

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

Université 8 Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf :...../2025



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

**Domaine** : Sciences et Technologie

**Filière** : Electromécanique

**Spécialité** : Electromécanique

**Par** : (Zerguine Achwak et Bilal Rahabi)

**Thème**

---

***Rayonnement solaire et système  
photovoltaïque : simulation et modélisation***

---

Soutenu publiquement, le 22 /06/2025. Devant le jury composé de :

|                         |            |               |           |
|-------------------------|------------|---------------|-----------|
| Dr. Boucerredj leila    | MCA        | Univ : Guelma | Encadreur |
| Pr. Moussaoui Abdelkrim | Professeur | Univ : Guelma | Président |
| Dr. Chabbi lilia        | MCB        | Univ : Guelma | Examineur |

**Année Universitaire : 2024/2025**

# Remerciements

(فَاذْكُرُونِي أَذْكُرْكُمْ وَاشْكُرُوا لِي وَلَا تَكْفُرُونِ)

*Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la patience, la force et la volonté nécessaires pour mener à bien ce projet.*

*Nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à notre encadrante, **Madame Boucerredj Leila**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses conseils précieux et son soutien tout au long de ce travail. Son encadrement rigoureux et bienveillant a grandement contribué à la réussite de ce projet.*

*Nous remercions également l'ensemble des enseignants et membres du département de Génie Électrique pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée durant notre parcours universitaire.*

*Nos remerciements vont aussi à nos camarades et collègues pour leur entraide, leur collaboration et leurs encouragements.*

*Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à nos familles pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur patience tout au long de notre formation.*

# DEDECACE

*À moi-même, À celle qui a traversé des nuits de doute, des jours de lutte,  
À celle qui a souri quand son cœur était brisé, À celle qui a prié, encore  
et encore, quand tout semblait perdu.*

*Tu as porté des douleurs en silence, affronté des épreuves dont seul Dieu  
connaît la lourdeur. Tu as choisi de continuer, de croire, de rêver malgré  
les tempêtes.*

*Ce mémoire n'est pas seulement un travail académique, C'est le fruit  
d'une bataille intérieure, d'une force invisible, D'un chemin tissé de foi,  
de larmes et d'espoir.*

*Aujourd'hui, je rends hommage à ta résilience, à ta patience, à ton  
courage. Tu n'as jamais abandonné. Et pour cela, tu mérites tout  
l'amour, toute la fierté, et tout le repos de l'âme. Ce succès, avant d'être  
pour les autres, il est pour toi.*

*À celle dont les prières ont été la clé de ma réussite, À celle qui a veillé  
sur moi, sacrifié pour mon avenir, À mon premier refuge, mon amour  
éternel, Ma tendre maman... Chaque mot de ce mémoire est imprégné de  
ton amour et de ta patience. Merci pour tout. Ce succès est le tien avant  
d'être le mien. je t'aime ❤️*

*À celui dont la force m'a inspiré, À celui dont le silence cache tant de  
sacrifices, À mon modèle de persévérance et de dignité, Mon pilier, mon*

*héros discret... Merci pour ton soutien constant et ton amour inconditionnel. Ce mémoire est aussi le fruit de ta présence dans ma vie.*

*À mon grand frère Mohamed Wassim, qui a toujours été mon modèle et mon soutien à chaque étape, À Aya 'toutiiii' et Maya 'doudi', mes petites fleurs qui remplissent ma vie de joie et d'amour, Vous êtes tous ma force et mon appui, Sans vous, je ne serais pas celle que je suis aujourd'hui. Merci pour votre patience, vos encouragements et vos sourires qui ont rendu chaque défi une belle aventure, Merci pour votre amour qui réchauffe mon cœur et allume l'espoir et la détermination en mon âme. Je vous dédie ce succès, et j'espère que vous resterez toujours à mes côtés à chaque étape de ma vie.*

*À ma petite nièce 'Amelia Talin 'Tu es un trésor précieux dans ma vie.*

*Je t'aime beaucoup.*

*À mon futur mari, que je ne connais pas encore, Mes prières te protègent, même si je ne te connais pas. Que la vie nous rassemble un jour, En attendant, je te souhaite tout le bonheur du monde.*

*À mon futur fils noah (نوح), le trésor que je n'ai pas encore dans mes bras, Je rêve de te rencontrer, de te voir grandir et de t'accompagner. Tu es déjà dans mon cœur, même si je ne te connais pas encore. Je t'envoie tout mon amour et mes espoirs pour ta vie à venir.*

*Ashwaq Zerguine*

# DEDICATION

*À mes chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inestimable tout au long*

*De mon parcours.*

*À mes frères, Mohamed et Hamza, pour leur présence réconfortante.*

*À mes amis fidèles Thami, Aymen, Oussama, Ahmed et Wassim, pour les bons moments.*

*Partagés et leur encouragement constant.*

*À tous mes camarades de route dans cette aventure académique.*

*Et enfin... à moi-même, pour ma persévérance et mes efforts malgré les défis.*

*Cette modeste œuvre est dédiée à vous tous.*

*Bilal Rahabi*

## **Résumé**

*Ce projet de fin d'études porte sur l'étude du rayonnement solaire et des systèmes photovoltaïques, avec un focus sur la modélisation du générateur photovoltaïque et la mise en œuvre de la commande MPPT pour optimiser la production d'énergie. À travers la simulation et l'optimisation du système, ce travail vise à améliorer l'efficacité des installations photovoltaïques et à promouvoir l'utilisation de l'énergie solaire comme solution durable et renouvelable face aux défis énergétiques actuels.*

**Mots clés :** *Production d'énergie électrique, Energies renouvelables, Rayonnement solaire, Convertisseur DC-DC, Commande MPPT.*

## **Abstract**

*This Project explore Solar radiation and photovoltaic systems, focusing on modeling the photovoltaic generator and applying MPPT control to maximize energy output. Through simulation and optimization, It aims to enhance the efficiency of solar power systems and support the adoption of clean, renewable energy solutions.*

**Keywords :** *Electric energy production, Renewable energy, Solar radiation, DC-DC converter, MPPT control.*

يُعتبر الإشعاع الشمسي أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة التي تتميز بنظافتها واستدامتها، مما يجعلها حلاً مثالياً لمواجهة التحديات البيئية والاقتصادية المرتبطة بالاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية. يهدف هذا المشروع النهائي إلى دراسة شاملة للإشعاع الشمسي وأنظمة الطاقة الكهروضوئية التي تحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية باستخدام خلايا شمسية تعتمد على الظاهرة الفيزيائية المعروفة بالتأثير الكهروضوئي. يتناول المشروع في البداية فهم خصائص الإشعاع الشمسي وتأثير العوامل الجوية والجغرافية على كمية الطاقة المستلمة، ثم ينتقل إلى نمذجة المولد الكهروضوئي الذي يشكل قلب النظام، حيث يتم تمثيله رياضياً لتسهيل تحليله وتصميم التحكم فيه. كما يركز المشروع على تطبيق تقنية تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT)، التي تعد من التقنيات الحيوية لتحسين أداء النظام وزيادة كفاءة تحويل الطاقة من المصدر الشمسي إلى الكهرباء، وذلك من خلال التحكم في عمل المحولات الكهربائية (DC-DC converters) المستخدمة في النظام. باستخدام أدوات المحاكاة المتقدمة، يتم تحليل أداء النظام تحت ظروف تشغيل مختلفة بهدف تحسين تصميمه وتحقيق أقصى استفادة ممكنة من الطاقة الشمسية. في نهاية المطاف، يسعى هذا العمل إلى تقديم حلول عملية تساهم في تعزيز استخدام الطاقة الكهروضوئية كمصدر طاقة متجدد وفعال، مما يدعم الجهود العالمية للحد من الانبعاثات الكربونية وتحقيق التنمية المستدامة.

