

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira Bejaia

Faculté De Technologie

Département D'électrotechnique

**Mémoire Pour L'obtention Du Diplôme De Master En Electrotechnique**

**Option Energies Renouvelables**



ⵜⴰⵎⴰⵎⴰⵔⵜ ⵏ ⵙⵓⵔⵉⵏ ⵏ ⵔⵉⵙⵏⵉⵔⵉⵏ  
جامعة بجاية  
Université de Béjaïa

*Thème*

**Modélisation et simulation de la commande MPPT  
d'un système photovoltaïque autonome**

Présenté par :

*Mr IDIR Fares*

*Mr TAIRI Kouceila*

Encadré par :

*Dr. Haroune Aouzellag*

Soutenu le 26/06/2023

Devant le jury :

*Dr. Yazid Madi*

*Dr. Bessam Amrouche*

**Année universitaire 2022/2023**

## **Remerciement**

*Tout d'abord nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers **Dr. Haroune Aouzellag**, maitre de conférences à l'université de Bejaia, d'avoir accepté de nous encadrer dans notre thématique proposée et de nous avoir fait profiter de ses connaissances et informations.*

*Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance extrême envers notre Co-encadreur **Dr. Idir A.Hakimn**, maitre de conférences à l'université de M'sila et **Dr. Nora Kacimi**, membre de son équipe de recherche, pour leurs conseils avisés, leur soutien constant et leur disponibilité qui ont contribué à mener à bien nos recherches et finaliser notre thèse.*

*Nous souhaitons également témoigner notre profond remerciement au **Dr. Azib Ahmed**, maitre de conférences à l'université de Bejaia, et au **Dr. Mebarki NasserEddine**, maitre de conférences à l'université de Bejaia. Votre volonté de nous aider à bien finaliser notre thématique, votre contribution a été précieuse et votre expertise ont fait une réelle différence dans la qualité de notre travail, nous sommes profondément reconnaissants.*

*Aussi nous tenons également à remercier chaleureusement et nous sommes profondément reconnaissants envers notre chargée de spécialité, le **Pr.Djamila Rekioua**, professeur à l'université de Bejaia pour sa pédagogie innovante, sa capacité à rendre les concepts complexes des énergies renouvelables accessibles et compréhensibles, ainsi pour son dévouement sans faille à élargir nos horizons.*

*Nous souhaitons également à exprimer notre gratitude envers les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont faits en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*Enfin nous tenons à remercier sincèrement tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidés et ont contribué au succès de ce travail.*

*Merci à tous pour votre précieux soutien.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes parents qui m'ont soutenus pour me permettre de réaliser tous mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.*

*A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtout nos enseignants du département génie électrique.*

*A tous mes camarades et mes amis.*

*Tairi, Kouceila*

## *Dédicaces*

*À ma chère famille,*

*À mes parents qui m'ont soutenu de tout leur cœur, encouragé chaque pas de ma vie et m'ont inculqué les valeurs qui ont façonné mon parcours.*

*À mes frères et sœurs, toujours présents pour me soutenir et me guider dans toutes les étapes de ma vie.*

*À toute la famille Bourouba, petit et grand, pour leur noblesse, générosité et soutien indéfectible.*

*À mon cher frère A. Hakim, pour son soutien profond, glorieux et inconditionnel, sa sagesse éclairant ma route et sa présence illuminant mes jours.*

*À mes chers amis, à mon ami intime Chakib BELAGGOUN, psychologue de travail de l'académie française et coach, pour nos moments de joie remplis de rires et de gaieté, pour nos conversations amusantes pleines de valeurs et de sagesse.*

*IDIR, Fares*

## ***Résumé***

Ce mémoire présente une simulation de l'utilisation de l'énergie solaire issue de panneaux photovoltaïques connectés à l'onduleur à deux niveaux. La première partie traite des panneaux photovoltaïques en expliquant leur fonctionnement, leurs caractéristiques et leur modélisation. La deuxième partie se concentre sur les convertisseurs et les commandes utilisées dans la simulation. Enfin, la troisième partie décrit la procédure de simulation et présente les résultats obtenus.

La liaison entre l'énergie générée et la charge est assurée grâce à l'efficacité des convertisseurs de puissance et à leur facilité de contrôle à l'aide de commandes spécifiques. Pour cela, une configuration globale a été mise en place en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Différentes commandes ont été appliquées afin d'obtenir un rendement optimal et d'assurer le bon fonctionnement du système, même en l'absence de perturbations telles que les harmoniques ou les déséquilibres. Parmi ces commandes, on peut citer la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).

**Mots clés : panneaux photovoltaïques, générateur photovoltaïque, convertisseurs de puissance, commande MLI, commande MPPT, simulation.**

## Abstract

This thesis presents a simulation of the utilization of solar energy from photovoltaic panels connected to a two-level inverter. The first part deals with photovoltaic panels, explaining their operation, characteristics, and modeling. The second part focuses on the converters and controls used in the simulation. Finally, the third part describes the simulation procedure and presents the results obtained.

The link between the generated energy and load is ensured by the efficiency of power converters and their ease of control through Command. For this purpose, a comprehensive configuration was implemented using Matlab/Simulink software. Various controls were applied to achieve optimal efficiency and ensure the proper functioning of the system in the absence of disturbances such as harmonics or imbalances. Among these controls, we can mention Pulse Width Modulation (PWM) control and Maximum Power Point Tracking (MPPT) control.

**Keywords: photovoltaic, photovoltaic generator, chopper, boost, MPPT, PWM inverter.**

## ملخص

يقدم هذا البحث محاكاة لإستخدام الطاقة الشمسية المتولدة من لوحات الخلايا الشمسية المتصلة بمحول ذو مستويين، عن طريق المحولات. يركز الجزء الأول على لوحات الخلايا الشمسية، حيث يتم شرح عملها، خصائصها، ونمذجتها. يركز الجزء الثاني على المحولات والأوامر المستخدمة في المحاكاة. وأخيرًا، يصف الجزء الثالث إجراء المحاكاة ويقدم النتائج المتحصل عليها.

يضمن الارتباط بين الطاقة المتولدة والحمل كفاءة المحولات الكهربائية وسهولة التحكم فيها ، تم تطبيق أوامر مختلفة لتحقيق كفاءة مثلى باستخدام الأوامر المناسب. لذا، تم إنشاء تكوين شامل باستخدام برنامج ماتلاب بشكل صحيح حتى في ظل عدم وجود تشويشات مثل التوترات التوافقية أو عدم وضمان تشغيل النظام التوازن. من بين هذه الأوامر، يمكن ذكر أمر تحكم عرض النبض وأمر تتبع نقطة القدرة القصوى.

**كلمات مفتاحية: لوحات الخلايا الشمسية، مولد الطاقة الشمسية، محولات الطاقة، أمر المحاكاة، عرض النبض، نقطة القدرة القصوى.**

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I :

<b>Figure I.1 :</b> Représentation schématique d'une installation d'un système photovoltaïque sur une habitation .....	4
<b>Figure I.2:</b> Le spectre solaire.....	4
<b>Figure I.3:</b> L'énergie solaire en fonction des longueurs d'ondes.....	5
<b>Figure I.4:</b> Structure d'une cellule photovoltaïque. ....	6
<b>Figure I.5:</b> Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	7
<b>Figure I.6:</b> Cellules monocristallin.....	7
<b>Figure I.7:</b> Cellule en silicium poly cristallin. ....	8
<b>Figure I.8:</b> Cellules au silicium Amorphe. ....	8
<b>Figure I.9:</b> Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	9
<b>Figure I.10:</b> Schéma équivalent d'une cellule PV avec une résistance série.....	10
<b>Figure I.11:</b> Schéma équivalent d'une cellule PV avec résistance série et l'autre parallèle...	11
<b>Figure I.12:</b> Schéma équivalent d'une cellule PV avec résistance série et l'autre parallèle...	12
<b>Figure I.13:</b> Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.....	13
<b>Figure I.14:</b> Système photovoltaïque autonome.....	14

## Chapitre II :

<b>Figure II.1 :</b> Système d'énergie PV interconnecté au réseau de services publics.....	18
<b>Figure II.2 :</b> Schéma de principe d'un convertisseur survolteur.....	19
<b>Figure II.3 :</b> Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.....	19
<b>Figure II.4 :</b> Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.....	20
<b>Figure II.5 :</b> Schéma synoptique de la M.L.I.....	21
<b>Figure II.6 :</b> M.L.I unipolaire.....	22
<b>Figure II.7 :</b> M.L.I bipolaire.....	22
<b>Figure II.8 :</b> Technique digitale.....	23
<b>Figure II.9:</b> Technique hybride.....	23
<b>Figure II.10:</b> schéma bloc représentatif d'un onduleur.....	24

<b>Figure II.11:</b> Schéma du system photovoltaïque connecté à l'onduleur à deux niveaux.....	25
<b>Figure II.12 :</b> Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	25
<b>Figure II.13 :</b> Caractéristique <b>Ppv (Vpv)</b> d'un panneau solaire.....	27
<b>Figure II.14.</b> Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation.....	28
<b>Figure II.15 :</b> Organigramme de l'algorithme l'incrémentatation de la conductance.....	29
<b>Figure II.16. :</b> Structure de la batterie.....	30
<b>Figure II.17 :</b> Principe de fonctionnement des batteries.....	31
<b>Figure II.18 :</b> Schéma du système de gestion de batterie dans un système photovoltaïque...	31
<b>Figure II.19 :</b> Principe de fonctionnement des batteries au plomb acide.....	32
<b>Figure II.20 :</b> Principe de fonctionnement des batteries au lithium-ion.....	33
<b>Figure II.21 :</b> Principe de fonctionnement des batteries au Nickel cadmium.....	33
<b>Figure II.22 :</b> Principe de fonctionnement des batteries au nickel-hydrure métallique.....	34

### **Chapitre III :**

<b>Figure III.1 :</b> Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec hacheur boost commandé en MPPT connecté au réseau avec batterie.....	37
<b>Figure III.2 :</b> La caractéristique I(V) du module Sun Power SPR-305-WHT.....	38
<b>Figure III.3 :</b> La caractéristique P(V) du module Sun Power SPR-305-WHT.....	39
<b>Figure III.4 :</b> La caractéristique I(V) du générateur photovoltaïque.....	39
<b>Figure III.5 :</b> La caractéristique P(V) du générateur photovoltaïque.....	40
<b>Figure III.6 :</b> Schéma de simulation.....	40
<b>Figure III.7 :</b> Profil de l'irradiation ( $w/m^2$ ).....	41
<b>Figure III.8 :</b> La puissance GPV.....	41
<b>Figure III.9 :</b> Le courant de GPV.....	42
<b>Figure III.10:</b> la Tension de GPV.....	42
<b>Figure III.11 :</b> Caractéristique de la batterie.....	44
<b>Figure III.12 :</b> schéma de simulation générale.....	44
<b>Figure III.13 :</b> schéma de simulation d'un onduleur commandé en MLI.....	45
<b>Figure III.14 :</b> La tension de bus continu .....	45
<b>Figure III.15.</b> États de Switch d'onduleur à deux niveaux .....	46

<b>Figure III.16</b> : La Puissance à la sortie de GPV .....	46
<b>Figure III.17</b> : Le courant de GPV.....	47
<b>Figure III.18</b> : Tension de GPV. ....	47
<b>Figure III.19</b> : La tension à la sortie de l'onduleur .....	48
<b>Figure III.20</b> : Courants triphasés à la sortie de l'onduleur.....	48
<b>Figure III.21</b> : État de la charge de la batterie .....	48

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre II :**

<b>Tableau II.1</b> : les séquences possibles dans l'onduleur à deux niveaux.....	26
<b>Tableau II.2</b> : Tableau comparatif de quelques caractéristiques des batteries.....	34

### **Chapitre III :**

<b>Tableau III.1</b> : Caractéristique du module Sun Power SPR-305-WHT.....	38
<b>Tableau III.2</b> : Paramètres des composants du hacheur boost.....	40
<b>Tableau III.3</b> : Les paramètres de la Batterie.....	43

# LISTE DES ABREVIATIONS

$I_{ph}$ : Photo-courant [A].

$I_d$ : Courant à travers la diode [A].

$I$ : Courant fourni par la cellule [A].

$I_s$ : Courant de saturation inverse de la diode [A].

$R_p$ : Résistance parallèle de la cellule [ $\Omega$ ].

$R_s$ : Résistance série de la cellule [ $\Omega$ ].

$I_p$ : Courant circulant dans la résistance [A].

$V$ : Représente la tension de sortie du modèle [V].

$V_T$ : Tension thermique de diode [V].

$q$ : Charge électrique élémentaire.

$K$ : Constante de Boltzmann.

$T$ : Température absolue de la cellule [K].

$n$ : Le facteur d'idéalité de la diode.

$STC$ : Standard Test Condition

$U_{co}$ : Tension du circuit ouvert [V].

$V_{mpp}$ : Tension à la puissance maximale [V].

$I_{cc}$ : Courant de court-circuit [A].

$I_{mpp}$ : Courant à la puissance maximale [A].

$P_m$ : La puissance maximale.

$GPV$ : Générateur photovoltaïque

$FF$ : Facteur de forme

$SEPV$ : systèmes d'énergie solaire photovoltaïque

$MPPT$ : maximum power point tracker

$PV$ : panneau photovoltaïque

$\alpha$ : Rapport cyclique

$MLI$ : modulation de largeur d'impulsion

$DSP$ : digital signal processor

*PIC*: peripheral interface controller

*IGBT*: insulated gate bipolar transistor

*PPM* : point de puissance maximale

*OX/Red* : oxydo-réducteurs

*Li* : lithium

*MI* : matériau d'insertion

# TABLE DE MATIERES

## REMERCIEMENTS

## DEDICACES

## RESUME

## ABSTRACT

## المخلص

## LISTE DES FIGURES

## LISTE DES TABLEAUX

## LISTE DES ABREVIATIONS

## TABLE DE MATIERES

### Introduction générale

### Chapitre I : L'énergie solaire et modélisation d'une cellule photovoltaïque

I. Introduction .....	3
II L'énergie solaire .....	3
III. La conversion photovoltaïque .....	5
III.1 L'effet photovoltaïque.....	5
III.2 La cellule photovoltaïque.....	5
III.3 Principe de fonctionnement .....	6
III.4 Type de cellule .....	7
III.4.1 Cellules monocristallines.....	7
III.4.2 Cellules en silicium poly cristallin.....	8
III.2.3 Cellules au silicium Amorphe.....	8
IV. Modélisation et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	9
IV.1 Modèle idéal .....	9
IV.2 Modèle avec une résistance série .....	10
IV.3 Modèle à deux résistances.....	10
IV.4 Modèle à deux diodes.....	11
V. Caractéristiques courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) d'une cellule photovoltaïque .....	12

VI. Les Systèmes Photovoltaïques .....	14
VI.1 Système photovoltaïque autonome.....	14
VII. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	14
VII.1 Avantage .....	14
VII.2 Inconvénients .....	15
VIII. Conclusion .....	15

## **Chapitre II : commande des systèmes photovoltaïques et définition et modélisation d'autres éléments du système**

I. Introduction.....	17
II. Configuration d'un système photovoltaïque.....	17
III. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	18
III.1 Convertisseur survolteur (hacheur boost) .....	18
III.1.1 Principe de fonctionnement.....	19
III.1.2 Modèle mathématique équivalent.....	19
III.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	20
III.2.1. Principe de base de MLI.....	20
III.2.2. Caractéristiques de la modulation.....	21
III.2.3. Les différentes possibilités de la génération des signaux MLI.....	21
IV. Les onduleurs.....	23
IV.1 Définition de l'onduleur.....	23
IV.2. Principe de fonctionnement de l'onduleur .....	24
IV.3. Classification des onduleurs .....	24
IV.3.1. Onduleur autonome.....	24
IV.3.2. Onduleur non autonome (assisté).....	24
IV.4. Les applications des onduleurs.....	24
IV.5. Présentation du système photovoltaïque connecté à l'onduleur à deux niveaux.....	24
IV.6. Modélisation de l'onduleur DC/AC à deux niveaux dans le repère triphasé .....	25
V. Synthèse des commandes du système photovoltaïque.....	26
V.1. Technique de la perturbation et observation (P&O).....	27
V.2. Technique de l'incrémental de la conductibilité.....	28
VI. Les batteries.....	30
VI.1. Définition .....	30

VI.2. Structure de la batterie.....	30
VI.3. Principe de fonctionnement .....	30
VI.4. Système de gestion de batterie.....	31
VI.5. Le choix de la taille de la batterie .....	32
VI.6. Types de batteries .....	32
VI.6.1 Les batteries au plomb acide.....	32
VI.6.2 Les batteries au lithium-ion.....	33
VI.6.3 Les batteries au Nickel cadmium.....	33
VI.6.4 Les batteries au nickel-hydrure métallique.....	34
VI.7. Tableau comparatif des caractéristiques des batteries.....	34
VII. Conclusion .....	35

### **Chapitre 3 : simulation des éléments du système photovoltaïque et interprétation des résultats**

I. Introduction.....	37
II. Présentation du système de simulation.....	37
III. Simulation du système photovoltaïque.....	38
III.1 Caractéristique du module PV .....	38
IV. Simulation du SPV avec hacheur boost commandé en MPPT.....	39
IV.1 Schéma de simulation.....	40
V. Application de la commande perturbation et observation (P&O).....	41
V.1 Interprétation des résultats.....	42
VI. Simulation du système photovoltaïque connecté à l'onduleur à deux niveaux avec une batterie..	43
VI.1.1 Batterie.....	43
VI.1.2. Schéma de simulation générale.....	44
VI.1.3. Schéma de simulation de l'onduleur commandé en MLI.....	45
VI.2. Résultat de simulation.....	44
VI.3. Interprétation des résultats .....	49
VII. Conclusion .....	49

### **CONCLUSION GENERALE**

### **BIBLIOGRAPHIE**

### Introduction générale

Au cours des dernières décennies, la question de l'énergie et de sa durabilité est devenue un enjeu majeur pour notre société. La dépendance croissante aux combustibles fossiles, combinée aux préoccupations croissantes concernant le changement climatique et au fait qu'elles sont devenues un moyen de pression économique et politique, a conduit à une recherche intense de sources d'énergie alternatives et durables. C'est dans ce contexte que les énergies renouvelables ont émergé comme une solution prometteuse et incontournable.

Plusieurs pays ont adopté des stratégies visant à favoriser le développement des énergies renouvelables, en libéralisant le marché de l'électricité et en exploitant de nouvelles sources d'énergie propres et durables. Les énergies renouvelables englobent celles qui sont produites à partir du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau et de la biomasse. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons plus spécifiquement à l'énergie solaire photovoltaïque, une filière en pleine expansion ces dernières années. Cette technologie présente de nombreux avantages, tels qu'une source d'énergie inépuisable, une absence de pollution environnementale, un fonctionnement silencieux et une absence de perturbation pour les riverains.

Avec les avancées technologiques dans le domaine des panneaux solaires, leur performance s'améliore, mais les rendements demeurent relativement faibles. Par conséquent, il est crucial de maximiser la puissance qu'ils peuvent générer en minimisant les pertes d'énergie. Une caractéristique clé de ces panneaux est la puissance maximale disponible, qui n'est atteinte qu'à un point de fonctionnement spécifique. Afin d'optimiser le rendement du générateur solaire, il est nécessaire de mettre en place un dispositif d'extraction du Point de Puissance Maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracker). Différentes stratégies sont décrites dans la littérature, et parmi celles-ci, nous avons utilisé l'algorithme classique de maximisation connu sous le nom de "perturb and observe" (P&O).

La production d'électricité solaire dépend de la disponibilité du soleil, ce qui signifie qu'elle peut varier en fonction des conditions météorologiques et des cycles jour/nuit. Les batteries permettent de pallier cette intermittence en stockant l'électricité produite pendant les périodes de forte production et en la libérant lorsque la demande est plus élevée ou lorsque la production solaire est réduite.

