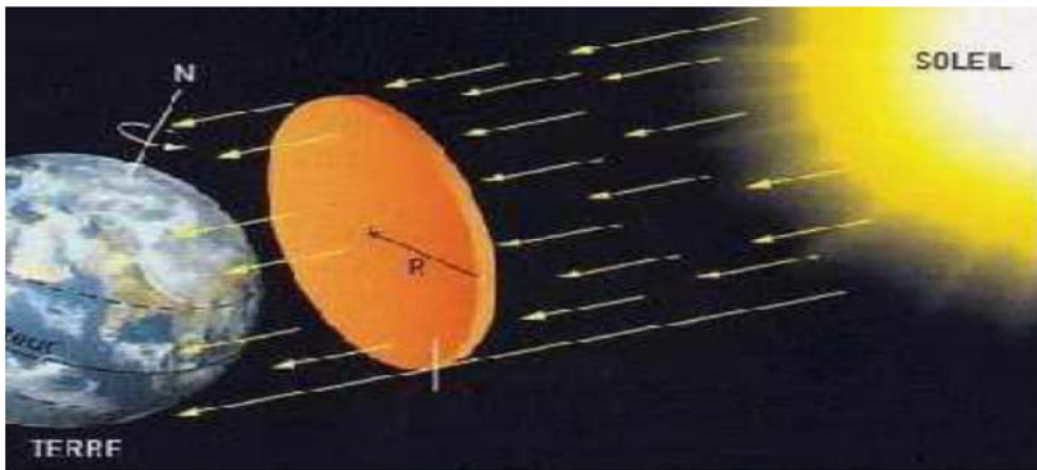


Figure 1.1 : Le rayonnement solaire

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000\text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de

temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$  [3].

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith) Figure 1.2. Le « G » représente le rayonnement "global" incluant le rayonnement direct et le rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct. [3].

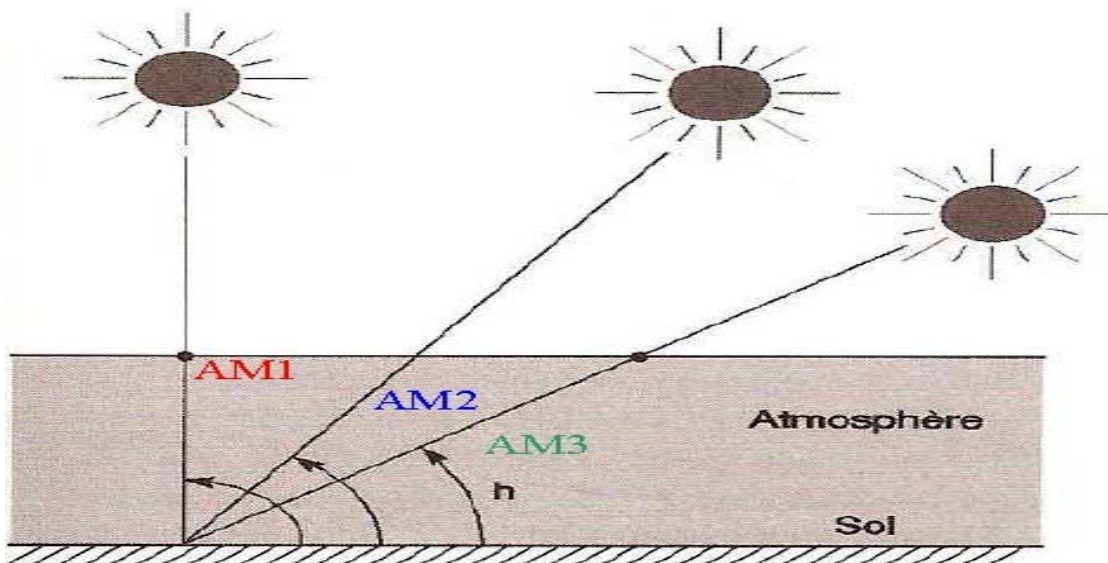


Figure 1.2 : Différentes positions du soleil

Il y a quatre types de rayonnement :

- Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil.
- Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste.

Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages.

- Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

- Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface figure 1.3 [4].

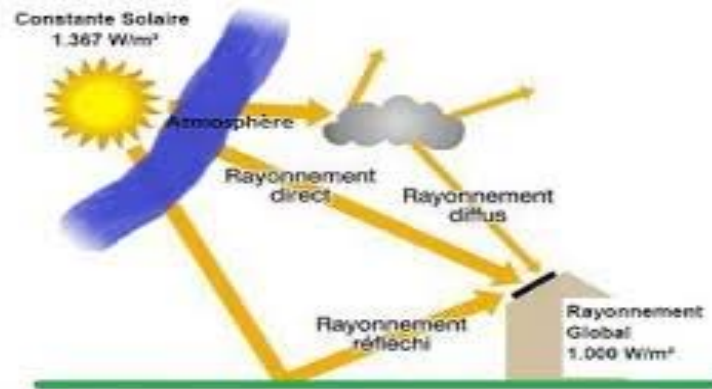


Figure 1. 3 : Les différents types du rayonnement solaire

## 1.2.4 Types de l'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie rayonnée par le soleil. Cette énergie est à l'origine de nombreux phénomènes physiques tels que la photosynthèse, le vent ou le cycle de l'eau. Elle vient de la fusion nucléaire se produisant au cœur du soleil. Il existe différents types d'énergies solaires :

- L'énergie passive
- L'énergie thermique
- L'énergie photovoltaïque
- L'énergie thermodynamique

### 1.2.4.1 Energie passive

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux. Cette énergie lumineuse du soleil fonctionne par la pénétration à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planches, est rejetée sous forme de chaleur.

### **1.2.4.2 Energie solaire thermique**

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique, c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau alimente - dans une étape suivante - des chauffe-eaux (pour l'eau sanitaire) et des systèmes de chauffages solaires.

### **1.2.4.3 Energie photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil aux cellules photovoltaïques. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique exposé à la lumière. Ces cellules se présentant sous forme de deux fines plaques regroupent ainsi, une source de courant continu et délivrent une tension continue à ces bornes.

### **1.2.4.4 Energie thermodynamique**

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe de base est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour produire de l'électricité au moyen d'une turbine thermique. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est importante.

### 1.3 Panneaux solaires photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque est un ensemble de plusieurs cellules associées en série et en parallèle, Ces derniers se sont des composants électroniques permettant de transformer l'énergie lumineuse en électricité [5].

#### 1.3.1 Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module. Les cellules individuelles sont généralement connectées dans une chaîne en série (typiquement 36 ou 72) pour atteindre la tension de sortie désirée. La puissance crête obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité. La courbe de la figure 1.4 montre les caractéristiques non linéaires du module photovoltaïque qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température. Cependant, plusieurs grandeurs électriques importantes décrivent le fonctionnement du module photovoltaïque :

- Le courant maximal ( $I_{sc}$ ). Il se produit lorsque les bornes du module sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- La tension à vide ( $V_{oc}$ ) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension du circuit ouvert.
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale du module) [6].

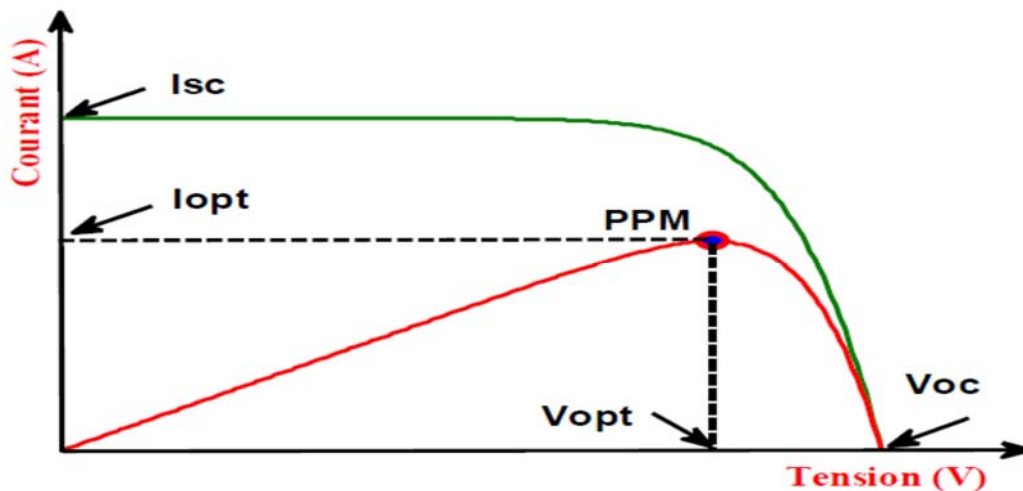


Figure 1. 4 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

### 1.3.2 Cellules PV

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » qui a été découvert par E. Becquerel en 1839 [6]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque est de créer un champ électrique interne.

Dans la figure 1.5 un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire. Elle se compose d'un abri du verre (**g**), un encapsulant (**e**), et un métal en arrière contact (**m**) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [7]. La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériau appelée l'énergie de bande gap ( $E_g$ ), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [8].

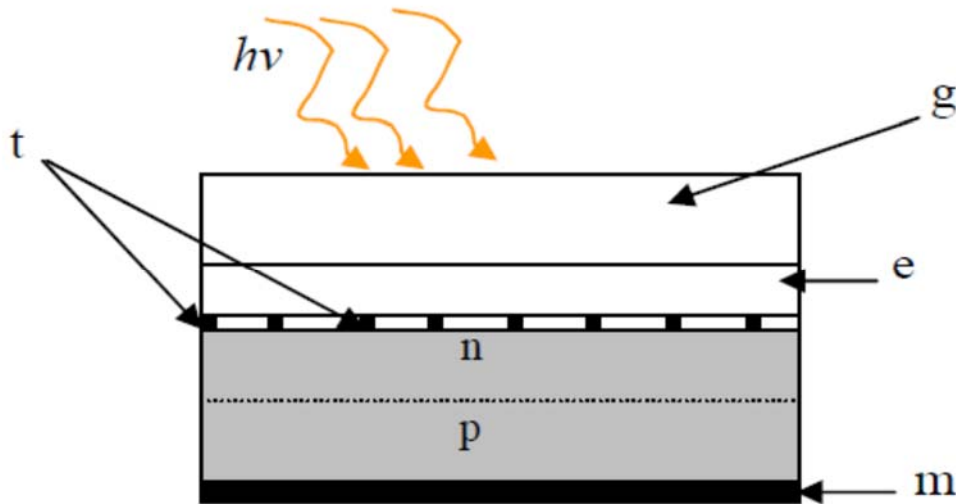


Figure 1.5 : Présentation schématique d'une cellule solaire

On distingue plusieurs types de cellules photovoltaïques :

### 1.3.2.1 Cellule en silicium poly cristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme de plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

**Avantages :**

- ✓ Bon rendement de conversion, environ 100 Wc/m<sup>2</sup>
- ✓ Moins cher que le monocristallin.

**Inconvénient :**

- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement.

### 1.3.2.2 Cellule en silicium monocristallin

Le silicium fondu se solidifie dimension. Ce cristal est découpé général d'un bleu uniforme.

**Avantages :**

- ✓ Bon rendement (environ 150 Wc/m<sup>2</sup>)

**Inconvénients :**

- ✓ Coût élevé.
- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement.

### 1.3.2.3 Cellule en silicium amorphe

Lors de sa transformation, le silicium produit un gaz qui se dépose sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée.

**Avantages :**

- ✓ Fonctionnement avec un éclairement faible.
- ✓ Moins chères que les autres.
- ✓ Possibilité d'intégration sur supports souples ou rigides.

**Inconvénients :**

- ✓ Rendement faible en plein soleil.
- ✓ Un rendement plus faible (environ 60 Wc/m<sup>2</sup>), ce qui nécessite de couvrir des surfaces plus importantes

### 1.3.3 Association des cellules PV

La cellule photovoltaïque génère 2,3 (Wc) sous une tension approximative de 0,5 Volt. Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications photovoltaïques domestiques ou industrielles. Afin d'obtenir une tension et une puissance considérable, plusieurs cellules photovoltaïques doivent être raccordées entre elles, soit en série et/ou en parallèle.

### 1.3.3.1 Association en série :

Lorsque l'on associe  $N_s$  cellules PV en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. La caractéristique I-V résultante de l'association de la Figure 1.6 est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension individuelle  $V_i$  par  $N_s$ . On note aussi que l'impédance optimale de l'association sera  $N_s$  fois plus grande que celle de la cellule de base [10].

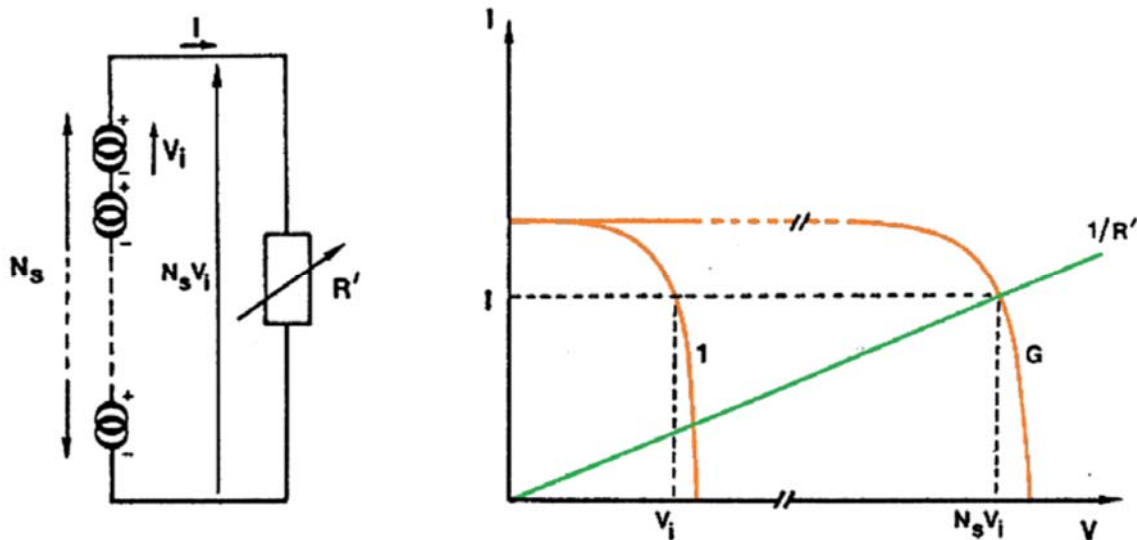


Figure 1.6 : Association de  $N_s$  cellules en série

Le courant généré par  $N_s$  cellules PV en série étant le même dans toute la branche et limité par le courant de la cellule la plus faible. On prendra soin de ne connecter en série que des cellules ayant la même densité de courant. C'est pour cela qu'en production, toutes les cellules sont testées et triées en fonction de leur rendement. Les résistances séries s'ajoutent et l'augmentation de la résistance série induit une perte de puissance. Il faut donc faire attention à la résistance d'interconnexion des cellules, dans une association en série. Le facteur de forme d'un module ne peut en général pas être meilleur que celui de ses cellules constitutives. Comme pour le courant, il se rapproche de celui de la plus mauvaise cellule. Les résistances parallèles s'ajoutent également.

### 1.3.3.2 L'association en parallèle

Cette fois-ci, c'est la tension de chaque cellule qui doit être identique, les courants s'ajoutant. La nouvelle courbe de la Figure 1.7 est obtenue en additionnant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule de base par  $N_p$ . L'impédance optimale de l'association sera  $N_p$  fois plus faible que celle d'une cellule individuelle [10].

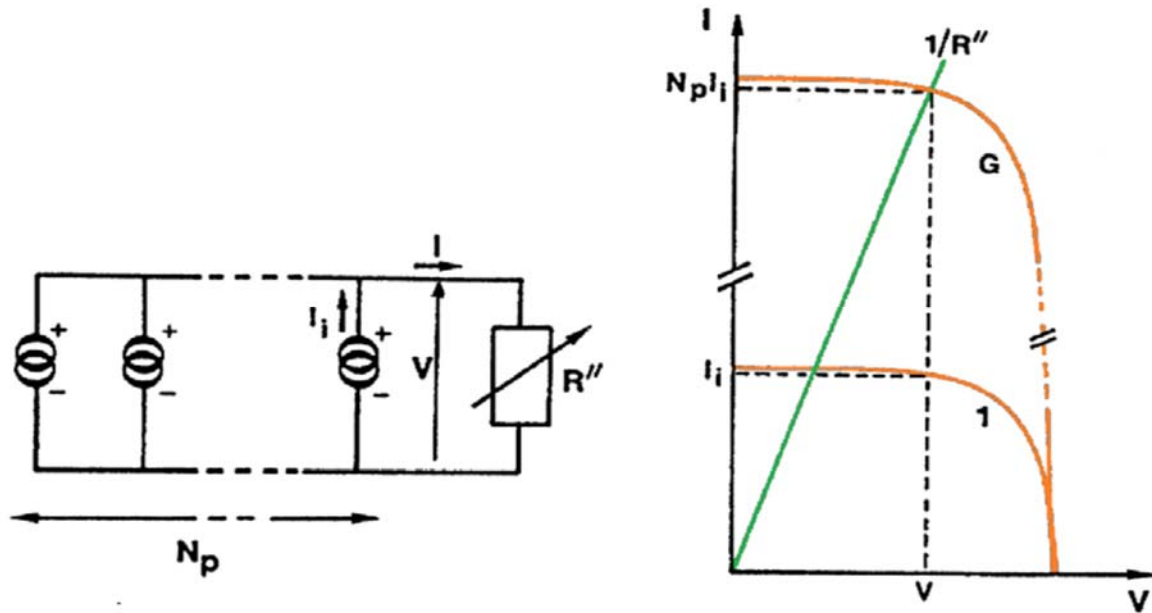


Figure 1.7 : Association de  $N_p$  cellules en parallèle

#### 1.4 Installations photovoltaïques

Généralement on peut définir trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau. Les deux premiers types sont indépendants du système de distribution d'électricité et se trouvent fréquemment dans les régions isolées.

##### 1.4.1 Systèmes autonomes

Dans les systèmes photovoltaïques qui fonctionnent indépendamment des réseaux électriques, l'énergie générée par les générateurs photovoltaïques est employée immédiatement (ventilation, pompage d'eau, ...etc.) ou emmagasinée dans des batteries [13]. La structure la plus simple des systèmes autonomes est le couplage direct où le générateur photovoltaïque est directement relié à la charge continue Figure 1.8. Dans cette configuration, la charge ne peut être opérationnelle que pendant les périodes d'ensoleillement suffisant. Ce qui est faisable pour des applications qui n'ont pas besoin de fonctionner la nuit ou dans l'obscurité comme le pompage de l'eau [13].

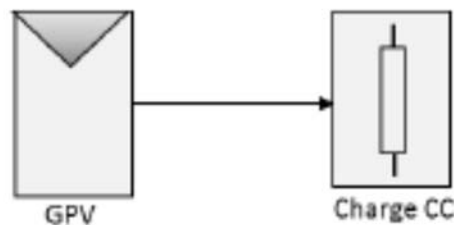
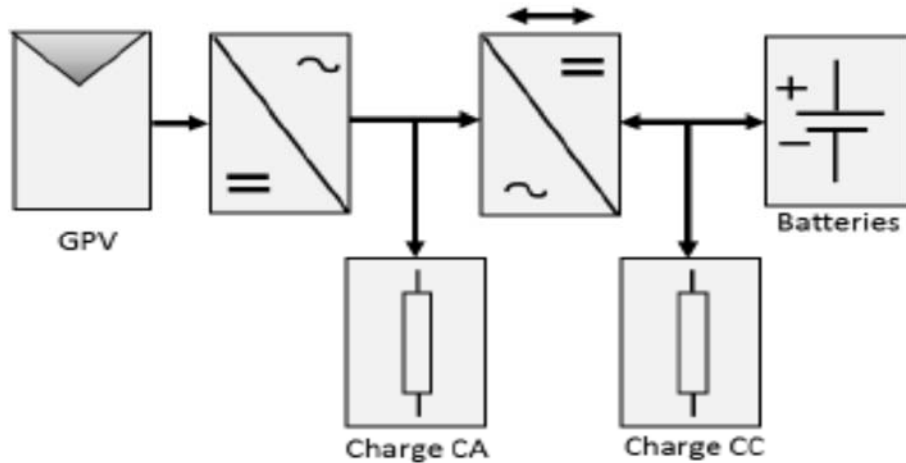


Figure 1.8 : Couplage direct générateur photovoltaïque-charge

Pour des applications qui ont besoin de l'énergie électrique même la nuit et lors des moments d'obscurité, un système de stockage peut être additionné au système. L'énergie générée par le générateur PV est stockée dans l'accumulateur d'énergie en vue d'être employée au moment du manque de l'éclairement. En effet, c'est presque toujours la batterie qui dure le moins longtemps dans une application photovoltaïque.

Deux configurations plus utilisées des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage d'énergie alimentant à la fois des charges CC et CA sont présentées dans les Figures 1.8 et 1.9. La différence entre les deux réside dans le fait que le générateur photovoltaïque est connecté à un convertisseur CC-CA pour la première, et à un convertisseur CC-CC pour la seconde [13].