**الكلمات المفتاحية:** إنتاج الطاقة الكهربائية، الطاقات المتجددة، الإشعاع الشمسي، محول التيار المستمر إلى التيار المستمر (DC-DC)، التحكم في تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT).

# Table des matières

|                                                                                                  |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Remerciements.....                                                                               | I        |
| Dédicace.....                                                                                    | II       |
| Dédicace.....                                                                                    | IV       |
| Résumé.....                                                                                      | V        |
| Table des matières.....                                                                          | VII      |
| Liste des abréviations et symboles.....                                                          | XII      |
| <b>Introduction générale.....</b>                                                                | <b>1</b> |
| <b>Chapitre I – l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïque .....</b>                       | <b>3</b> |
| I.1.Introduction .....                                                                           | 4        |
| I.2.L'énergie solaire .....                                                                      | 4        |
| I.3.Rayonnement solaire .....                                                                    | 5        |
| I.3.1. Définition .....                                                                          | 5        |
| I.3.2. Les types de rayonnement .....                                                            | 6        |
| I.4.Le photovoltaïque.....                                                                       | 6        |
| I.4.1. Définition .....                                                                          | 6        |
| I.4.2. Les Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....                  | 8        |
| I.5.La Cellule photovoltaïque.....                                                               | 9        |
| I.6. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE<br>PHOTOVOLTAÏQUE.....                             | 10       |
| I.7. Effet photovoltaïque.....                                                                   | 11       |
| I.8.Le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque électrique d'une cellule photovoltaïque... | 12       |
| I.9.Caractéristique courant- tension ( $I-V$ ) de la cellule photovoltaïque.....                 | 12       |
| I.9.1. Tension en circuit ouvert $V_{CO}$ .....                                                  | 13       |
| I.9.2. Le courant en circuit ouvert $I_{SC}$ .....                                               | 13       |
| I.9.3. Point du fonctionnement $P_m$ ( $V_m$ , $I_m$ ).....                                      | 13       |
| I.10.Regroupement des cellules .....                                                             | 13       |
| I.10.1. Cellules mise en série.....                                                              | 14       |



|                                                                               |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <i>I.10.2. Cellules mise en parallèle.....</i>                                | <i>15</i>        |
| <i>I.11. Les centrales photovoltaïques en Algérie .....</i>                   | <i>16</i>        |
| <i>I.12. La conclusion .....</i>                                              | <i>17</i>        |
| <b><i>Chapitre II – le Générateur photovoltaïque.....</i></b>                 | <b><i>18</i></b> |
| <i>II.1. Introduction .....</i>                                               | <i>19</i>        |
| <i>II.1. Le système photovoltaïque.....</i>                                   | <i>19</i>        |
| <i>II.2. Le panneau PV' .....</i>                                             | <i>20</i>        |
| <i>II.2.1 Influence de l'éclairement et la température d'une cellule.....</i> | <i>20</i>        |
| ➤ <i>Influence de l'éclairement .....</i>                                     | <i>20</i>        |
| ➤ <i>Influence de la température.....</i>                                     | <i>21</i>        |
| <i>II.3. La batterie solaire .....</i>                                        | <i>22</i>        |
| <i>II.3.1. Groupement de batteries Groupement de batteries .....</i>          | <i>23</i>        |
| ➤ <i>Montage en série .....</i>                                               | <i>23</i>        |
| ➤ <i>Montage en parallèle .....</i>                                           | <i>24</i>        |
| ➤ <i>Montage en série ET parallèle.....</i>                                   | <i>25</i>        |
| <i>II.4. Le régulateur (contrôleur de charge).....</i>                        | <i>25</i>        |
| <i>II.4.1. Les différents types de régulateurs de charge .....</i>            | <i>26</i>        |
| ➤ <i>Les régulateurs série .....</i>                                          | <i>26</i>        |
| ➤ <i>Les régulateurs shunt .....</i>                                          | <i>26</i>        |
| ➤ <i>Régulateur MPPT.....</i>                                                 | <i>27</i>        |
| ➤ <i>Fonctionnement d'un régulateur MPPT .....</i>                            | <i>27</i>        |
| <i>II.5. Les onduleurs .....</i>                                              | <i>28</i>        |
| <i>II.5.1. Principe de fonctionnement d'onduleur .....</i>                    | <i>28</i>        |
| <i>II.5.2. Différents types d'onduleurs autonomes.....</i>                    | <i>30</i>        |
| <i>II.5.3. Circuit équivalent d'un onduleur monophasé .....</i>               | <i>31</i>        |
| <i>II.5.4. Modélisation d'un onduleur monophasé .....</i>                     | <i>32</i>        |
| <i>II.6. La charge .....</i>                                                  | <i>34</i>        |
| <i>II.7. Le Câblage .....</i>                                                 | <i>35</i>        |
| <i>II.8. Différents systèmes photovoltaïques .....</i>                        | <i>36</i>        |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>II.8.1. Systèmes photovoltaïques autonomes (hors réseau)</i> .....                 | 36 |
| <i>II.8.2. Systèmes connectés au réseau</i> .....                                     | 37 |
| <i>II.9. La conclusion</i> .....                                                      | 38 |
| <b><i>Chapitre III- la commande MPPT dans le système photovoltaïque</i></b> .....     | 39 |
| <i>III.1. Introduction</i> .....                                                      | 40 |
| <i>III.2. Convertisseur DC/DC</i> .....                                               | 40 |
| <i>III.3. Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire</i> .....          | 40 |
| <i>III.4. Composition du convertisseur</i> .....                                      | 41 |
| <i>III.4.1. Le transistor MOSFET</i> .....                                            | 41 |
| <i>III.4.2. Le condensateur</i> .....                                                 | 42 |
| <i>III.4.3. L'inductance</i> .....                                                    | 43 |
| <i>III.4.4. La diode</i> .....                                                        | 44 |
| <i>III.5. Les types des convertisseurs DC-DC</i> .....                                | 44 |
| <i>III.5.1. Convertisseur survolteur (Boost)</i> .....                                | 46 |
| ➤ <i>Schéma du convertisseur Boost</i> .....                                          | 46 |
| ➤ <i>Principe de fonctionnement</i> .....                                             | 46 |
| <i>III.5.2. Convertisseur abaisseur (BUCK)</i> .....                                  | 47 |
| ➤ <i>Principe de fonctionnement</i> .....                                             | 48 |
| <i>III.5.3. Convertisseur abaisseur BUCK-BOOST</i> .....                              | 51 |
| <i>III.5.4. Principe de fonctionnement d'un convertisseur BUCK-BOOST</i> .....        | 51 |
| <i>III.6. La COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE</i> .....                      | 53 |
| <i>III.6.1. Modélisation du système</i> .....                                         | 53 |
| <i>III.6.2. Le Principe de la commande MPPT</i> .....                                 | 54 |
| <i>III.7. Classification Des Commandes MPPT</i> .....                                 | 55 |
| <i>III.7.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les paramètres d'entrée</i> ..... | 56 |
| <i>III.7.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche</i> .....    | 56 |
| <i>III.8. Les Algorithmes MPPT</i> .....                                              | 58 |
| <i>III.8.1. La méthode perturbe et observe P&amp;O</i> .....                          | 58 |
| <i>III.8.2. La méthode de l'Incrémentation de la Conductance</i> .....                | 60 |