Au premier chapitre, on présentera brièvement l'énergie solaire photovoltaïque et quelques types de cellules photovoltaïques, ensuite nous entamons notre étude sur le photovoltaïque et les modélisations basées sur les circuits équivalent des panneaux solaires et nous terminons par citer les avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser aux convertisseurs DC/DC et DC/AC insérés entre le GPV et l'onduleur, à la suite du chapitre nous parlerons des commandes du MPPT et leurs principes de fonctionnement. Nous finirons ce chapitre par citer les différents types de batteries.

Au troisième chapitre, nous procédant à la simulation, puis nous étalons les résultats obtenus et nous terminerons ce travail avec une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

## **L'ENERGIE SOLAIRE ET MODELISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE**

### I. Introduction :

Aujourd'hui, il est nécessaire de subvenir à l'augmentation de besoin de la société en énergie. Pour répondre à cette augmentation, on a deux façons possibles d'agir : Soit il faudrait diminuer la consommation des récepteurs d'énergie en améliorant leur efficacité et en augmentant leur productivité. Soit, il faudrait développer des nouvelles sources d'énergie et d'ailleurs déjà des chercheurs sont en cours de recherche. Dans l'immédiat, nous avons déjà des sources en énergie renouvelable inépuisables qui sont le vent et le soleil .On s'intéresse dans notre travail au système photovoltaïque

La technologie photovoltaïque permet de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter de pièces mobiles, de production de chaleur ou de pollution atmosphérique locale ou globale. En outre, l'énergie produite est continue et peut être facilement stockée pour une utilisation ultérieure [1].

Dans ce chapitre nous présenterons des généralités sur l'énergie renouvelable l'énergie solaire et les rayonnements solaires puis des systèmes photovoltaïques (l'effet photovoltaïques, types de cellules et leur principe de fonctionnement, etc...). Enfin nous aborderons les différents systèmes photovoltaïques ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

### II. L'énergie solaire :

L'énergie solaire représente certainement la source d'énergie renouvelable la plus élégante. En plus d'être silencieuse, elle s'intègre parfaitement aux constructions (façades, toiture...), et du fait qu'elle n'intègre pas des pièces mécaniques mobiles, elle ne nécessite pas un entretien particulier et reste fiable longtemps, c'est la raison pour laquelle elle est devenue une référence dans les applications spatiales et dans les sites isolés. Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

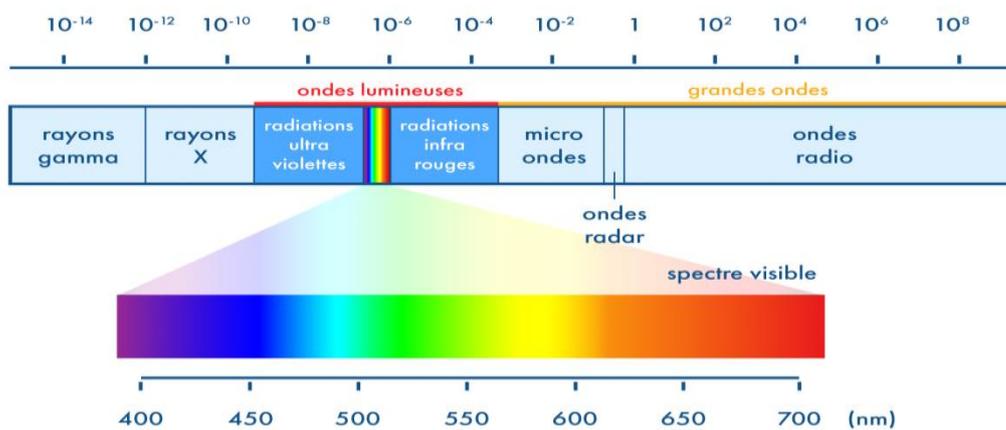
- L'énergie solaire thermique consiste à produire de la chaleur à l'aide de panneaux sombres, tandis que la vapeur peut être utilisée pour générer de l'électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque, quant à elle, utilise des panneaux solaires pour produire d'électricité directement à partir de la lumière. Cette forme d'énergie est déjà utilisée dans de nombreux pays, en particulier ceux qui manquent de sources d'énergie conventionnelles telles que les hydrocarbures et le charbon [2].



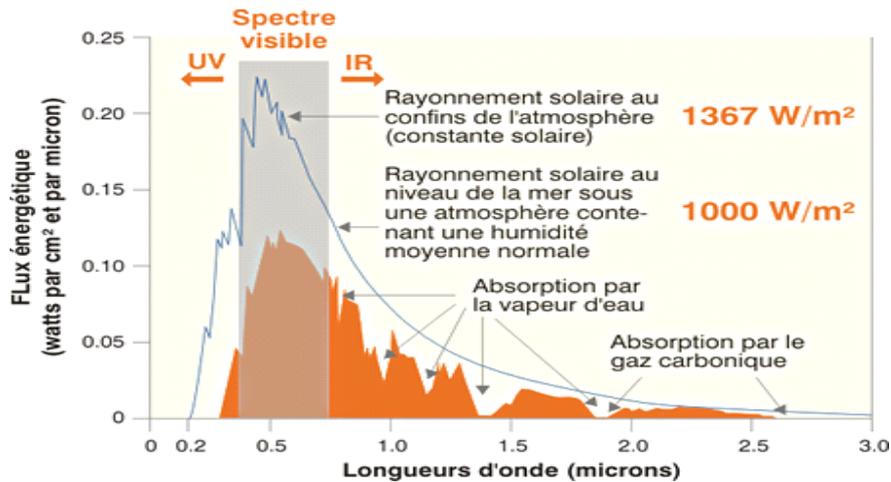
**Figure.I.1 :** Représentation schématique d'une installation d'un système photovoltaïque sur une habitation.

L'énergie photovoltaïque qui, comme son nom le laisse entendre, transforme l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en électricité.

Bien que le soleil soit situé à une distance considérable de la Terre, une quantité importante d'énergie est transmise à la surface terrestre sous forme de rayonnement électromagnétique [2]. Le photon, considéré comme la particule élémentaire du rayonnement électromagnétique, comprend une gamme d'ondes allant de la lumière visible aux ondes radios et aux rayons X. La caractérisation du rayonnement est basée sur sa longueur d'onde, sa fréquence, son énergie et son intensité. Les photons peuvent avoir une gamme d'énergies différentes, chacune étant inversement proportionnelle à sa longueur d'onde. Le spectre électromagnétique, représenté dans la figure (1.1) est défini par l'ensemble des longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique [3].



**Figure I.2 :** Le spectre solaire



**Figure I.3 :** l'énergie solaire en fonction des longueurs d'ondes.

D'après la Figure 1.2, l'énergie associée au rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4\mu\text{m}$ ).
- 47% dans la bande visibles (entre  $0.4\mu\text{m}$  et  $0.8\mu\text{m}$ ).
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0.8\mu\text{m}$ ).

### III La conversion photovoltaïque :

#### III.1.L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui consiste à la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

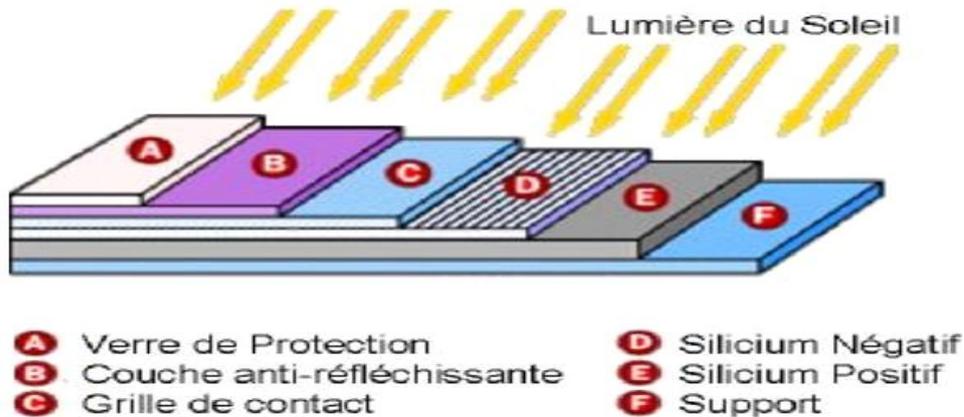
Les propriétés électriques uniques des matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, sont responsables de l'amélioration de l'effet photovoltaïque des panneaux solaires lorsqu'ils interagissent avec les photons. Les modules photovoltaïques sont composés de cellules solaires, des dispositifs semi-conducteurs fabriqués à partir de silicium pur avec des impuretés provenant d'autres éléments chimiques [4].

#### III.2.La cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont composées de semi-conducteurs capables d'absorber l'énergie lumineuse et de la convertir directement en électricité. Ces cellules se composent de :

- Une fine couche semi-conductrice, telle que le silicium, qui possède une bande interdite jouant le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure. Les propriétés électroniques de cette couche peuvent être modifiées.
- Une couche antireflet qui permet une meilleure pénétration des rayons solaires.
- Une grille conductrice située sur le dessus (cathode) et un métal conducteur sur le dessous (anode).
- Les versions les plus récentes contiennent une combinaison de multicouches

réfléchissantes juste en dessous du semi-conducteur. Cette configuration permet à la lumière de rebondir plus longtemps dans le semi-conducteur, améliorant ainsi le rendement de la cellule. [2].



**Figure I.4 :** Structure d'une cellule photovoltaïque.

### III.3.Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque se compose de deux couches de semi-conducteurs dopés, formant une diode. La première couche est dopée au phosphore et conduit les charges négatives, tandis que la seconde couche est dopée au bore et conduit les charges positives. Cette configuration crée une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsqu'un photon pénètre dans le semi-conducteur, il transfère son énergie aux atomes de la jonction PN. Les électrons de ces atomes sont éjectés, produisant des charges négatives (électrons) et des charges positives (trous). Cette création de charges crée une différence de potentiel entre les deux couches, qui peut être mesurée entre les connexions positives et négatives de la cellule. Les charges peuvent également être collectées par un courant continu.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques consiste à déplacer les électrons et les trous vers le côté opposé du matériau photovoltaïque plutôt que de les laisser revenir à leur position d'origine. En d'autres termes, il s'agit de faire circuler les électrons et les trous dans une direction commune pour générer un courant électrique. [5].

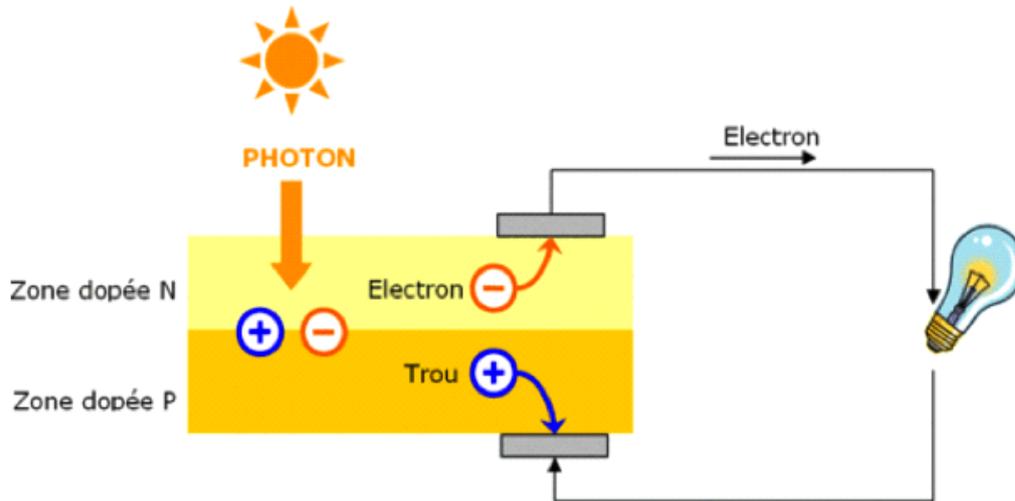


Figure I.5 : Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### III.4.Type des cellules photovoltaïques :

#### III.4.1.Cellules monocristallines :

Lors du refroidissement, le silicium se solidifie en un unique cristal bleu intense et brillant, utilisé mais peu répandu sur le marché solaire. Il offre un bon rendement dans des conditions d'éclairage élevées et est utilisé dans les panneaux solaires les plus performants.

- Rendement électrique des panneaux : 15 à 20 %.
- Puissance des panneaux : 5 à 300W<sub>c</sub>.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, habitat, centrales et toits solaires [6].

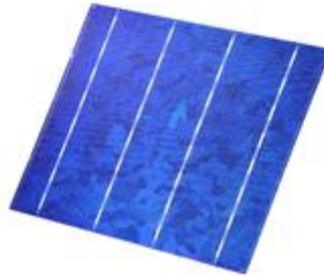


Figure I.6: Cellules monocristallines.

### III.4.2. Cellules en silicium poly cristallin :

Le silicium multi-cristallin est maintenant la technologie dominante, représentant près de 50% du marché. Les cellules sont formées en associant des cristaux de silicium, ce qui crée une structure hétérogène. Comparé au silicium monocristallin, il est légèrement moins performant dans des conditions d'éclairage modéré et moins coûteux.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 17 %.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Usage : id. silicium cristallin [6].



**Figure I.7:** Cellule en silicium poly cristallin.

### III.4.3. Cellules au silicium Amorphe :

Le silicium non cristallin intégré dans les cellules a-Silicium n'a pas subi de cristallisation, donc ses atomes sont désordonnés, ce qui améliore sa capacité à capturer la lumière par rapport au silicium cristallin. Cependant, cela entraîne des difficultés pour les charges générées à se déplacer en raison du désordre de la matière, ce qui se traduit par un faible coefficient de conversion.

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 %.
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1Wc.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90Wc.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m<sup>2</sup> (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes, centrales au sol [6].



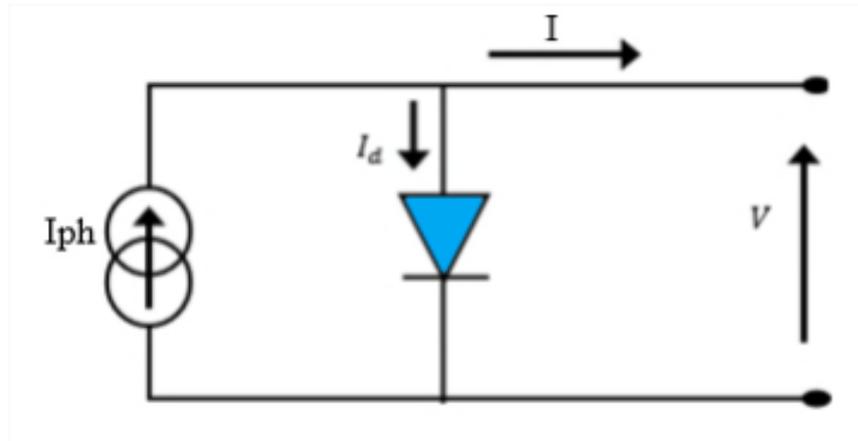
**Figure I.8:** Cellules au silicium Amorphe.

## IV. Modélisation et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

### IV.1 Modèle idéal :

Le modèle idéal est le plus simple des modèles d'une cellule photovoltaïque, il est représenté par une source de courant, qui modélise le courant généré par les photo-porteurs, en parallèle avec une diode idéale qui modélise la jonction  $PN$  [7].

Le schéma électrique équivalent de la cellule  $PV$  pour ce modèle est représenté par la figure :



**Figure I.9 :** Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.1)$$

Avec :

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I.2)$$

La tension  $V_T$  est souvent donnée par :

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (I.3)$$

D'où :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I.4)$$

Avec :

$I$ : représente le courant de sortie fournie par la cellule solaire.

$I_{ph}$ : représente le courant génère par la cellule solaire lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil [A].

$I_d$  : représente le courant de la diode [A].

$I_s$ : Courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) [A].

$V$ : représente la tension de sortie du modèle [V].

$V_T$ : Tension thermique de diode [V].

$n$  : Facteur d'idéalité de la diode.

$K$  : Constante de Boltzmann ( $K=1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).

$T$ : Température de la cellule [ $^{\circ}\text{K}$ ].

$q$ : Charge d'électron ( $q=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

#### IV.2 Modèle avec une résistance série :

Le modèle utilisant une résistance série est fréquemment employé et a été étudié par Townsend. Il représente une cellule avec une source de courant  $I_{ph}$  qui varie en fonction de l'éclairement et est connectée en parallèle avec une diode. Cette cellule est également équipée d'une résistance série  $R_s$ , qui sert à modéliser les pertes qui se produisent au niveau des contacts et des connexions. La valeur de cette résistance est très faible [7].

Le schéma électrique équivalent pour ce modèle est présenté dans la figure ci-dessous.

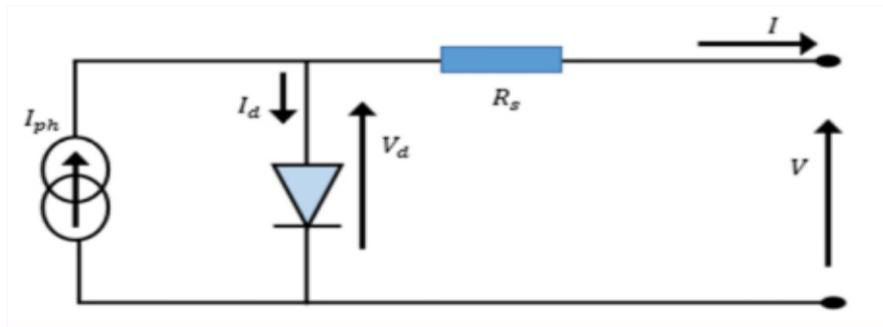


Figure I.10 : Schéma équivalent d'une cellule PV avec une résistance série.

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant résultant  $I$  est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.5)$$

Avec :

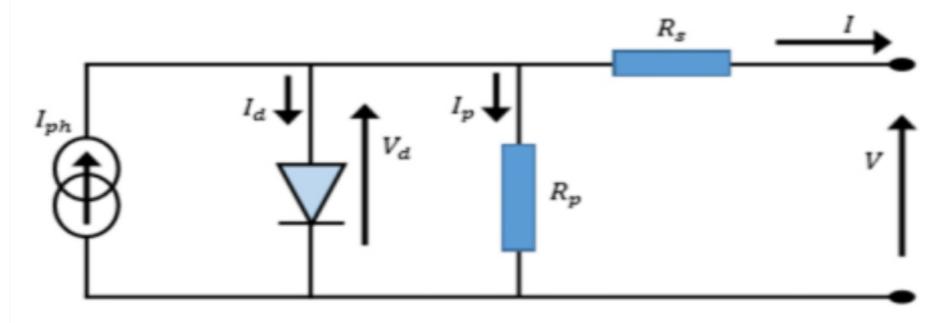
$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

D'où l'équation du courant qui est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (I.7)$$

#### IV.3 Modèle à deux résistances :

Ce modèle est similaire au modèle simplifié présenté. La Figure 1.14 montre une source de courant, une diode en parallèle avec une résistance en série. Toutefois, dans ce modèle, une résistance shunt en parallèle, notée  $R_p$ , est ajoutée. Cette résistance a une grande influence sur le courant produit par le modèle. En termes physiques, la résistance shunt sert à modéliser les pertes qui se produisent autour de la jonction en raison d'impuretés et aux coins de la cellule [8].



**Figure I.11 :** Schéma équivalent d'une cellule PV avec résistance série et l'autre parallèle.

Ce modèle est le plus utilisé dans de nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV, et sa simplicité pour le calcul mathématique.