**Figure 1.9 :** Système photovoltaïque autonome alimentant des charges CC et CA

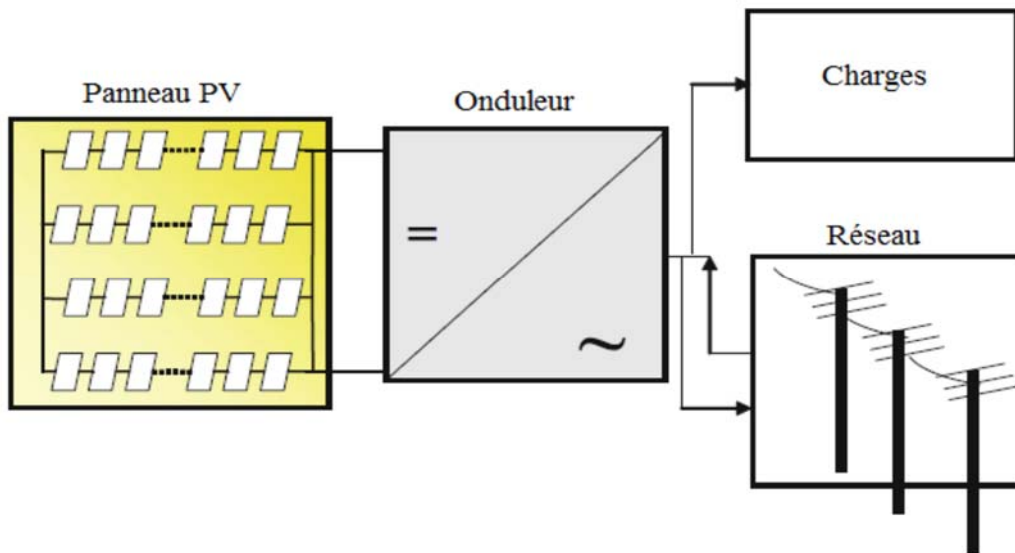
#### 1.4.2 Système PV raccordé au réseau électrique :

Ces systèmes fonctionnent en parallèle avec les réseaux électriques existants, permettant l'échange d'électricité vers et depuis le réseau. L'énorme avantage de cette solution, c'est l'absence de batterie, et l'injection de l'électricité est directement dans le réseau. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Le compteur marche alors dans les deux sens. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers des onduleurs. Un système PV connecté au réseau peut être subdivisé en deux systèmes:

- Systèmes PV centralisés.
- Systèmes PV décentralisés

### 1.4.2.1 : Systèmes PV décentralisés

Dans ces systèmes, le stockage d'énergie n'est pas nécessaire car le rayonnement solaire fournit de la puissance aux maisons, et s'il y a un surplus d'énergie, il peut être injecté dans le réseau figure 1.10. Dans ce cas, l'onduleur doit s'intégrer harmonieusement à l'énergie (tension et fréquence) fournie par le réseau. Pendant la nuit ou à des instants où la puissance PV est insuffisante, l'approvisionnement en électricité se fait directement du réseau électrique.



**Figure 1.10** : Système PV raccordé décentralisé

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.

### 1.4.2.1 : Systèmes PV centralisés

Ce sont des centrales photovoltaïques de puissance allant jusqu'à la gamme de MW. Avec ces systèmes, nous pouvons obtenir un réseau de moyenne ou haute tension. Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

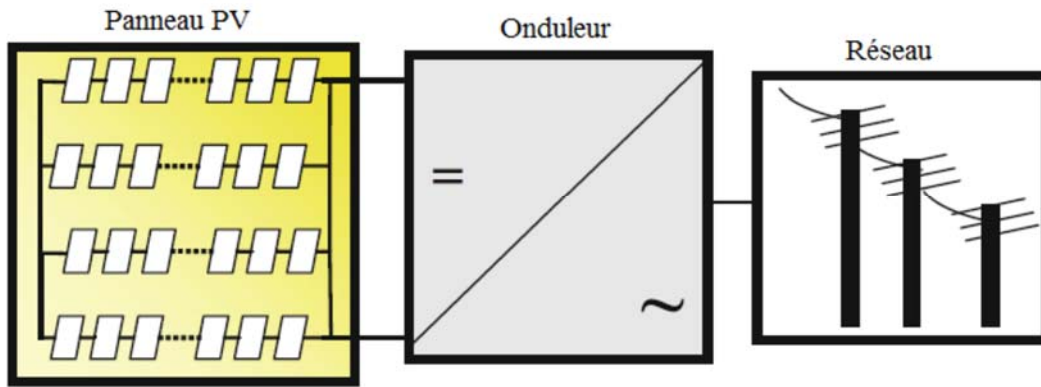


Figure 1.11 : Système PV centralisé

### 1.4.3 Système autonome hybride

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable avec une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif Figure 1.12 [14].

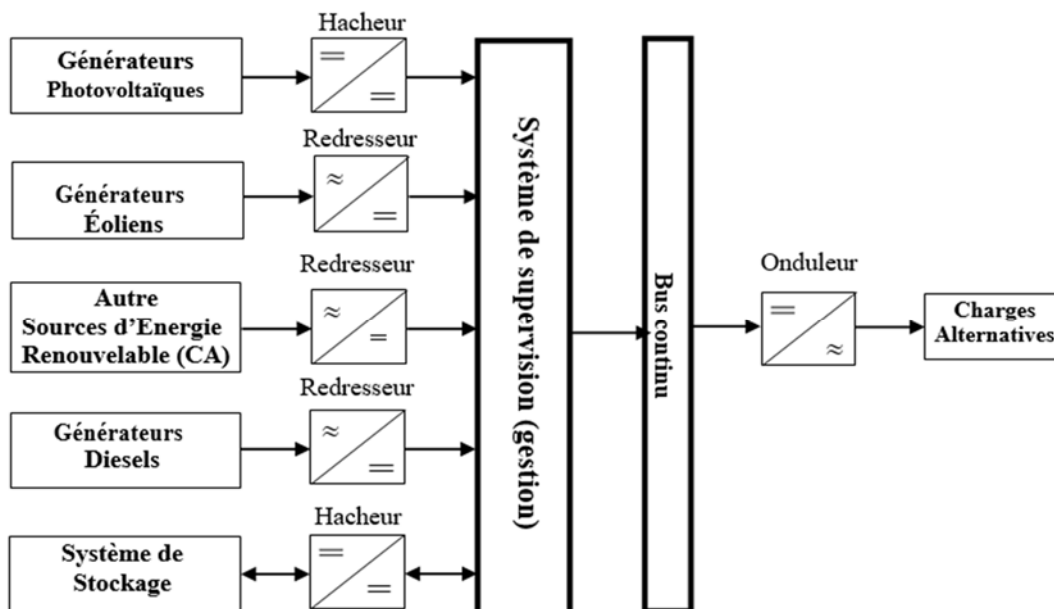


Figure 1.12 : Système hybride à bus continu

**Conclusion :**

Dans le présent chapitre, nous avons donné quelques notions relatives aux domaines de l'énergie solaire photovoltaïque, et nous avons rappelé quelques généralités sur le rayonnement solaire et le principe de conversion de l'énergie photovoltaïque. Nous avons aussi décrit les différentes possibilités d'associations de cellules photovoltaïques pour fabriquer un module PV. Dans la dernière partie, nous avons abordé les différentes architectures d'installations photovoltaïques qui existent, à savoir autonomes et connectées au réseau électrique.

## *Chapitre 2:*

*Etude et modélisation des convertisseurs DC/DC .*

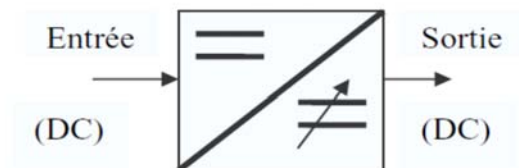
## Chapitre 2

*Etude et modélisation des convertisseurs DC/DC***2.1 Introduction**

La conversion continue-continue occupe une place très importante dans le domaine de l'électronique de puissance. En effet, y ' a des gros domaines d'utilisation des hacheurs. On mentionne par exemple les entraînements avec moteur à courant continu, les sous –stations à redresseur à traction à courant continu, ou la charge d'accumulateurs. Mais aussi les installations pour la recherche nucléaire nécessitent des alimentations en courant continu pour les divers aimants, pompes à faire le vide, on trouve aussi les hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ils permettent de rendre constante une tension d'entrée très versatile [15].

Dans ce chapitre, on présentera le convertisseur statique permettant la conversion continue-continue c'est le hacheur.

Un hacheur est un convertisseur statique, continu-continu. Il permet d'alimenter une charge sous une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue constante [16]. On représente le hacheur par le symbole suivant :



**Figure 2.1 :** Convertisseur continu-continu

Selon le modèle, un hacheur peut être abaisseur ou élévateur en tension (un quadrant), réversible en courant ou en tension (deux quadrants), ou en courant et tension (quatre quadrants). Ils peuvent être directs ou indirects.

**2.2 Les hacheurs directs**

Les hacheurs directs relient un générateur et un récepteur qui se comportent l'un comme une source de tension, l'autre comme une source de courant, conformément à la règle

d'alternance des sources. Ils ne comportent que des interrupteurs qui permettent d'agir sur les connexions entre le générateur et le récepteur.

On désignera par :

$u$  et  $i$ , la tension et le courant d'entrée,

$u'$  et  $i'$ , la tension et le courant de sortie,

$U$ ,  $I$ ,  $U'$  et  $I'$ , les valeurs moyennes de  $u$ ,  $i$ ,  $u'$  et  $i'$ .

Si on néglige les pertes à l'intérieur du hacheur, les puissances moyennes à l'entrée et à la sortie sont les mêmes dans un hacheur direct, puisqu'il n'y a pas d'élément interne de stockage, il en est de même des puissances instantanées :  $ui = u'i'$  [17].

### 2.2.1 Hacheur série

Le hacheur série, dit aussi abaisseur de tension ou buck converter, commande le début :

- d'un générateur de tension dont la tension est toujours positive,
- dans un récepteur de courant dont le courant ne peut devenir négatif. [17]

#### ❖ Principe de fonctionnement

On supposera d'abord que le générateur et le récepteur sont parfaits le premier fournit une tension  $U$  constante, le second absorbe un courant  $I'$  constant.

La figure 2.2.a explique avec deux interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  ce qu'on demandera aux semi-conducteurs de réaliser.

Les deux interrupteurs doivent être complémentaires (toujours un fermé, jamais les deux à la fois) pour que le générateur de tension ne soit pas court-circuité, et que le récepteur de courant ne soit pas mis en circuit ouvert.

- *Quand  $K_1$  est fermé,*

$$i_{k1} \text{ est égal à } I', i_{k2} \text{ nul, } u_{k1} \text{ nulle et } u_{k2} \text{ égale à } -U. \quad (2.1)$$

- *Quand  $K_2$  est fermé,*

$$i_{k1} \text{ est nul, } i_{k2} \text{ égal à } I', u_{k1} \text{ égale } +U \text{ et } u_{k2} \text{ nulle.} \quad (2.2)$$

Les branches de caractéristiques utilisées figure 2.2.c montrent que  $k_1$  doit être à ouverture et fermeture commandées, et que  $k_2$  être une simple diode.

Le schéma de principe est présenté sur la figure 2.2.b : le hacheur est formé d'un transistor  $T$  et d'une diode  $D$ .

La figure 2.2.d donne les formes d'ondes de la tension de sortie  $u'$ , du courant d'entrée  $i$ , des courants dans  $T$  et  $D$  et des tensions à leurs bornes.

- *Quand  $T$  est fermé :*

$$u' = U, \quad i = I' \quad (2.3)$$

$$u_T = 0, \quad i_T = I', \quad u_D = -U, \quad i_D = 0 \quad (2.4)$$

➤ Quand T est ouvert :

$$u' = 0, \quad i = 0 \quad (2.5)$$

$$u_T = +U, \quad i_T = 0, \quad u_D = 0, \quad i_D = I' \quad (2.6)$$

Si T est la période de fonctionnement et  $\alpha T$  la durée des intervalles de conduction du transistor, la tension de sortie  $u'$  a pour valeur moyenne :  $U' = \alpha U$

En faisant varier  $\alpha$  de 0 à 1, on fait varier  $U'$  de 0 à U. [17].

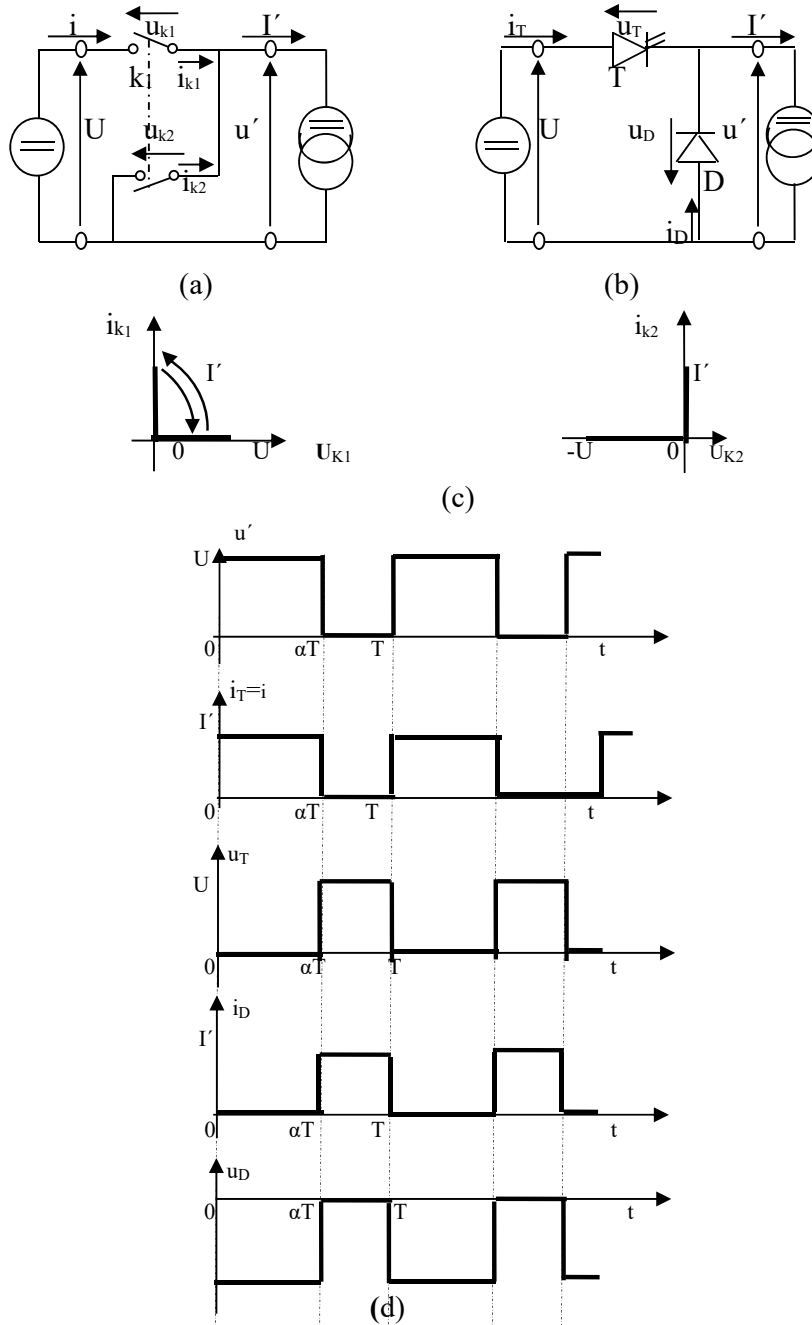


Figure 2.2 : Schémas et caractéristique d'un hacheur série

### 2.2.2 Hacheur parallèle

Le hacheur parallèle ou élévateur ou (boost converter) commande le débit

D'un générateur de courant dont le courant  $i$  est toujours positif,

Dans un récepteur de tension dont la tension  $u'$  ne peut devenir négative [17].

#### ❖ Principe de fonctionnement

La figure 2.3.a donne le schéma avec interrupteurs mécaniques

L'interrupteur  $k_1$  permet de relier l'entrée à la sortie ; l'interrupteur complémentaire  $k_2$  ferme le circuit du générateur de courant quand  $k_1$  est ouvert.

➤ Quand  $k_1$  est fermé :

$$u_{k_1} = 0, \quad i_{k_1} = I, \quad u_{k_2} = +U', \quad i_{k_2} = 0. \quad (2.7)$$

➤ Quand  $k_2$  est fermé :

$$u_{k_1} = -U', \quad i_{k_1} = 0, \quad u_{k_2} = 0, \quad i_{k_2} = I. \quad (2.8)$$

Les branches de caractéristiques utilisées figure (II.3.c) montrent qu'il faut remplacer  $k_1$  par une diode et  $k_2$  par un transistor. D'où le schéma de principe de la figure (2.3.b).

La figure 2.3.d donne les formes d'ondes des diverses variables.

Pour  $0 < t < \alpha T$ , le transistor conduit :

$$u = 0, \quad i' = 0 \quad (2.9)$$

$$i_D = 0, \quad u_D = -U', \quad i_T = I, \quad u_T = 0. \quad (2.10)$$

Pour  $\alpha T < t < T$ , la diode conduit :

$$u = U, \quad i' = I \quad (2.11)$$

$$i_D = I, \quad u_D = 0, \quad i_T = 0, \quad u_T = +U' \quad (2.12)$$

➤ La tension d'entrée  $u$  a pour valeur moyenne :

$$U = (1 - \alpha) U' \quad (2.13)$$

➤ Le courant de sortie  $i'$  a pour valeur moyenne :

$$I' = (1 - \alpha) I \quad (2.14)$$

Quand  $\alpha$  va de 1 à zéro,  $U$  va de 0 à  $U'$  et  $I'$  va de 0 à  $I$ . [17].

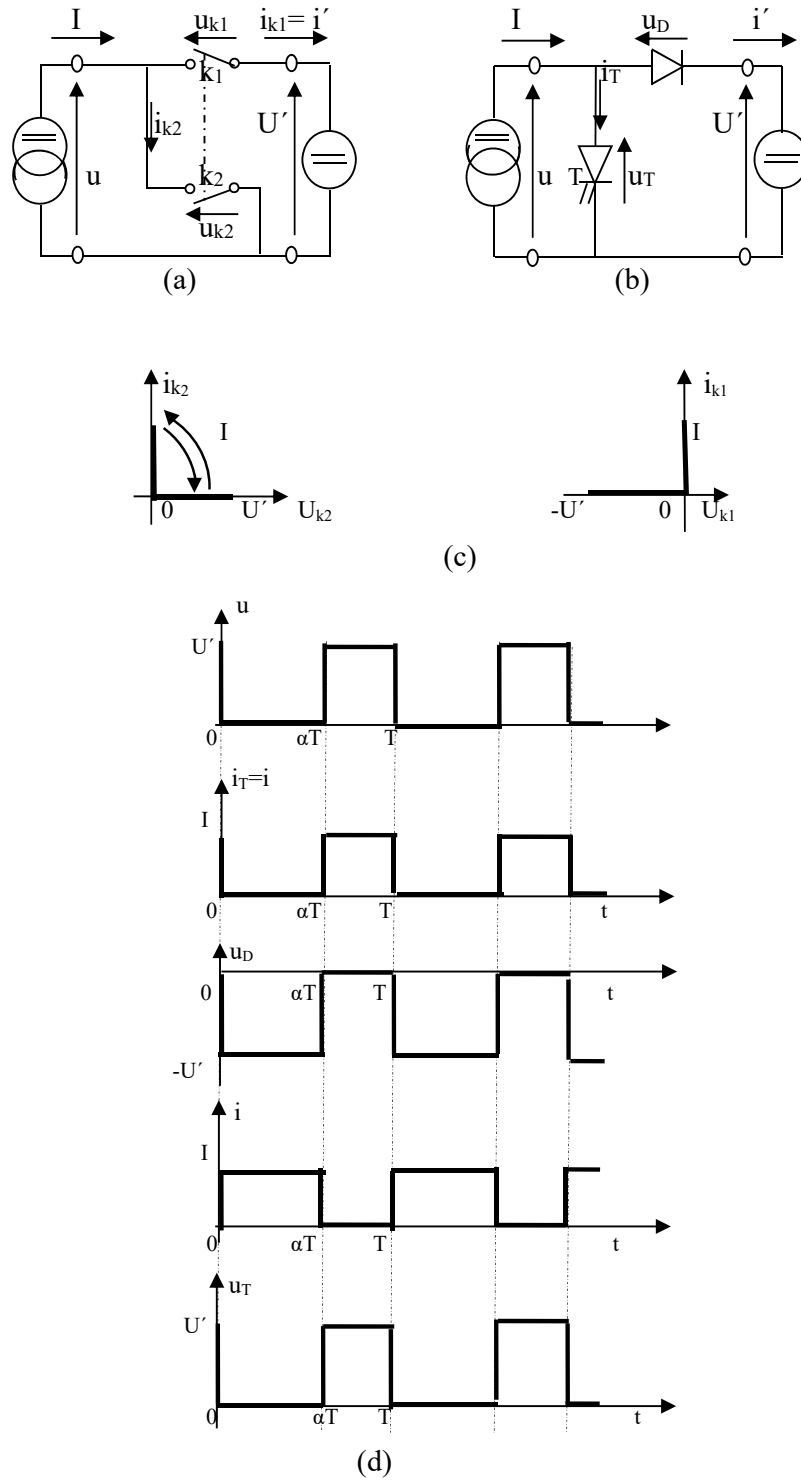


Figure 2.3 : Schémas et caractéristiques d'un hacheur parallèle

### 2.2.3 Hacheur réversible

#### 2.2.3.1 Hacheur réversible en courant

Avec un schéma à deux interrupteurs on peut commander le transfert de l'énergie dans les deux sens entre :

- Une source de tension
- Une source de courant

À condition que les deux sources présentent la ou les mêmes réversibilités (toutes deux réversibles en tension, ou en courant, ou en tension et en courant). [17].