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.8.3. La méthode basée sur la mesure de la tension du circuit ouvert.....          | 62        |
| III.8.4. Commande à base de la mesure du courant de court-circuit.....                | 63        |
| III.9. La conclusion .....                                                            | 64        |
| <b>Chapitre IV- Optimisation et simulation d'un système photovoltaïque</b> .....      | <b>65</b> |
| IV.1. Introduction .....                                                              | 66        |
| IV.2. Les Caractéristiques des panneaux solaires.....                                 | 66        |
| IV.2.1. Configuration du générateur photovoltaïque .....                              | 66        |
| IV.2.2. Dimensionnement du système de stockage .....                                  | 66        |
| IV.2.3. Schéma de connexion des batteries.....                                        | 67        |
| IV.3. Étude du convertisseur DC-DC.....                                               | 67        |
| IV.4. Étude du contrôleur MPPT .....                                                  | 67        |
| IV.5. Les Algorithmes MPPT .....                                                      | 68        |
| IV.6. Simulation sous MATLAB/Simulink.....                                            | 68        |
| IV.6.1. Objectif de la simulation.....                                                | 69        |
| IV.7. Schéma du modèle de simulation sous MATLAB/Simulink.....                        | 69        |
| IV.7.1. Comportement dynamique de l'algorithme MPPT.....                              | 69        |
| IV.7.2. Analyse électrique des batteries : tension, courant et état de charge .....   | 70        |
| IV.8. Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT .....                | 71        |
| IV.8.1. Simulation avec la commande P&O.....                                          | 71        |
| IV.8.2. Simulation avec la commande PSO.....                                          | 71        |
| IV.8.3. Simulation avec la commande GWO.....                                          | 71        |
| IV.8.4. Évolution du Courant de Charge selon le Temps avec les Algorithmes MPPT ..... | 72        |
| ➤ Analyse des 3 algorithmes .....                                                     | 72        |
| 1. Algorithme PSO (Particle Swarm Optimization).....                                  | 72        |
| 2. . Algorithme GWO (Grey Wolf Optimization).....                                     | 73        |
| 3. Algorithme P&O (Perturb and Observe).....                                          | 73        |
| IV.8.5. Puissance de Sortie selon le Temps pour Trois Algorithmes MPPT .....          | 74        |
| ➤ Analyse des 3 algorithmes.....                                                      | 74        |
| 1.Algorithme PSO (Particle Swarm Optimization).....                                   | 74        |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2. Algorithme GWO (Grey Wolf Optimization).....                                           | 74 |
| 3. Algorithme PLO (Perturb and Observe).....                                              | 74 |
| IV.8.6. Évolution de la Tension de la Batterie selon le Temps pour Trois Algorithmes MPPT | 75 |
| ➤ Analyse des 3 algorithmes .....                                                         | 75 |
| 1. Algorithme PSO (Particle Swarm Optimization).....                                      | 75 |
| 2. Algorithme GWO (Grey Wolf Optimization).....                                           | 76 |
| 3. Algorithme PLO (Perturb and Observe).....                                              | 76 |
| IV.9. Conclusion .....                                                                    | 77 |
| Conclusion générale .....                                                                 | 78 |

# *Liste des abréviations et symboles*

*PV* : photovoltaïque

*R<sub>sh</sub>* : Résistance shunt interne.

*R<sub>s</sub>* : Résistance série interne.

*I<sub>ph</sub>* : coutant du GPV

*K* : constante de Boltzmann

*T* : la température absolue

*V* : Tension aux bornes de la photo génératrice.

*V<sub>oc</sub>* : tension de circuit ouvert

*I<sub>sc</sub>* : courant en circuit ouvert

*P<sub>m</sub>* : La puissance maximale

*FF* : Le facteur de forme

*I<sub>cc</sub>* : courant de court-circuit

*V<sub>e</sub>* : tension d'entrée

*V<sub>s</sub>* : tension de sortie

*α* : rapport cyclique

*MOSFET* : Metal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor

*MPPT* : Maximum Power Point Tracking

*PPM* : Point de Puissance Maximale

*Soc* : state of charge

# *Introduction générale*

*Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie renouvelable, propre et inépuisable, dont l'exploitation via les systèmes photovoltaïques représente une solution majeure face aux enjeux énergétiques actuels. Ces systèmes convertissent directement la lumière solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, phénomène physique par lequel certains matériaux semi-conducteurs génèrent un courant électrique sous l'effet de la lumière. La compréhension approfondie du rayonnement solaire, incluant ses caractéristiques, son interaction avec l'atmosphère terrestre et les paramètres géographiques, est essentielle pour optimiser la performance des systèmes photovoltaïques. Ces derniers se composent principalement de générateurs photovoltaïques, constitués de cellules solaires modélisées par des circuits électriques équivalents, et nécessitent des techniques de commande avancées telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour maximiser leur rendement. La modélisation et la simulation de ces systèmes, souvent réalisées via des outils comme MATLAB-Simulink, permettent d'étudier leur comportement dynamique et statique, d'optimiser leur conception et de prévoir leur performance en conditions réelles. Ce projet de fin d'études s'inscrit donc dans cette démarche globale, visant à étudier le rayonnement solaire et les systèmes photovoltaïques, à modéliser le générateur photovoltaïque, à implémenter la commande MPPT, puis à optimiser et simuler l'ensemble du système pour contribuer à la généralisation et à l'efficacité de l'énergie solaire photovoltaïque comme alternative aux énergies conventionnelles.*

*L'objectif de ce mémoire est la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque pour le suivi de Rayonnement solaire par de la commande MPPT par des différents types des régulateurs sous le logiciel Matlab. Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit : Le premier chapitre est consacré à une étude détaillée de l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïque. Cette étude comprend une large définition*

*de ce type de systèmes, ainsi les différentes classes de ce genre de systèmes. Des exemples illustratifs sont présentés. Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse aux études des générateur photovoltaïque, le troisième chapitre comprend des définitions sur la commande MPPT dans le système photovoltaïque. Le quatrième chapitre fait l'objet de l'application sur un système photovoltaïque dont l'objective et la charge des batteries Li-Ion en suivant le rayonnement solaire par la commande MPPT par différent type des régulateurs (PSO, ...).*

*Chapitre I*  
*L'énergie solaire et*  
*les systèmes*  
*photovoltaïque*



**I.1.Introduction :**

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui convertit la lumière du soleil en électricité. Cette technologie repose sur le phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque, qui se produit au sein de cellules spécialement conçues. En exploitant le rayonnement solaire, ces cellules permettent de produire de l'électricité propre, contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone et à la lutte contre le changement climatique.

Ce chapitre vise à fournir une compréhension complète de l'énergie solaire, son fonctionnement, ses systèmes, et ses implications pour l'avenir énergétique mondial. Cette analyse approfondie est essentielle pour appréhender les enjeux actuels et futurs liés à la transition vers des sources d'énergie durables.