En général, le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.8)$$

Avec :

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} \quad (I.9)$$

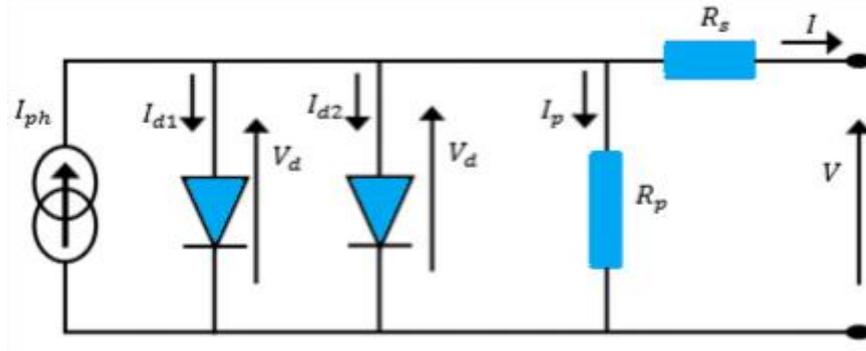
Où,  $I_p$  : représente le courant circulant dans la résistance  $R_p$

Le courant de la cellule PV peut alors s'écrire sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (I.10)$$

#### IV.4 Modèle à deux diodes :

Actuellement, le modèle à deux diodes est considéré comme le plus réaliste pour décrire le comportement d'une cellule solaire. Cela s'explique par le fait qu'il prend en compte le mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule, en utilisant deux diodes. Ce modèle est composé de deux exponentielles. La première exponentielle tient compte du phénomène de diffusion, tandis que la seconde exponentielle correspond au phénomène de recombinaison dans la région de déplétion. Pour modéliser le fonctionnement d'une cellule solaire, il est possible d'utiliser le schéma électrique équivalent à deux diodes présenté dans la Figure 1.15. Ce schéma est décrit mathématiquement par la connexion en parallèle de deux diodes ayant des courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$ , des facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , une source de courant produisant un photocourant  $I_{ph}$  dépendant de l'éclairement solaire. La résistance série  $R_s$  prend en compte la résistivité du matériau, des électrodes et du contact semi-conducteur-métal, tandis que la résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit  $R_p$  traduit la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur causé par un défaut [9].



**Figure I.12 :** Schéma équivalent d'une cellule PV avec résistance série et l'autre parallèle.

Les résistances  $R_p$  et  $R_s$  prennent en compte les phénomènes dissipatifs se produisant au niveau de la cellule. Une valeur élevée de  $R_p$  réduit les courants de fuite et améliore le facteur de forme. En revanche, une valeur faible de  $R_s$  réduit les pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur.

A partir de la figure II-4, il est clair d'observer que le courant de sortie de la cellule solaire est décrit par l'équation ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (I.11)$$

Où  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont les courants qui traversent la première et de la deuxième diode respectivement :

$$I_{d1} = I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n_1 V_{T1}}\right) - 1 \right] \quad (I.12)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n_2 V_{T2}}\right) - 1 \right] \quad (I.13)$$

Avec :

$I_{s1}$  : représente le courant de saturation la première diode ;

$I_{s2}$  : représente le courant de saturation de la seconde diode ;

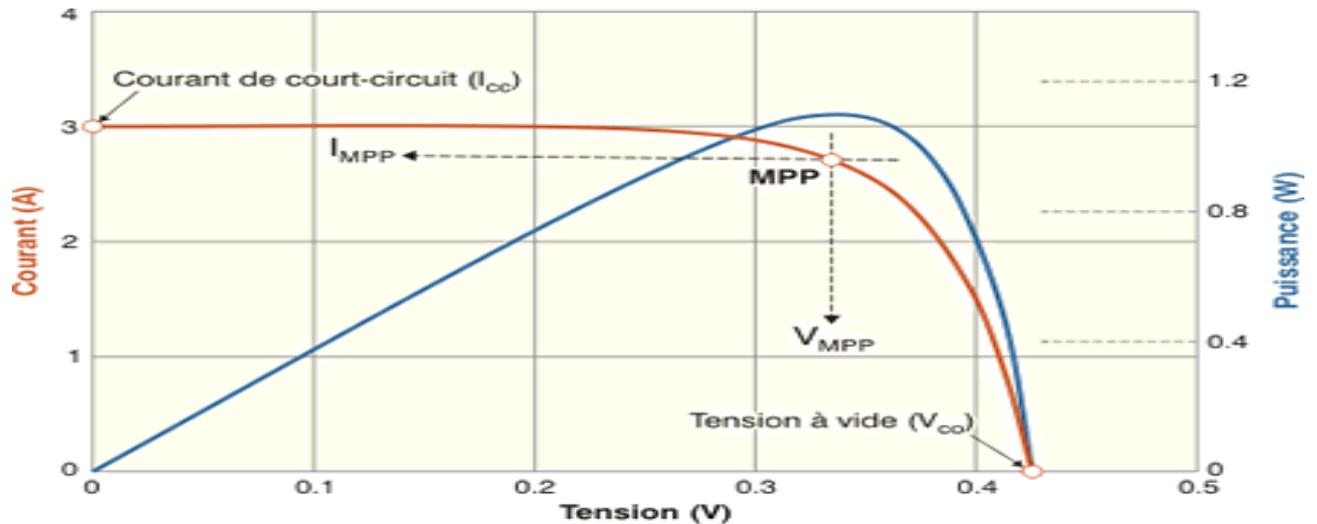
$n_1, n_2$  : représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes

Le courant prédit par le circuit présenté par la figure II-4 peut être exprimé comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n_1 V_{T1}}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n_2 V_{T2}}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (I.14)$$

## V. Caractéristiques courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) d'une cellule photovoltaïque :

La figure représente les courbes I(v) et P(v) d'un module photovoltaïque typique dans des conditions standard l'éclairement et de température 1000 W/m<sup>2</sup> et 25°C.



**Figure I.13 :** Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique  $I(v)$  et  $P(v)$  de la cellule photovoltaïque de la figure, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

- $I_{mpp}$  : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque
- $V_{mpp}$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.
- La puissance maximale  $P_m$  : C'est la puissance mesurée dans les conditions de référence (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$ , spectre AM 1.5 et à la température de  $25^\circ\text{C}$ . C'est la variation de l'impédance.
- La tension en circuit ouvert  $U_{co}$  : Si l'on place une cellule photovoltaïque sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite tension de circuit ouvert  $U_{co}$  ou tension à vide d'environ  $0,6 \text{ V}$ .
- Rendement énergétique : Rapport de la puissance maximal à la puissance de radiation incidente, il est exprimé en (%). Soit (S) la surface du module et (E) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\eta = \frac{P_m}{S \cdot E}$$

- Facteur de forme : Rapport entre la puissance maximal  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}}$$

## VI. Les Systèmes Photovoltaïques :

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque dit *GPV*), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types : autonome et raccordé au réseau.

### VI.1 Système photovoltaïque autonome :

Une centrale autonome est une installation qui ne dépend pas du réseau électrique et dont le système de stockage garantit une alimentation électrique continue même en cas de faible ensoleillement ou d'obscurité. Ces installations sont bénéfiques d'un point de vue technique et financier, et sont souvent la seule solution pour s'électrifier dans des zones où l'électricité du réseau n'est pas disponible.

Le générateur photovoltaïque fournit du courant continu, donc si l'installation nécessite du courant alternatif, un onduleur est nécessaire. Ces systèmes doivent utiliser des batteries de stockage pour stocker l'énergie produite en l'absence de soleil [10].

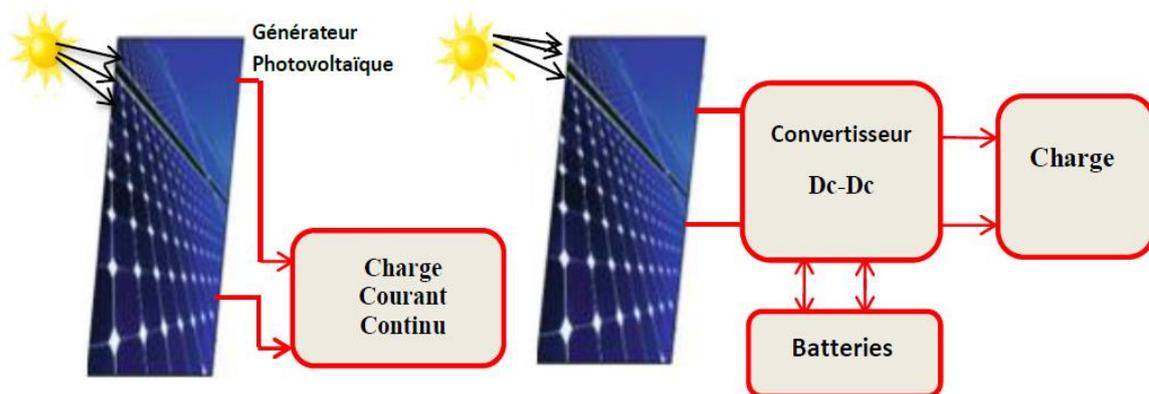


Figure I.14 : Système photovoltaïque autonome.

## VII. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

### VII.1 Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Lorsque le bâtiment est raccordé au réseau, la revente du surplus de production permet d'amortir les investissements et de générer des revenus.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

## VII.2 Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.  
Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.  
Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

## VIII. Conclusion :

En général, les cellules photovoltaïques en silicium cristallin sont les plus utilisées dans les installations solaires car elles ont une efficacité élevée et sont relativement peu coûteuses. Pour les installations plus petites et portables, les cellules photovoltaïques en film mince peuvent être une option plus pratique en raison de leur légèreté et de leur flexibilité.

Les panneaux solaires doivent être installés dans un endroit où ils peuvent recevoir le plus de lumière directe possible et être orientés vers le sud pour maximiser l'exposition au soleil.

# **CHAPITRE II**

**COMMANDE DES SYSTEMES  
PHOTOVOLTAIQUES ET  
DEFINITION ET  
MODELISATION D'AUTRES  
ELEMENTS DU SYSTEME**

## **I. Introduction :**

Les systèmes d'énergie solaire photovoltaïque (SEPV) ont été utilisés pour alimenter les charges dans les zones éloignées ainsi que dans les centrales électriques connectées à la compagnie d'électricité ; dans des zones reculées ainsi que dans des centrales électriques connectées au service public d'électricité. De nombreux travaux de recherche ont été menés pour réduire le coût de l'énergie générée par les SEPV. L'un des facteurs les plus importants des travaux de recherche est de réduire le coût de l'énergie en augmentant l'énergie générée par les systèmes photovoltaïques en modifiant ses opérations de performance. Ceci peut être réalisé en suivant la puissance maximale disponible dans les systèmes PV, ce qui peut augmenter considérablement l'énergie générée par le SEPV et d'en réduire le coût. Le dispositif utilisé pour suivre la puissance maximale disponible des systèmes SEPV est appelé tracker de point de puissance maximale (MPPT). Le MPPT utilise une technique contrôlée pour commander les convertisseurs électroniques de puissance afin de s'assurer qu'ils extraient la puissance maximale disponible du système SEPV [11].

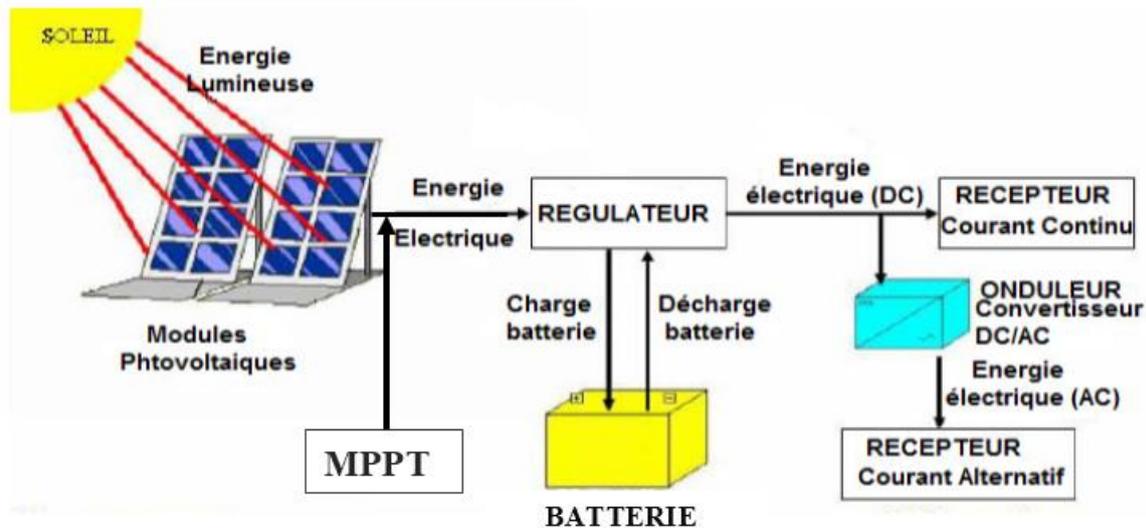
Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps, configuration d'un système photovoltaïque par la suite, un aperçu général sur les convertisseurs DC/DC qui sont utilisé dans des systèmes photovoltaïque. La seconde partie est consacrée à la description de quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximal.

## **II. Configuration d'un système photovoltaïque :**

La configuration d'un système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs tels que la puissance requise, l'emplacement géographique, la disponibilité des ressources solaires, le type de charge, les conditions climatiques et les couts. Un système photovoltaïque typique comprend des panneaux solaires, un régulateur de charge, un convertisseur de tension et des batteries. Le régulateur de charge est utilisé pour réguler la charge des batteries et éviter la surcharge ou la décharge excessive. Le convertisseur de tension est utilisé pour convertir le courant continu en courant alternatif (AC) pour alimenter les charges AC telles que les appareils électroménagers, les équipements de bureau, etc.

Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie produite par les panneaux solaires et fournir de l'énergie lorsque les panneaux ne sont pas en mesure de produire suffisamment d'énergie comme la nuit ou par temps nuageux.

La figure II.1 décrit le système qui nous sera utilisé dans notre travail, le système est constitué d'un ensemble de GPV, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC) commandé par MPPT et d'onduleur de tension triphasé qui est utilisé pour convertir la tension DC en tension AC afin d'être connecté à la charge.



La figure II.1. Système photovoltaïque plus détaillé

### Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Hacheur ou convertisseur continu-continu (DC /DC), il permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il existe plusieurs types de hacheurs, tels que le hacheur buck (abaisseur de tension), le hacheur boost (élévateur de tension), le hacheur buck-boost (abaisseur-élévateur de tension). [12]

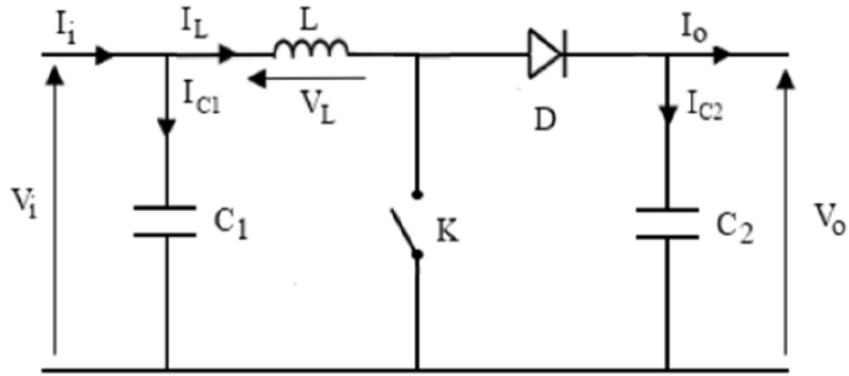
Le choix du type de hacheur dépend de l'application spécifique et des exigences de tension et de courant de sortie.

Le convertisseur BOOST peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT), puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que le d'autre convertisseur.

### III.1 Convertisseur survolteur (hacheur boost)

Un hacheur survolteur (ou "boost") est un convertisseur de puissance électronique qui élève la tension continue d'une source d'alimentation à une tension plus élevée. Il est également connu sous le nom de "convertisseur élévateur" ou "convertisseur step-up".

Le principe de fonctionnement d'un hacheur survolteur repose sur l'utilisation d'un interrupteur électronique (par exemple un transistor) qui commute rapidement entre l'état passant et l'état bloqué, en régulant la tension de sortie. Lorsque l'interrupteur est fermé, l'énergie est stockée dans un inducteur, puis lorsque l'interrupteur est ouvert, l'énergie est transférée au circuit de sortie ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.2). [12]



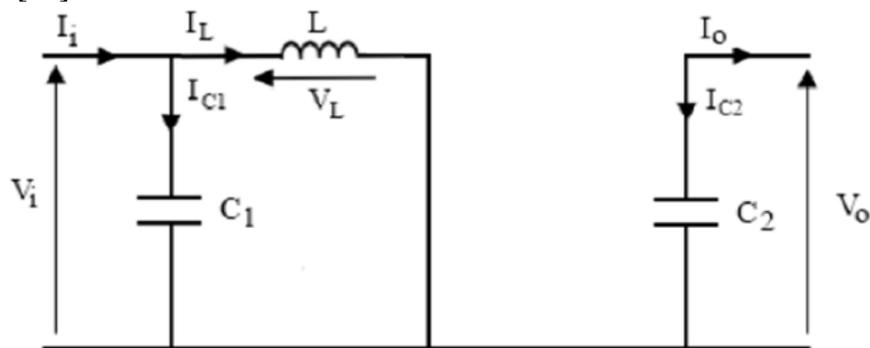
La figure II.2 : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur

### III.1.1 Principe de fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps  $t \in [\alpha T_e, T_e]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors  $V_K = V_o$ . En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on obtient :  $V_o(1 - \alpha) = V_i$ . [12]

### III.1.1 Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (II.17), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. entre  $[0, \alpha T_e]$ . [12]



La figure II.3 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations Suivantes : [12]

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.1})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II.2})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.3})$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant : [12]

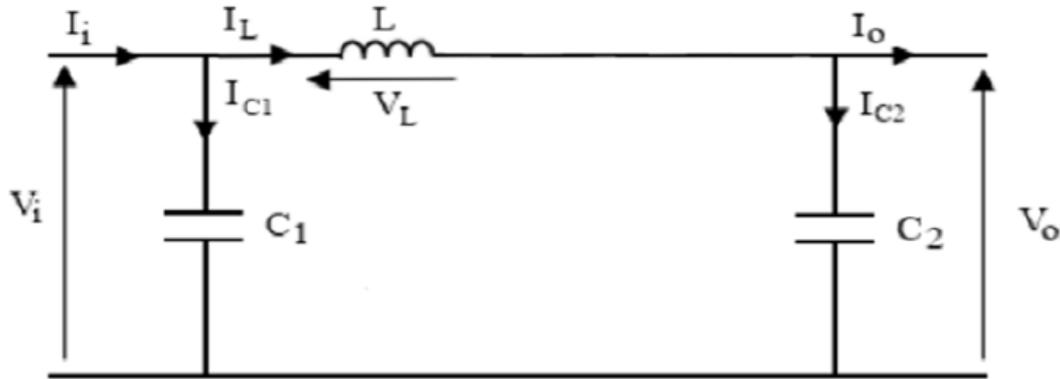


Figure (II.4) : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

Les équations suivantes sont déduites de la figure (II.4) : [12]

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.4})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (\text{II.5})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.6})$$

### III.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

#### III.2.1. Principe de base de MLI :

La modulation de largeur d'impulsion (en anglo-saxon pulse width modulation) consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer. [13]

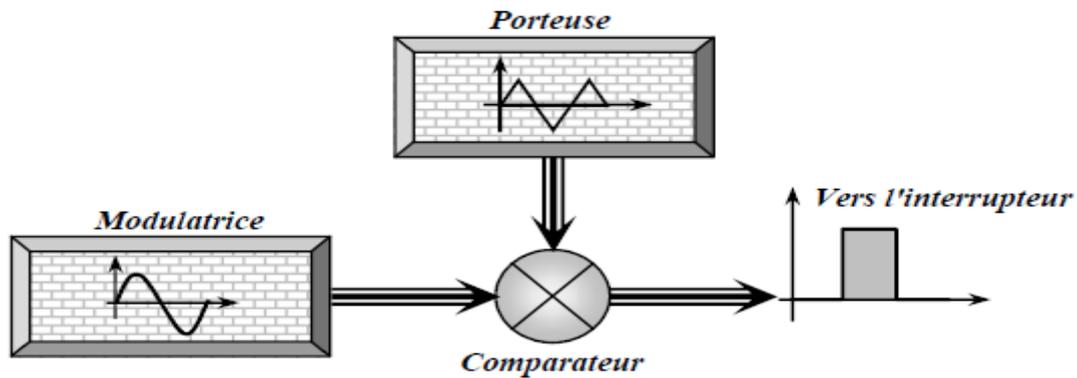


Figure (II.5) : Schéma synoptique de la commande M.L.I qui est utilisée dans les onduleurs.