#### ❖ Principe de fonctionnement :

Le schéma avec interrupteurs figure (2.4.a) est toujours le même :  $k_1$  permet de relier l'entrée et la sortie,  $k_2$  court-circuite la source de courant quand  $k_1$  est ouvert.

- *Quand  $I'$  est positif :*

Si  $k_1$  est fermé (état 1) :

$$u_{k_1} = 0, \quad i_{k_1} = I' > 0 \quad (2.15)$$

$$u_{k_2} = +U, \quad i_{k_2} = 0 \quad (2.16)$$

Si  $k_1$  est ouvert (état 2) :

$$u_{k_1} = +U, \quad i_{k_1} = 0 \quad (2.17)$$

$$u_{k_2} = 0, \quad i_{k_2} = -I' < 0 \quad (2.18)$$

- *Quand  $I'$  est négatif :*

Si  $k_1$  est fermé (état 3) :

$$u_{k_1} = 0, \quad i_{k_1} = I' < 0 \quad (2.19)$$

$$u_{k_2} = +U, \quad i_{k_2} = 0 \quad (2.20)$$

Si  $k_1$  est ouvert (état 4) :

$$u_{k_1} = +U, \quad i_{k_1} = 0 \quad (2.21)$$

$$u_{k_2} = 0, \quad i_{k_2} = -I' > 0. \quad (2.22)$$

On en déduit les branches de caractéristiques utilisées et les semi-conducteurs devant être substitués aux interrupteurs mécaniques :

- $k_1$  doit être remplacé par un transistor,  $T_1$  avec une diode  $D_1$  en parallèle inverse

De même  $k_2$  doit être remplacé par un transistor,  $T_2$  avec une diode  $D_2$  en parallèle inverse figure 2.4.c.

On voit que ce convertisseur résulte de l'association d'un hacheur série, formé par  $T_1$  et  $D_2$ , et d'un hacheur parallèle formé par  $T_2$  et  $D_1$  figure 2.4.b.

- Pour  $I'$  positif, il fonctionne en hacheur série ; le courant  $I'$  passant tantôt par  $T_1$ , tantôt par  $D_2$ . Si  $\alpha_1$  est la durée relative de la fermeture de  $T_1$  pendant chaque période,  $u'$  a pour valeur moyenne :  $U' = \alpha_1 U$ .

- Pour  $I'$  négatif, il fonctionne en hacheur parallèle ; le courant  $I'$  passant tantôt par  $T_2$ , tantôt par  $D_1$ . Si  $\alpha_2$  est la durée relative des intervalles de fermeture de  $T_2$ ,  $u'$  a pour valeur moyenne :  $U' = (1 - \alpha_2) U$ . [17].

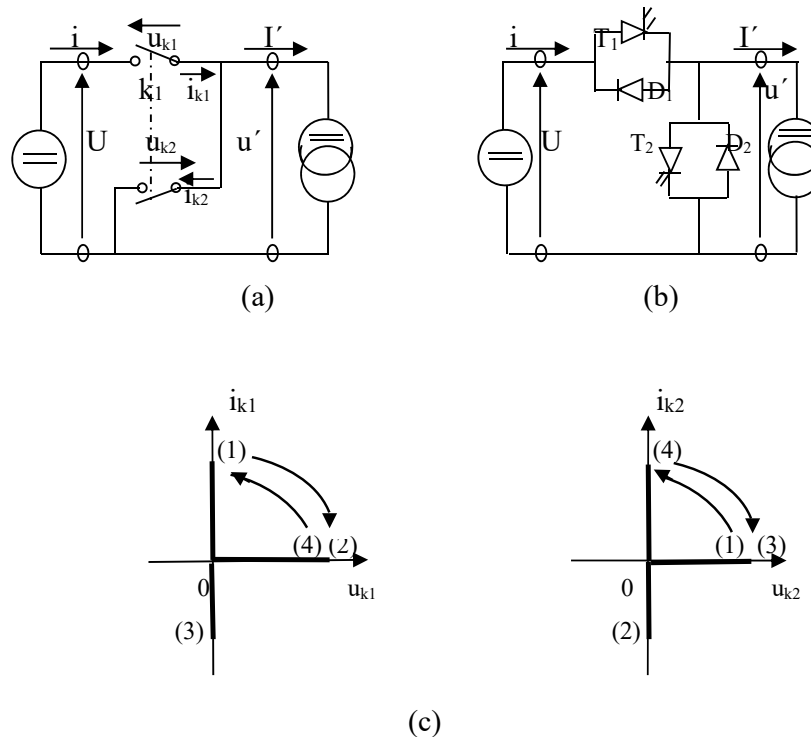


Figure 2.4 : Hacheur réversible en courant

### 2.2.3.2 Hacheur réversible en tension

Le courant  $I'$  est toujours positif.

➤ Quand la tension  $U$  est positive :

$k_1$  fermé,  $k_2$  ouvert :  $i_{k1} = I' > 0$  ;  $u_{k2} = -U < 0$  (état1)

$k_1$  ouvert,  $k_2$  fermé :  $u_{k1} = U > 0$  ;  $i_{k2} = I' < 0$  (état2)

➤ Quand la tension  $U$  est négative :

$k_1$  fermé,  $k_2$  ouvert :  $i_{k1} = I' > 0$  ;  $u_{k2} = -U > 0$  (état3)

$k_1$  ouvert,  $k_2$  fermé :  $u_{k1} = U < 0$  ;  $i_{k2} = I' > 0$  (état4)

Les deux interrupteurs  $k_1$  et  $k_2$  doivent être réalisés avec deux semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandées figure 2.5.a, aptes à bloquer des tensions inverses,  $T_1$  et  $T_2$ , comme indiqué sur le schéma de principe figure 2.5.b

Si la tension  $U$  est positive, on retrouve le fonctionnement du convertisseur série, si la tension  $U$  est négative celui du convertisseur parallèle figure 2.5.c. [17].

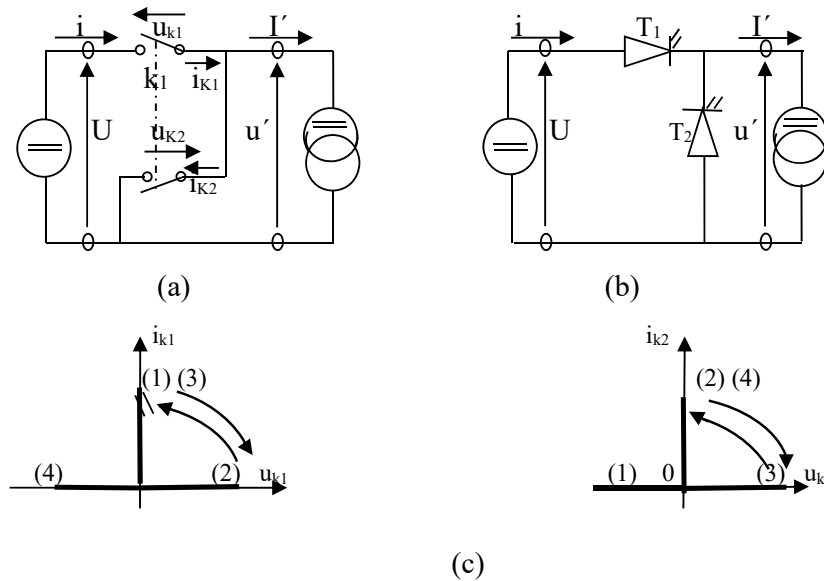


Figure 2.5 : Hacheur réversible en tension

### 2.2.3.3 Hacheur réversible en tension et en courant (pont)

La structure à quatre interrupteurs ou en pont figure 2.6.a offre plus possibilités que celle à deux interrupteurs car elle permet de relier chacune des bornes de sortie à chacune des bornes d'entrée ou de les séparer.

Puisque, par moments, le hacheur relie directement, les sources d'entrée et de sortie doivent encore être de natures différentes, l'une de tension, l'autre de courant. Mais on peut commander le transfert entre sources de réversibilités différentes.

La commande des interrupteurs,  $k_1$  et  $k'_1$  d'une part, et  $k'_2$  d'autre part, doit être complémentaire pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit et la source de courant jamais en circuit ouvert. [17].

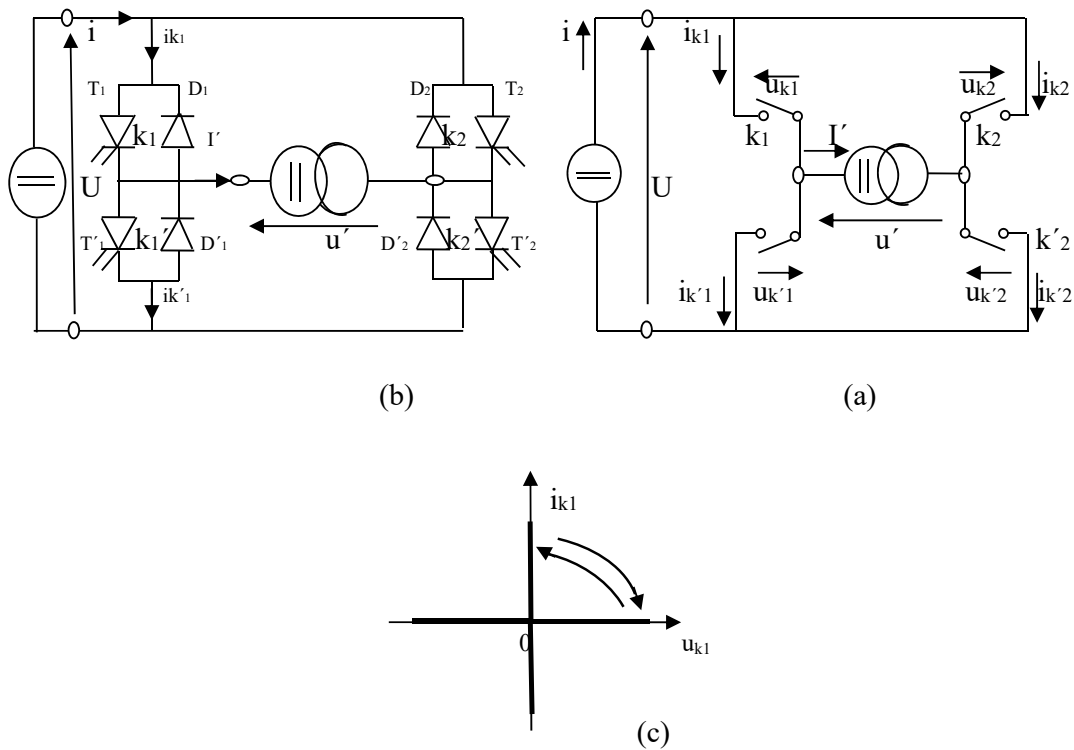


Figure 2.6 : Hacheur en pont

Parmi les nombreuses possibilités offertes par la structure en pont, l'une de plus utilisées correspond au hacheur reliant :

- une source de tension réversible en courant :

$$U > 0, i > 0 \text{ ou } i < 0$$

- une source de courant réversible en courant et en tension

$$I' > 0 \text{ ou } I' < 0, u' > 0 \text{ ou } u' < 0.$$

Nous nous limiterons à l'étude de ce cas et désignerons par  $U'$  la valeur moyenne de la tension  $u'$ .

❖ **Principe de fonctionnement :**

Considérons les divers régimes imposés à l'interrupteur  $k_1$  :

- Quand  $k_1$  est fermé avec  $I'$  positif,  $i_{k1} = I'$  est positif ;
- Quand  $k_1$  est fermé avec  $I'$  négatif,  $i_{k1} = I'$  est négatif ;
- Quand  $k_1$  est ouvert,  $u_{k1} = U$  est positif ;

Il faut pouvoir fermer et ouvrir  $k_1$ .

La figure (2.6.c) montre les trois branches de caractéristiques sur lesquelles a pouvoir travailler  $k_1$  et les commutations qu'il peut avoir à effectuer.

Pour les trois autres interrupteurs on trouverait exactement la même chose. Chaque interrupteur doit donc être réalisé avec un semi-conducteur à fermeture et ouverture commandées du type transistor et une diode montée en parallèle inverse. D'où le schéma de la figure 2.6.b [17].

### 2.3 Hacheurs à liaisons indirectes

Pour commander le transfert d'énergie entre deux sources de même nature, sans changer la nature de l'une d'elles, il faut utiliser un hacheur à liaison indirecte.

Les hacheurs indirects relient un générateur et un récepteur de même nature.

Ils comportent des interrupteurs et un élément de stockage d'énergie qui joue le rôle d'une source intermédiaire de courant ou de tension suivant que générateur et récepteur sont des sources de tension ou de courant. L'élément de stockage reçoit de l'énergie du générateur puis la transmet au récepteur en fonction des connections établies par les interrupteurs. [17].

#### 2.3.1 Hacheur à stockage inductif :

Lorsque le hacheur est monté entre un générateur de tension et un récepteur de tension, l'élément de stockage doit être une inductance qui joue le rôle d'une source de courant reliée à l'entrée ou à la sortie. [17].

##### ❖ Principe de fonctionnement :

La figure 2.7.a donne le schéma avec interrupteurs mécaniques  $k_1$  et  $k_2$  de ce hacheur souvent appelé abaisseur-élevateur ou (buck-boost convertter). Les deux interrupteurs doivent être complémentaires pour que les deux sources de tension ne soient jamais reliées directement et pour que l'inductance  $L$  ne soit jamais en circuit ouvert.

La tension  $U'$  doit être positive dans le sens indiqué pour que, en régime périodique, la tension aux bornes de  $L$  ait une valeur moyenne nulle figure 2.7.c.

➤ *Quand  $k_1$  est fermé :*

$$U_{k_1} = 0, \quad i_{k_1} = i_L, \quad u_{k_2} = -(U + U'), \quad i_{k_2} = 0 \quad (2.23)$$

➤ *Quand  $k_2$  est fermé :*

$$U_{k_1} = +(U + U'), \quad i_{k_1} = 0, \quad U_{k_2} = 0, \quad i_{k_2} = i_L, \quad (2.24)$$

Il faut donc remplacer  $k_2$  par une diode  $D$  et  $k_1$  par un semi-conducteur à fermeture et ouverture commandées  $T$  figure 2.7.b. [17].

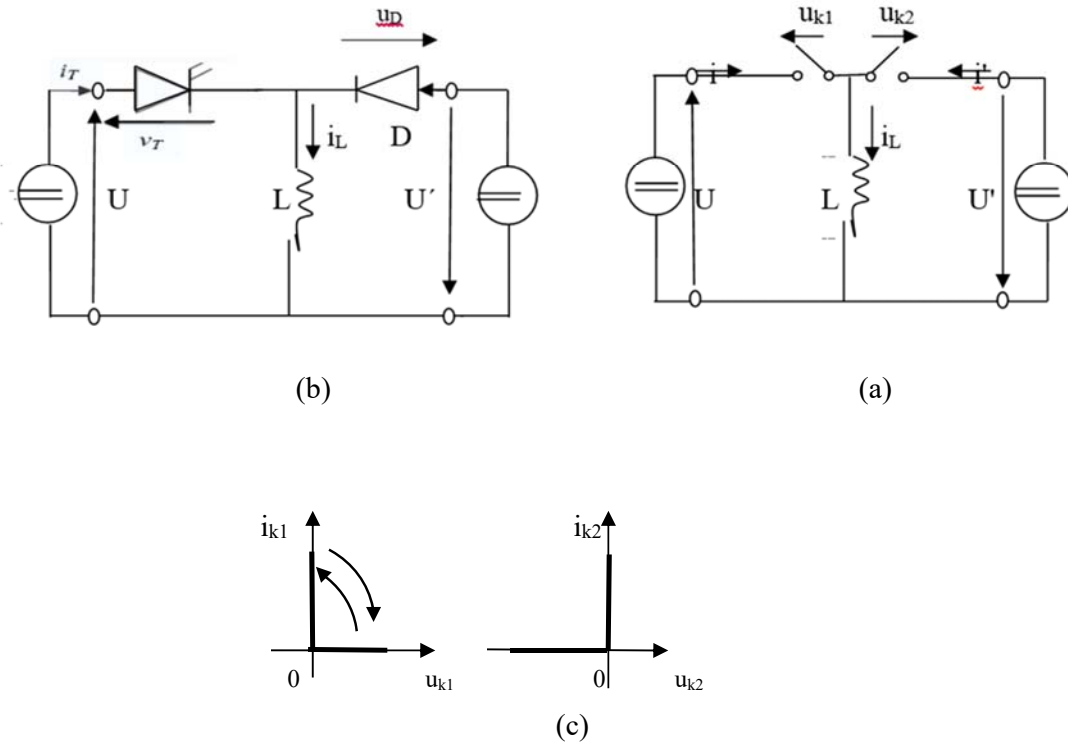


Figure 2.7 : Hacheur à stockage inductif

❖ Les formes d'ondes

On arrive ainsi au schéma et aux formes d'ondes de la figure (2.7.d). Ces dernières ont été tracées en tenant compte de la valeur finie de l'inductance  $L$ .

Pour  $0 < t < \alpha T$ ,  $T$  conduit :

$$i = i_T = i_L, \quad i' = 0, \quad u_D = -(U + U') \quad (2.25)$$

Puisque  $L \left( \frac{di_L}{dt} \right) = U$ ,  $i_L$  croît linéairement.

Pour  $\alpha T < t < T$ ,  $D$  conduit :

$$i_L = i' = i_D, \quad i = 0, \quad u_T = +(U + U') \quad (2.26)$$

Puisque  $L \left( \frac{di_L}{dt} \right) = -U$ ,  $i_L$  décroît linéairement.

En régime établi, le courant  $i_L$  a la même valeur moyenne  $i_L$  pendant les deux intervalles, d'où les valeurs moyennes  $I$  et  $I'$  des courants d'entrée :

$$I = \alpha I_L, \quad I' = (1 - \alpha) I_L \quad (2.27)$$

Si on néglige les pertes à l'intérieur du hacheur, la puissance moyenne (elle non plus la puissance instantanée) est la même à l'entrée et à la sortie.

De  $U'I' = UI$  on déduit : 
$$\frac{U'}{U} = \frac{I}{I'} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \tag{2.28}$$

Si  $\alpha$  varie de 0 à 1,  $\frac{U'}{U}$  varie théoriquement de 0 à l'infini. [17].

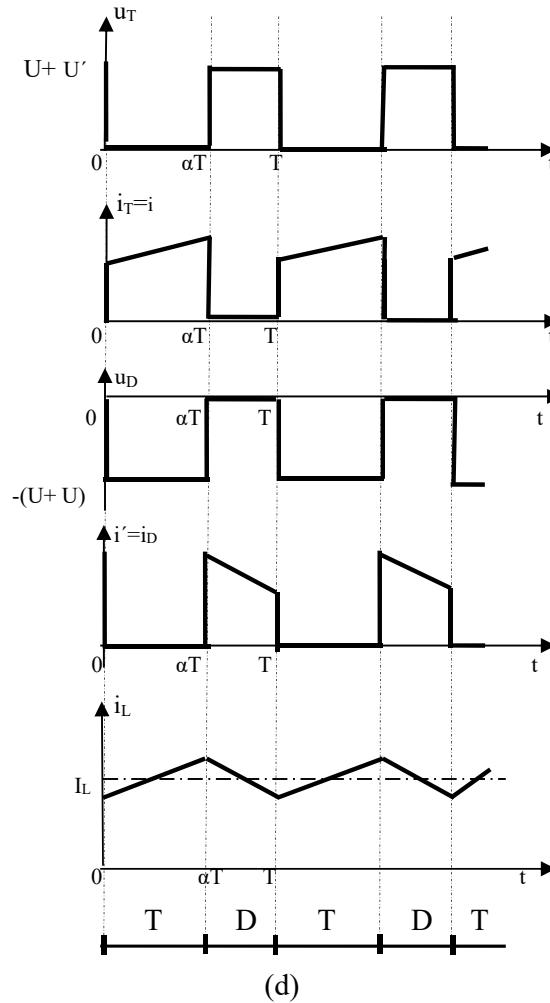


Figure 2.7 : Hacheur à stockage inductif

### 2.3.2 Hacheur à stockage capacitif

Si le hacheur doit relier deux sources de courant, l'élément d'accumulation doit être un condensateur. (Hacheur de cuk ou cuk convertter), il joue le rôle de source de tension intermédiaire. [17].

#### ❖ Principe de fonctionnement

La figure 2.8.a donne le schéma à deux interrupteurs  $k_1$  et  $k_2$ . Ceux-ci doivent être complémentaires. Des branches de caractéristiques utilisées on déduit que  $k_1$  doit être remplacé par un semi-conducteur à fermeture et ouverture commandées T, et que  $k_2$  doit être remplacé par une diode D. figure 2.8.b. [17].