**Figure (I.1) : L'Énergie Solaire**

**I.2.L'énergire solaire :**

L'énergie solaire est une source incontournable, offrant chaque année un rayonnement équivalent à environ 8 000 fois la consommation énergétique mondiale. Ce rayonnement, déposé sur la surface de la Terre, correspond à une puissance instantanée de 1 kilowatt par mètre carré ( $\text{kW/m}^2$ ), étendue sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les régions désertiques reçoivent en moyenne 6 heures de lumière solaire par jour, fournissant ainsi une ressource énergétique significative pour l'humanité. Cette énergie peut être exploitée de plusieurs manières :[1]

- **Énergie Solaire Thermique** : Cette méthode utilise la chaleur du soleil pour chauffer un fluide, comme de l'eau ou de l'air. Par exemple, des panneaux solaires thermiques peuvent chauffer de l'eau pour des douches ou des piscines. C'est une technique simple et efficace pour obtenir de la chaleur.
- **Énergie Solaire Photovoltaïque** : Cette technologie convertit la lumière du soleil directement en électricité à l'aide de cellules solaires. Quand la lumière frappe ces cellules, elle génère un courant électrique. Cela permet aux maisons et aux bâtiments de produire leur propre électricité.
- **Énergie Solaire Concentrée (CSP)** : Ici, des miroirs ou des lentilles sont utilisés pour concentrer la lumière du soleil sur un petit point, créant beaucoup de chaleur. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour produire de la vapeur qui alimente des turbines générant de l'électricité. C'est souvent utilisé dans de grandes installations solaires.
- **Énergie Solaire Passive** : Contrairement aux méthodes actives qui nécessitent des équipements, l'énergie solaire passive repose sur la façon dont les bâtiments sont conçus. Par exemple, une maison orientée vers le soleil avec de grandes fenêtres peut capter plus de lumière et de chaleur, réduisant ainsi le besoin de chauffage ou d'éclairage artificiel.

### **I.3.Rayonnement solaire :**

#### **I.3.1. Définition :**

Le rayonnement solaire est l'énergie émise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur, et il joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des systèmes d'énergie solaire photovoltaïque. Ce rayonnement, qui se compose principalement de lumière visible, ainsi que de rayonnements ultraviolets (UV) et infrarouges (IR), est exploité par les panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité. Lorsque la lumière solaire frappe les cellules photovoltaïques, qui sont faites de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, elle excite les électrons de ces matériaux, générant ainsi un courant électrique. La quantité d'électricité produite dépend donc de l'intensité et de la qualité du rayonnement reçu, ce qui signifie que des conditions d'ensoleillement direct et peu nuageuses optimisent les performances des panneaux. Par conséquent, la relation entre le rayonnement solaire et l'énergie solaire photovoltaïque est fondamentale : le premier constitue la source d'énergie nécessaire au fonctionnement du second, permettant ainsi de transformer une ressource naturelle inépuisable en électricité et contribuant à la réduction de notre dépendance aux énergies fossiles.

**I.3.2. Les types de rayonnement :**

- Le rayonnement solaire peut être classé en plusieurs types en fonction de son chemin et de son interaction avec l'atmosphère et la surface terrestre. Les trois principaux types de rayonnement solaire sont : direct, diffus et réfléchi.
- Le rayonnement solaire direct : également appelé radiation directe, représente la lumière émise par le soleil qui atteint la surface de la Terre sans être déviée ou diffusée par l'atmosphère. Ce type de rayonnement est perçu par les systèmes photovoltaïques lorsque ceux-ci sont orientés directement vers le soleil. En raison de sa trajectoire directe, il a une intensité élevée et est particulièrement efficace pour la production d'électricité dans des conditions d'ensoleillement clair, comme lors de journées ensoleillées.
- Le rayonnement solaire diffus : désigne la lumière du soleil qui a été dispersée par les molécules d'air, les particules et les nuages dans l'atmosphère avant de parvenir à la surface terrestre. Contrairement au rayonnement direct, il provient de toutes les directions du ciel. Cela signifie que même les jours nuageux, il y a encore une part de lumière qui atteint la surface, bien que d'intensité réduite. Le rayonnement diffus est également utile pour les systèmes photovoltaïques, car il permet de capter l'énergie solaire même en présence de couvert nuageux.
- Le rayonnement solaire réfléchi : désigne la lumière du soleil qui a été renvoyée par des surfaces comme le sol, l'eau, ou des bâtiments, après avoir été initialement absorbée par la surface. Cela inclut les surfaces réfléchissantes qui peuvent renvoyer une partie de la lumière solaire dans l'atmosphère. Ce type de rayonnement peut être particulièrement pertinent dans les systèmes solaires concentrés, où les miroirs reflètent le rayonnement solaire vers un point focal pour générer de la chaleur ou de l'électricité.

**I.4. Le photovoltaïque :****I.4.1. Définition :**

Le terme "photovoltaïque" dérive de deux mots grecs : "photo", qui signifie "lumière", et "voltaïque", qui fait référence à Volta, une unité de mesure de la tension électrique, en l'honneur d'Alessandro Volta, un scientifique italien qui a contribué à l'étude de l'électricité. Donc, "photovoltaïque" signifie littéralement "production d'électricité par la lumière".



**Figure (I.2) :** Représentation des cellules photovoltaïques

En d'autres termes, les systèmes photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse (généralement du soleil) en électricité. Cette technologie est essentielle pour la production d'énergie renouvelable et joue un rôle crucial dans les efforts de transition vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement.

Appelé aussi « module photovoltaïque » ou PV, c'est un panneau solaire qui est destiné à récupérer les rayonnements du soleil pour les transformer en électricité (Courant continu DC). L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [2]. Un ensemble de panneaux photovoltaïques reliés entre eux constitue le générateur, qui est défini par sa puissance crête, exprimée en kilowatt crête (kWc).

Le Tableau (I.1) résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque.[3]

**Tableau (I.1) :** Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques.

|             |                                                                                                                                      |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1839</b> | <b>Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque</b>                                                        |
| <b>1883</b> | Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se                                                                  |
| <b>1954</b> | Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu <sub>2</sub> S/CdS (Air Force, USA)                                    |
| <b>1955</b> | Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W                                                    |
| <b>1958</b> | Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh                                                    |
| <b>1970</b> | Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andrée et al. En URSS                                         |
| <b>1973</b> | Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu <sub>2</sub> S |
| <b>1980</b> | La première cellule à base de Cu <sub>2</sub> S/CdS délivrant un rendement > 10%                                                     |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1982</b> | Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si                                                                                                                                                                                          |
| <b>1985</b> | Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire                                                                                                                                                                                          |
| <b>1994</b> | Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)                                                                                                                                                                  |
| <b>1996</b> | Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)                                                                                                                                                                             |
| <b>1998</b> | Cellules couches minces Cu(InGa) Se <sub>2</sub> atteignent un rendement de 19% (NREL, US)                                                                                                                                                                                |
| <b>2002</b> | Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW                                                                                                                                                                                                              |
| <b>2007</b> | Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)                                                                                                                                                                                   |
| <b>2008</b> | Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm <sup>2</sup> obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)                                                                     |
| <b>2009</b> | Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA) Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA) |

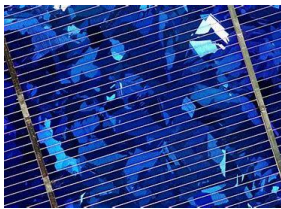
#### **I.4.2. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :**

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, pulque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [4] :

- a. Les Cellules mono cristallines** : Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) Cependant, Elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe [4].
- b. Les cellules poly cristallines** : Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en le dortoir) [4].
- c. Les Cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des

Calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce damier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [4].