### III.2.2. Caractéristiques de la modulation :

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs : [13]

- **Le coefficient de réglage** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$M_R = \frac{V_M}{V_P} \quad (\text{II.7})$$

- **L'indice de modulation** : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$M_I = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.8})$$

### III.2.3. Les différentes possibilités de la génération des signaux MLI :

Pour obtenir des signaux MLI il existe trois techniques sont : [13]

- ❖ Technique analogique
- ❖ Technique digitale
- ❖ Technique hybride

#### a) Technique analogique :

Parmi ces techniques, on trouve la M.L.I. bipolaire et unipolaire, figure (II.6) et (II.7), et qui consiste à comparer un signal triangulaire "onde porteuse", avec un signal sinusoïdal "onde modulatrice". Par exemple dans un onduleur triphasé le circuit exige trois modulations qui forment le système triphasé équilibré avec amplitude et fréquence variable. [13]

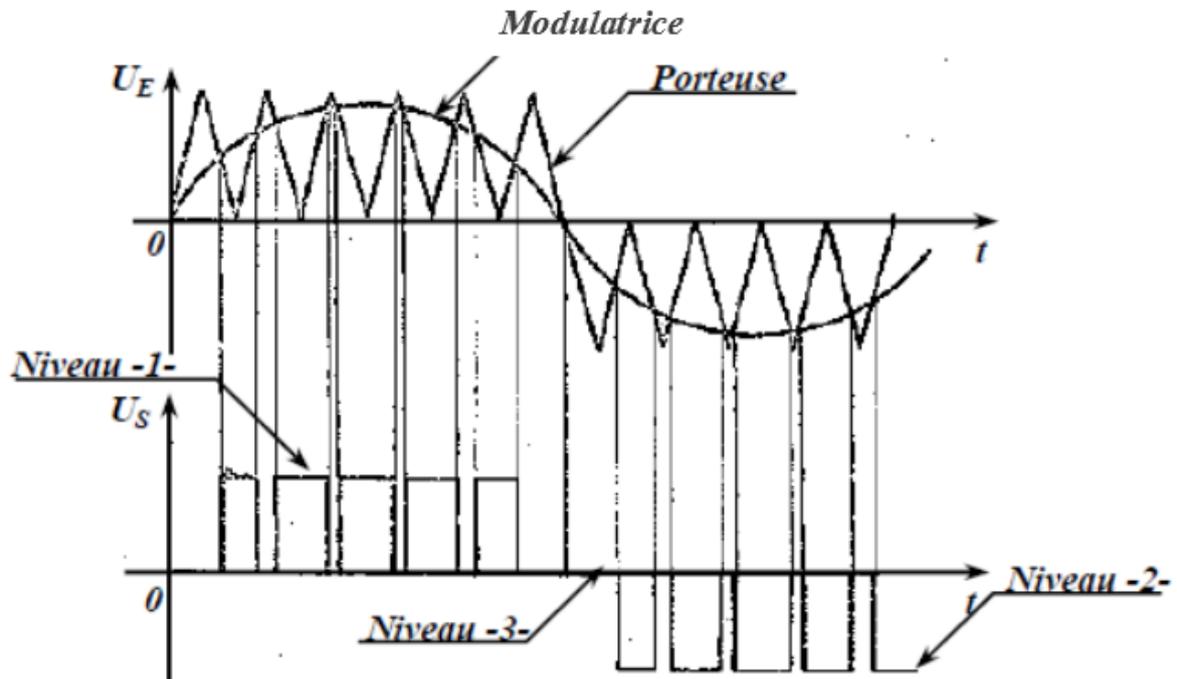


Figure (II.6) : M.L.I unipolaire

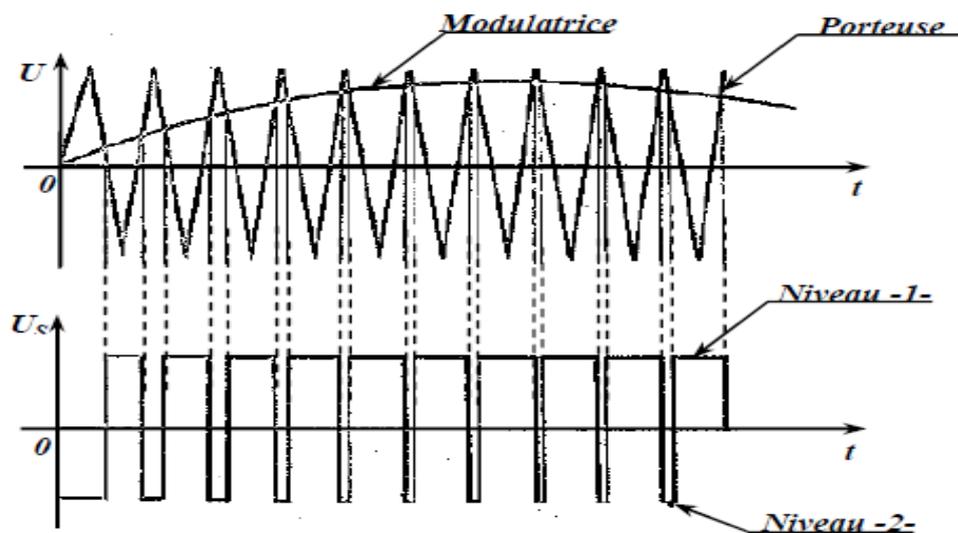


Figure (II.7) : M.L.I bipolaire

**b) Technique digitale :**

Dès l'arrivée des microprocesseurs, l'implantation des circuits d'onde M.L.I a reçu une considérable attention, une façon de classer les exemples existants des circuits M.L.I digitaux et déterminer leur proportionnalité HARDWARE et SOFTWARE. Parmi les réalisations qui ont un HARDWARE relativement complet est l'implantation à base du Circuit intégré.

Dans ce dernier la modulation est réalisée à l'aide des comparateurs pour les hacheurs, de trois comparateurs et un décodeur pour les onduleurs. D'autres implantations à base de microprocesseurs sont proposées dans lesquels la solution est en faveur du SOFTWARE, à l'aide

de ce dernier on élabore des programmes pour la génération des signaux de commande et aussi le contrôle, figure (II.8). [13]

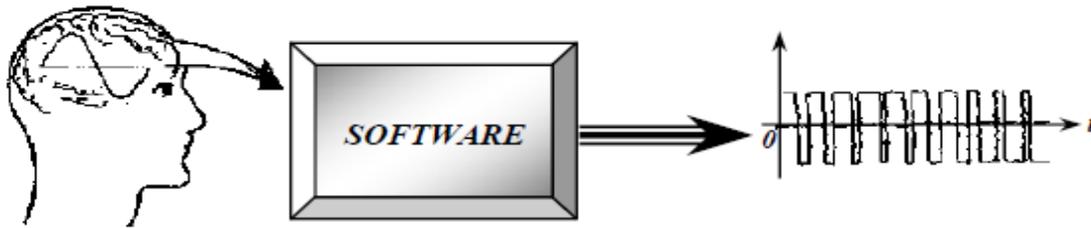


Figure (II.8) : Technique digitale

### C) Technique hybride :

Ces techniques sont basées sur l'emploi des combinaisons de circuits analogiques et digitaux, durant la période de transition de la technique analogique à la technique digitale. Le principe de cette technique est de comparer deux signaux dont l'un est triangulaire par exemple généré par un ordinateur, et l'autre sinusoïdale (cas d'un onduleur) par un circuit analogique, figure (II.9). [13]

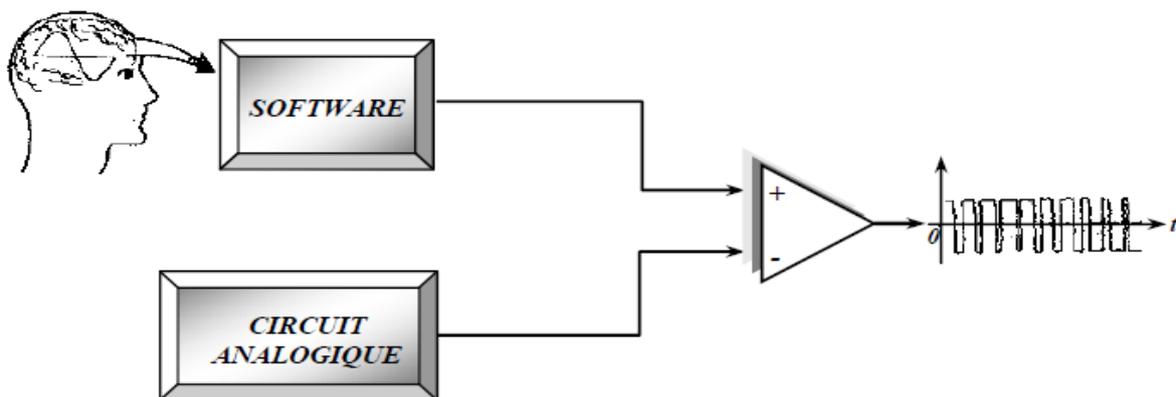


Figure (II.9) : Technique hybride.

## IV. Les onduleurs :

### IV.1 Définition de l'onduleur :

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment une puissance électrique sous forme continue en une puissance sous forme alternative, à une valeur désirée de tension ou du courant et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur à une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée. [13]

## IV.2. Principe de fonctionnement de l'onduleur :

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continu comme le montre la figure (II.10). [14]



Figure (II.10) : schéma bloc représentatif d'un onduleur.

## IV.3. Classification des onduleurs :

Il existe plusieurs schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs. [15]

### IV.3.1. Onduleur autonome :

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par la commande (un circuit analogique, une DSP ou un PIC). La charge est quelconque. [15]

### IV.3.2. Onduleur non autonome (assisté) :

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est dite «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome, c'est un redresseur fonctionnant en mode onduleur. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables. [15]

## IV.4. Les applications des onduleurs :

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité. Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcés : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif. [15]

## IV.5. Présentation du système photovoltaïque connecté à l'onduleur à deux niveaux :

Le schéma synoptique du système de puissance proposé est illustré sur la figure II.11. Ce système est constitué d'un ensemble de GPV, d'un hacheur survolteur et d'onduleur de tension triphasé. [16]

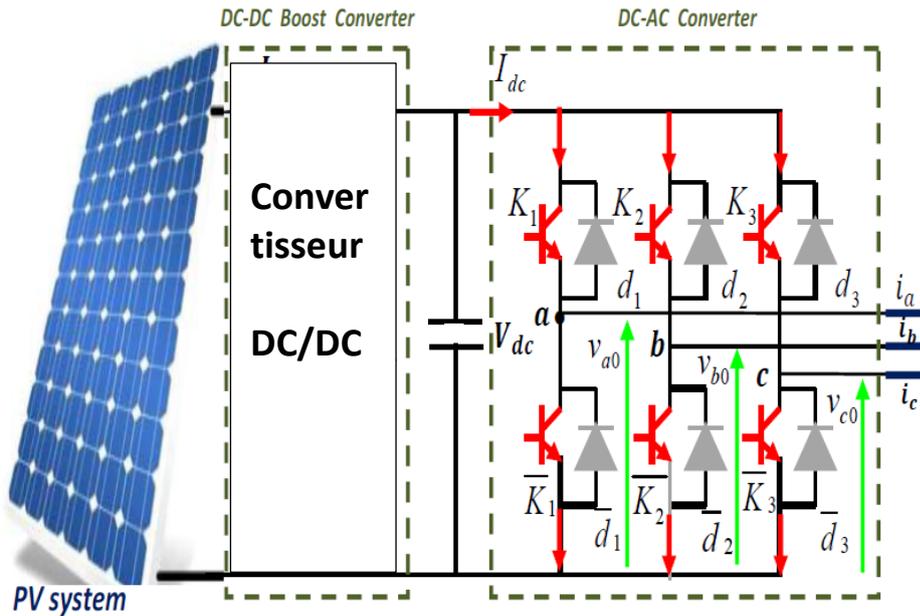


Figure (II.11) : Schéma du system photovoltaïque connecté à l'onduleur à deux niveaux

#### IV.6. Modélisation de l'onduleur DC/AC à deux niveaux dans le repère triphasé :

L'onduleur de tension est constitué généralement à transistors IGBT ou à thyristors. Il permet, d'imposer au réseau des ondes de tension à amplitudes et fréquences variables à partir d'une tension continue. Le schéma d'onduleur triphasé à deux niveaux est illustré par la figure II.12. Le bus continu est connecté à un condensateur de capacité  $C$  sous une tension  $V_{dc}$ . L'onduleur a pour objectif de maintenir la tension constante aux bornes du bus continu ainsi que de régler le facteur de puissance au point de connexion avec le réseau. [16]

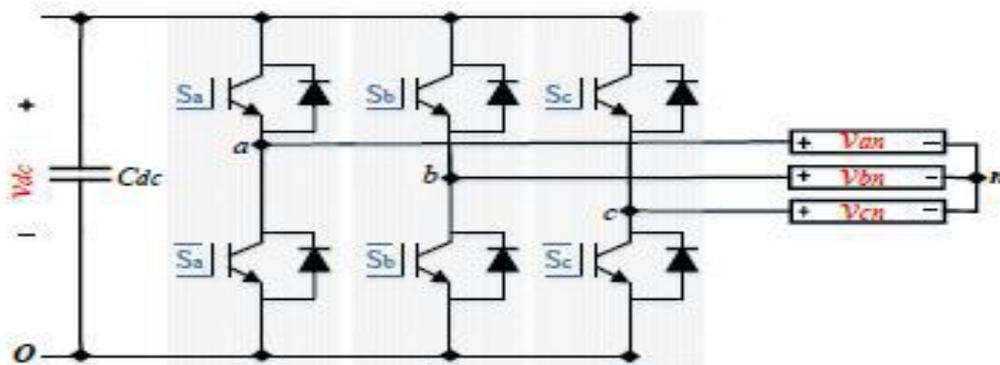


Figure II.12 : Schéma structurel d'un onduleur triphasé à deux niveaux

Les interrupteurs sont  $(S_a, S_b, S_c, \bar{S}_a, \bar{S}_b, \bar{S}_c)$  commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part La relation entre la tension continue et les tensions alternatives varie en fonction de l'état de ces interrupteurs. Le vecteur de tension à la sortie de l'onduleur est donné par : [16]

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Avec  $V_{dc}$  la tension du bus continu à l'entrée de l'onduleur,  $(S_a, S_b, S_c)$  sont les états des interrupteurs des bras de l'onduleur pour les trois phases  $(a, b, c)$  respectivement. Le nombre des états de commutation possibles de l'onduleur à deux niveaux est de huit états représenté par huit vecteurs de tension avec six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls : (voir le tableau II.1).[16]

Si  $i_a, i_b, i_c$ , sont les courants de la partie alternative, le courant dans le coté continu peut être donné par : [16]

$$I_{DC} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{II.10})$$

$S_a$	$S_b$	$S_c$	Vecteur de sortie
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = \frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = -\frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = -\frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = \frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

Tableau II.1 : les séquences possible dans l'onduleur à deux niveaux

## V. Synthèse des commandes du système photovoltaïque :

La détermination de la puissance de référence des panneaux solaires est plus délicate que cette dernière est en fonction des paramètres météorologiques (température et éclaircissement). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Donc une commande pour la poursuite du point de la puissance maximale PPM s'impose. Cette commande, dite algorithme MPPT. [16]

Une commande MPPT, en anglais Maximum Power Point Tracking est une loi de commande spécifique permet de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque. Le principe MPPT est l'utilisation d'un circuit qui mesure la tension et le courant du panneau pour tirer l'énergie au point de puissance maximale. Beaucoup d'algorithmes qui cherchent le PPM, ont été proposés dans la littérature, certains parmi eux sont basés sur le calcul instantané de la puissance soit à l'entrée soit à la sortie du convertisseur. D'autres commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant délivré par le

GPV. Dans notre travail, pour une meilleure compréhension des performances de ces commandes, nous expliquons dans le paragraphe suivant quelques techniques les plus utilisées [16].

### V.1. Technique de la perturbation et observation (P&O) :

La méthode de perturbation et observation est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT. Le principe de cette commande est basé sur un algorithme de contrôle adaptatif, qui consiste à calculer la puissance instantanée à chaque instant  $P(k)$  à partir de la tension et le courant instantanés.

Faire une comparaison à celle mémorisée à  $(k-1)$ , et selon le résultat de comparaison,  $V_{pv}$  est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit dans une direction opposée (Figure II.3, Figure II.4). Ce processus est lié à un calcul bouclé du rapport cyclique qui sera appliqué à un convertisseur DC-DC. Ce principe reste toujours la base des algorithmes développés [16].

Le problème avec cet algorithme est : [16]

- l'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales ;
- la mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement. Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémentations mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.

La figure (II.13) suivante d'écrit un schéma explicatif de la méthode de perturbation et d'observation. [17]

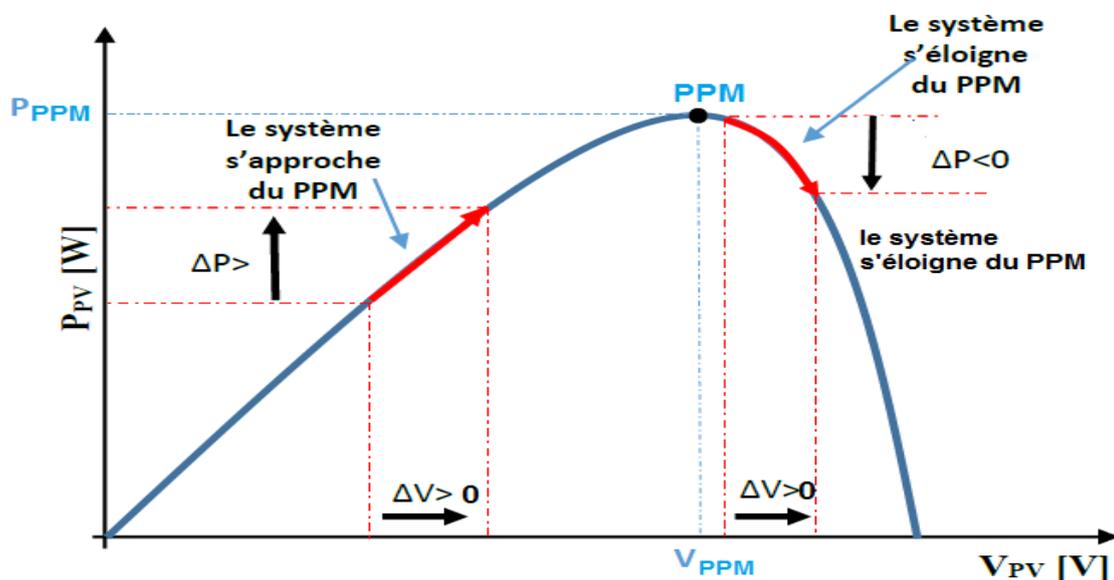


Figure II.13 : Caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) d'un panneau solaire.