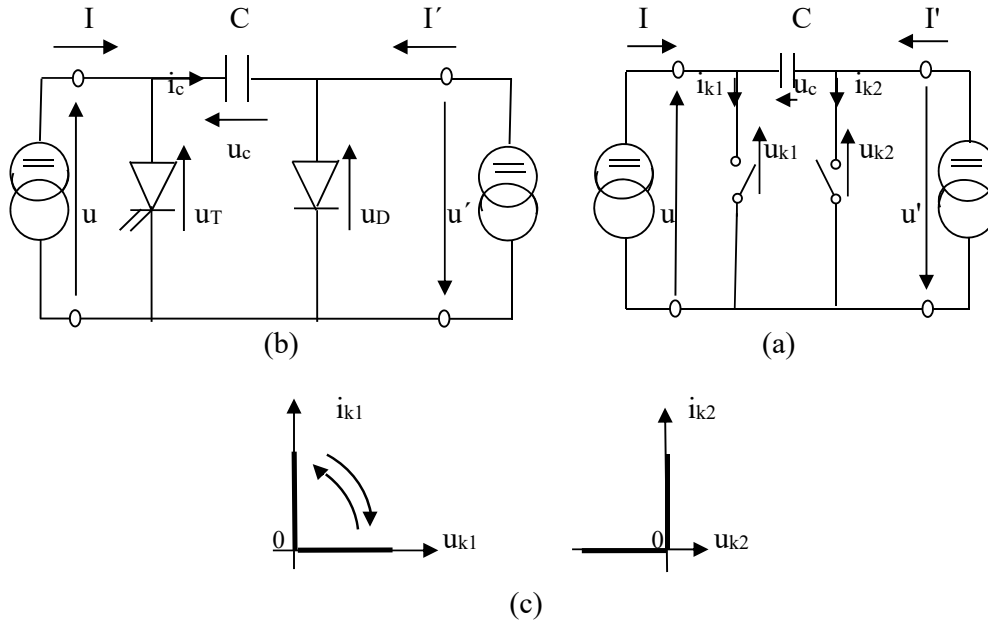


Figure 2.8 : Hacheur à stockage capacitif

❖ Les formes d'ondes

Pour  $0 < t < \alpha T$ , le semi-conducteur commandé conduit ; le condensateur alimente le récepteur à courant  $I'$  constant, la tension  $u_c$  diminue linéairement :

$$u = 0, \quad u' = u_c$$

$$i_c = -I', \quad \frac{du_c}{dt} = -\frac{I'}{c} \quad (2.29)$$

$$i_T = I + I', \quad u_T = 0, \quad i_D = 0, \quad u_D = -u'. \quad (2.30)$$

Pour  $\alpha T < t < T$ , la diode conduit ; le générateur charge le condensateur à courant  $I$  constant, la tension  $u_c$  croit linéairement :

$$U = u_c, \quad u' = 0$$

$$i_c = I, \quad \frac{du_c}{dt} = \frac{I}{c} \quad (2.31)$$

$$i_T = 0, \quad u_T = u_c, \quad i_D = I + I', \quad u_D = 0. \quad (2.32)$$

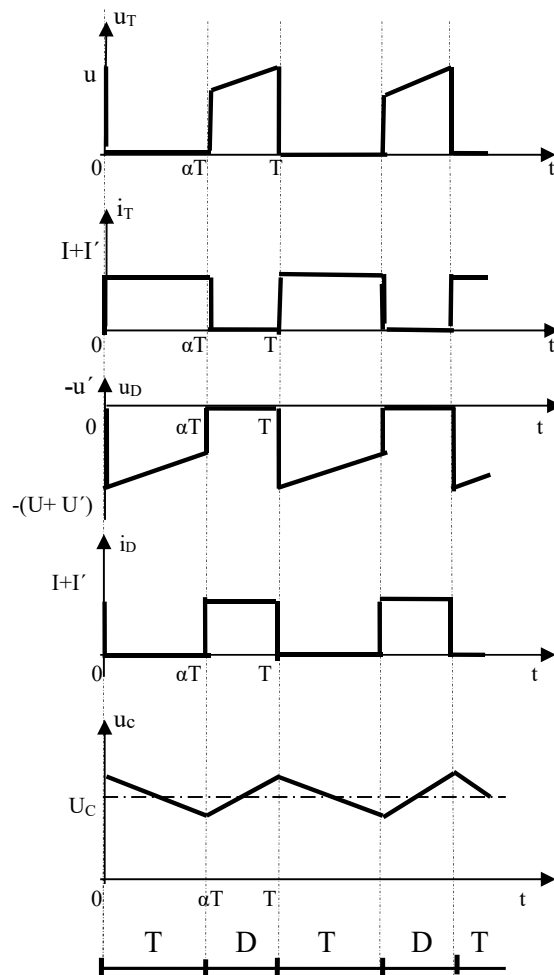
En régime établi, la valeur moyenne  $U_c$  de la tension aux bornes de C est la même pendant sa décharge et pendant sa charge. D'où les valeurs moyennes  $U$  et  $U'$  des tensions d'entrée et de sortie :

$$U' = \alpha U_c, \quad U = (1 - \alpha)U_c \quad (2.33)$$

Si on néglige les pertes à l'intérieur du hacheur, les puissances moyennes à l'entrée et la sortie sont les mêmes :

$$\frac{U'}{U} = \frac{I}{I'} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (2.34)$$

D'ordinaire le générateur est circuit RLE, de la résistance R négligeable, qui impose en régime permanent  $U=E$  et le récepteur est caractérisé par une relation  $U' = U'(I')$ . dans ce cas en agissant sur  $\alpha$ , on impose la valeur de la tension appliquée au récepteur  $U' = \frac{\alpha E}{1-\alpha}$  ; le récepteur réagit en imposant alors  $I'$ . Figure (2.8.d). [17].



(d)

Figure 2.8 : Hacheur à stockage capacitif

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement aux structures des convertisseurs DC-DC, tel que le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur.., On a présenté aussi les modélisations des convertisseurs DC-DC dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur.

A decorative border resembling a scroll, with rounded corners and a slight shadow effect, framing the text.

## *Chapitre 3:*

# *Modélisation et simulation du générateur PV.*

## Chapitre 3

### *Modélisation et simulation du générateur PV*

#### 3.1 Introduction

La modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV) est une phase indispensable dans l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Il existe plusieurs modèles mathématiques décrivant le générateur photovoltaïque. L'objectif de la modélisation est la détermination des caractéristiques courant-tension et puissance-tension du générateur sous conditions climatiques changeables (température et éclairement).

Les modèles les plus utilisés sont :

1. modèle mathématique (idéale)
2. modèle à une seule diode
3. modèle à deux diodes

Dans ce chapitre nous examinerons les formules mathématiques « modèles » de la cellule et du générateur photovoltaïque (GPV) à une seule exponentielle, puis nous présenterons l'implémentation de ces modèles sous MATLAB/SUMILINK. Les résultats de simulation effectuée seront présentés puis interprétés.

#### 3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Une évaluation de fonctionnement de modules PV et la conception de systèmes d'énergie sont basées sur la caractéristique électrique courant-tension des modules sous différents niveaux de rayonnement et différentes températures de la cellule PV. La modélisation des cellules PV et des modules peut être effectuée au moyen d'équations qui fournissent différents degrés d'approximation du dispositif réel.

Plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature afin de simuler les cellules PV opérant dans diverses conditions. La complexité des modèles dépend de nombre de paramètres à identifier. Chaque modèle est essentiellement une amélioration du modèle idéal qui contient une source de courant représentant la puissance solaire incidente et une diode qui représente la jonction

PN. Des éléments supplémentaires peuvent être ajoutés pour mieux rendre compte de la description du comportement de la cellule PV dans certains quadrants de fonctionnement [21].

Le modèle à une diode est le modèle le plus répandu. Il est utilisé pour les cellules PV et les modules PV en raison de sa simplicité et sa bonne précision dans le quadrant de production d'énergie.

La figure (3.1) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule :

- La résistance série ( $R_s$ ) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- La résistance shunt ( $R_p$ ) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

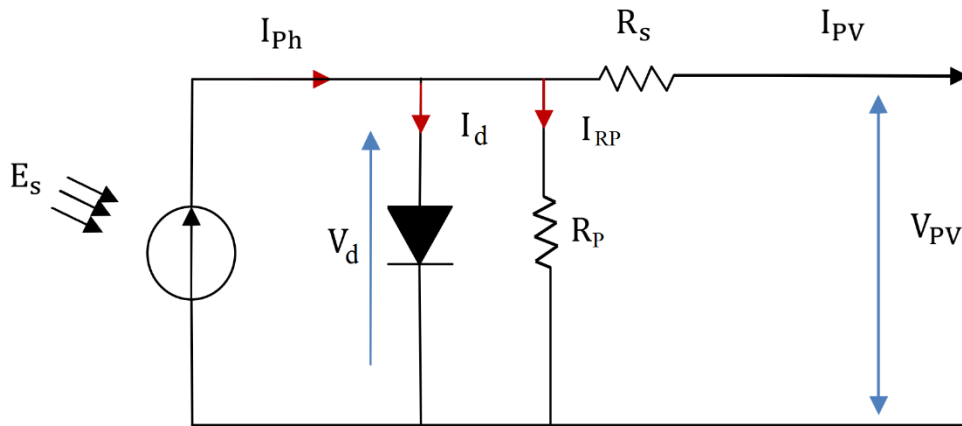


Figure 3.1 Schéma équivalent électrique de la cellule PV

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{(V_{pv} + (I_{pv} \times R_s))}{\lambda \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \quad (3.1)$$

Où

- ✓  $I_{sat}$  est le courant de saturation,
- ✓  $K$  est la constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K),
- ✓  $T$  est la température effective des cellules en Kelvin (k),
- ✓  $e$  est la charge de l'électron ( $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  C),
- ✓  $n$  est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ),
- ✓  $I_{pv}$  est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,
- ✓  $V_{pv}$  est la tension aux bornes de cette même cellule,
- ✓  $I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit),
- ✓  $R_p$  est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,
- ✓  $R_s$  est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

### 3.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension ( $I=f(V)$ ) ou de l'équation caractéristique, qui permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ces paramètres sont les suivantes :

#### 3.3.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_p$  infinie), ce courant se confond avec la photo courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (3.1), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{I_{cc} \cdot R_s}{\lambda \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{(I_{cc} \cdot R_s)}{R_p} \quad (3.2)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{I_{pv} \cdot R_s}{\lambda \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right]$ , devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right)} \quad (3.3)$$

3.3.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt, Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{V_{ov}}{\lambda.K.T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{ov}}{R_p} \tag{3.4}$$

3.4 Modèle idéal avec une seule diode (ISDM)

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électronique équivalent de la figure 3.2.

Nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant d'une source du courant et une diode en parallèle. La source du courant  $I_{ph}$  représente le photo- courant (génééré) et la branche de diode un courant  $I_d$ .

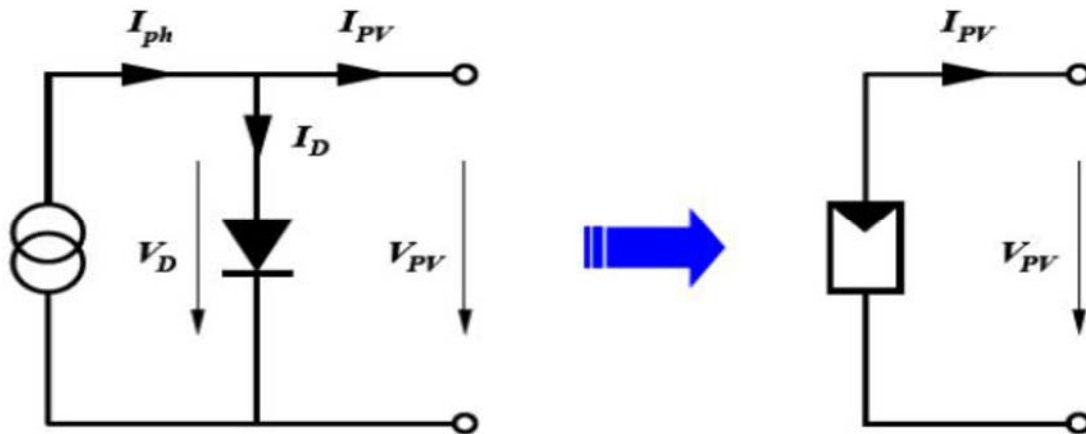


Figure 3-2. Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Le courant délivré par la cellule photovoltaïque éclairée sur une charge  $R$  s'écrit :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \tag{3.5}$$

$I_{ph}$ : photo- courant généré.

$I_D$ : Courant traversant la diode.

$$I_D = I_S \left[ e^{\left( \frac{V_D}{V_S} \right)} - 1 \right] \tag{3.6}$$

$$V_D = \frac{KT}{q} \quad (3.7)$$

$q$  : charge de l'électron.

$K$  : la constante de Boltzmann.

$VT$  : tension thermique.

$I_s$  : courant de saturation.

$V_D$  : tension à la borne de la diode.

$T$  : température absolue (en kelvin).

Dans l'obscurité, une cellule solaire organique suit le comportement d'une diode classique. Selon que la tension appliquée est supérieure ou inférieure à une tension de seuil, la diode est respectivement passante ou bloquante. Le courant  $I_D$  dans la diode suit une équation de type Schottky

$$I_D = I_s \left[ e^{\left(\frac{V_D}{nKT}\right)} - 1 \right] \quad (3.9)$$

Avec  $I_s$  : le courant de saturation sous polarisation inverse ;  $q$  : la charge de l'électron ;  $k$  : la constante de Boltzmann ;  $T$  : la température et  $n$  : le facteur d'idéalité ( $1 < n < 2$ , le cas idéal étant  $n=1$ ).

D'où

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ e^{\left(\frac{V_D}{nKT}\right)} - 1 \right] \quad (3.10)$$

### 3.4.1 Identification des paramètres dans les conditions standards STC

Lorsque la borne du circuit équivalent de figure 3.2 est court-circuitée, le courant de diode  $i_d$  est égal à zéro. La valeur du courant photonique  $i_{ph}$  est égale au courant de court-circuit  $I_{SCS}$  disponible dans la fiche technique du produit. Lorsque le circuit est ouvert, le courant de sortie de la cellule PV  $i_{pv}$  est égal à zéro. La valeur du courant de diode  $i_d$  devient égale au courant  $i_{ph}$  qui est  $I_{SCS}$  dans les conditions STC. Cela peut être exprimé par l'équation (3.6) qui comprend deux paramètres inconnus de  $I_{SS}$  et  $A_n$ :

$$i_{SCS} = i_{SS} \left[ e^{\left(\frac{v_{OCS}}{v_{TCS} A_n}\right)} - 1 \right] \quad (3.11)$$

Où  $V_{TCS}$  est la tension thermique dans les conditions STC, qui est constante et exprimée par la formule (3.7).

$$v_{TCS} = \frac{kT_{CS}}{q} \quad (3.12)$$

En utilisant l'équation (3.5), les caractéristiques (I–V) du point de puissance maximale (MPP) sont donc exprimées dans les conditions STC par l'équation (3.8).

$$i_{MS} = i_{SCS} - i_{ss} \left[ e^{\left( \frac{v_{MS}}{v_{TCS} A_n} \right)} - 1 \right] \quad (3.13)$$

Les paramètres inconnus  $i_{ss}$  et  $A_n$  peuvent être déterminés en résolvant les deux équations non linéaires (3.6) et (3.8). Ils peuvent également être combinés pour former une seule équation :

$$\frac{e\left(\frac{v_{MS}}{v_{TCS} A_n} - 1\right) - 1}{e\left(\frac{v_{OCS}}{v_{TCS} A_n} - 1\right) - 1} = 1 - \frac{i_{MS}}{i_{SCS}} \quad (3.14)$$

Nous définissons une nouvelle variable  $A_{inv}$  comme la réciproque de  $A_n$ :

$$A_{inv} = \frac{1}{A_n} \quad (3.15)$$

L'équation (3.9) peut être réorganisée dans l'équation (3.11) qui est une équation non linéaire.

$$f(A_{inv}) = e^{C_1 A_{inv}} - C_3 e^{C_2 A_{inv}} - 1 + C_3 = 0 \quad (3.16)$$

Où les constantes sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} C_1 = \frac{v_{MS}}{v_{TCS}} \\ C_2 = \frac{v_{OCS}}{v_{TCS}} \\ C_3 = 1 - \frac{i_{MS}}{i_{SCS}} \end{cases} \quad (3.17)$$

Nous utilisons la méthode de Newton – Raphson pour résoudre l'équation (3.11). La dérivation de  $f(A_{inv})$  est exprimée par l'équation (3.13):

$$f'(A_{inv}) = C_1 A_{inv} e^{C_1 A_{inv}} - C_3 C_2 A_{inv} e^{C_2 A_{inv}} \quad (3.18)$$

Les valeurs de  $A_n$  étant généralement comprises entre 1 et 2,  $A_{inv}$  peut s'attribuer une valeur initiale de 0,7. La tolérance choisie est ( $Err = 10^{-6}$ ). L'itération numérique Newton – Raphson est donnée par l'équation (3.14).

$$A_{inv}(n+1) = A_{inv}(n) - \frac{f[A_{inv}(n)]}{f'[A_{inv}(n)]} \tag{3.19}$$

L'organigramme itératif conçu pour l'identifier les paramètres est illustré sur la figure 3.3. La valeur de  $A_{inv}$  est continuellement mise à jour jusqu'à ce que la sortie de  $f(A_{inv})$  soit proche de zéro, et la valeur résultante de  $A_n$  représente, par conséquent, le facteur d'idéalité ISDM.

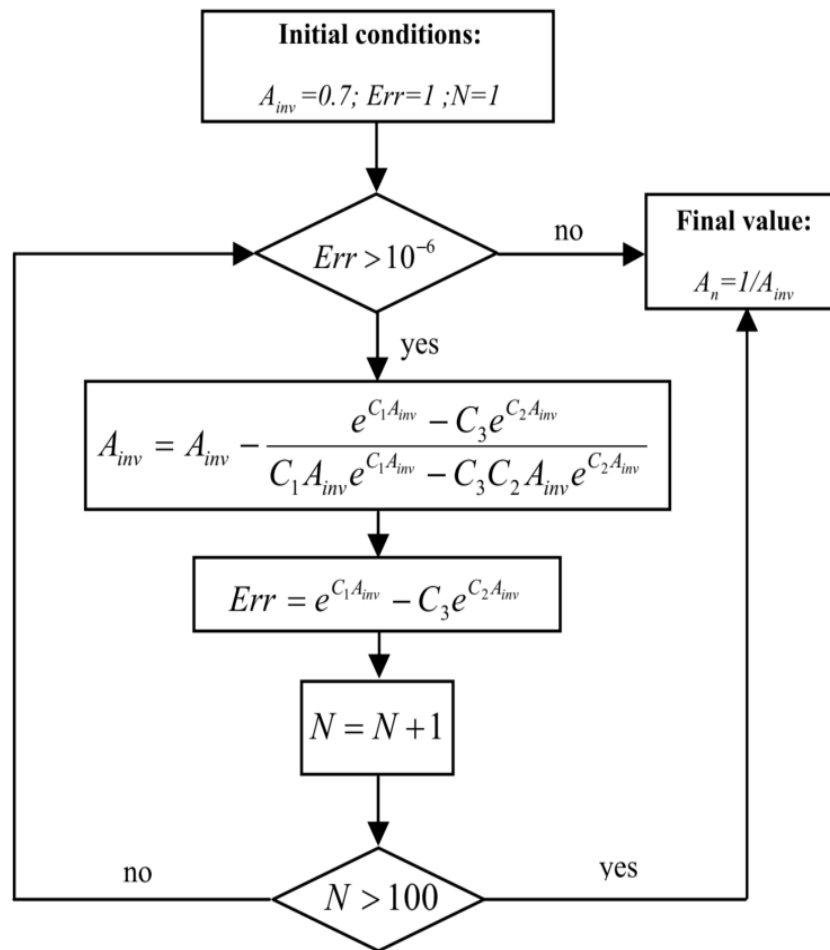


Figure 3.3. Organigramme itératif de la méthode Newton – Raphson

### 3.4.2 Caractéristique (I-V) avec variations de l'éclairement et la température

En réalité, les caractéristiques (I-V) du modèle de simulation devraient répondre aux variations à la fois de la température interne de la cellule et l'éclairement solaire. Le fabricant des cellules photovoltaïques

fournit généralement des coefficients de correction par des tests expérimentaux. Les coefficients de température pour le courant de sortie PV, la tension et la puissance sont notés respectivement  $\alpha_T$ ,  $\beta_T$  et  $\lambda_T$ . En partant de l'hypothèse que le facteur d'idéalité  $A_n$  est constant quelles que soient les variations environnementales, l'expression de  $i_{ph}$  devrait être [13]:

$$i_{ph}(G, \Delta T) = \frac{G}{G_{STC}} i_{SCS} (1 + \alpha_T \Delta T) \quad (3.20)$$

Où  $G$  est le rayonnement solaire actuel et  $G_{STC}$  est le rayonnement solaire dans les conditions STS.  $\Delta T$  est la différence entre la température de la cellule TC et la température TCS dans les conditions STC qui est de 25 ° C ou 298 K. La correction de la tension en circuit ouvert pour l'éclairement solaire et les variations de température de la cellule est donnée par l'équation (3.21):

$$v_{OC}(G, \Delta T) = v_{OCs} (1 + \beta_T \Delta T) v_T \quad (3.21)$$

La valeur du courant de saturation de la diode  $i_s(G, \Delta T)$  peut être déterminée à partir des conditions du circuit ouvert, car le courant  $i_{ph}$  est égal au courant de diode  $i_d$ :

$$i_s(G, \Delta T) = \frac{i_{ph}(G, \Delta T)}{e^{\left[ \frac{qv_{oc}(G, \Delta T)}{kT_c A_n} \right]} - 1} \quad (3.22)$$

L'équation donnant les caractéristiques (I–V) de la cellule photovoltaïque avec les variations de la température de la cellule et d'éclairement solaire peut s'écrire :

$$i_{pv} = i_{ph}(G, \Delta T) - \underbrace{i_s(G, \Delta T)}_{i_d(G, \Delta T)} \left[ e^{\left( \frac{qv_{pv}}{kT_c A_n} \right)} - 1 \right] \quad (3.23)$$

La tension  $V_{pvM}$  et le courant  $I_{pvM}$  du module photovoltaïque sont donnés en fonction de la tension  $V_{pv}$  et du courant  $I_{pv}$  par les relations suivantes :

$$I_{pvM} = N_S I_{pv} \quad (3.24)$$

$$V_{pvM} = N_p V_{pv} \quad (3.25)$$

Où  $N_s$  est le nombre de cellules en série et  $N_p$  est le nombre de cellules parallèles. Les paramètres de la cellule PV peuvent être estimés à l'aide des spécifications du module PV indiquées dans le tableau 1 de l'annexe.