**Tableau (I.2) :** Types de cellules photovoltaïques [4].

| Types               | Silicium monocristalin                                                            | Silicium polycristallin                                                              | Silicium amorphe                                                                    |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                     |  |    |  |
| <b>Rendement</b>    | De 15% à 19%                                                                      |                                                                                      | 7% à 10%                                                                            |
| <b>Durée de vie</b> | 35ans                                                                             | 35ans                                                                                | ≤10 ans                                                                             |
| <b>Avantages</b>    | Bon rendement en soleil direct                                                    | Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe) | Souplesse<br>Prix moins élevé que les cristallins<br>Bon rendement en diffus        |
| <b>Inconvénient</b> | Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...)<br>Prix élevé.              | Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux.)<br>Prix élevé.                   | Mauvais rendement en plein soleil.                                                  |

## I.5.La Cellule photovoltaïque :

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

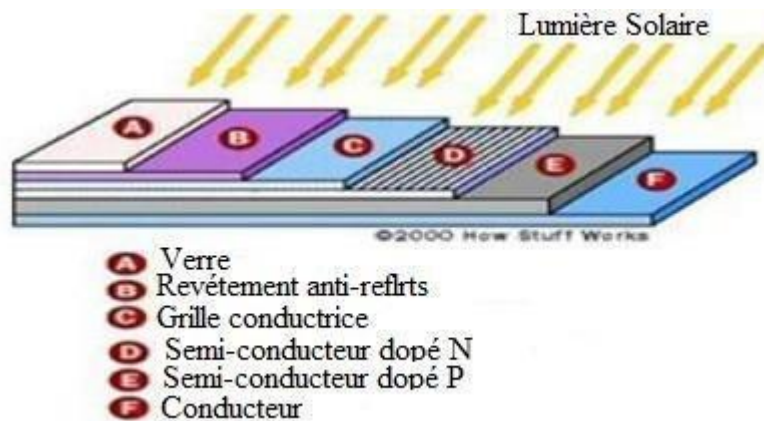
- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant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

- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.



- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.[5]

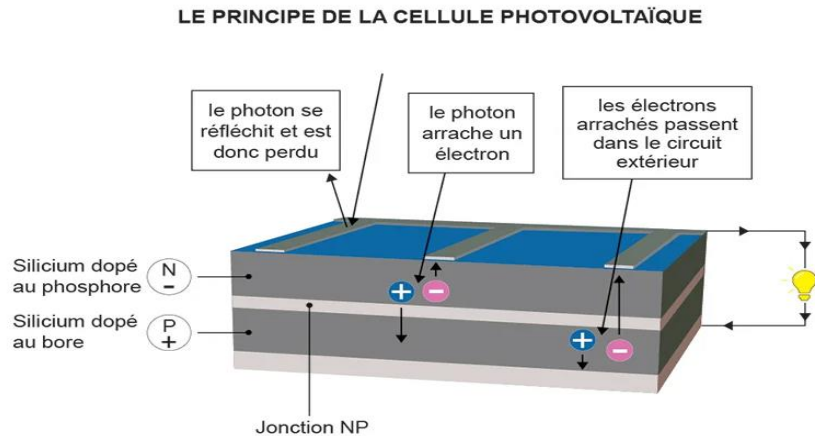


**Figure (I.3) :** Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [5].

### **I.6. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque :**

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque, qui permet de transformer directement l'énergie lumineuse des rayons du soleil en électricité. Ce processus implique la génération et le mouvement de charges électriques, tant positives que négatives, au sein d'un matériau semi-conducteur lorsqu'il est exposé à la lumière. Pour fabriquer ces cellules, on utilise des lingots de silicium, qui sont découpés en fines couches de type P ou N en y incorporant des éléments comme le brome ou le phosphore. La cellule solaire se forme par la création d'une jonction entre deux zones de types opposés (jonction PN). À proximité de cette jonction, un champ électrique se développe, ce qui permet de maintenir la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en forme de grille sont ensuite ajoutés sur la surface avant et à l'arrière de la cellule pour collecter le courant électrique généré.



**Figure (I.4) :** Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [6].

### I.7. Effet photovoltaïque :

C'est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs. Le plus connu d'entre eux est le silicium utilisé pour les composants électroniques. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère un courant. En effet, lorsque les photons heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique [7].



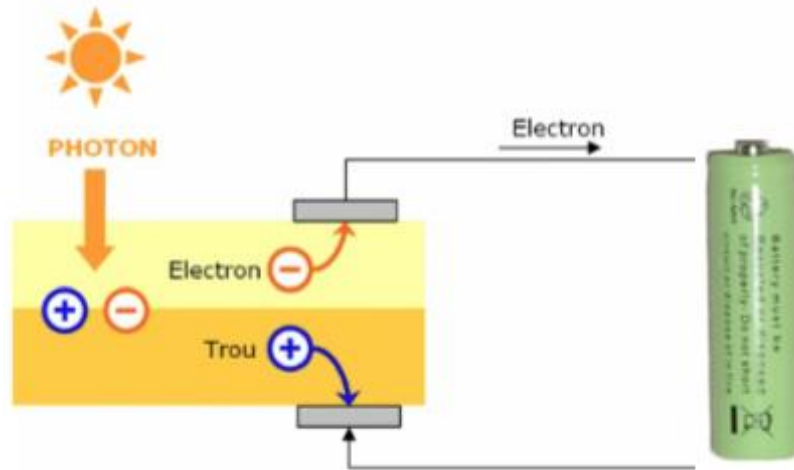


Figure (I.5) : Effet photovoltaïque

C'est-à-dire des particules de lumière, sont absorbés par le semi-conducteur. Lorsque ces photons frappent la surface du matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans ce dernier. Cette énergie supplémentaire permet aux électrons de se libérer et de se mettre en mouvement dans une direction spécifique, ce qui engendre un flux d'électricité, autrement dit un courant électrique. Ainsi, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, offrant une solution potentielle pour la production d'électricité à partir de sources renouvelables.

### I.8. Le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté à la figure (I.6) :

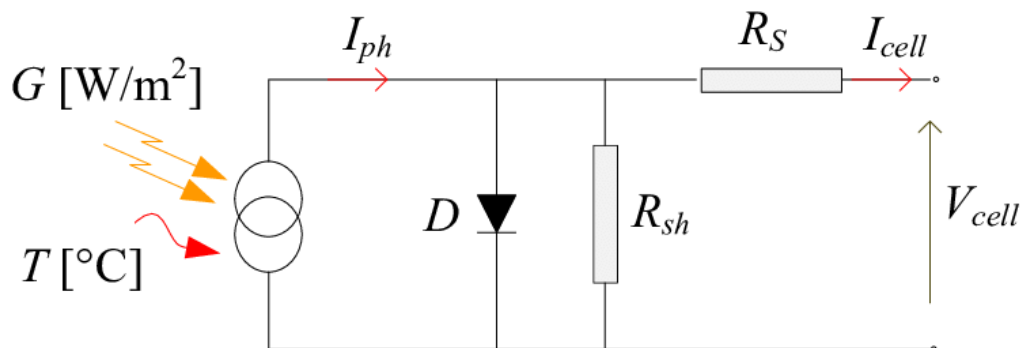


Figure (I.6) : schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

G : Générateur, T : température, I : Courant traversant l'utilisation.

D : est une diode idéale.

Rsh : : Résistance shunt interne.

Rs : Résistance série interne.

V : Tension aux bornes de la photo génératrice.