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (II.14) suivante : [17]

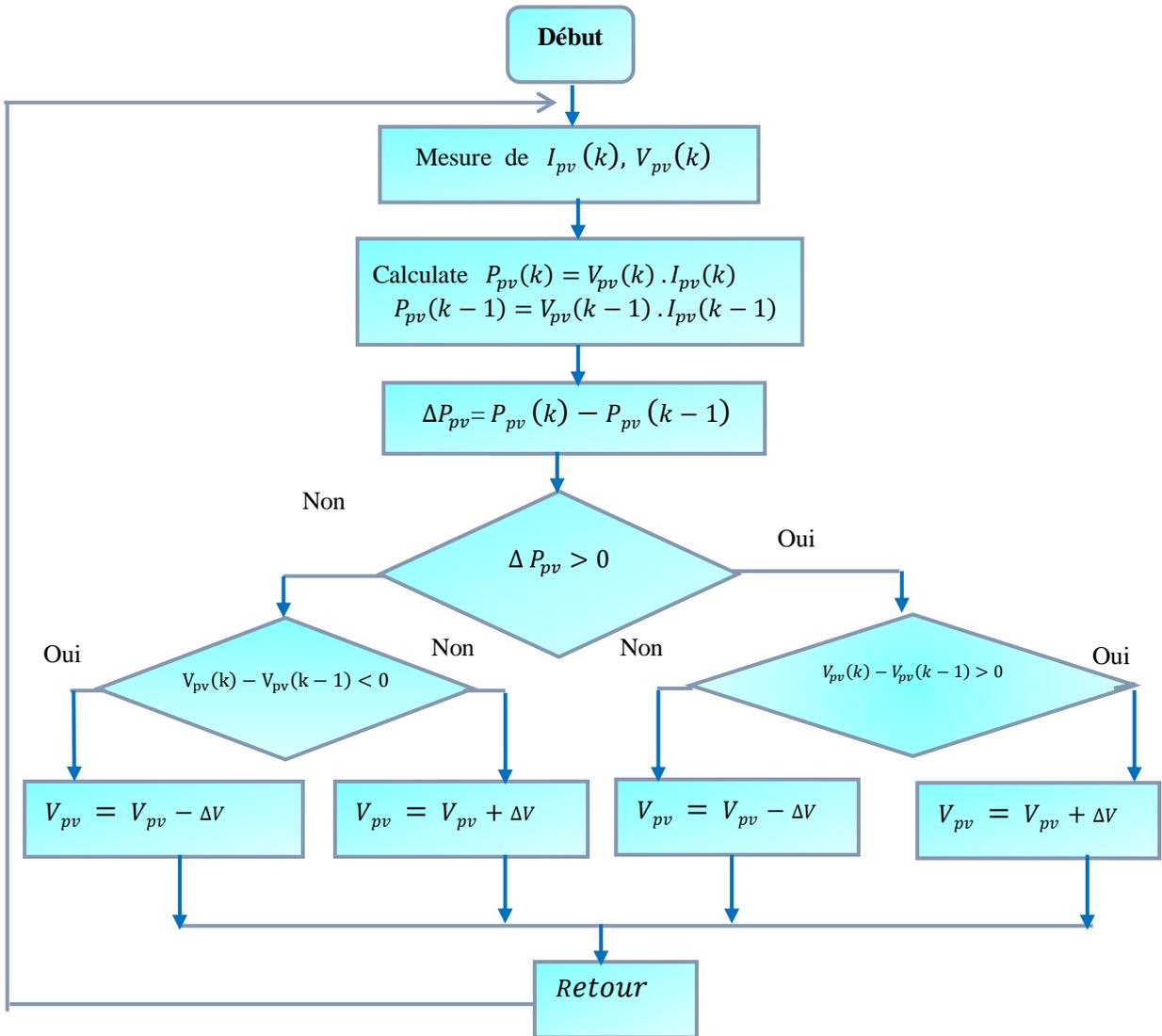


Figure II.14. : Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation

## V.2. Technique de l’incrémentatation de la conductibilité :

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance est une grandeur physique relativement connue : elle se base sur la connaissance de la variation de cette grandeur du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. La figure II.15 permet d’écrire les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, & \text{le point de fonction est au voisinage de PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est à gauche du PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est à droite du PPM} \end{cases}$$

Cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme Inc-Cond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus. [16]

Organigramme de l'algorithme l'incrémation de la conductance est le suivant : [16]

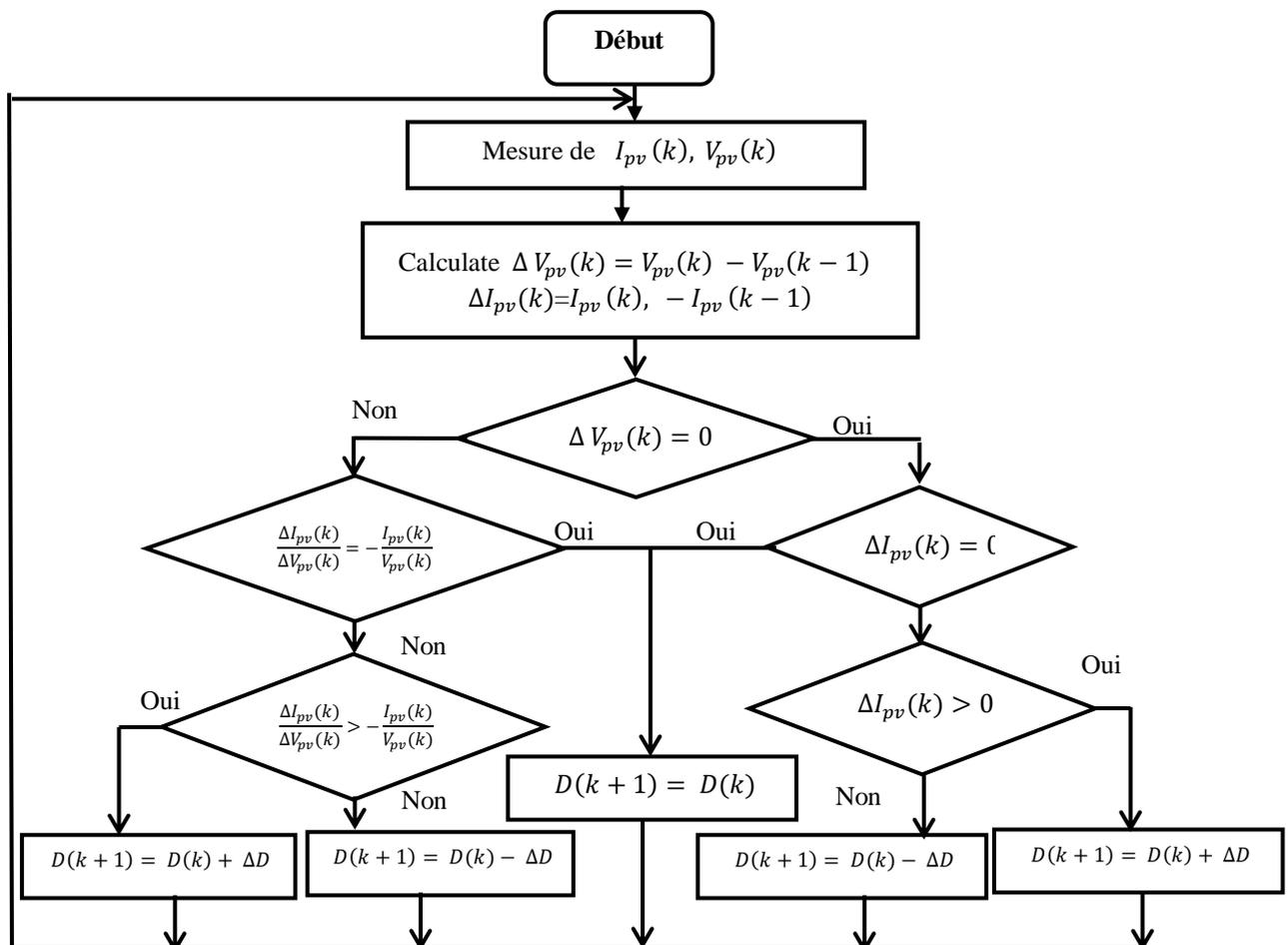


Figure II.15 : Organigramme de l'algorithme l'incrémation de la conductance

## VI. Les batteries

### VI.1.Définition

Les batteries solaires sont conçues pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques, assurant ainsi une alimentation électrique continue, indépendamment des conditions (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Elles sont également connues sous le nom de batteries à décharge lente ou batteries stationnaires, spécialement adaptées aux systèmes solaires. Contrairement aux autres batteries, ces batteries solaires se déchargent de manière progressive et peuvent supporter des décharges fréquentes et peu profondes plus efficacement.

### VI.2. Structure de la batterie :

Une batterie solaire comporte des électrodes positives et négatives composée d'alliages plongées dans un électrolyte (acide). L'ensemble est enfermé dans un bac scellé ou équipé d'un bouchon de remplissage et d'un évent. Les réactions d'oxydoréduction qui régissent le fonctionnement d'une batterie sont réversibles, tant que la batterie n'a pas été complètement déchargée pendant une période prolongée ni surchargée de manière excessive. Un fonctionnement prolongé dans l'un de ces états conduirait à une détérioration des performances de la batterie. [18]

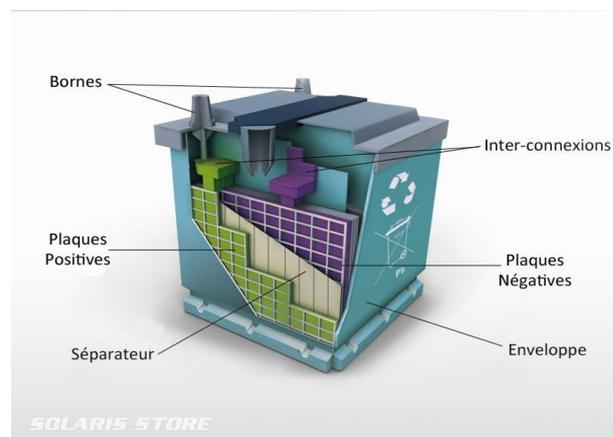


Figure II.16. : Structure de la batterie

### VI.3. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'une batterie repose sur l'utilisation de deux paires d'oxydo-réducteurs,  $OX1/Red1$  et  $OX2/Red2$ , qui se produisent sur des électrodes distinctes. La réaction chimique entre ces deux électrodes est une réaction d'oxydo-réduction, permettant l'échange réversible d'ions tout au long des cycles de charge et de décharge. La réaction globale du système est la suivante :  $OX2+Red1 \rightleftharpoons OX1+Red2$  **(II.10)**

Pour que les réactions chimiques puissent avoir lieu, les électrons sont connectés à l'extérieur de la cellule à un circuit électrique. La figure (I.14) suivante présente le principe de fonctionnement d'un accumulateur.

Lors de la décharge, la batterie fournit de l'énergie à une charge connectée à ses deux électrodes. À la plaque négative, une oxydation se produit, entraînant une perte d'électrons, tandis qu'à la plaque positive, une réduction se produit, entraînant un gain d'électrons. Lors de la charge, le processus s'inverse, et une force électromotrice apparaît entre les deux électrodes.

L'électrolyte joue un rôle essentiel en facilitant le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. [18]

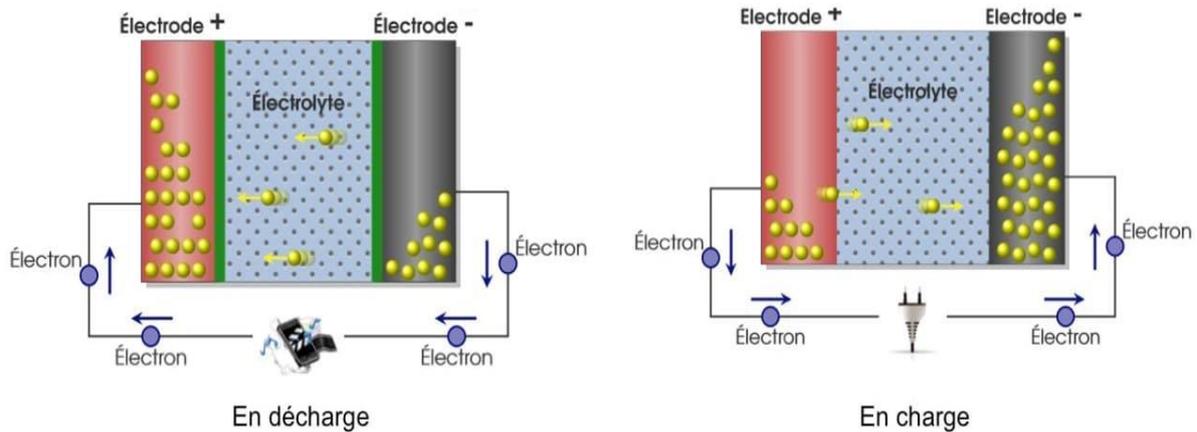


Figure II.17 : Principe de fonctionnement des batteries

#### VI.4. Système de gestion de batterie :

Le système de gestion de batterie surveille tous les aspects des batteries, tels que la tension, le courant, la température et l'état de charge, tout en les protégeant contre une surcharge ou une décharge excessive. Le système de gestion de batterie communique également avec les autres composants de votre système pour s'assurer que tout fonctionne correctement et qu'il n'y a aucun problème qui pourrait endommager l'un d'entre eux sans avertissement.

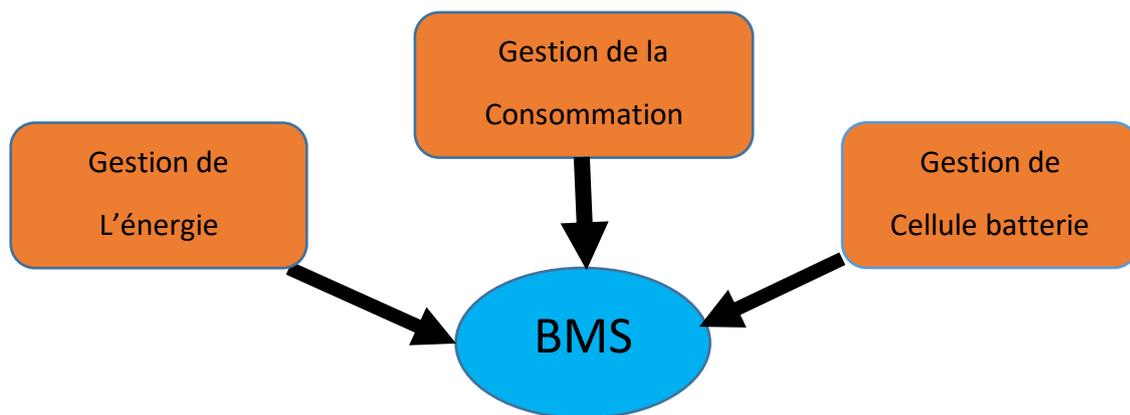


Figure II.18 : Schéma du système de gestion de batterie dans un système photovoltaïque

**VI.5. Le choix de la taille de la batterie :**

La taille de votre banque de batteries dépendra du nombre de jours pendant lesquels vous souhaitez pouvoir fonctionner sans être connecté au réseau électrique. Plus vous avez d'énergie stockée dans vos batteries, plus vous pouvez fonctionner longtemps avant d'avoir besoin d'une recharge provenant d'une autre source, comme un générateur ou d'autres systèmes d'alimentation, ce qui nécessiterait du carburant et des coûts d'entretien tout en produisant des gaz à effet de serre.[19]

Pour calculer la taille de votre batterie, vous devez calculer les watt-heures (Wh) dont vous avez besoin par jour en multipliant le nombre de jours pendant lesquels vous souhaitez être autonome par votre consommation d'énergie en watts. [19]

Pour une exigence quotidienne de 10 kWh, la taille de la batterie lithium requise sera : 10 kWh x 1,2 (profondeur de décharge de 80 %) x 1,05 (facteur d'inefficacité) = 12,6 kWh. [19]

Les batteries sont disponibles en trois tensions : 12, 24 et 48 volts. Pour les batteries au lithium, 12,6 kWh équivaut à : 1 050 ampères-heures à 12 volts, 525 ampères-heures à 24 volts ou 262,5 ampères-heures à 48 volts. [19]

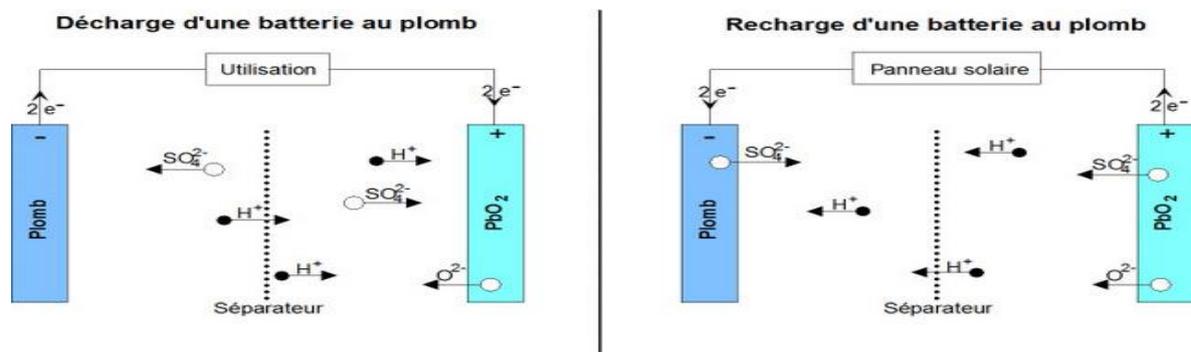
**VI.6.Types de batteries :**

Les batteries les plus couramment utilisées pour le stockage d'énergie électrique dans les applications stationnaires comprennent les batteries au plomb-acide, les batteries au nickel-cadmium, les batteries au nickel-hydrure métallique et les batteries au lithium-ion.

**VI.6.1. Les batteries au plomb acide :**

La batterie au plomb-acide est largement utilisée comme forme de stockage d'énergie électrique en raison de son coût relativement bas et de sa disponibilité étendue. Elle est composée d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension souhaitée. La batterie est constituée de plaques positive et négative assemblées en alternance, avec des électrodes recouvertes de matière active. [20]

L'équation globale de la réaction (charge ou décharge) est :



**Figure II.19 :** Principe de fonctionnement des batteries au plomb acide

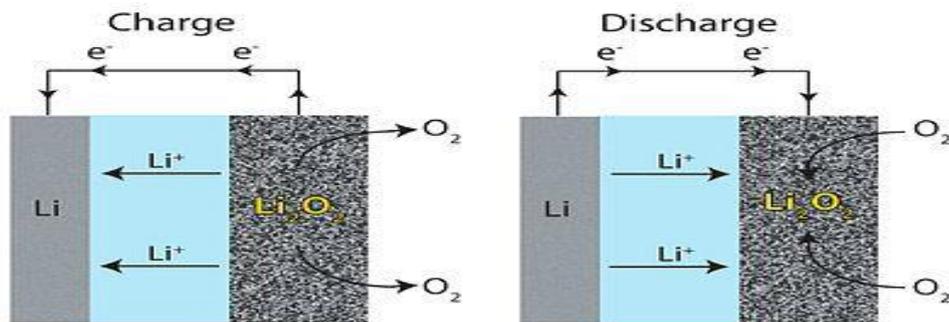
**VI.6.2. Les batteries au lithium-ion :**

La batterie au lithium-ion est un dispositif de stockage d'énergie électrochimique qui utilise le lithium sous forme ionique. Elle est composée d'un séparateur, d'une anode en graphite et d'une cathode généralement fabriquée à partir d'oxyde métallique. Les deux électrodes sont immergées dans un électrolyte contenant principalement des ions lithium. L'électrolyte facilite l'échange réversible des ions entre les électrodes, permettant ainsi la génération d'électricité. [20]

L'équation globale de la réaction (charge ou décharge) est :



Avec MI le matériau d'insertion placé à l'électrode positive.