### 3.4.3 Schéma bloc de simulation

La figure 3.4 représente le schéma bloc de simulation du panneau photovoltaïque.

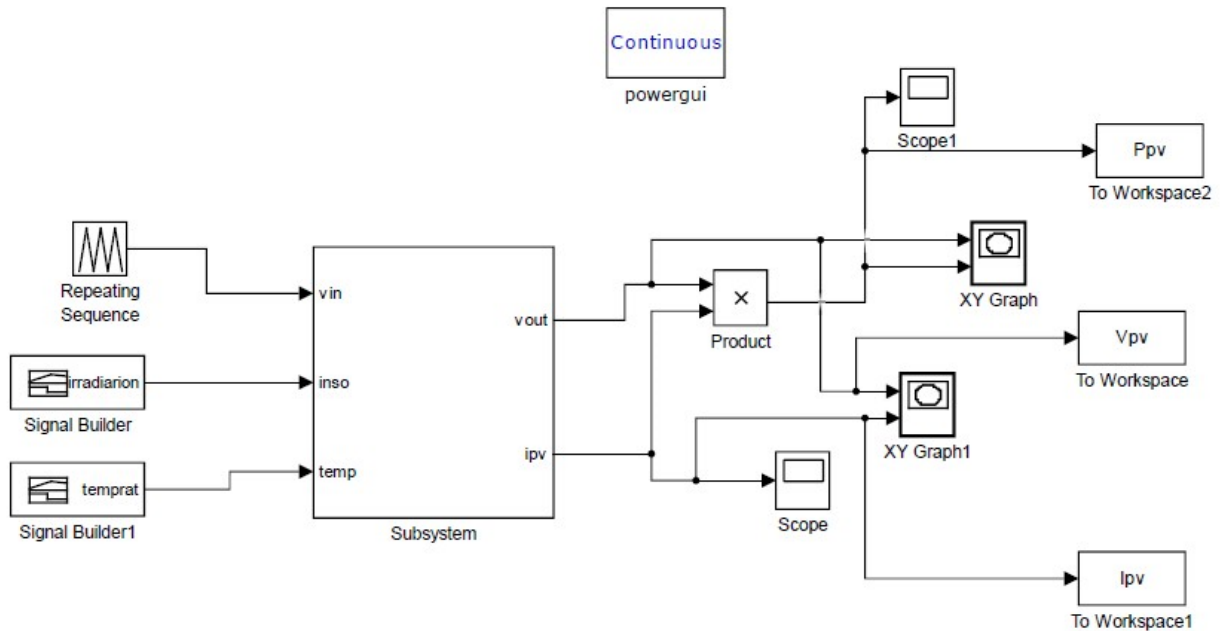


Figure 3.4. Schéma bloc de simulation du panneau PV

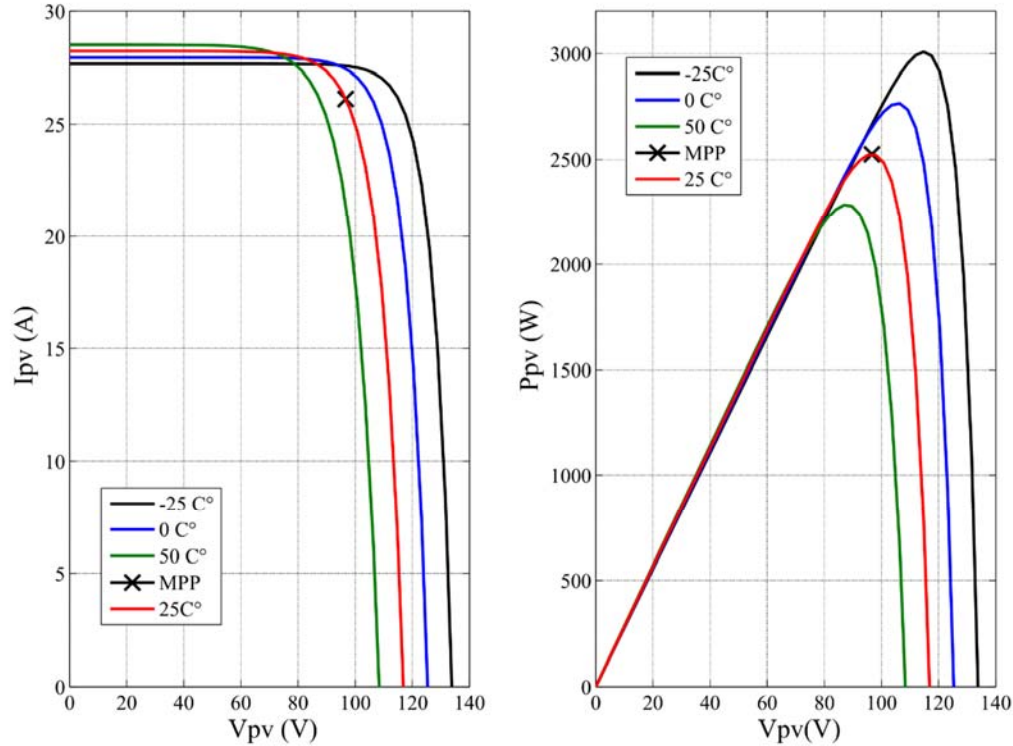
### 3.4.4 Résultats de simulation

Les figures (3.5) et (3.6) représentent les courbes des sorties ( $I_{PV} - V_{PV}$ ) et ( $P_{PV} - V_{PV}$ ) qui illustrent l'impact de changement de la température et l'éclairement solaire, respectivement.

#### 3.4.4.1 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV, La figure (3.5) montre l'influence de la température sur les caractéristiques du panneau PV lors du changement de la température. Le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution en fonction de la tension pour différentes valeurs de

température, ceci montre que la puissance délivrée par le module, et la tension de circuit ouvert sont inversement proportionnels avec la température interne du module.

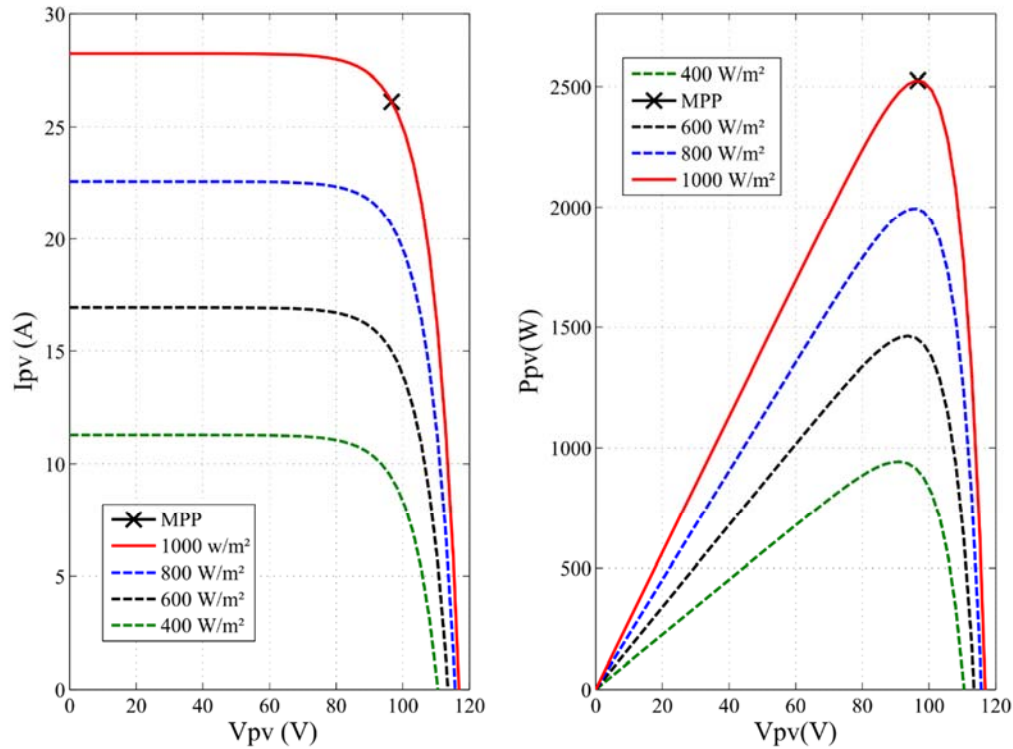


**Figure 3.5.** Influence de la température sur les caractéristique  $I_{PV}=f(V_{PV})$  et  $P_{PV}=f(V_{PV})$

### 3.4.4.2 Influence de l'éclairement

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. En effet, le photo-courant est proportionnel à l'éclairement, par contre le courant à travers la diode qui n'est que le photo-courant à l'obscurité, reste inchangé aux variations de ce dernier.


La figure (3.6) montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du panneau PV lors de variation de l'éclairement. Sous une température de référence constante 25 °C, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement, car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique. La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque augmente proportionnellement avec l'éclairement solaire.



**Figure 3.6.** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I_{PV}=f(V_{PV})$  et  $P_{PV}=f(V_{PV})$

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque qui nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. Ensuite nous avons fait la simulation de notre panneau photovoltaïque ce qui permet de tracer ces caractéristiques pour les différents paramètres influents (température et éclairement), avec l'interprétation des différents graphes obtenus. A partir de ces dernières nous avons montré l'influence des paramètres externes (température et éclairement) sur le rendement du panneau photovoltaïque, puis nous avons constaté que les changements climatiques ont la plus grande influence sur ce dernier.



***Chapitre 4:***  
***Etude comparative des algorithmes P&O et INC-Cond***  
***du système PV autonome.***

## Chapitre 4

### *Etude comparative des algorithmes P&O et Inc-Cond du système PV autonome*

#### 4.1 Introduction

L'augmentation sans cesse croissante de la demande en énergie électrique, ont largement stimulé la recherche des nouvelles sources d'énergie illimitées telles que l'énergie solaire. La technologie photovoltaïque (PV) est basée sur la conversion directe du rayonnement solaire en courant direct (DC) à l'aide des cellules photovoltaïques, Le champ d'application de cette innovation technologique est très vaste avec différentes configurations autonomes ou reliées au réseau de distribution. Le problème majeur de cette technologie (PV) réside dans la conception et la réalisation des systèmes photovoltaïques permettant d'assurer le bon fonctionnement des modules photovoltaïques dans des conditions optimales, qui dépendent directement aux conditions climatiques, telles que le rayonnement solaire et la température, Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance optimale. Pour cela, on insère, entre le générateur photovoltaïque (GPV) et le système d'exploitation, des convertisseurs statiques commandés permettant d'extraire le maximum de puissance du générateur. Ces commandes sont couramment appelées MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dans ce chapitre nous décrivons les étapes de dimensionnement et de contrôle d'un système d'alimentation photovoltaïque (PV) autonome avec stockage d'énergie.

Les objectifs principaux de cette étude portés dans ce dernier chapitre sont :

- l'optimisation de la puissance issue du générateur PV.
- Le contrôle de la tension de la batterie.
- Contrôle le transfère l'énergie PV à la batterie (chargement et déchargement) et à la charge.
- Le contrôle permanence par un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) avec deux algorithmes, méthode de Perturbation et Observation (P&O) et méthode de la conductance incrémentale (Inc-Cond) associées à un hacheur abaisseur. Celui-ci assure le couplage entre le GPV et la charge.
- Contrôle l'état de charge de la batterie, afin d'éviter une éventuelle surcharge et le décharge profonde de ce dernier.

Notre système PV que nous étudierons est composé de neuf modules PV positionné en trois chaînes.

## 4.2 Système photovoltaïque autonome étudié

Notre système que nous allons étudier et analyser et simulé est illustré par le circuit équivalent sur la figure 4.1. Le convertisseur abaisseur est le contrôleur de charge qui transfère la puissance du générateur photovoltaïque à la batterie et alimente la charge.

Le circuit équivalent de la batterie est formé par une source de tension  $V_{OC}$  en série avec une résistance  $R_{bat}$ , et une capacité équivalente aux bornes du bloc batterie  $C_{BAT}$ . Le courant de charge  $I_{load}$  désigne toutes les charges continues raccordées aux bornes de la batterie [22].

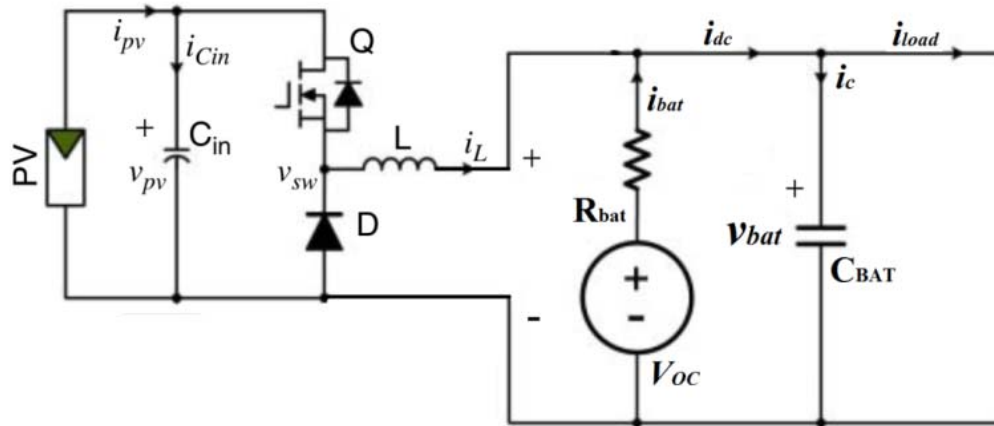


Figure 4.1. Circuit équivalent du système PV étudié

## 4.3 Dimensionnement du convertisseur DC/DC

Le circuit équivalent de notre système photovoltaïque que nous allons étudier représenté par la figure 4.1 comporte l' hacheur de tension DC-DC est contrôlé par la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion), dans laquelle le rapport cyclique  $D$  est choisi comme étant la variable de contrôle du système dans laquelle le rapport cyclique  $D$  est choisi comme étant la variable de contrôle du système. Une topologie abaisseur doit être envisagée si la tension de sortie du convertisseur n'est jamais supérieure à la tension aux bornes du générateur PV ( $V_{MPP}$ ), lorsque la variation de tension des deux côtés a été prise en compte. La condition de fonctionnement peut être exprimée par  $V_o (\max) \leq V_{MPP} (\min)$ , avec  $V_o$  est la tension à vide de la batterie, et  $V_{MPP} (\min)$  désigne la valeur la plus basse de la tension aux bornes du générateur PV au point de fonctionnement optimum MPP qui peut être estimée à partir de la température ambiante la plus élevée et de l'éclairement minimal. La valeur la plus élevée de la tension de sortie,  $V_o (\max)$ , peut être déterminée à partir du profil de charge. Pour les applications de charge de batterie, la tension de batterie

devient la tension de sortie du convertisseur  $V_o$ , qui varie de la tension de coupure à 0% de l'état de charge (SOC) jusqu'à la tension du circuit ouvert qui correspond à 100% de l'état de charge [22].

#### 4.3.1 Calcul de l'inductance $L$ et le condensateur $C_{in}$

Dans les conditions de fonctionnement standards (STC) de température et éclairage solaire, et à la fréquence de commutation prédéfinie  $f_{sw}$ , le courant d'ondulation de l'inductance et la tension d'ondulation au niveau de la liaison PV doivent être spécifiés par les valeurs de crête à crête,  $\Delta I_L$  et  $\Delta V_{PV}$ , respectivement. L'analyse en régime permanent peut déterminer le rapport cyclique au point de fonctionnement nominal. Dans les conditions de fonctionnement STC, le générateur photovoltaïque doit être exploité au voisinage du point de fonctionnement optimum MPP, qui est représenté par la tension  $V_{MPP}$  et le courant  $I_{MPP}$ . Le rapport cyclique nominal peut être calculé par la formule (4.1) [22].

$$D_0 = \frac{V_{0-NOM}}{V_{MPP}} \quad (4.1)$$

La tension nominale  $V_{0-NOM}$  qui correspondant au mode de fonctionnement continu du convertisseur (CCM) peut être spécifiée à partir du profil de charge. La valeur de l'inductance,  $L$ , et la capacité,  $C_{in}$ , peuvent être calculées en utilisant les équations (4.2) et (4.3), respectivement [12]:

$$L = \frac{V_{0-NOM} (1 - D_0)}{\Delta I_L f_{sw}} \quad (4.2)$$

$$C_{in} = \frac{I_{MPP} (1 - D_0)}{\Delta V_{pv} f_{sw}} \quad (4.3)$$

En appliquant les lois de base de Kirchhoff de la figure 4.1, la dynamique du système peut être révélée en mode de fonctionnement CCM. Lorsque la tension de la liaison PV est la variable de contrôle, la tension de sortie  $V_o$  est supposée constante pour la modélisation dynamique. Sur la base de l'état de conduction du dispositif de commutation  $Q$ , on distingue deux cas :

$Q$  à l'état passant (ON)

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{pv} - v_o \quad (4.4)$$

$$C_{in} \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \quad (4.5)$$

Q à l'état bloqué (OFF)

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_0 \quad (4.6)$$

$$C_{in} \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} \quad (4.7)$$

### 4.3.2 Modélisation dynamique

Le générateur PV et les circuits de conditionnement de puissance sont non linéaires. À partir de l'expression dynamique de l'état de commutation ON/OFF, un modèle moyenné peut être dérivé en utilisant la méthode de moyen-âge de l'espace d'états, et de la technique de linéarisation pour dériver des modèles linéaires pour l'analyse dynamique et la synthèse du régulateur. L'approche de cette méthode exige que la fréquence du dispositif de commutation soit beaucoup plus élevée que la dynamique critique du système, qui est formée par des composants de stockage d'énergie, tels que le condensateur et l'inducteur. Dans cette condition, la dynamique de commutation non linéaire peut être négligée pour l'analyse dynamique et la synthèse du contrôleur. Au cours d'un cycle de commutation, le modèle d'espace d'état du système peut être dérivé de l'état ON/OFF de l'interrupteur Q. La valeur moyenne des signaux continus peut être utilisée pour former un modèle dynamique sans avoir besoin de représenter les ondulations de commutation. La dynamique du système peut être exprimée sous une forme générale montrant la dynamique du courant de l'inducteur et de la tension de la liaison PV [22].

$$\frac{di_L}{dt} = f(i_L, v_{pv}, d) \quad (4.8)$$

$$\frac{dv_{pv}}{dt} = g(i_L, v_{pv}, d) \quad (4.9)$$

Le modèle linéaire peut être dérivé par un processus de linéarisation :

$$\frac{d\tilde{i}_L}{dt} = \left. \frac{\partial f}{\partial v_{pv}} \right|_{SS} \tilde{v}_{pv} + \left. \frac{\partial f}{\partial i_L} \right|_{SS} \tilde{i}_L + \left. \frac{\partial f}{\partial d} \right|_{SS} \tilde{d} \quad (4.10)$$

$$\frac{d\tilde{v}_{pv}}{dt} = \left. \frac{\partial g}{\partial v_{pv}} \right|_{SS} \tilde{v}_{pv} + \left. \frac{\partial g}{\partial i_L} \right|_{SS} \tilde{i}_L + \left. \frac{\partial g}{\partial d} \right|_{SS} \tilde{d} \quad (4.11)$$

Où,  $\tilde{v}_{pv}$ ,  $\tilde{i}_L$ , et  $\tilde{d}$  représentent les petits signaux en régime permanent (SS) de la tension du module PV  $V_{pv}$ , le courant de l'inductance  $i_L$  et le rapport cyclique  $d$ . En faisant la moyenne de la dynamique d'état des équations (4.4), (4.5), (4.7) et (4.8), nous obtenons :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \underbrace{[dv_{pv} - v_o]}_{f(v_{pv}, d, i_L)} \quad (4.12)$$

$$\frac{dv_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{in}} \underbrace{[di_{pv} - di_L]}_{g(v_{pv}, d, i_L)} \quad (4.13)$$

Où le rapport cyclique de commutation  $d$  est la variable de contrôle. En raison des caractéristiques non linéaires de (4.12) et (4.13), une linéarisation est nécessaire pour dériver le modèle à petits signaux au point de fonctionnement nominal. En du régime permanent prédéfini, le modèle à petits signaux peut être dérivé en utilisant les équations (4.10) et (4.11), et exprimé sous forme d'espace d'états par l'équation (4.14) :

$$\begin{bmatrix} \frac{d\tilde{i}_L}{dt} \\ \frac{d\tilde{v}_{pv}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D}{L} \\ -\frac{D}{C_{in}} & \frac{1}{R_{pv} C_{in}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_{pv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{pv}}{L} \\ -\frac{i_L}{C_{in}} \end{bmatrix} \tilde{d} \quad (4.14)$$

Où  $D$ ,  $V_{pv}$  et  $i_L$  sont considérés constants en régime permanent. Les signaux  $\tilde{i}_L$ ,  $\tilde{v}_{pv}$  sont les variables d'état et  $\tilde{d}$  représente la variable de contrôle,  $R_{pv}$  est la résistance du module PV définie comme le rapport entre la tension et le courant de la borne PV.