L'équation du modèle du générateur photovoltaïque est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q \cdot v + I \cdot R_s}{mKT} \right) - 1 \right] - \left( \frac{v + I \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.1)$$

## **I.9. Caractéristique courant- tension (I-V) de la cellule photovoltaïque :**

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extraits de la caractéristique courant-tension :

### **I.9.1. Tension en circuit ouvert $V_{co}$ :**

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante [8] :  $V_T$

$$I_{ph} - I_0 \left( \exp \left[ \frac{V_{co}}{V_T} \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (I.2)$$

Dans le cas idéal ( $R_s \rightarrow 0$ ,  $R_{sh} \rightarrow \infty$ ,  $I_{PH} = I_{CC}$ ), on obtient :

$$V_{\infty} = V_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.3)$$

### **I.9.2. Le courant en circuit ouvert $I_{sc}$ :**

En court-circuit  $V=0$  :

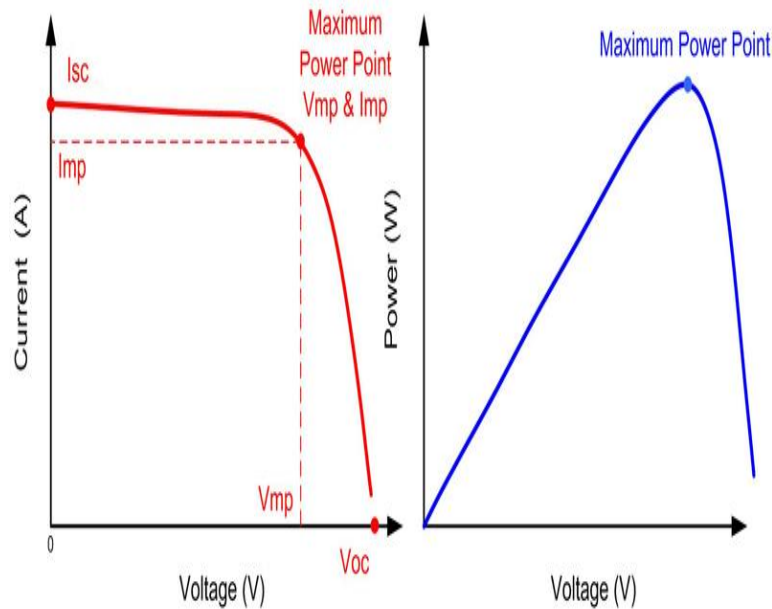
D'où :  $I_{cc} = I_{PH}$ , (dans le cas idéal). L'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I = \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (I.4)$$

### **I.9.3. Point du fonctionnement $P_m$ ( $V_m$ , $I_m$ ) :**

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m * I_m$$



**Figure (I.7) :** Caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque.

➤ **Le Facteur de forme FF :**

Le facteur de forme (FF), aussi appelé facteur de remplissage, correspond au rapport entre la puissance maximale ( $P_{\max}$ ) et le produit de la tension en circuit ouvert par le courant de Court-circuit. Il est défini par :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (I.5)$$

➤ **Le rendement photovoltaïque**

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad (I.6)$$

**Avec :**

$P_{\max}$  = : puissance maximale délivrée (W).

$P_{in}$  = puissance lumineuse incidente (W).

## **I.10.Regroupement des cellules :**

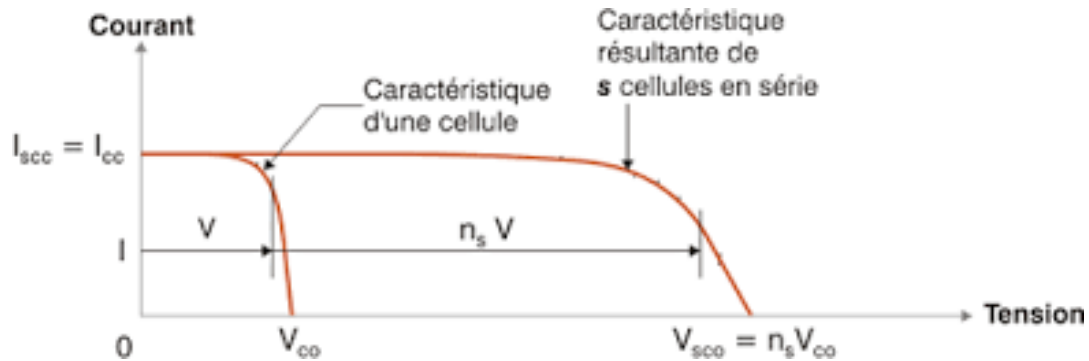
### **I.10.1. Cellules mise en série :**

Dans un groupement  $N_s$  cellules en série figure (I.8) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique

du groupement série est obtenus par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. Les équations qui résument les caractéristiques électriques d'une association série de  $N_s$  cellules.[9]

$I_{cc}=I_c$  : courant de court-circuit.

$V_{co}N_s = N_s * V_{co}$  : tension de circuit-ouvert.



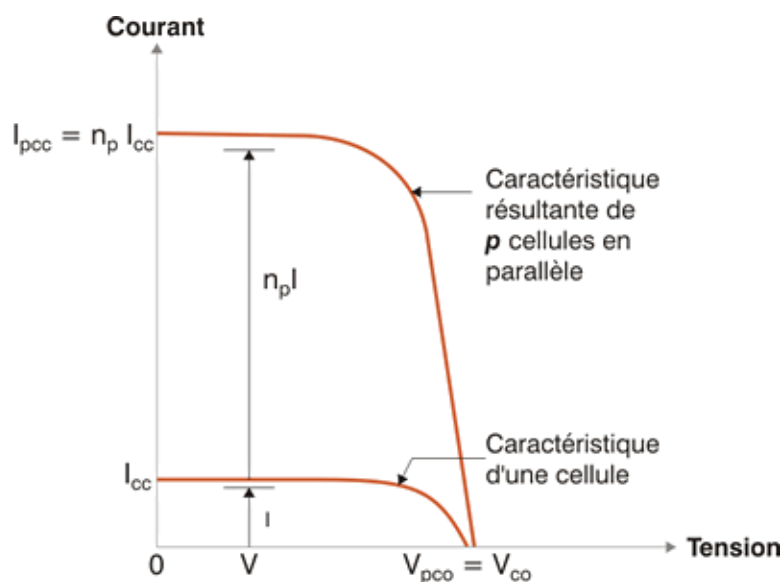
**Figure (I.8) :** caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série.

#### I.10.2. Cellules mise en parallèle :

Dans un groupement  $N_p$  identique connectées en parallèle figure (I.9), les cellules soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.[9]

$I_{cc}N_p=N_p*I_{sc}$  : courant de court-circuit.

$V_{co} = V_{co}N_p$  : tension de circuit-ouvert.



**Figure (I.9) :** caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en parallèle.

### I.11. Les centrales photovoltaïques en Algérie :



**Figure (I.10) :** Un modèle des panneaux solaires installé dans le sud

Les centrales photovoltaïques en Algérie représentent une part importante du développement des énergies renouvelables dans le pays. Grâce à un ensoleillement exceptionnel et à des conditions climatiques favorables, l'Algérie dispose d'un potentiel solaire considérable. Le gouvernement algérien a mis en place plusieurs initiatives et projets pour exploiter cette ressource. Depuis le programme national des énergies renouvelables lancé en 2011, l'Algérie vise à diversifier son mix énergétique et à réduire sa dépendance aux combustibles fossiles. Plusieurs centrales photovoltaïques ont été construites ou sont en cours de développement, avec des capacités variées. Les centres photovoltaïques contribuent non seulement à la production d'électricité, mais aussi à la création d'emplois locaux et au développement des compétences dans le secteur des énergies renouvelables. En outre, l'Algérie aspire à exporter une partie de son électricité solaire vers d'autres pays, notamment en Europe, grâce à des interconnexions électriques.