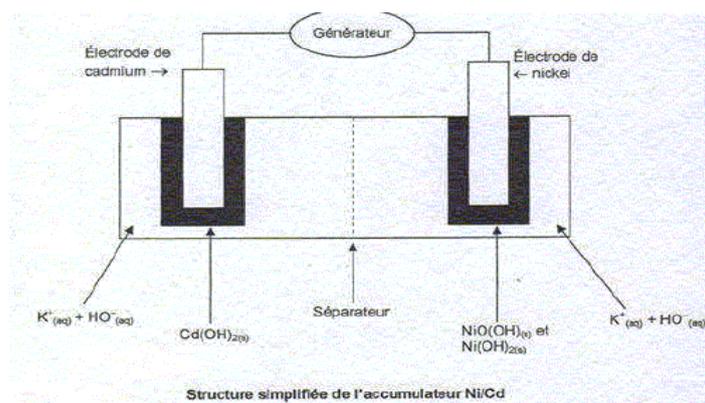


**Figure II.20 :** Principe de fonctionnement des batteries au lithium-ion.

**VI.6.3. Les batteries au Nickel cadmium :**

Une batterie au nickel-cadmium est une batterie rechargeable dans laquelle l'électrode positive est composée d'hydroxyde de nickel et l'électrode négative est composée de cadmium. Ces électrodes sont immergées dans un électrolyte à base de potasse.

Les réactions d'oxydoréductions ayant lieu pendant la charge et la décharge sont traduites par l'équation : [20]



**Figure II.21 :** Principe de fonctionnement des au Nickel cadmium.

**VI.6.4. Les batteries au nickel-hydrure métallique :**

L'accumulateur nickel-hydrure métallique a été développé comme alternative aux accumulateurs Ni-Cd afin de résoudre le problème de toxicité du cadmium. L'électrode positive de l'accumulateur NiMH est constituée d'oxyhydroxyde de nickel (NiOOH), tandis que l'électrode négative est composée d'un alliage capable d'absorber l'hydrogène sous forme d'hydrure métallique lors de la charge de la batterie. [20]

L'équation globale de la réaction (charge ou décharge) est :

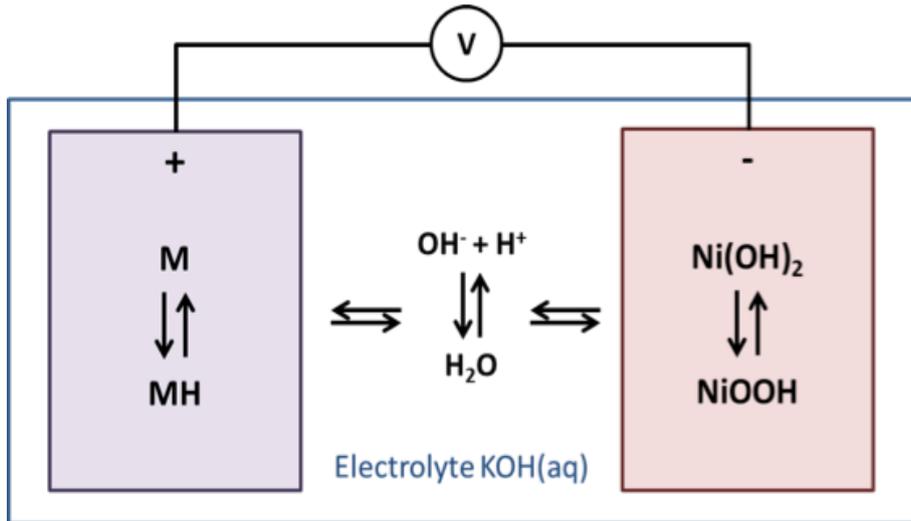


Figure II.22 : Principe de fonctionnement des batteries au nickel-hydrure métallique.

**VI.7. Tableau comparatif des caractéristiques des batteries :**

Type de batteries	Tension d'un élément (V)	Durée de vie (nombre de recharge)	Temps de charge (en heures)	Autodécharge (par mois)
Plomb acide	2 V	200-300	8-16 h	5 %
Lithium-ion	3.7 V	500-1000	2-4 h	10 %
Nickel cadmium	1.25 V	1500	1 h	20 %
Nickel-hydrure métallique	1.25 V	300-500	2-4 h	30 %

Tableau II.2 : Tableau comparatif de quelques caractéristiques des batteries

**VII. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons exploré différents aspects de la configuration d'un système photovoltaïque qui implique de prendre en compte de nombreux éléments, tels que les convertisseurs DC-DC, les techniques de commande, la gestion des batteries et le choix de l'onduleur. Nous avons commencé par examiner les convertisseurs DC-DC, tels que les hacheurs, qui jouent un rôle essentiel dans le processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique utilisable. En particulier, nous nous sommes concentrés sur le convertisseur survolteur, Ensuite, nous avons abordé la commande MLI et les différents techniques du commande MPPT, notamment la technique de la perturbation et observation (P&O) et la technique de l'incrémentation de la conductibilité, qui permettent d'optimiser les performances du système.

Une compréhension approfondie de ces différents aspects est essentielle pour concevoir et optimiser un système photovoltaïque efficace, fiable et adapté aux besoins spécifiques de l'utilisateur.

# **CHAPITRE III**

**SIMULATION DES  
ELEMENTS DU SYSTEME  
PHOTOVOLTAÏQUE ET  
INTERPRETATION DES  
RESULTATS**

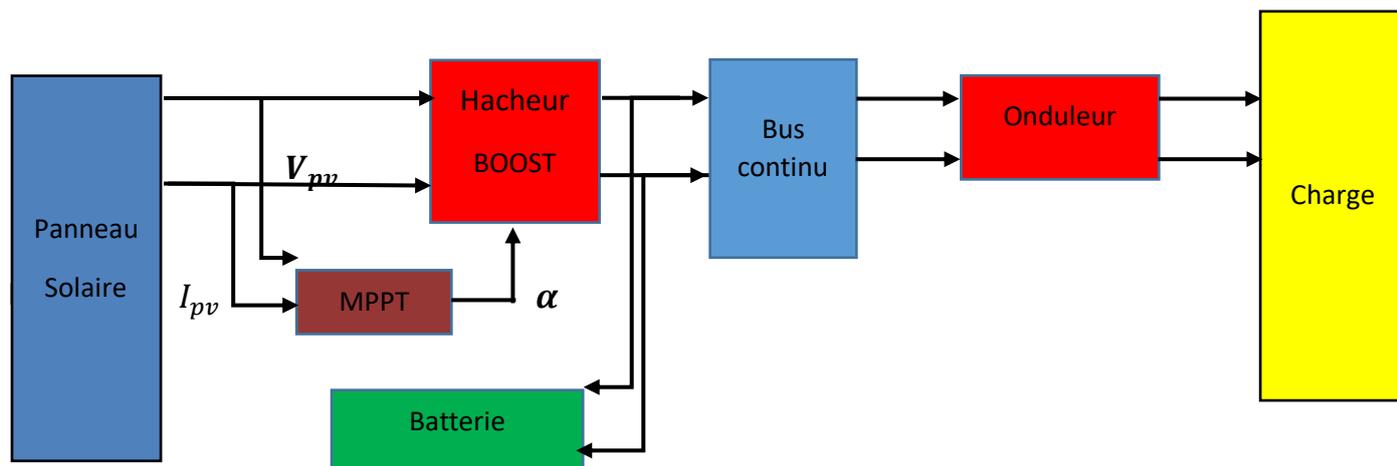
## I. Introduction :

Nous proposons dans ce chapitre la simulation sous environnement Matlab, des techniques de poursuite du point de puissance maximal grâce aux méthodes décrites dans les chapitres précédents. Dans un premier temps, nous allons simuler le comportement d'un GPV commandé à l'aide d'un hacheur Boost, débitant sur une charge résistive et piloté respectivement à l'aide de la méthode de perturbation et observation (**P&O**) , Dans un second temps, nous remplacerons la charge résistive par un onduleur triphasé à deux niveaux contrôlé en utilisant une commande MLI dans le but d'intégrer de manière efficace le système PV à une charge alternative. Enfin on introduisant une batterie .Toutes les opérations de simulation sont faites par le logiciel MATLAB R2012a.

## II. Présentation du système de simulation :

La chaîne de conversion photovoltaïque a été entièrement modélisée et étudiée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. Elle est composée de blocs fonctionnels programmés et simulés qui sont :

- **GPV**, simulant le fonctionnement d'un module et/ou d'un panneau photovoltaïque.
- **Boost**, simulant le fonctionnement d'un convertisseur élévateur de type Boost ;
- **Commande** : une commande MPPT appliquée au convertisseur, et la commande ; MLI appliquée à l'onduleur triphasé a deux niveaux.
- **Paramètres météo**, définissant les conditions d'ensoleillement et de température extérieure.
- **Batterie**



**Figure III.1** : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec hacheur boost commandé en MPPT connecté au réseau avec batterie

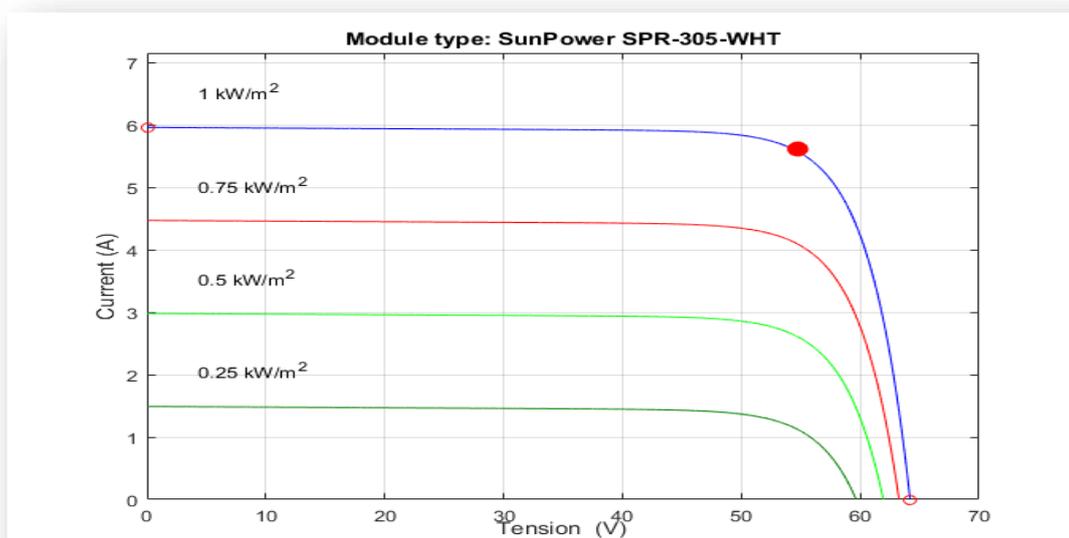
### III. Simulation du système photovoltaïque :

#### III.1 Caractéristique du module PV :

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV de type Sun Power SPR-305-WHT. Le tableau (3.1) donne les caractéristiques du module Sun Power SPR-305-WHT avec 96 cellules monocristalline en série, sous les conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup>, Température de la cellule : 25°C), la figure 3.2 et la figure 3.3 donnent respectivement la caractéristique I(V) et La caractéristique P(V) du module Sun Power SPR-305-WHT.

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale	305 W
Tension au MPP ( $V_{PPM}$ )	54.7V
Courant au MPP ( $I_{PPM}$ )	5.58 A
Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )	5.69A
Tension de circuit-ouvert ( $V_{oc}$ )	64.2 V
Courant photonique ( $I_{ph}$ )	5.96 A
Courant de saturation ( $I_{sat}$ )	5.26 $\mu$ A
Temp.Coefficient de tension	-0.177 V/K
$R_s$	0.037998 $\Omega$
$R_p$	993.51 $\Omega$
Number of cells connected in series ( $N_s$ )	96

**Tableau III.1 :** Caractéristique du module Sun Power SPR-305-WHT.



**Figure III.2 :** La caractéristique I(V) du module Sun Power SPR-305-WHT

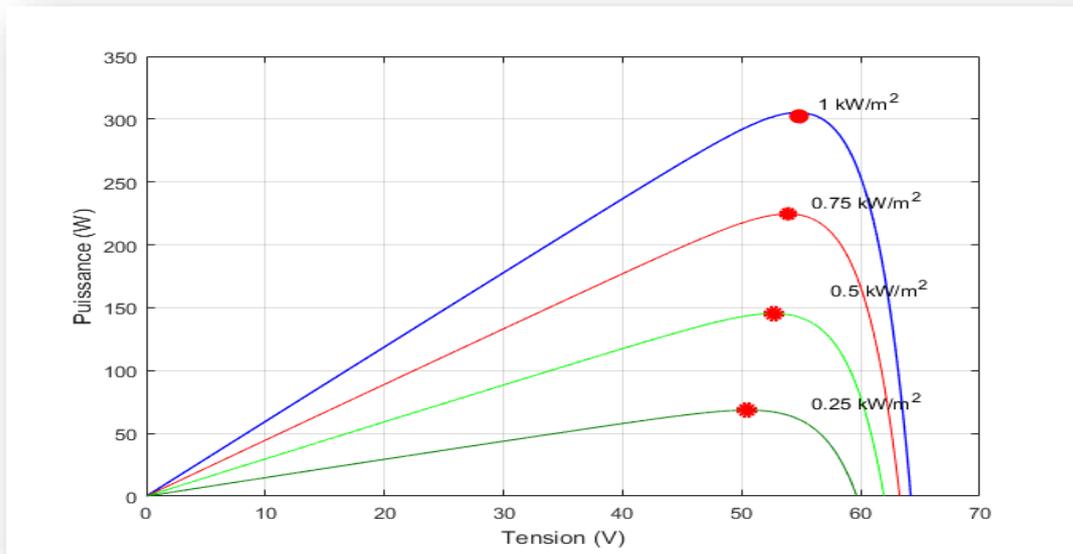


Figure III.3 : La caractéristique P(V) du module Sun Power SPR-305-WHT.

#### IV. Simulation du SPV avec hacheur boost commandé en MPPT :

Dans cette simulation on a utilisé 5 modules PV de type Sun Power SPR-305-WHT avec un hacheur boost dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau (III.1).

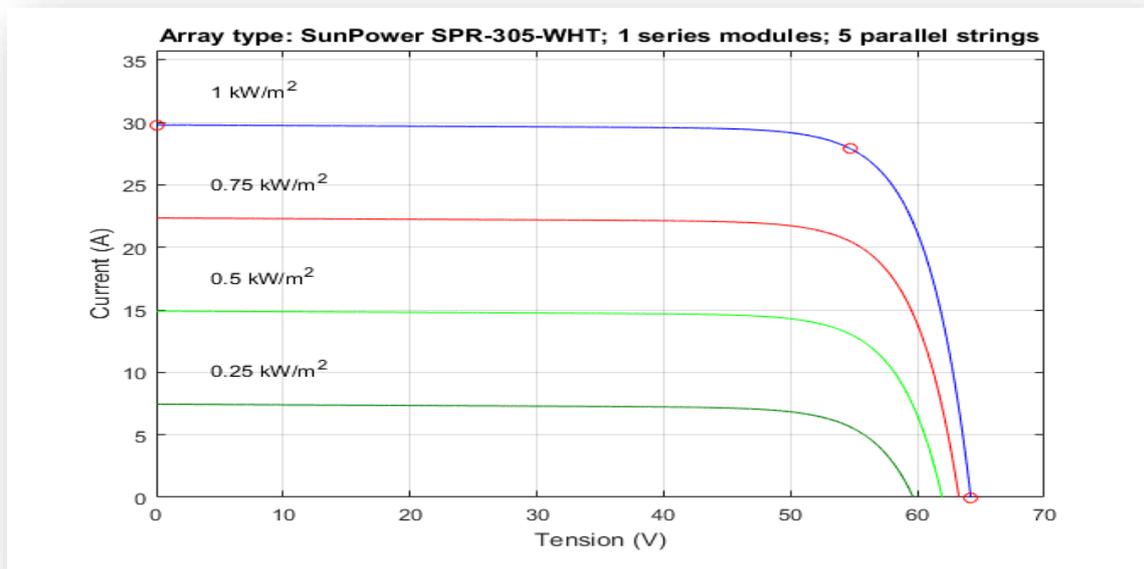


Figure III.4 : La caractéristique I(V) du générateur photovoltaïque

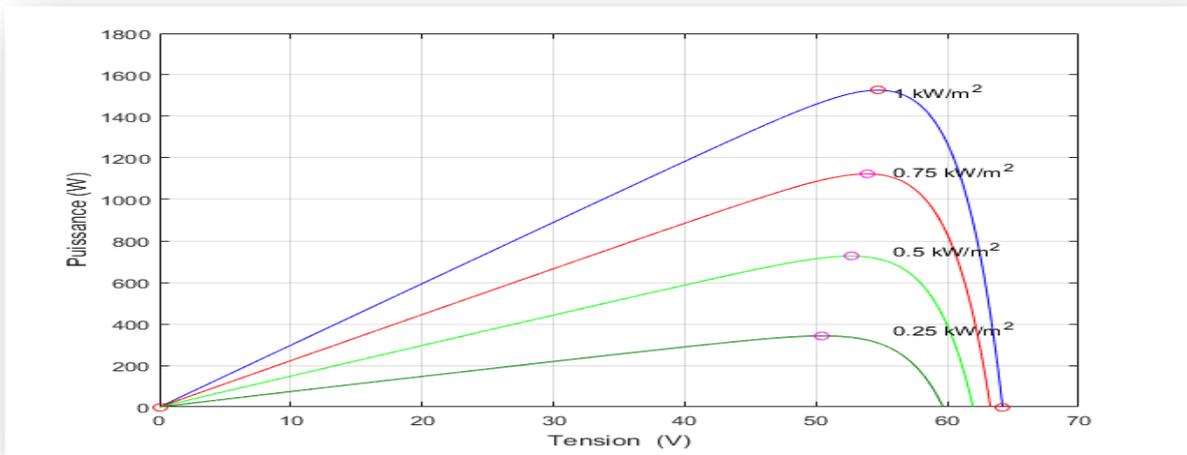


Figure III.5 : La caractéristique P(V) du générateur photovoltaïque

On a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O avec variation de l'irradiation comme le montre la figure (3.6) et une température de 25° C.

L'inductance	La capacité	La capacité	La résistance
L	C1	C2	R
0.005 H	100 e-6	4000 e-6	20 Ω

Tableau III.2 : Paramètres des composants du hacheur boost.