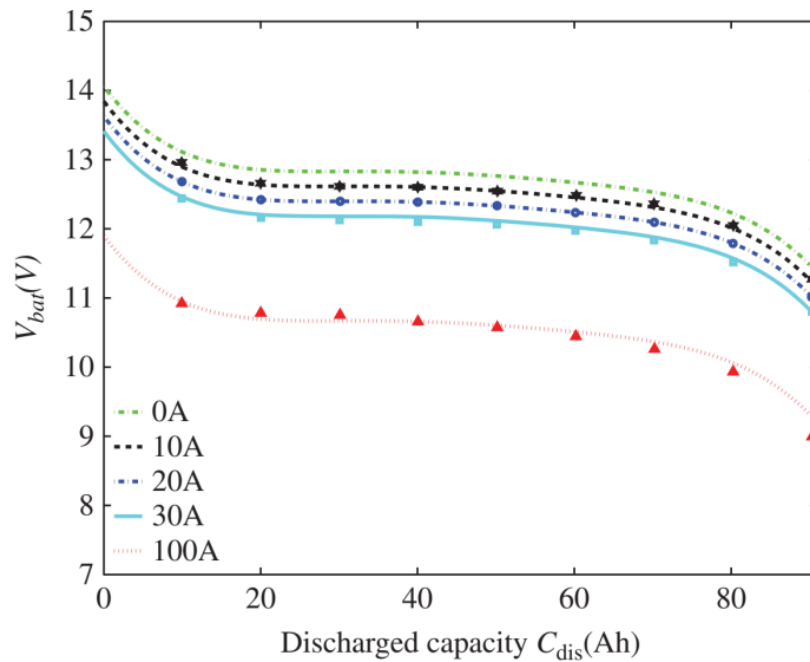
#### 4.4 Modélisation de la batterie

La batterie peut être considérée comme une source de tension variable, la valeur en régime permanent étant affectée par l'état de charge (SOC) et le taux de charge ou de décharge. Un modèle simple de la batterie peut être représenté par un circuit équivalent de Thévenin, qui est formé par une source de tension en série avec une résistance, comme le montre la figure 4.1. Le modèle donné par l'équation (4.15) peut simuler la valeur de la tension en régime permanent répondant aux variations du courant de décharge.

$$v_{bat} = V_{OC} - R_{bat} \cdot i_{bat} \quad (4.15)$$

BK-10V10T est un module spécifique de batterie utilisé dans le système photovoltaïque autonome étudié. Ces paramètres sont définis dans le tableau 4.3. La figure 4.2 illustre les caractéristiques de décharge données par la fiche technique du produit [23].

Pour une représentation générale, la capacité de décharge,  $C_{dis}$  peut être converti en état de charge (SOC), ce qui est la manière normale pour représenter la capacité de la batterie.



**Figure 4.2.** Tensions de la batterie en fonction de la capacité de décharge [23].

Pour le module BK-10V10T, la fonction polynomiale est dérivée dans l'équation (4.16), où les constantes polynomiales sont répertoriées dans le tableau 3 de l'annex.

$$V_{OC} = P_{S5}SOC^5 + P_{S4}SOC^4 + P_{S3}SOC^3 + P_{S2}SOC^2 + P_{S1}SOC + P_{S0} \quad (4.16)$$

Dans le circuit équivalent de la figure 4.1, le courant d'inductance du convertisseur abaisseur est noté  $i_L$ .

La dynamique du circuit est donnée par les équations :

$$i_L + i_{bat} = C_{BAT} \frac{dv_{bat}}{dt} + i_{load} \quad (4.17)$$

$$R_{bat} C_{BAT} \frac{di_{bat}}{dt} + i_{bat} = i_{load} - i_L \quad (4.18)$$

Avec l'hypothèse d'une tension VOC constante en régime permanent, la dynamique de la liaison batterie peut être représentée par la fonction de transfert :

$$i_{bat}(s) = \frac{i_{load} - i_L}{R_{bat} C_{BAT} s + 1} \quad (4.19)$$

#### 4.5. Régulation de la tension

Nous dérivons de l'équation (4.14) la fonction de transfert suivante :

$$\frac{\tilde{v}_{pv}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{-\frac{i_L}{C_{in}}s - \frac{Dv_{pv}}{LC_{in}}}{s^2 - \left(\frac{1}{R_{pv}C_{in}}\right)s + \frac{D^2}{LC_{in}}} \quad (4.20)$$

La fonction de transfert dans l'équation (4.20) représente un système du second ordre, qui peut être normalisé par l'équation (4.21):

$$G_0(s) = \frac{k_0(\beta s + 1)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.21)$$

Où la fréquence propre non amortie et le facteur d'amortissement sont exprimés respectivement en  $\omega_n$  et  $\xi$ . On peut alors dériver les coefficients relatifs à l'équation (4.20).

$$\omega_n = \frac{D}{\sqrt{LC_{in}}} \quad (4.22)$$

$$\xi = -\frac{\sqrt{L}}{2DR_{pv}\sqrt{C_{in}}} \quad (4.23)$$

$$k_0 = -\frac{Dv_{pv}}{LC_{in}} \quad (4.24)$$

$$\beta = \frac{Li_L}{Dv_{pv}} \quad (4.25)$$

Nous proposons d'utiliser un régulateur PID standard pour réguler la tension de la liaison PV. Une fonction de transfert en boucle fermée  $F(s)$  souhaité du premier ordre est adopté, avec la forme générale :

$$F(s) = \frac{1}{\alpha s + 1} \quad (4.26)$$

$\alpha$  est une constante à définir. Le régulateur peut alors être dérivé par l'expression (4.27) :

$$C(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{k_0 s(\alpha\beta s + \alpha + \beta)} \quad (4.27)$$

Le régulateur PID défini par la fonction de transfert (4.27) peut être écrit sous la forme parallèle suivante :

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d}{\tau \cdot s + 1} \quad (4.28)$$

Les paramètres du régulateur PID peuvent être dérivés des équations (4.27) et (4.28).

$$\tau = \frac{\alpha \cdot \beta}{\alpha + \beta} \quad (4.29)$$

$$k_i = \frac{\omega_n^2}{k_0(\alpha + \beta)} \quad (4.30)$$

$$k_p = \frac{2\xi\omega_n(\alpha + \beta) - \omega_n^2\alpha\beta}{k_0(\alpha + \beta)^2} \quad (4.31)$$

$$k_d = \frac{(\alpha + \beta)^2 - 2\xi\omega_n(\alpha + \beta)\alpha\beta + \omega_n^2\alpha^2\beta^2}{k_0(\alpha + \beta)^3} \quad (4.32)$$

#### 4.6 Algorithme de maximisation de puissance (MPTT)

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). L'objectif de ces commandes est de chercher le point de puissance

maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale. La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV, [24].

La figure 4.2 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

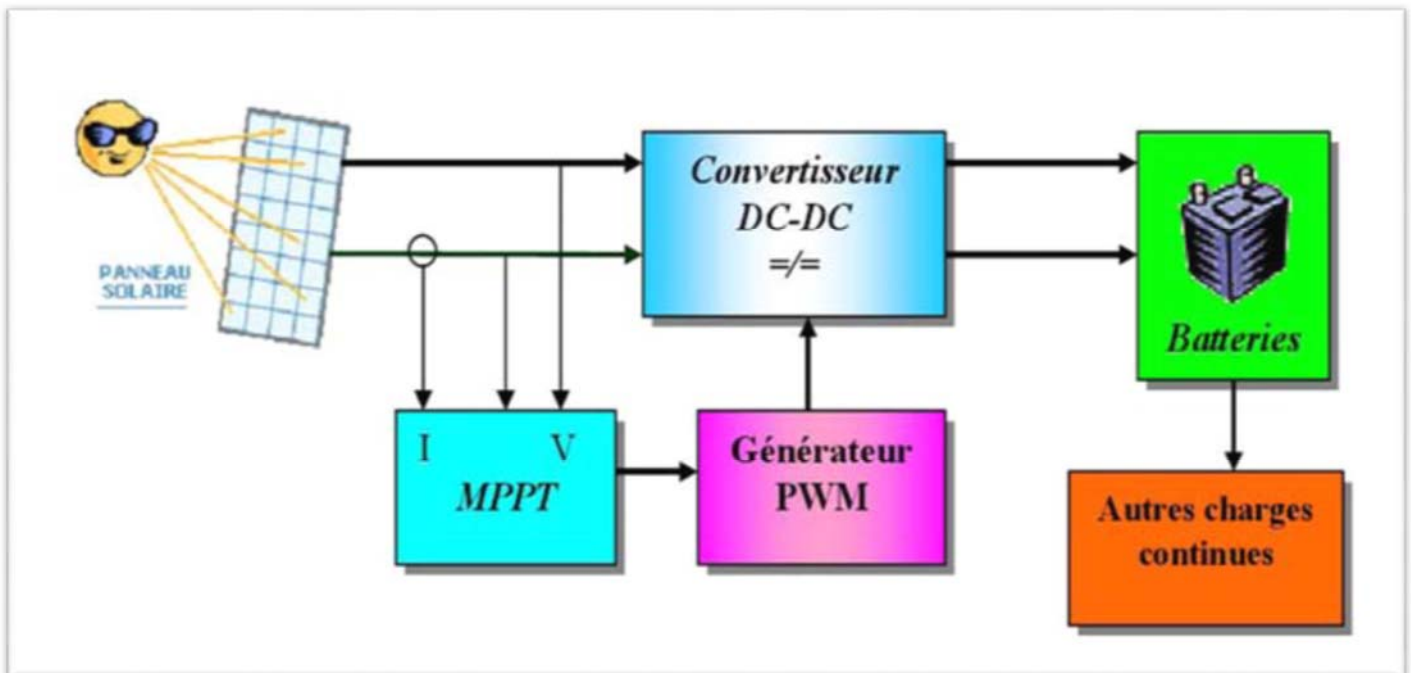


Figure 4.3 Schéma d'un système photovoltaïque avec MPPT

Dans ce chapitre, on présentera deux méthodes du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- ✓ Méthode de perturbation et observation (PO).
- ✓ Méthode de conductance Incrémentale (Inc-Cond).

### 4.6.1 La technique Perturbation & Observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température [25].

Le principe de cet algorithme P&O est d'effectuer une perturbation sur la tension  $V_{pv}$  et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque selon le signe de la pente de la puissance en fonction de la tension selon les équations (33).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dv} > 0 \quad \text{if} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \\ \frac{dp}{dv} = 0 \quad \text{if} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \\ \frac{dp}{dv} < 0 \quad \text{if} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \end{array} \right. \quad (33)$$

La figure 4.4 représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurés pour calculer  $P_{pv}(k)$ . Cette valeur de  $P_{pv}(k)$  est comparée à la valeur  $P_{pv}(k-1)$  calculée au cycle précédent.

Si la puissance de sortie a augmenté,  $V_{pv}$  est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué,  $V_{pv}$  est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent.  $V_{pv}$  est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint,  $V_{pv}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{op}$ . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [26].

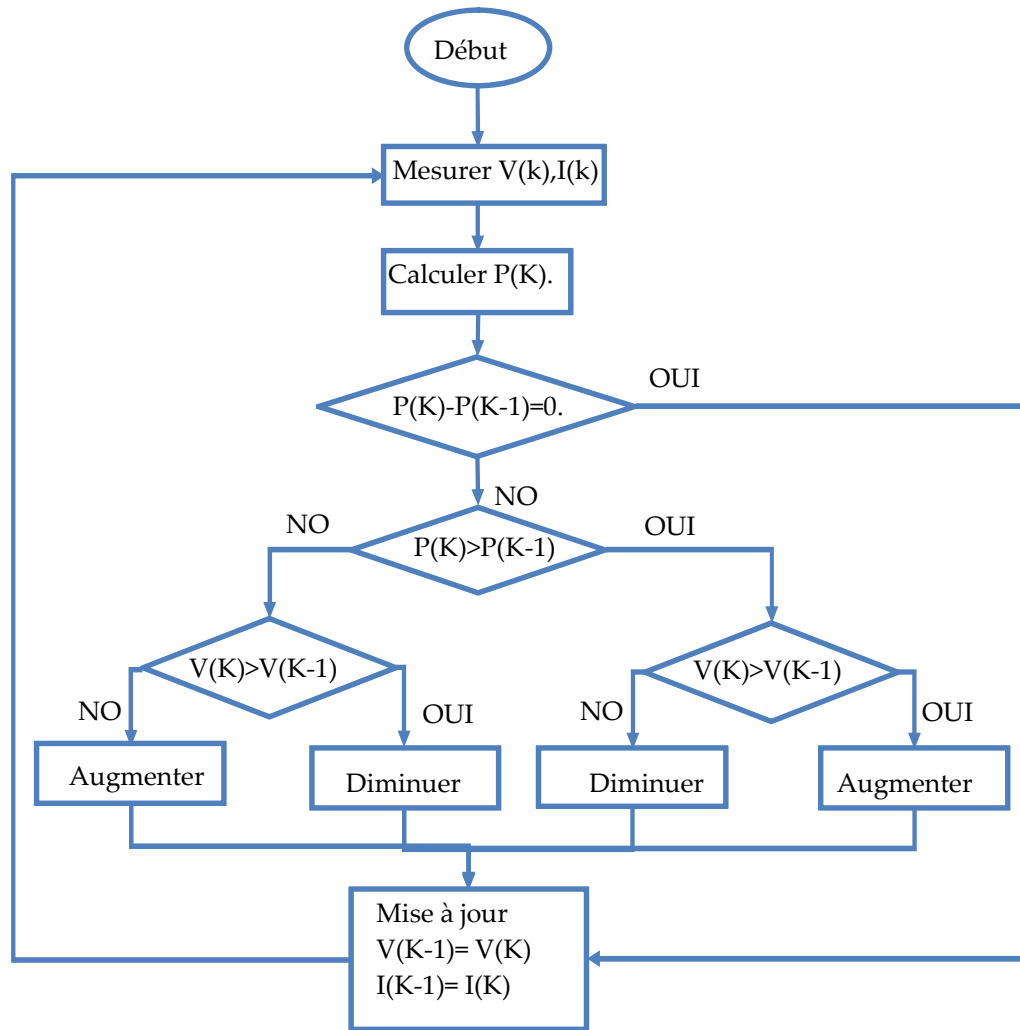


Figure 4.4 Organigramme de la méthode P&O

#### 4.6.2 La technique de l'incrément de la conductance, 'Inc-Cond'

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance  $G = \frac{I}{V}$  et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, 'PMP'. Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance (-G), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à

l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, 'PMP' [26].

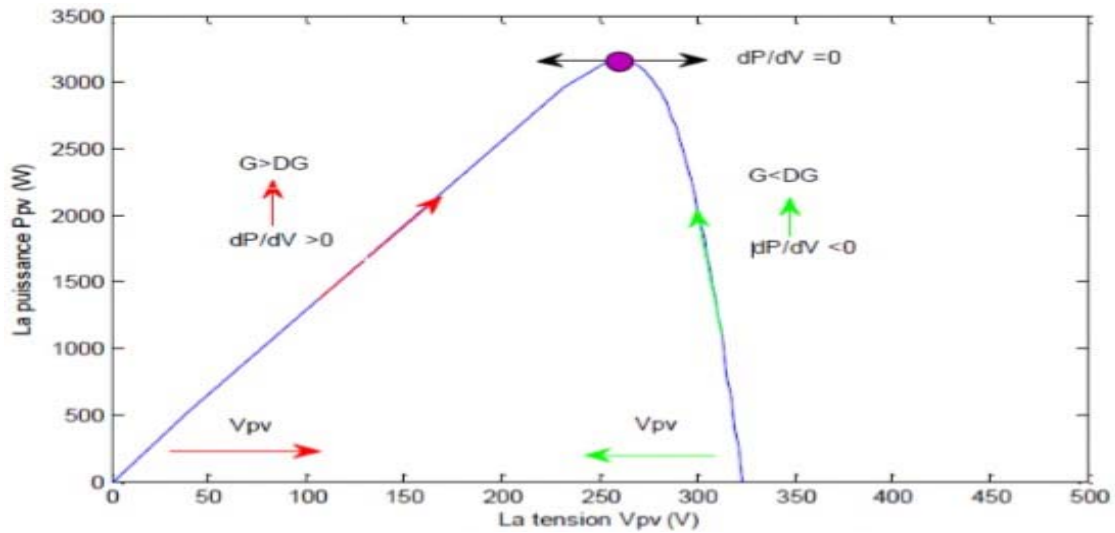


Figure 4.5 : Principe de la méthode Inc-Cond

Nous allons chercher le maximum de point d'annulation de la dérivée de puissance de la figure précédente, en comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG.

$$P = V \cdot I \tag{4.34}$$

D'où en écrivant la dérivée :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + \frac{dV}{dV} \cdot I \tag{4.35}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + I \tag{4.36}$$

$$\frac{dP}{dV} \cong V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \tag{4.37}$$

Donc :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (a) \text{ Au point du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{Ou} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad (b) \text{ A gauche du MPP} \tag{4.38}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad (c) \text{ A droit du MPP}$$

Les deux équations (b) et (c) sont utilisées pour déterminer la direction du déplacement de point de fonctionnement MPP dans laquelle la perturbation se produit, elle se répète jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite.

À partir des équations (4.38), l'algorithme Inc-Cond peut être représenté par l'organigramme suivant :

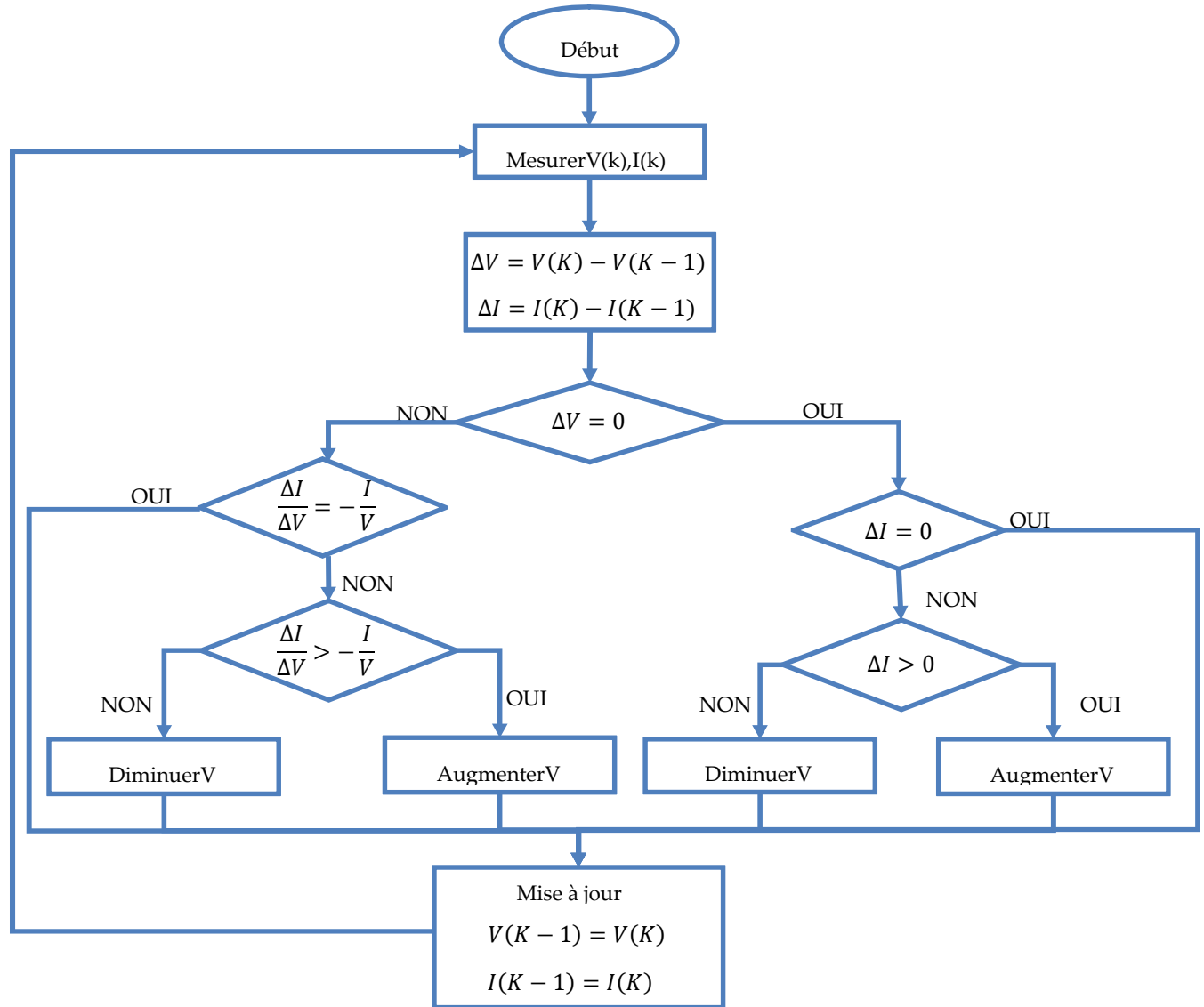


Figure 4.6 Organigramme de la méthode Inc-Cond

#### 4.7. Intégration du contrôle de charge de la batterie avec MPPT

Pour empêcher la génération PV en cas de surcharge de la capacité de charge de la batterie, le cycle de charge doit être maintenu avec la fonction MPPT. Lorsque la tension et le courant de la batterie atteignent les limites de charge, l'algorithme MPPT doit être arrêté pour réduire la production d'énergie PV. La figure 4.7 illustre la manière d'intégration du contrôle de charge de la batterie et l'algorithme MPPT. Les limites

admissibles de tension de la batterie utilisée, inférieure ( $V_{min}$ ) et supérieure ( $V_{max}$ ) sont illustrées dans le tableau 2 de l'annexe [22].