**Tableau (I.3) :** les centrales photovoltaïques en Algérie [8].

|                                     |                                                                                                |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hauts plateaux sont (90MW)</b>   | <b>Setif, Bordj Bouararidj, Batna, Mila et Souk Ahras, ce lot est attribué à YINGLI SOLAR.</b> |
| <b>Hauts plateaux centre (90MW)</b> | M'sila, Djelfa, Laghouat, et Ouargla, ce lot est attribué à YINGLI SOLAR.                      |
| <b>Hauts plateaux ouest (85MW)</b>  | Saida, Naâma, El Beyodh et Sidi Belabes, ce lot est attribué à BELECTRIC.                      |

**Sud-ouest du pays (53MW)**

Chaoulef, Zaouat Kounta, Adrar, Timimoune, Kabertene, Reggane (relevant de la wilaya d'Adrar) et In Salah (relevant de la wilaya de Tamanrasset). Ce lot est attribué à YINGLI SOLAR

**I.12. Conclusion :**

L'énergie solaire constitue une source propre, inépuisable et abondante, offrant une alternative durable face aux énergies fossiles. Exploitée à travers le rayonnement solaire, elle peut être convertie directement en électricité grâce aux cellules photovoltaïques. Ces dernières reposent sur l'effet photovoltaïque, un phénomène qui permet la génération d'un courant électrique lorsque des photons frappent un matériau semi-conducteur.

Les performances d'une cellule photovoltaïque dépendent de plusieurs paramètres électriques tels que la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, le point de puissance maximale, le facteur de forme et le rendement. Les équations électriques associées permettent de modéliser le comportement de la cellule sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

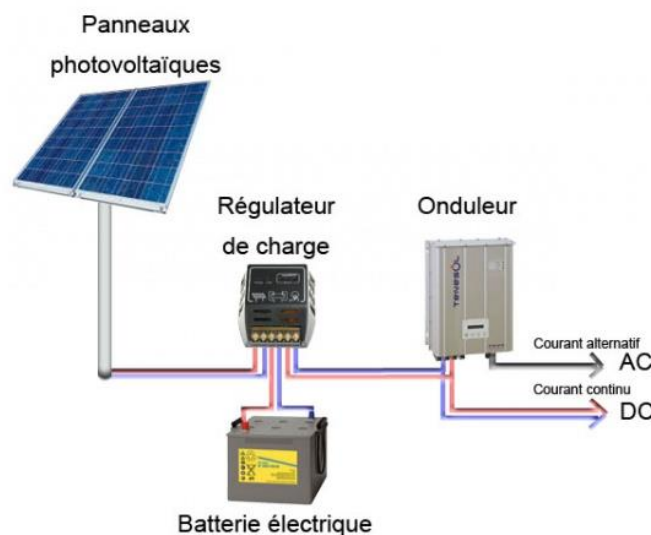
Par ailleurs, la mise en série ou en parallèle des cellules permet d'ajuster la tension ou le courant en fonction des exigences du système à alimenter. Ainsi, une compréhension approfondie des caractéristiques et des configurations des cellules photovoltaïques est essentielle pour concevoir des systèmes solaires efficaces, fiables et adaptés aux besoins énergétiques actuels.

# *Chapitre II*

## *Le Générateur photovoltaïque*

### II.1. Introduction :

Un système photovoltaïque autonome est conçu pour fonctionner de manière indépendante du réseau électrique. Il est généralement utilisé dans les zones isolées ou difficiles d'accès. L'énergie solaire captée par les panneaux photovoltaïques est convertie en électricité sous forme de courant continu, puis stockée dans des batteries. Un onduleur est utilisé pour transformer ce courant continu en courant alternatif afin d'alimenter les appareils domestiques. Ce type de système assure une autonomie énergétique complète et constitue une solution écologique pour les besoins électriques de base. Ce système est composé de : Générateur photovoltaïque, Système de stockage, Régulateur, Onduleur.....



**Figure (II.1) :** Les différents composants d'un système photovoltaïque autonome.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les différents composants d'un système photovoltaïque, ces composants principaux et leur rôle, puis expliquerons son fonctionnement leurs différents éléments à savoir les panneaux photovoltaïques, les onduleurs, le système de stockage, les différents types de ces composants.

### II.1. Le système photovoltaïque :

Un système PV est un ensemble complet d'équipements PV pour transformer la lumière du soleil en électricité, généralement il se compose de cinq éléments principaux : le générateur PV, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge.



Par le mécanisme photovoltaïque, les panneaux PV transforment l'énergie solaire en courant continu (CC). Ce dernier peut être utilisé directement, soit sera converti en courant alternatif (CA) par l'onduleur. Le surplus d'énergie produit par le système est emmagasiné dans les accumulateurs (batteries). La charge et la décharge des batteries sont contrôlées par le régulateur qui assure la régulation entre la production, la consommation et le stockage [10].

### II.2. Le panneau PV :



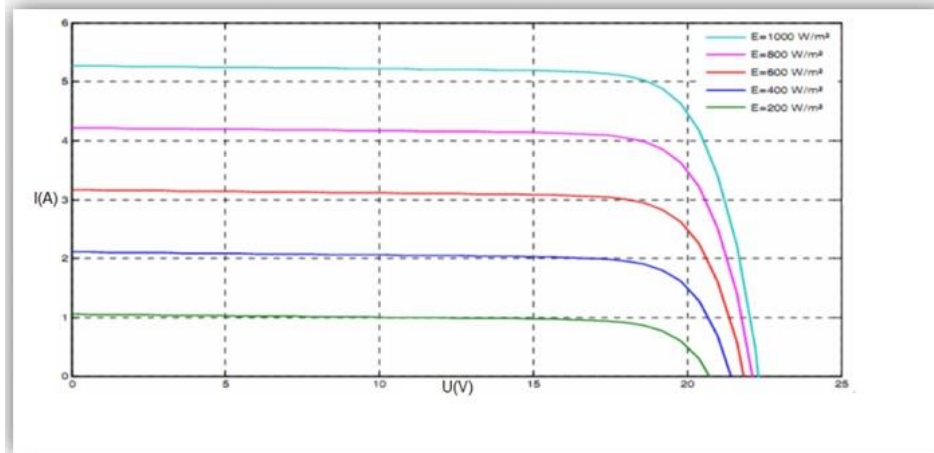
**Figure (II.2) :** Un panneau solaire.

Un panneau solaire photovoltaïque est un dispositif qui convertit la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Il est composé de cellules en silicium dopé de types n (excès d'électrons) et p (déficit d'électrons) qui, sous l'impact des photons solaires, libèrent des électrons créant un courant.

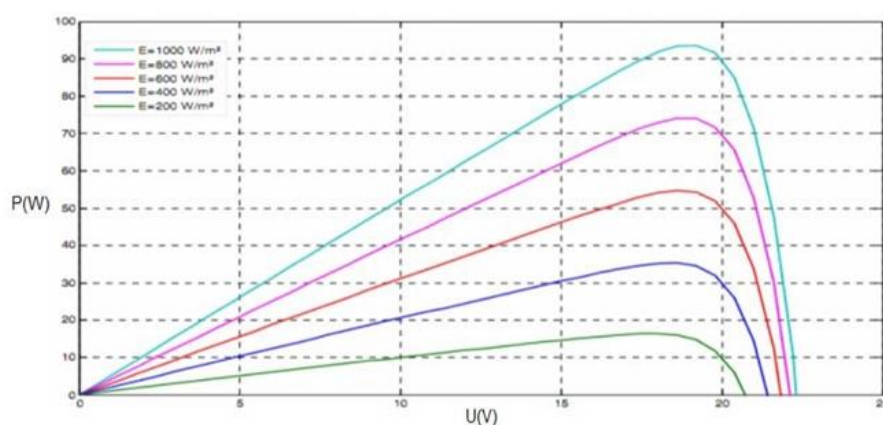
#### II.2.1 Influence de l'éclairement et la température d'une cellule :