IV.1 Schéma de simulation :

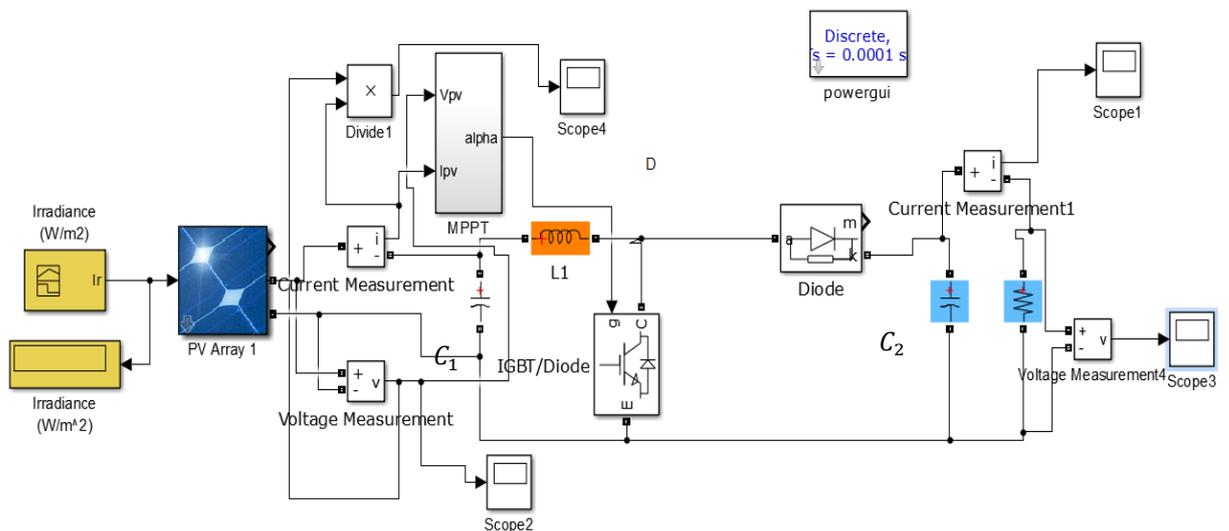


Figure III.6 : Schéma de simulation

V. Application de la commande perturbation et observation (P&O) :

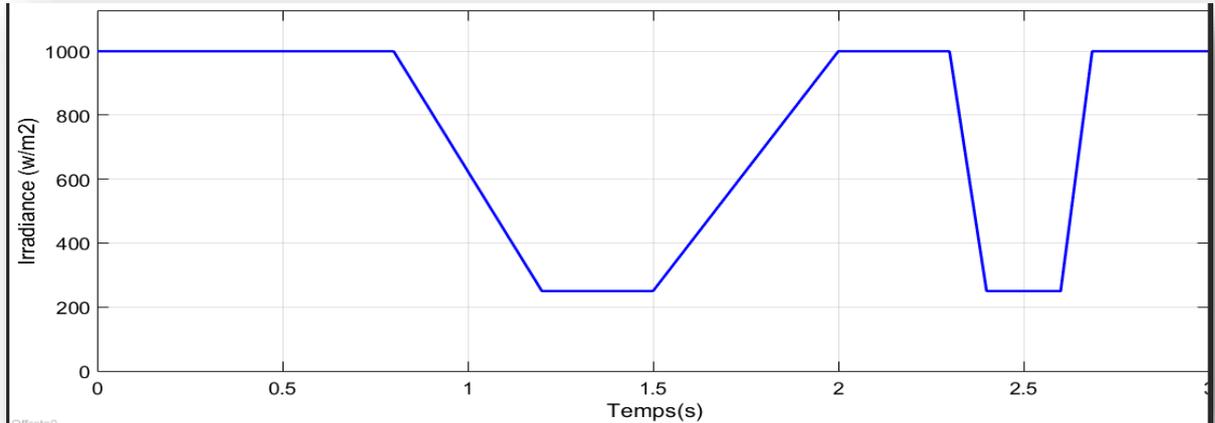


Figure III.7 : Profil de l'irradiation (w/m²).

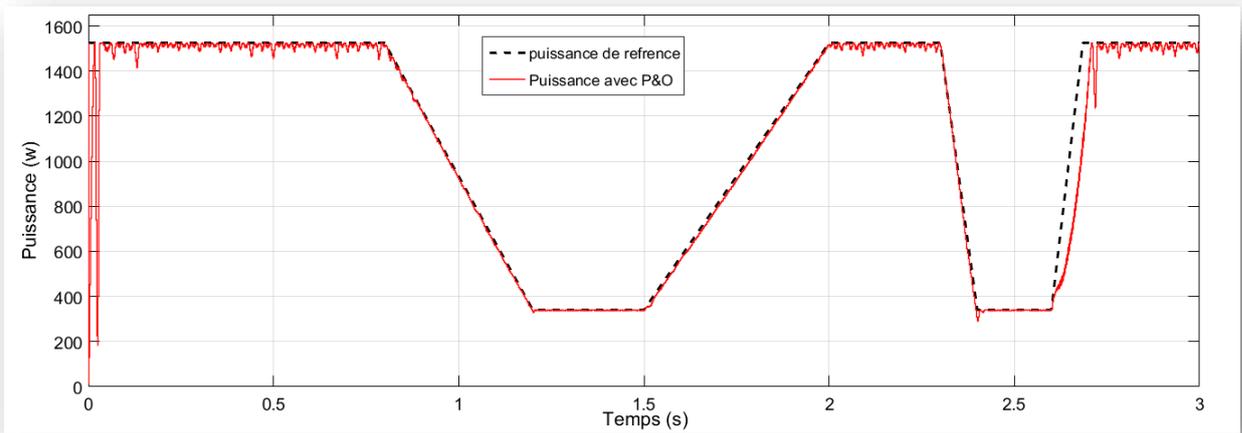


Figure III.8 : La puissance GPV.

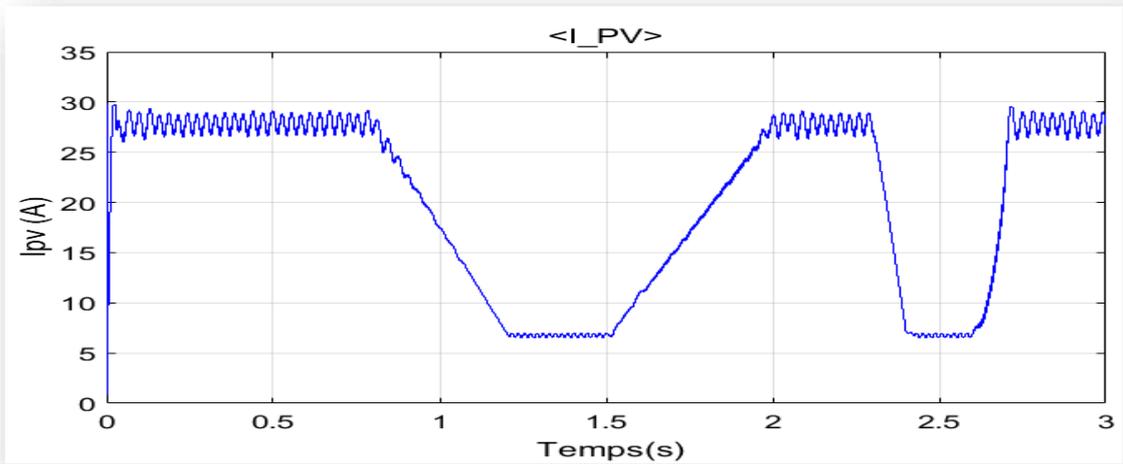


Figure III.9 : Le courant de GPV.

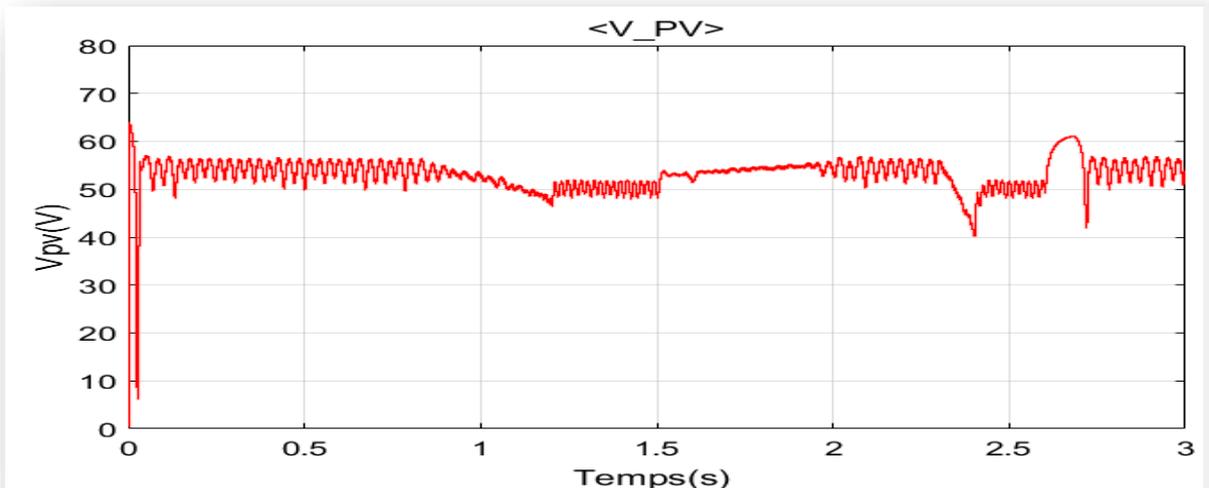


Figure III.10 : Tension de GPV.

### V.1 Interprétation des résultats :

Les figures III.8 et la figure III.9, figure III.10 illustrent respectivement la puissance, le courant, et la tension générée par le système photovoltaïque (SPV) lors de la simulation du contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking). La méthode de perturbation utilisée suit approximativement les variations de la puissance (figures III.8), mais présente toutefois des oscillations importantes autour de la puissance de référence. De plus, on peut observer un temps de réponse relativement long lorsque l'irradiation varie, car le programme prend du temps pour s'adapter aux changements.

## **VI. Simulation du système photovoltaïque connecté à l'onduleur à deux niveaux avec une batterie :**

Afin d'améliorer les performances du système GPV, nous ajoutons une Batterie pour le maintien d'une énergie stable et continue pour la charge. Pour cela, on applique le schéma dans la figure (IV.1), sur Simulink qui se constitue de :

- Un GPV avec un convertisseur boost et le suivi du point de puissance maximale est assuré par la méthode de perturbation et observation.
- Une commande MPPT pour le GPV.
- Une batterie en Lithium-Ion avec ça commande par un convertisseur DC/DC, dont les caractéristiques sont donne par le tableau III.3 et figure III.11
- Une boucle de régulation avec deux régulateurs PI
- Un onduleur triphasé à deux niveaux est utilisé, constitué de six commutateurs leur commutation est gérée à travers un algorithme MLI, avec trois charges de type RL.

### **VI.1.Batterie :**

#### **VI.1.1.1.Les paramètres de la batterie Lithium-Ion :**

Les batteries nous permettent de stocker l'énergie produite non consommée pour une utilisation ultérieure, pour cela nous avons choisis la batterie en Lithium-Ion qui présente l'avantage d'avoir une autodécharge relativement faible et une grande autonomie.

Type de batterie	Lithium-Ion
Tension nominale	220 V
Capacité	100 Ah
Niveau de charge initial	50 %
Capacité maximum	107 Ah
Tension maximale en charge complète	256.0772 V
Courant nominale de décharge	20 A
Résistance interne	0.022 $\Omega$

**Tableau III.3 :** Les paramètres de la Batterie

#### **VI.1.1.2.Les caractéristiques de la batterie Lithium-Ion :**

La batterie est dotée d'un courant nominal de décharge exceptionnel, permettant de répondre aux besoins énergétiques les plus exigeants. Grâce à sa conception avancée, elle est capable de délivrer en toute fiabilité un courant constant et stable, sans compromettre ses performances

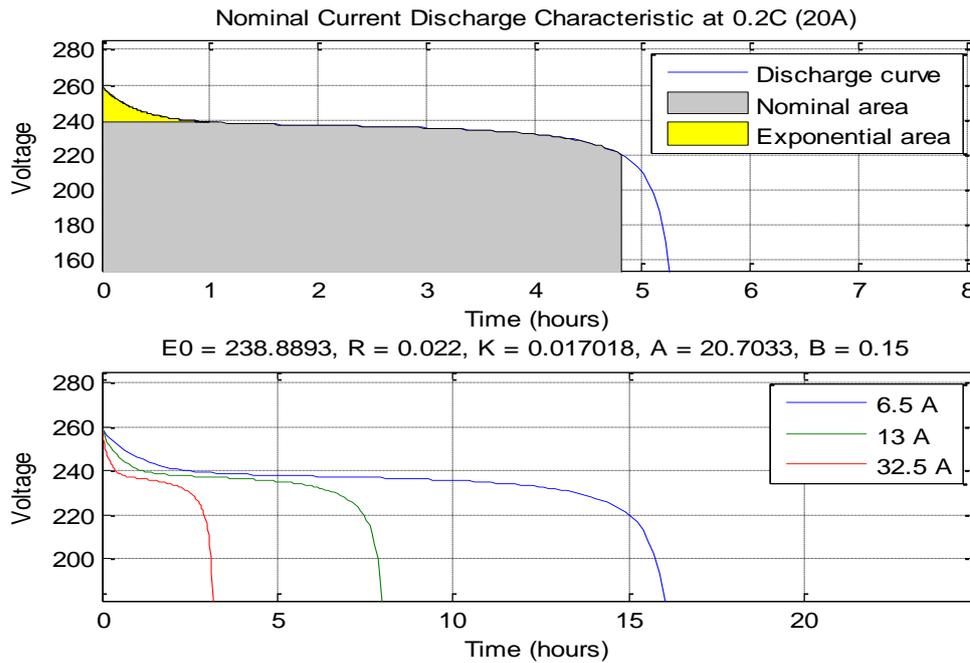


Figure III.11 : Caractéristique de la batterie.

VI.1.2. Schéma de simulation générale :

Le schéma de simulation générale comprend notre système photovoltaïque raccordé à un hacheur boost contrôlé par MPPT, un onduleur commandé en MLI et une batterie au lithium-ion.

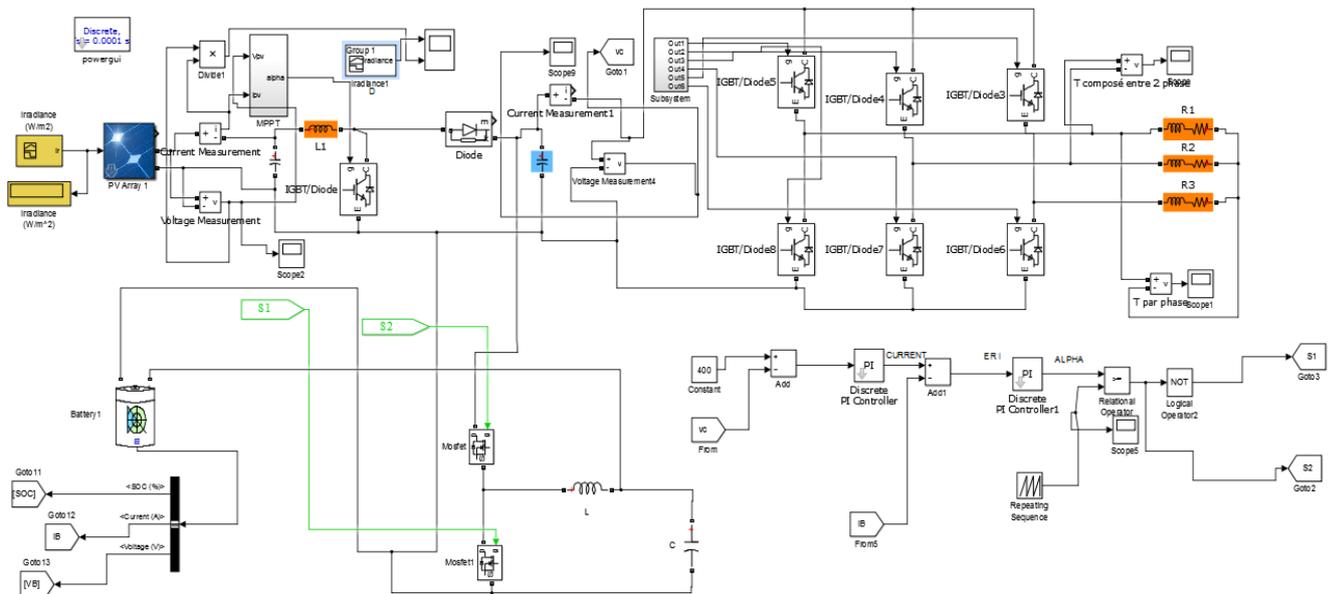
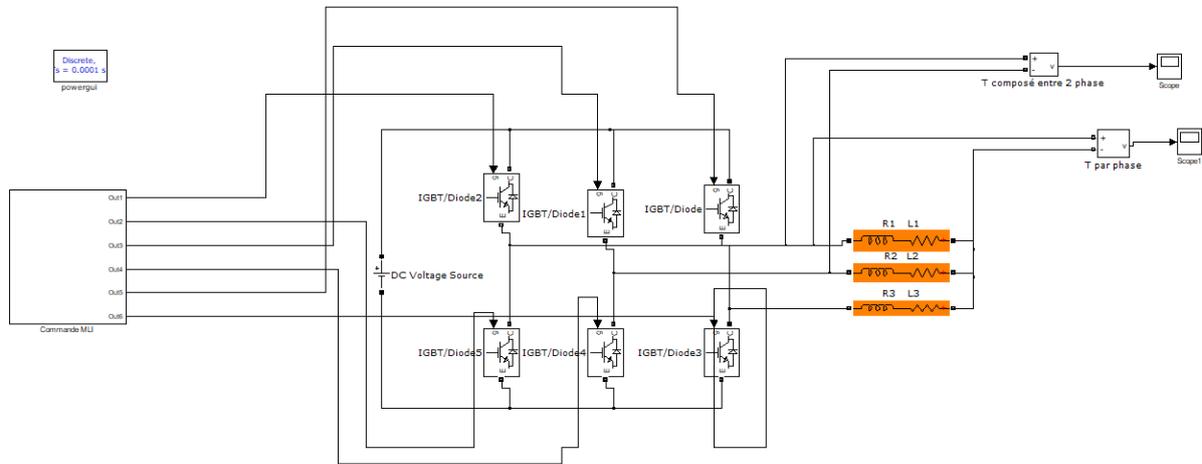


Figure III.12 : schéma de simulation général

**VI.1.3. Schéma de simulation de l'onduleur commandé en MLI :**

Le schéma de simulation de l'onduleur offre une représentation complète de l'onduleur, incluant tous les composants internes et une charge RL ( $R = 10 \Omega$ ,  $L = 0.05 \text{ H}$ ).

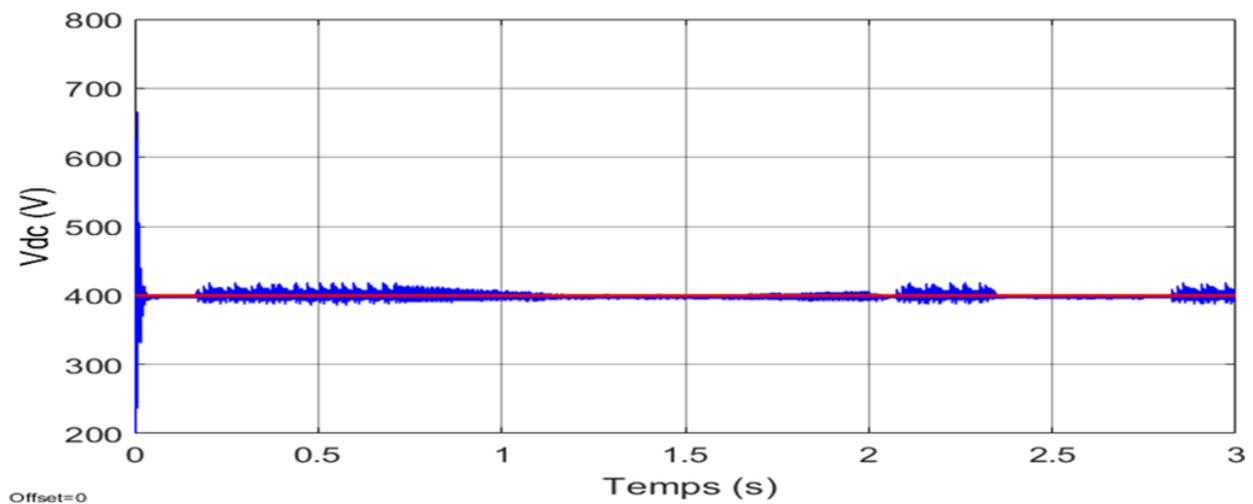


**Figure III.13 :** schéma de simulation d'un onduleur commandé en MLI

**VI.2. Les résultats de simulation :**

Les résultats de simulation sont exprimés par les graphes suivants :

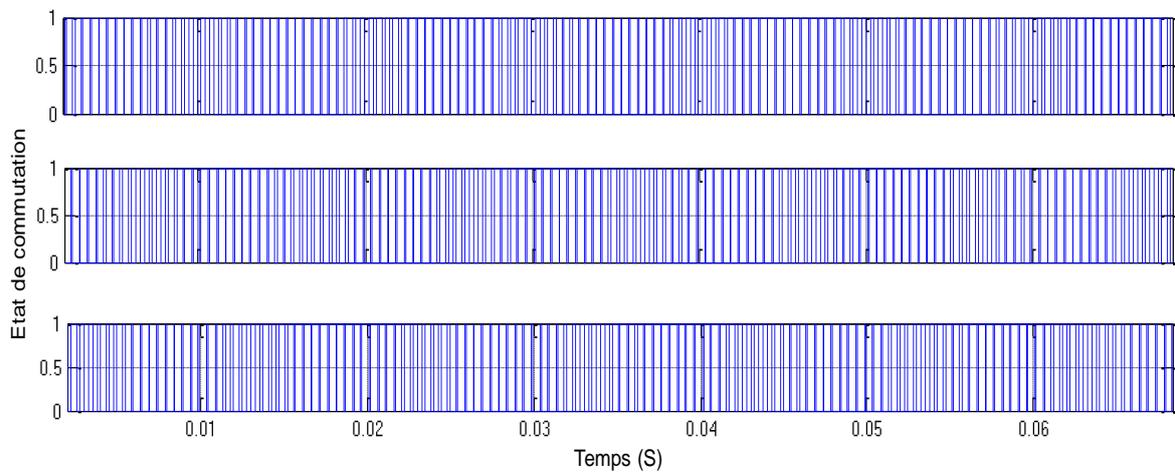
La figure suivante de la tension du bus continu offre une visualisation claire et précise de l'évolution de la tension sur le bus continu d'un système d'alimentation, une tension stable et constante indique un bon fonctionnement de la source d'alimentation et une alimentation régulière des composants du système.