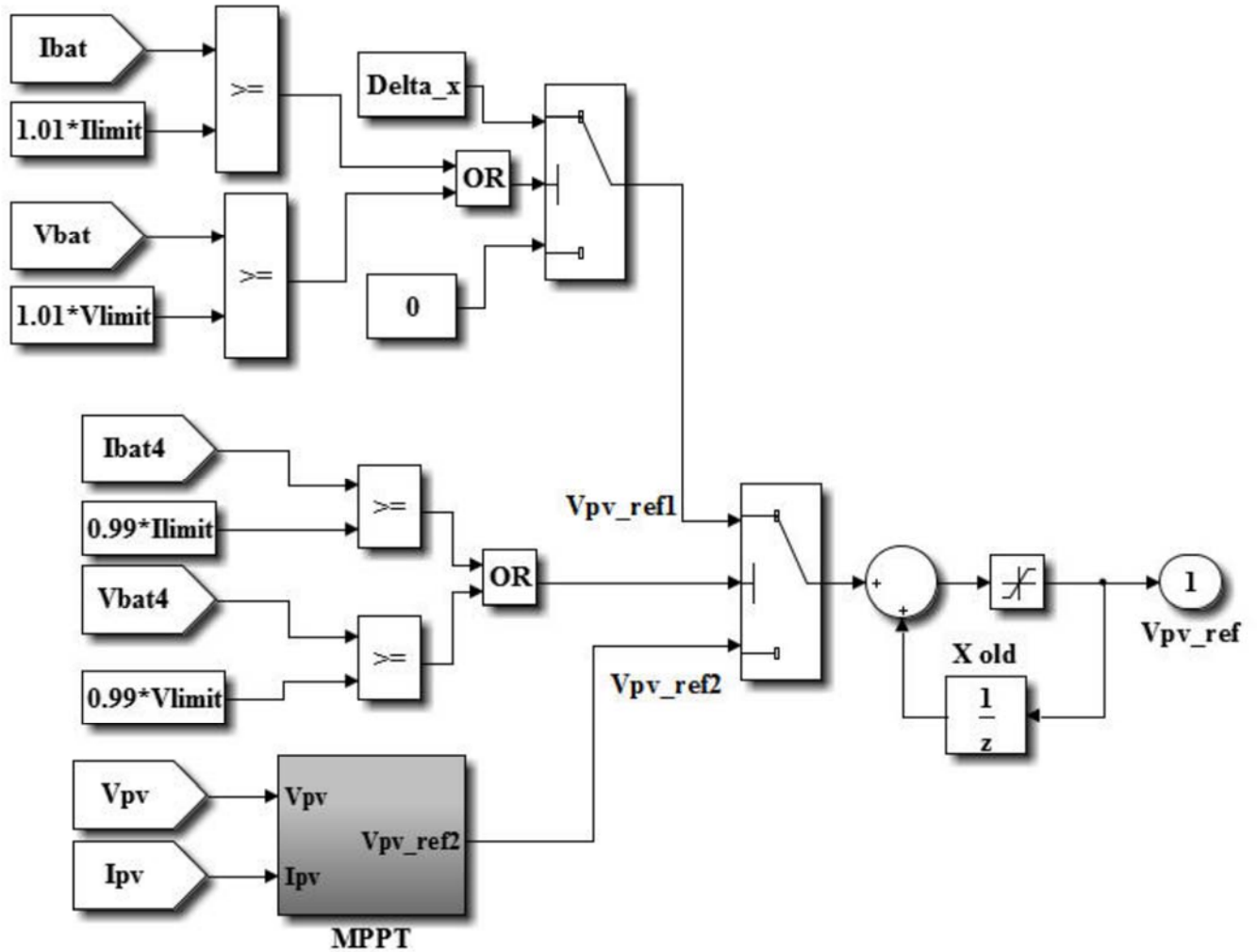


Figure 4.7. Intégration du contrôle de charge de la batterie avec MPPT

#### 4.8. Résultats de simulations

Le modèle global de simulation du système étudié est présenté à la figure 4.8. Il comporte le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC abaisseur de tension, la liaison de batterie et le bloc-batterie, avec les blocs de contrôle et MPPT avec les deux méthodes (P&O et Inc-Cond). Les paramètres du panneau photovoltaïque sont donnés dans le tableau 1 de l'annexe.

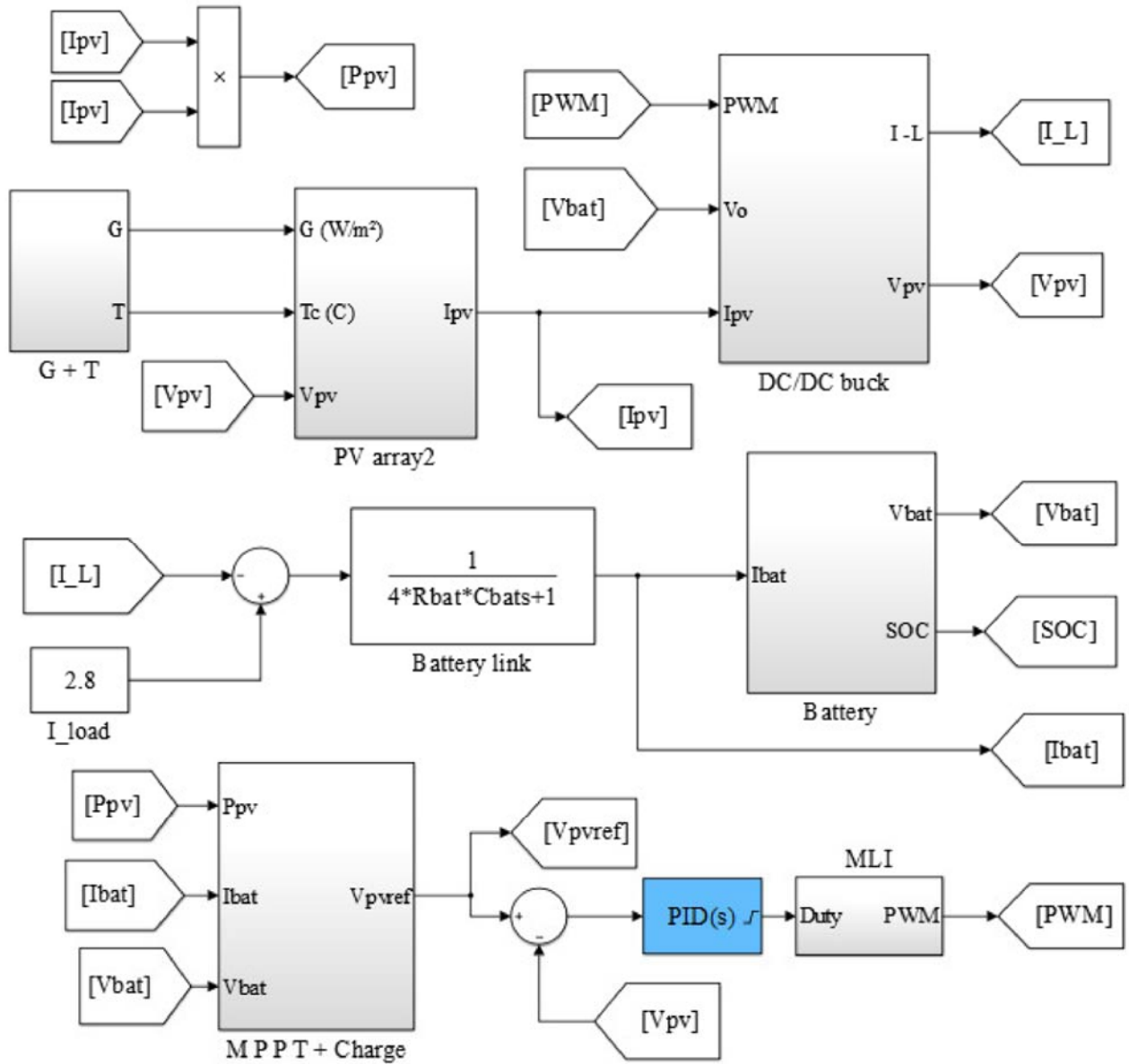
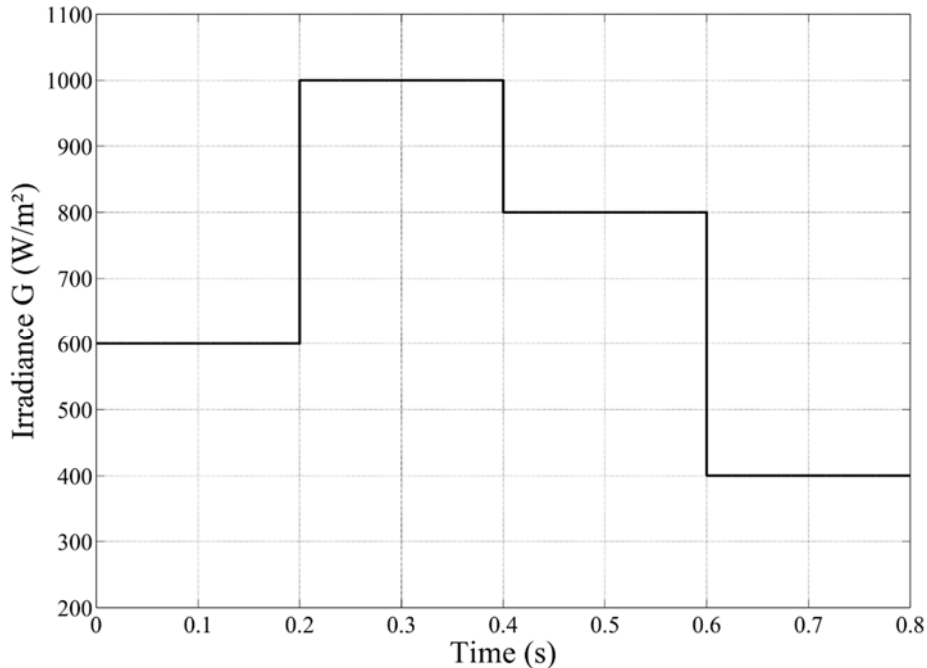


Figure 4.8. Modèle de simulation du system PV autonome

Pour valider le modèle, nous le soumettons à certaines conditions de changement de l'éclairement solaire selon la figure 4.9.

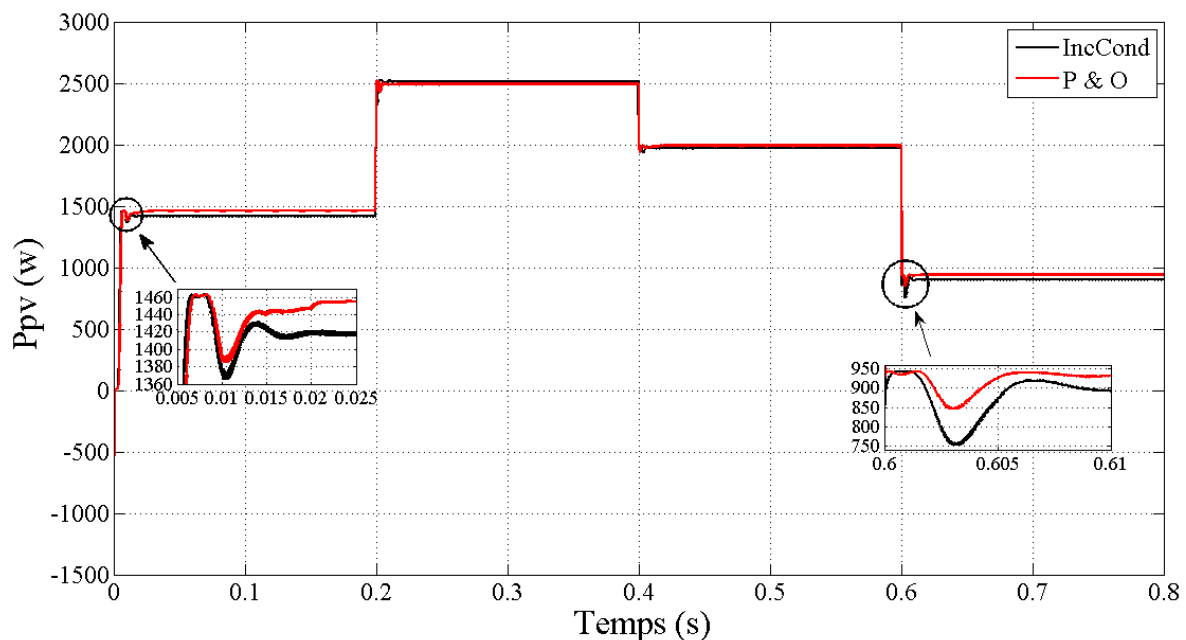


**Figure 4.9.** Variation de l'éclairement solaire en fonction du temps

Les résultats de la simulation sont illustrés sur les figures 4.10 au 4.14.

- ✓ Pour un éclairement de 600 W/m<sup>2</sup>, On remarque sur la figure 4.10 que le temps de montée de puissance jusqu' à la valeur  $P_{max}$  est différent pour les deux commandes, pour P&O de valeur égale à  $t_s = 0.025s$  et une valeur de  $P_{MAX} = 1460W$  et par contre la commande inc-Cond reprend plus rapide  $t_s = 0.02s$  et une valeur de  $P_{MAX} = 1420W$  et plus stable dans le régime permanent.
- ✓ Dans le cas de changement d'éclairement solaire, on constate que la réponse obtenue avec l'algorithme P&O est légèrement plus élevée et le pic moins par rapport à celle obtenue avec l'algorithme inc-Cond.
- ✓ Sur la figure 4.11, on remarque que le temps nécessaire à la stabilisation de la tension  $V_{PV}$  du générateur PV est différent pour les deux commandes. La méthode P&O présente des oscillations remarquables de tension provoquées par la perturbation active de l'algorithme MPPT dans le cas où l'éclairement est relativement bas, avec un temps de réponse lent  $t_s \approx 0.03s$ . Dans la commande inc-Cond, la tension se stabilise plus rapidement  $t_s \approx 0.02s$  en atteignant des valeurs plus importantes  $\approx 99V$ .
- ✓ Dans le cas de changement d'ensoleillement, on constate que la réponse obtenue avec l'algorithme inc-Cond plus rapide et stable et plus robuste que l'algorithme P&O.

- ✓ L'état de charge initial de la batterie a été réglé à 80% comme illustré sur le figure 4.14 . Un courant de charge de 2,8 était constamment extrait de la liaison de la batterie. Avant 0,2 s, l'éclairement solaire était de  $400 \text{ W/m}^2$  et la température des cellules solaires était de  $25^\circ \text{C}$ . Puisque la tension est inférieure à la limite de  $V_{\min}=54,45 \text{ V}$ , le MPP est suivi à 0,09 s pendant la période de démarrage et maintenu par l'algorithme MPPT en régime permanent.
- ✓ L'état de charge augmente progressivement en réponse au courant de charge. L'éclairement solaire augmente à l'instant 0,2 s de  $400$  à  $1000 \text{ W/m}^2$  et redescend pour atteindre la valeur  $800 \text{ W/m}^2$  à l'instant 0,4 s. La puissance de sortie  $P_{pv}$  augmente considérablement, entraînant une augmentation du courant de charge  $I_{bat}$  comme illustré dans le figure 4.13. L'augmentation de l'état de charge devient plus rapide qu'auparavant. Étant donné que l'état de charge est encore relativement faible, la tension de la batterie  $V_{bat}$  est toujours inférieure à la limite supérieure  $V_{\max}$ . L'algorithme MPPT fonctionne dans ce cas en continu pour injecter la puissance la plus élevée dans la liaison de la batterie.
- ✓ On remarque selon les résultats de simulations obtenue que l'état de charge de la batterie par les deux algorithmes (P&O et Inc-Cond) sont presque les mêmes avec une légère déférence.