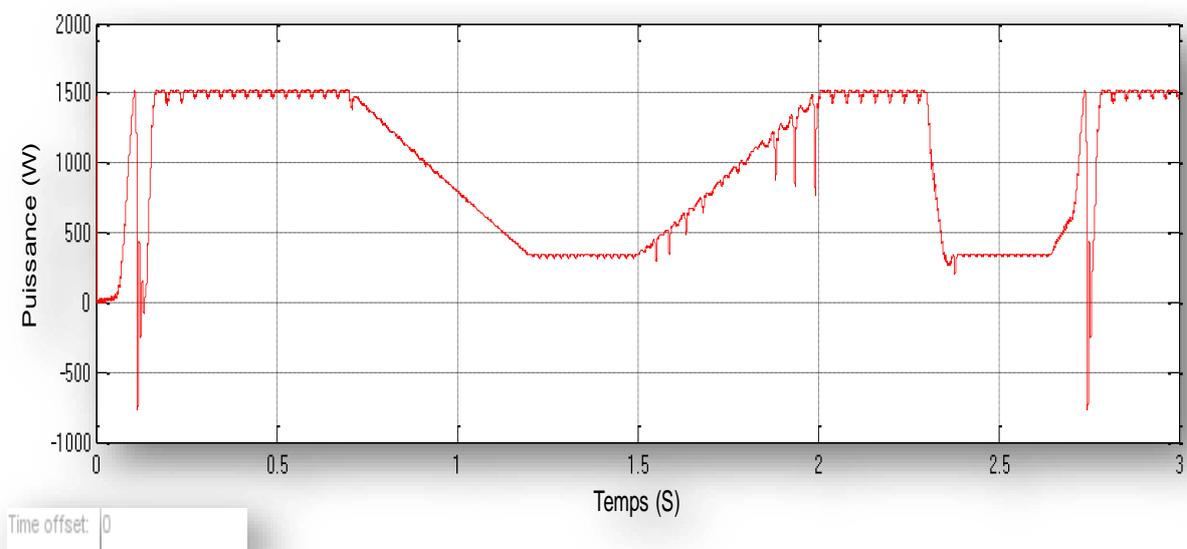
**Figure III.14 :** La tension de bus continu

La figure suivante celle des états de switch de l'onduleur commandé en MLI offre une visualisation détaillée de l'état de commutation des interrupteurs de puissance de l'onduleur à chaque instant, en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion. Cette

représentation graphique permet de suivre les variations de largeur d'impulsion des signaux de commande et de comprendre le fonctionnement précis de l'onduleur en MLI.



**Figure III.15 : États de Switch d'onduleur à deux niveaux**



**Figure III.16 : La Puissance à la sortie de GPV**

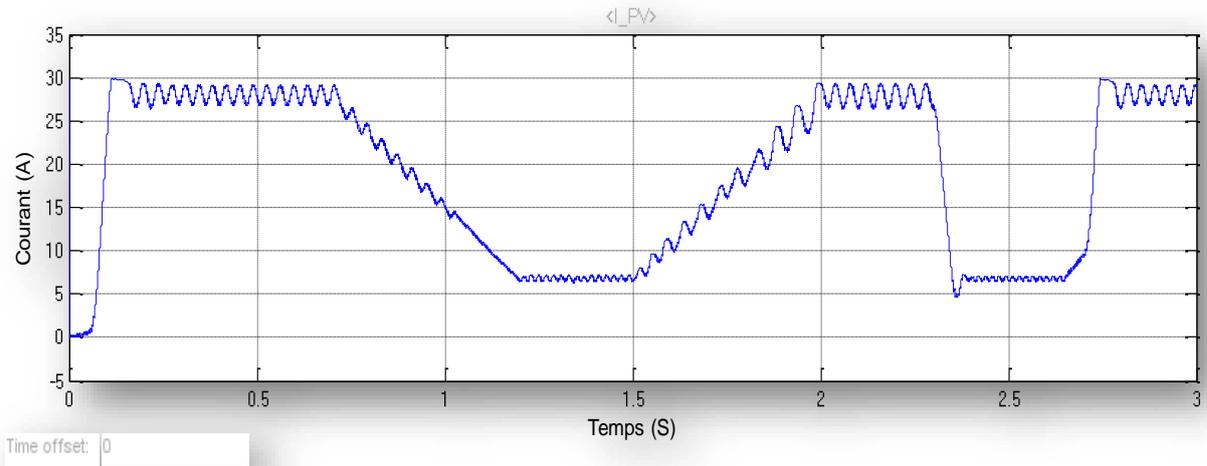


Figure III.17. Le courant de GPV.

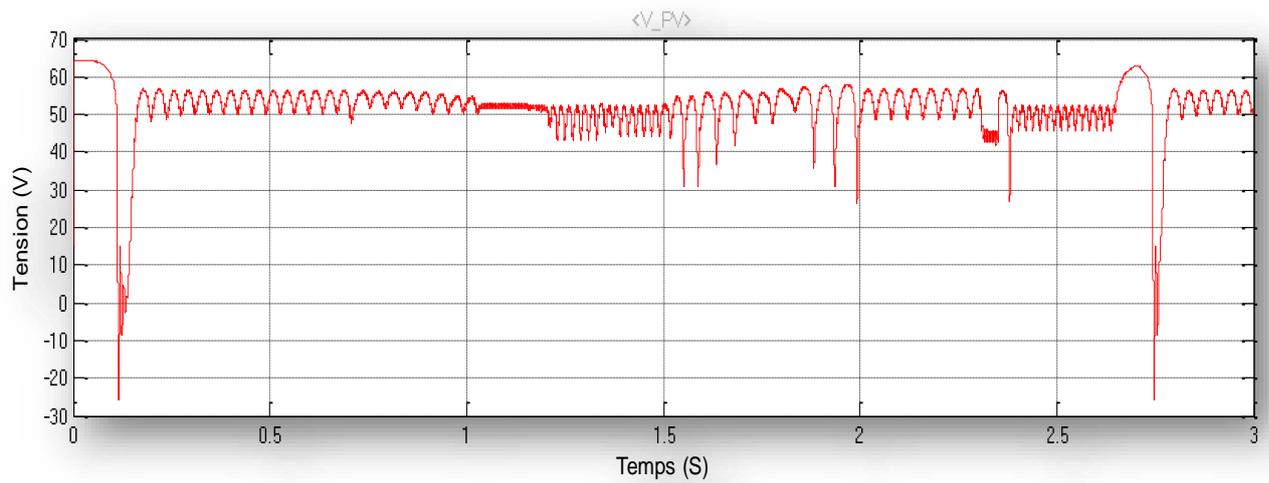


Figure III.18 : Tension de GPV.

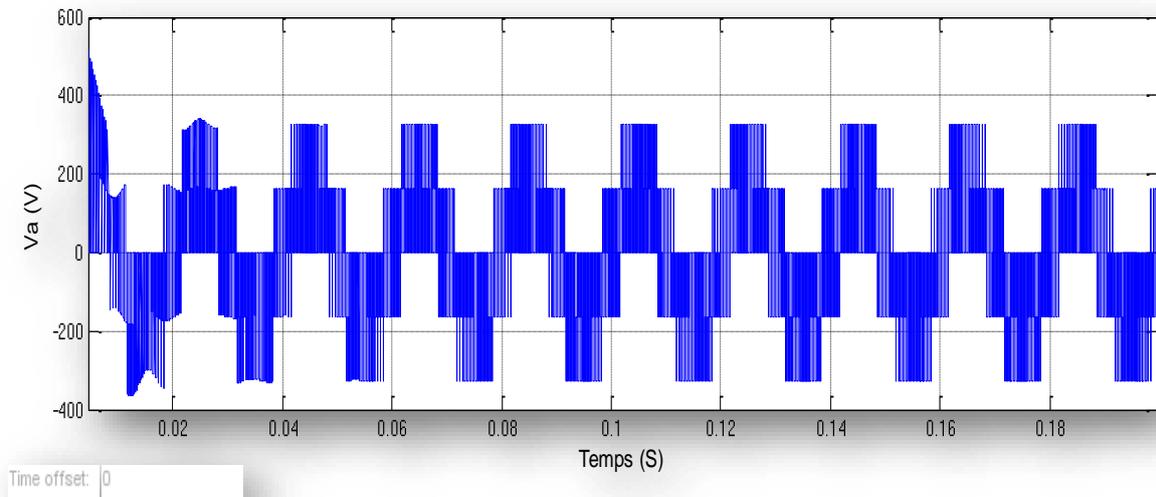


Figure III.19 : La tension d'une phase à la sortie de l'onduleur

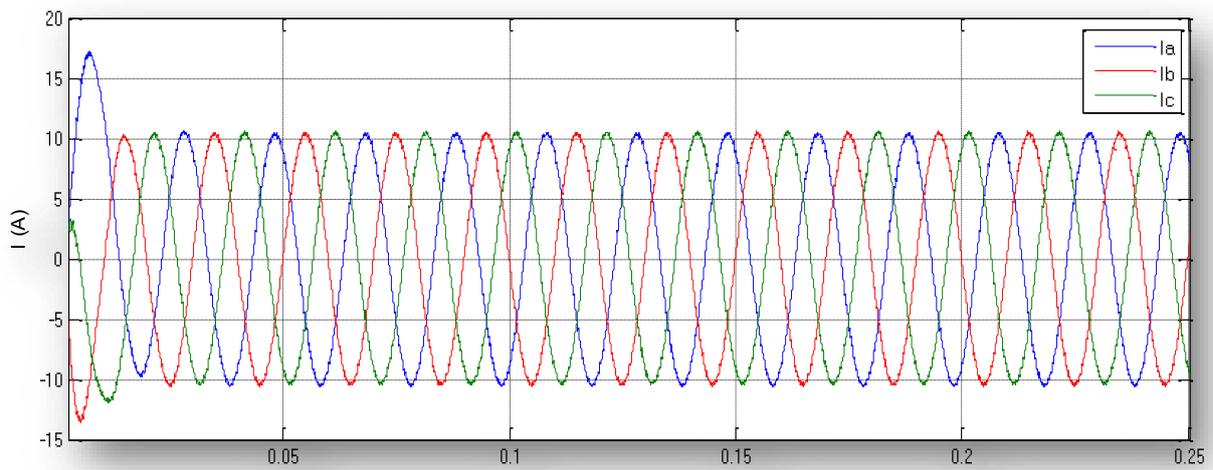


Figure III.20. Courants triphasés à la sortie de l'onduleur

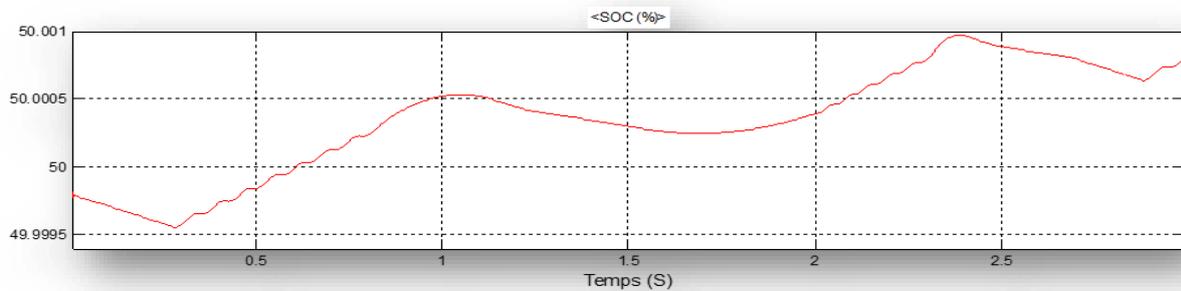


Figure III.21 : État de charge de la batterie

## **VI.2 Interprétation des résultats :**

Dans la figure III.21 nous présentons l'évolution du courant triphasé à la sortie de l'onduleur à deux niveaux lors du changement d'éclairement solaire. Nous pouvons constater dans les résultats de simulation obtenus que les courants de sortie soient de forme sinusoïdale alternative triphasée. De même, pour la puissance à la sortie du GPV, qui suit toujours le profil d'irradiation (figure III.17).

Nous remarquons aussi d'après la figure III.15 que durant le changement d'éclairement, la tension du bus continu, suit toujours sa consigne ( $V_{dc\_ref}=400$  V) quelle que soit la variation de profil d'irradiation et sa due à la boucle de régulation.

## **VII. Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à la simulation, dans un premier temps, nous avons utilisées une méthode connues pour extraire la puissance maximale des panneaux photovoltaïques à savoir la méthode perturbation et observation. Dans un second temps, dans le but d'alimenter une charge, nous avons utilisé un onduleur à deux niveaux et une batterie.

### Conclusion générale :

Les besoins en énergie ont été comblés par des recherches sur les énergies renouvelables. Parmi ces énergies, l'énergie solaire photovoltaïque se démarque en tant que source propre, silencieuse, disponible et gratuite. Cette caractéristique explique en partie sa croissance mondiale significative.

Le présent mémoire se concentre sur les systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique. Ces systèmes connaîtront des développements majeurs afin de diversifier les sources de production et de mieux protéger l'environnement, une volonté de plus en plus affirmée. Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink).

Notre simulation se focalise sur l'analyse de la commande MPPT numérique, qui se base directement sur la tension et le courant du panneau solaire pour rechercher le point de fonctionnement optimal correspondant à la puissance maximale. Afin de générer cette puissance et d'atteindre une efficacité maximale, l'ensemble du panneau photovoltaïque doit opérer à ce point spécifique. Nous avons connecté un bloc de batterie approprié à notre modèle afin d'assurer un stockage efficace de l'énergie.

La connexion au réseau électrique s'est faite en utilisant deux types de convertisseurs. Le premier est un convertisseur DC/DC de type boost, qui génère une tension continue. Ce convertisseur présente l'avantage d'être capable d'augmenter la tension, ce qui permet au système de s'adapter aux variations météorologiques et d'extraire la puissance maximale disponible. Le deuxième convertisseur est un convertisseur DC/AC contrôlé par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à l'aide de transistors IGBT. Il convertit la tension continue en une tension alternative pouvant être injectée dans le réseau.

Les résultats de la simulation ont confirmé que les convertisseurs et la commande MPPT basée sur la méthode "perturbation et observation" remplissent efficacement leurs fonctions. Ces résultats encourageants nous motivent davantage à poursuivre nos recherches dans cette direction.

À la lumière de cette étude, nos perspectives est de pouvoir exploiter les nouvelles technologies comme L'intégration de technologies telles que l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'Internet , des objets qui peut permettre une gestion plus efficace des systèmes photovoltaïques, en optimisant la production, en détectant les pannes et en améliorant la maintenance prédictive.

### Bibliographie

- [1] MECHALIKH Med Nadjib et HAMADA Charaf Eddine " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau " Mémoire de master à l'université Kasdi Merbah - Ouargla, 2013.
- [2] Hamida CHOHRAOUI & Ratiba HADBI " modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau "Mémoire de master à l'université de Abou Bekr BELKAID-Tlemcen, 2016.
- [3] Houda CHABANE " étude d'une cellule solaire à base de structure PIN " Mémoire de master à l'université Hadj Lakhdar-Batna 2014.
- [4] GUEMOUNI Brahim et MESSAHLI Ramzy " Application des différentes techniques de reconfiguration d'un générateur photovoltaïque sous un ombrage partiel " Mémoire de master à l'université A. MIRA-BEJAIA, 2021.
- [5] ZIAT Soheir Ibtissem, MEDJAHED Nour El Houda " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O) " Mémoire de master à, l'université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019.
- [6] AHDIBI Souhila, "Etude et simulation des cellules solaires photovoltaïques à base de "Si "et "GaAs" " Mémoire de master a Université Mohamed Boudiaf – M'sila 2019.
- [7] S. Hadji, " optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie photovoltaïque "Thèse doctorat, université de Sétif, 2018.
- [8] GALLOUL Lyssia, MESSAHLI Lynda Thème "Modélisation d'un panneau photovoltaïque" .Mémoire de master à l'université A.MIRA-BEJAIA 2019.
- [9] BELLALA Djamel, "Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques" Thèse Doctorat de l'Université de Batna, 2009.
- [10] Pr. Djamila REKIOUA "Cours de Système de conversion de l'énergie Photovoltaïque Master, Energies Renouvelables.
- [11] Ali M. ELTAMALY, Almoataz Y. ABDELAZIZ "Power Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems " green energy and technology, Springer Nature Switzerland AG 2020.
- [12] OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria" Modélisation et Système Photovoltaïque Contrôle d'un système Connecté au Réseau" Mémoire de master à l'université de Bejaia, 2015
- [13] BELAIDI Wahiba, ADJIMI Nadia, " Modélisation et commande d'un onduleur MLI" mémoire de master à l'université de Larbi Ben M'hidi à Oum El-Bouaghi, 2009.
- [14] LADOUALI Khalil, "Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque domestique " mémoire de master à l'université de Larbi Ben M'hidi à Oum El-Bouaghi, 2021.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [15], LAKEHAL Bilel "Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveau " Mémoire de master à l'université de Bejaia, 2015
- [16] Nora KACIMI "Contribution à la commande et la supervision des systèmes à énergies renouvelables" Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, 2023.
- [17] DJENNADI Rafik, BOUKHENTACHE Nacer " Modélisation et simulation d'une commande MPPT d'un système photovoltaïque "Mémoire de master à l'université de Bejaia, 2021.
- [18] TARGANT Lyes, KHALEF Sofiane " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique " Mémoire de master à l'université de Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou, 2017.
- [19] GEORGE Bailey," Advanced Methods and Strategies to Build the Most Efficient Solar Systems for Indoor and Outdoor Living ", Off-Grid Solar Power, 2021
- [20] IMROU Karim Adam, "Modélisation et simulation de la durée de vie des batteries stationnaires en condition réelle de fonctionnement" Mémoire de Master à l'université D'ABOMEY-CALAVI, 2022