**Figure 4.10.** Courbes des puissances de PVG

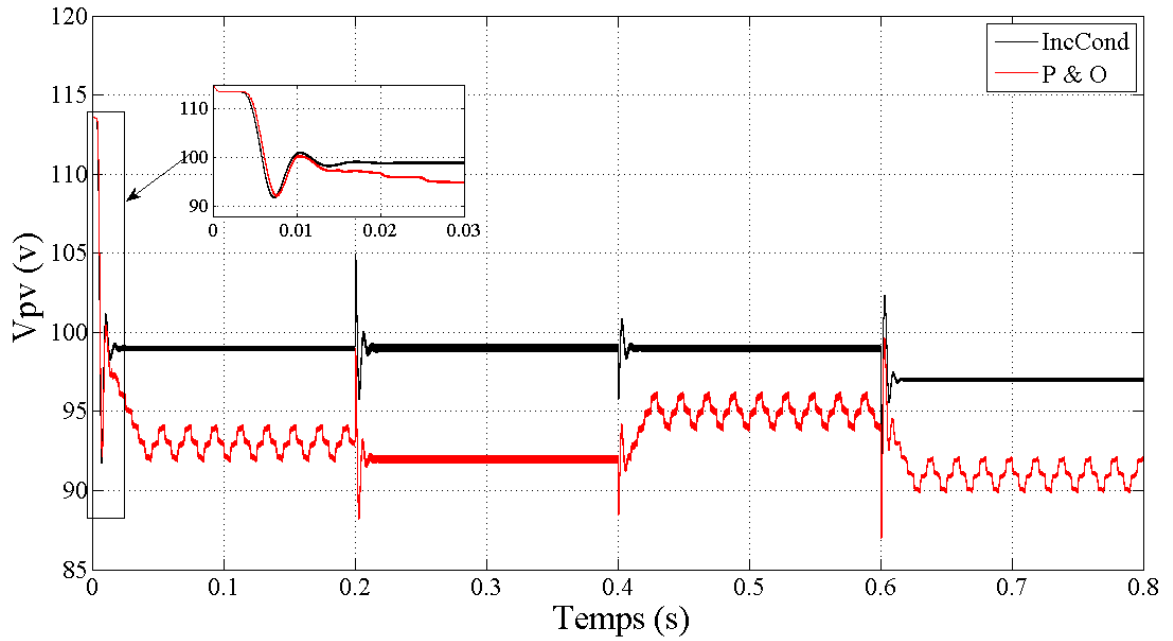


Figure 4.11. Courbes des tensions aux bornes du générateur PVG

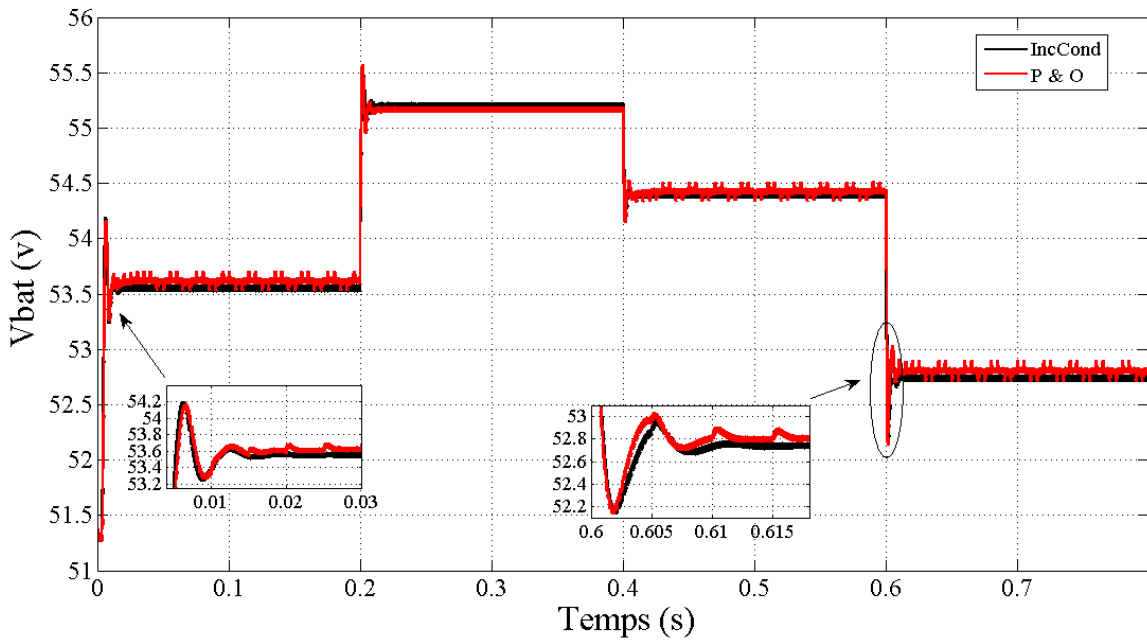


Figure 4.12. Tension de la batterie

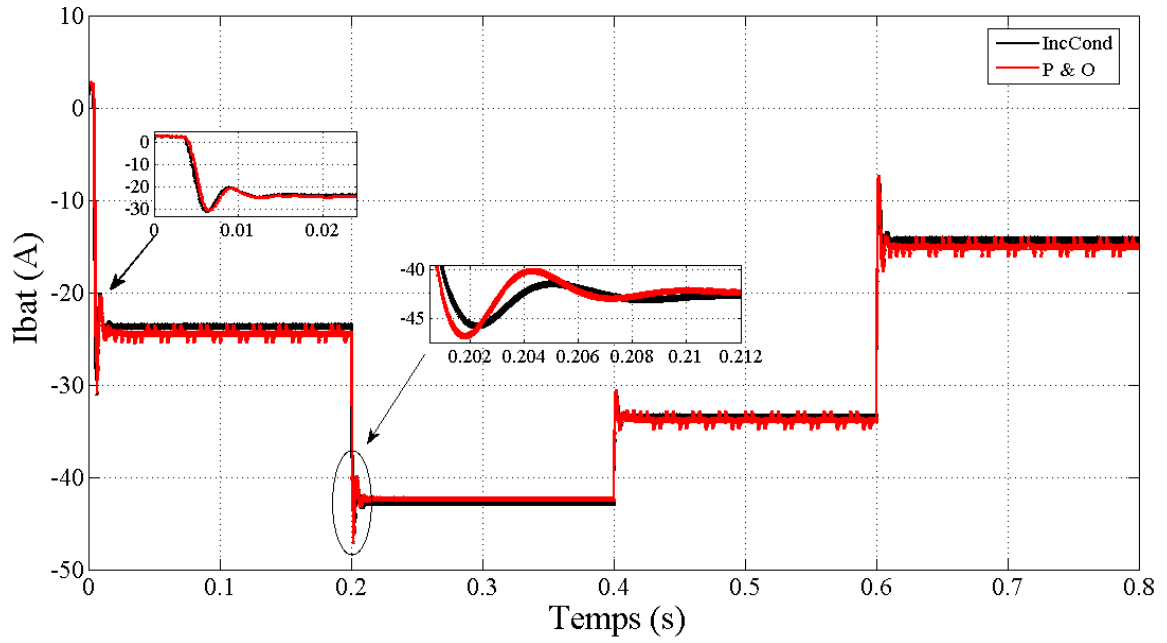


Figure 4.13. Courant de charge de la batterie

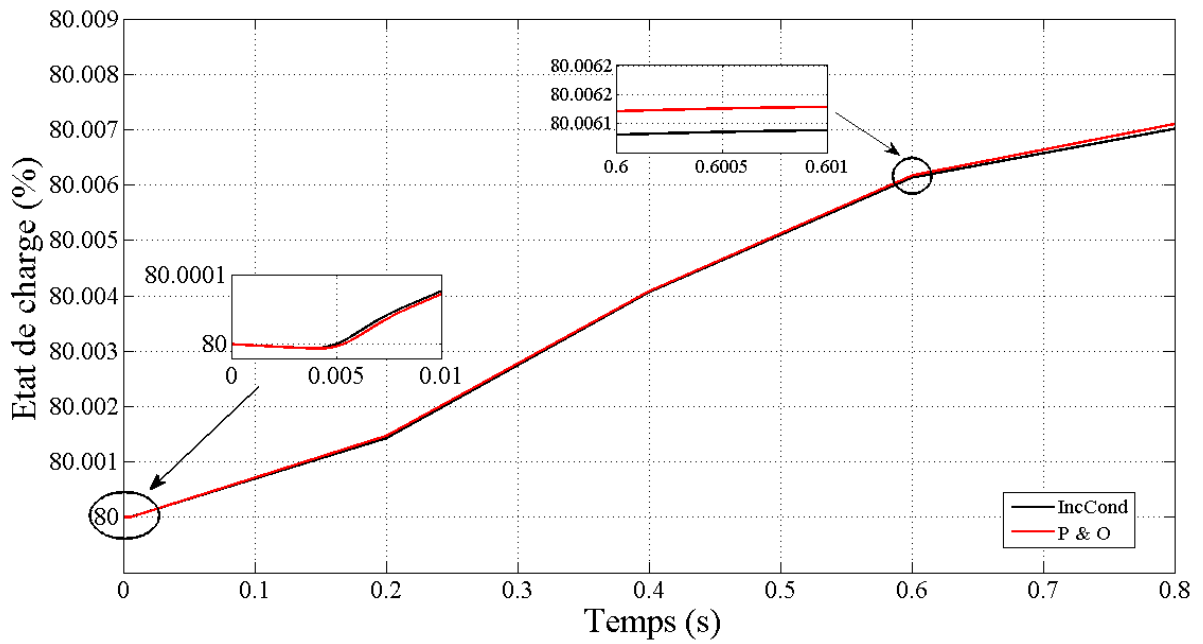


Figure 4.14. Etat de la charge de la batterie

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les principes des deux algorithmes MPPT les plus populaires (Inc-Cond et P&O), et puis nous avons dimensionné et modélisé un système PV autonome est mis en œuvre avec un convertisseur abaisseur pour maintenir simultanément la charge et le contrôle de suivi MPP, et nous avons suivi la régulation de la tension de la batterie et la variation de l'état de charge SOC en réponse aux changements de l'éclairement solaire par les deux méthodes (P&O et Inc-Cond).

Les résultats des simulations montrent que l'algorithme 'Inc-Cond' donne des résultats meilleurs que le 'P&O'.

.



# *Conclusion générale*

# ***CONCLUSION GENERALE***

---

## **CONCLUSION GENERALE**

Le travail accompli dans ce mémoire a pour but le dimensionnement, l'optimisation de la production PV autonome par deux méthodes, et le contrôle de la tension de la batterie.

Notre travail a été réalisé comme suite :

Dans le premier chapitre on a présenté brièvement et d'une façon générale le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, le principe de fonctionnement, les technologies des cellules PV, ainsi que les différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de conversion de l'énergie photovoltaïque. Ensuite, on a présenté le module photovoltaïque, ses caractéristiques et les paramètres qui influent sur son comportement électrique. On a étudié, dans le deuxième chapitre, les types des convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques, tel que le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur).

Le chapitre trois a porté sur la modélisation et simulation du générateur photovoltaïque sous différents paramètres climatiques influent (température et éclairement) sur MTLAB dont le but est l'optimisation de ce système pour un meilleur rendement. Ainsi, cette modélisation nous a permis de déterminer le point de la puissance maximale, point d'intérêt de notre étude.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié un système photovoltaïque autonome complet, composé par un générateur PV raccordé à la charge à travers le système d'adaptation qui se compose d'un hacheur abaisseur fonctionnant comme contrôleur du point de puissance maximale. Selon l'information fournie par le système MPPT basé sur les deux algorithmes Perturbation Observation «P&O» et d'incrémentation de la conductance «Inc-Cond» qui charge la batterie mise aux bornes de la charge, le système global a été simulé sur Matlab.

Ce dernier chapitre exprime les étapes nécessaires pour spécifier, concevoir, simuler et évaluer les circuits de conditionnement d'énergie ainsi que l'analyse en régime transitoire et la vérification par simulation des objectifs cibler dans l'introduction de ce mémoire, qui sont l'optimisation de la puissance PV et la stabilité de la tension de la batterie en dépit des conditions météorologiques.

*En perspective de ce travail, nous avons pensé à quelques suggestions :*

Faire étude comparative entre les algorithmes : logique flou et P&O et IncCond

## ***CONCLUSION GENERALE***

---

- L'utilisation des méthodes très développées comme la méthode de la logique floue et neurone - floue pour l'optimisation de la puissance maximale du système photovoltaïque.

Développer et améliorer les systèmes PV par un dimensionnement adéquat des composants, en vue de les intégrer dans le domaine de production décentralisée.

# ANNEXES

## ANNEXES

**Tableau 1.** Paramètres du panneau photovoltaïque

Composants	Valeurs
L'éclairement aux conditions standard STC	1000 W/m <sup>2</sup>
Constant de Boltzmann	$K=1.38 \times 10^{-23}$ J/K
Charge de l' électron	$1.6 \times 10^{-19}$ C
Facteur d'idéalité de la diode	$A_n = 1.6$
Température de la cellule PV à STC	298 K
Nombre de cellules PV par module PV	60
Configuration du panneau PV	3 × 3 PV modules
Puissance du GPV à MPP et STC	280 W / module
Tension du GPV à MPP and STC	31.67V
Courant du GPV à MPP and STC	8.84A
Tension de circuit ouvert à STC	38.97V
Courant de court-circuit à STC	9.41A

**Tableau 2** Paramètres de la batterie et de charge

Type de Type de batterie	NiMH
Modèle de batterie	BK-10V10T
Tension nominale de la batterie	55 V
Bande limites de tension	54,45-55,45 V
Capacité nominale de la batterie	90 Ah
Tension nominale de la charge CC	48 V
Plage de tension acceptable de charge CC	42-56 V

## ANNEXES

---

**Tableau 3** Paramètres polynomiaux pour la modélisation du module de batterie BK-10V10T

Composants	$P_{s5}$	$P_{s5}$	$P_{s5}$	$P_{s5}$	$P_{s5}$	$P_{s5}$
Valeurs nominales	42.2942	-98.3961	88.7769	-40.3893	10.2942	11.4802

## *Références Bibliographiques*

---

### *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

- [1] [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com).
- [2] Joukoff, Alexandre « climatologie du rayonnement solaire » institut royal météorologique, 1991 .
- [3] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [4] le pompage photovoltaïque Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller Bocar Sada Sy (IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA)
- [5] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-panneau-photovoltaïque-7973/>
- [6] Mohamed Lakhdar Louazene « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla» Université El Hadj Lakhdar – Batna
- [7] : « Les piles solaires, le composant et ces applications » Edition.Masson (1985).
- [8] Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome» *Universitaire De Bechar*
- [9] <https://www.ecosources.org>
- [10] Thomas Mambrini. «Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie. Université Paris Sud - Paris XI, 2014.
- [11] A.Labouret, M.Villoz, «Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel) », édition DUNOD, août 2003, Paris(France).
- [12] A. Belkaid, 2015. « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome». Thèse de doctorat, Université de Sétif
- [13] Abdellatif MAHAMMEDI «Contribution à la Commande d'un Convertisseur de Puissance aux Topologies Améliorées Associé à un Générateur Photovoltaïque Basée sur les Techniques Avancées» THESE DE DOCTORAT Université Ziane Achour de Djelfa
- [14] Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal. Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cell hybrid system , Thèse de doctorat de l'Université de Kassel, Germany, 2005.
- [15] Handruedi BHULER,

## *Références Bibliographiques*

---

- " les convertisseurs statiques",
  - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes [30 novembre 1991]
- [16] ellipses, Physique appliquée "les base et l'électronique de puissance",  
Ellipses édition marketing, [S.A ; 2004].
- [17] Guy SEGUIER, Francis LABRIQUE, Robert BAUSIERE  
Structures, fonctions de base, 10ème édition, [Dunond ; 2015].
- [18] Juing-Huei Su, Jiann-Jong Chen, Dong-Shiuh Wu, Learning Feedback Controller Design of Switching Converters Via MATLAB/SIMULINK, IEEE Transactions on Education, vol. 45, November 2002.
- [19] Daniel Logue, Philip. T. Krein, Simulation of Electric Machinery and Power Electronics Interfacing Using MATLAB/SIMULINK, in 7th Workshop Computer in Power Electronics, 2000,pp. 34-39.
- [20] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, Power Electronics Converters, Applications and Design, ISBN 9814-12-692-6.CH3+4
- [21] [Picault et al., 2010a] Picault, D., Raison, B., Bacha, S., Aguilera, J., et De La Casa, J. (2010a). Changing photovoltaic array interconnections to reduce mismatch losses : a case study. 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering,
- [22] Messaoud, M., & Haddi, B. 2021). Optimum Parametric Identification of a Stand-Alone Photovoltaic System with Battery Storage and Optimization Controller Using Averaging Approach Optimum Parametric Identification of a Stand-Alone Photovoltaic System with Battery Storage and Optimization Controller Using Averaging Approach. Journal European des systems automatisés, 54(1), 63-71
- [23] Photovoltaic Power System Modeling, Design, and Control by Weidong Xiao (z-lib.org)
- [24] BAHRI Ahmed ,ABDELKRIM Thameur , MORDJAOUI Mourad , BECAR Belgasem, BOURAGHDA Skander <<Etude comparative des algorithmes d'optimisation MPPT pour un

## *Références Bibliographiques*

---

système photovoltaïque>> The national conference on Energy Systems, Environment, Plasma and Materials "ESEPM2020", MESTEL Laboratory, University of Ghardaia

[25] S. Issaadi, « *Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones* », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.

[26] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « *Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque* », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.

تحجيم الأنظمة الكهروضوئية هو الشغل الشاغل للباحثين. بهدف تحسين كفاءة الطاقة وحماية وحدات المحول من خلال التصنيف المتسق لدارات تكييف الطاقة والتوصيلات للتطبيقات الكهروضوئية. في هذا السياق، يهدف هذا الموضوع إلى تنفيذ خطوات النمذجة والتحكم التفصيلية لنظام الطاقة الكهروضوئية المستقل مع تخزين الطاقة، وفقاً للمواصفات العملية للشحنة ووحدة توليد الطاقة الكهروضوئية وحزمة البطارية. الهدف الرئيسي هو تقدير جميع المعلمات غير المعروفة، مثل عامل المثالية للصمام الثنائي وتيار التشبع العكسي ووحدة التحكم والوصلة الكهروضوئية. يوفر الارتباط الكهروضوئي الذي يربط دائرة مصدر الكهروضوئية بالمحول الجانبي الكهروضوئي (PVSC) وظيفة ترشيح للحفاظ على جهد ثابت على الرابط. جهاز التحكم بالشحن المستخدم في المحول الجانبي الكهروضوئي هو محول مخفض DC / DC ينقل الطاقة الكهروضوئية إلى البطارية ويزود الحمل. باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation (PWM))، والتي تكون دورة عمل التبديل فيها هي متغير إدخال التحكم؛ يتم التحكم في دائرة تكييف الطاقة PVSC باستمرار من خلال المعلومات التي يوفرها نظام MPPT، والذي يشحن البطارية المتصلة بأطراف الشحن لتحقيق أقصى قدر من الطاقة. بناءً على خوارزميتين يتم دراستها ومراجعتها، هي: الأول هو الاضطراب والملاحظة (P&O) والثاني هو زيادة التوصيل (INC)، حيث تقوم بمحاكاة ومقارنة الخوارزميتين.

يتم الحفاظ على جهد البطارية بشكل صحيح بواسطة جهاز التحكم في الشحن والمخصص لمطابقة جهد الشحن المقدر، لتجنب نسبة تحويل الجهد العالي. طريقة مقترحة لدمج كل من وظيفة MPPT وشحن دورة البطارية. خرج المولد الكهروضوئي ودوائر تكييف الطاقة، التي يتم إنشاؤها في الغالب من محولات الطاقة المحولة، غير خطية. ثم يتم اشتقاق نموذج متوسط للتحليل الديناميكي وتوليف وحدة التحكم، باستخدام متوسط مساحة الحالة وطريقة الخطية. مجموعة الخلايا الكهروضوئية مكونة من تسع وحدات كهروضوئية مكونة في ثلاث سلاسل مستخدمة في هذا التطبيق لإثبات فعالية النمذجة والتصميم والتحكم والمحاكاة. تم بناء وتطوير نموذج المحاكاة لوحدة التحكم وواجهة الطاقة على المدى القصير، باستخدام Matlab Simulink.

**الكلمات المفتاحية:** نظام الكهروضوئي مستقل. النمذجة الديناميكية، المتوسط، الخطي، حالة الشحن (SOC)، نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، محول مخفض

## Résumé

Le dimensionnement des systèmes photovoltaïques est la préoccupation majeure des chercheurs et des industriels de l'électricité. Cela vise à améliorer l'efficacité énergétique et à protéger les unités de conversion par une évaluation cohérente des circuits de conditionnement de puissance et des interconnexions pour l'application PV. Dans ce contexte, ce thème vise à réaliser des étapes de modélisation et de contrôle détaillées d'un système d'alimentation photovoltaïque (PV) autonome avec stockage d'énergie, selon les spécifications pratiques de la charge, de l'unité de génération PV et du pack de batteries. L'objectif principal est d'estimer tous les paramètres inconnus, comme le facteur d'idéalité de la diode et le courant de saturation inverse, le contrôleur et la liaison PV. La liaison PV reliant le circuit source PV au convertisseur côté PV (PVSC) fournit une fonction de filtrage pour maintenir une tension constante sur la liaison. Le contrôleur de charge utilisé dans le convertisseur côté PV est un convertisseur abaisseur CC/CC. Il transfère la puissance PV à la batterie et alimente la charge. Utilisation de la technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM), dont le rapport cyclique de commutation est la variable d'entrée de commande ; Le circuit de conditionnement de puissance PVSC est contrôlé en permanence par les informations fournies par le système MPPT, qui charge la batterie connectée aux bornes de charge pour atteindre un maximum d'énergie. Sur la base de deux algorithmes sont étudiés et revus, Le premier est Perturbation et observation (P&O) et le second est Incrémentation de la conductance (Inc-Cond), Où nous simulons et comparons les deux algorithmes. La tension de la batterie correctement maintenue par le contrôleur de charge et spécifiée pour correspondre à la tension nominale de charge, afin d'éviter un rapport élevé de conversion de tension. Une méthode proposée pour intégrer à la fois la fonction MPPT et la charge du cycle de la batterie. La sortie du générateur PV et les circuits de conditionnement de puissance, principalement construits à partir de convertisseurs de puissance à découpage, ne sont pas linéaires. Un modèle moyenné a ensuite été dérivé pour l'analyse dynamique et la synthèse du contrôleur, en utilisant la méthode de moyennage et de linéarisation de l'espace d'état. Un réseau photovoltaïque de neuf modules photovoltaïques configurés en trois chaînes utilisées dans cette application pour démontrer l'efficacité de la modélisation, de la conception, du contrôle et de la simulation. Le modèle de simulation pour le contrôleur et l'interface de puissance est construit et développé à court terme, en utilisant les blocs fondamentaux de Matlab Simulink.

**Mots clés :** système photovoltaïque (PV) autonome, modélisation dynamique, approche de moyenne, linéarisation, état de charge (SOC), point de puissance maximale (MPPT), convertisseur abaisseur

## Abstract

The dimensioning of photovoltaic systems is the major concern of researchers and power industry practitioners. This aims to improve energy efficiency and protect the conversion units by a consistent assessment of power conditioning circuits and interconnections for the PV application. In this context, this theme sets out to realize detailed modeling and control steps of a standalone photovoltaic (PV) power system with energy storage, according to practical specifications of the load, PV generation unit, and battery pack. The main goal is to estimate all unknown parameters, as the diode ideality factor and revers saturation current, the controller, and the PV link. The PV link interfacing the PV source circuit to the PV-side converter (PVSC) provides a filtering function to maintain a steady voltage at the link. The charge controller used in the PV-side converter is a DC/DC buck converter. It transfers the PV power to the battery and supplies the load. Using pulse-width modulation (PWM) technical, of which the switching duty cycle is the control-input variable;

The PVSC power conditioning circuit permanently controlled by the information provided by the MPPT system, which charges the battery connected to the load terminals to achieve maximum energy. Based on two algorithms are studied and reviewed, as:

The first is Perturb and observe (P&O) and the second is Increment of the conductance (INC),

Where we simulate and compare the two algorithms.

The battery pack voltage properly maintained by the charge controller and specified to match the load voltage rating, to avoid a high ratio of voltage conversion.

A method proposed to integrate both the MPPT function and the battery cycle charge. The PV generator output and the power conditioning circuits, mainly constructed from switching-mode power converters, are nonlinear. An averaged model then derived for dynamic analysis and controller synthesis, using the state-space averaging and linearization method. A PV array of nine PV modules configured into three strings used in this application to demonstrate the effectiveness of modeling, design, control, and simulation. Simulation model for the controller and power interface is built and developed in short term, using the fundamental blocks of Matlab Simulink.

**Key words:** standalone photovoltaic (PV) system, dynamic modeling, averaging approach, linearization, stat of charge (SOC), maximum power point (MPPT), buck converter