##### ➤ Influence de l'éclairement :

Les figures (II.3) et (II.4) représentent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante.[13]



**Figure (II.3) :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension d'un GPV modèle à une exponentielle.

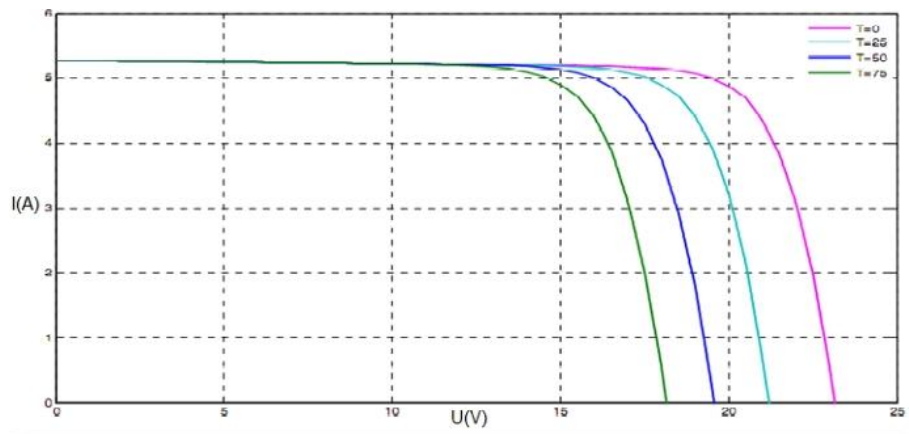


**Figure (II.4) :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension d'un GPV modèle à une Exponentielle.

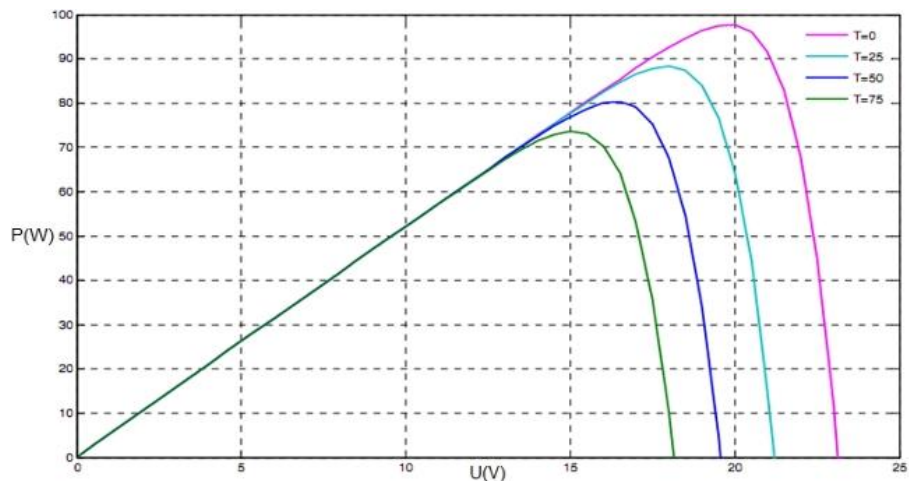
Pour une température constante de  $25^\circ$ , on remarque la variation de courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la puissance  $P_{max}$  en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. Pour la figure (II.4).1, Le courant  $I_{cc}$  augmente proportionnellement à l'augmentation de l'éclairement, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par l'augmentation de la puissance. [13]

#### ➤ Influence de la température :

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Les figures (II.5) et (II.6) donnent l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différentes valeurs de températures et un éclairement constant [13].



**Figure (II.5) :** Influence de la température sur la caractéristique courant-tension d'un GPV modèle à une exponentielle.



**Figure (II.6) :** Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension d'un GPV modèle à une exponentielle.

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaire, la figure (II.6).1 présente la variation du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la puissance  $P_{max}$  en fonction de la tension pour des températures différentes à un éclairage donné. Quand la température de la cellule augmente le courant de court-circuit augmente Faiblement tandis que la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  diminue de manière remarquable. Par contre la puissance maximale diminue lorsque la température augmente.[13]

### II.3. La batterie solaire :

Une batterie solaire est un dispositif de stockage d'énergie qui conserve l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques pour une utilisation ultérieure, notamment la nuit ou

par temps nuageux pour assurer une alimentation électrique continue et fiable même en l'absence de soleil. Elle se caractérise par :

- Ampérage en Ampère heure (Ah).
- Voltage en Volt.

On peut trouver les types des batteries solaires suivants :

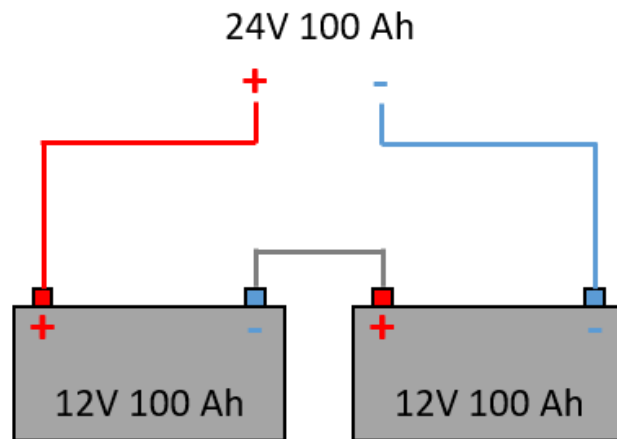
- **Batteries à gel** : Ce sont des batteries au plomb à électrolyte gélifié, sans entretien, très résistantes et adaptées aux systèmes solaires autonomes et habitats isolés. Elles offrent une longue durée de vie (jusqu'à 20 ans en maintien de charge) et une excellente performance en décharge lente ou cyclage profond. Leur conception étanche (technologie VRLA) évite les risques de fuite d'acide et ne nécessite pas de remplissage d'eau.
- **Batteries plomb étanches VRLA (Valve Regulated Lead Acid)** : Batteries scellées, sans entretien, avec régulation par soupape pour éviter les dégagements gazeux. Elles sont fiables, sûres et adaptées aux installations industrielles ou de secours, avec une durée de vie typique de plus de 5ans.
- **Batteries stationnaires plomb ouvert OPzS** : Plus classiques avec électrolyte liquide, elles ont une très bonne résistance aux températures extrêmes et une longue durée de vie (>10 ans), mais demandent un entretien régulier (remplissage d'eau).

### II.3.1. Groupement de batteries Groupement de batteries :

Il peut augmenter la capacité de stockage avec la connexion en série ou /et en parallèle plusieurs batterie identique et de même durée de vie. [12]

#### ➤ Montage en série :

Le groupement plusieurs batteries d'intensité identique en série permet d'augmenter la tension du groupement des batteries sans modifier l'intensité. [12]

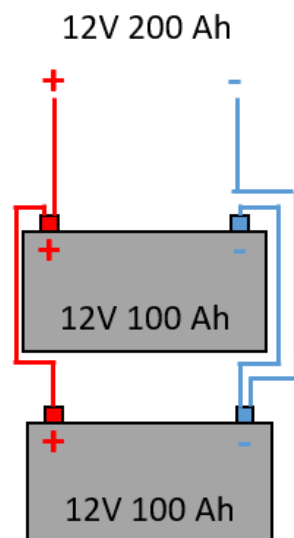


**BRANCHEMENT EN SERIE**  
Les tensions s'additionnent

**Figure (II.7) :** branchement des batteries en série.

➤ **Montage en parallèle :**

Le groupement de plusieurs batteries de tension identique en parallèle permet d'augmenter la capacité du parc des batteries sans modifier tension. [12]



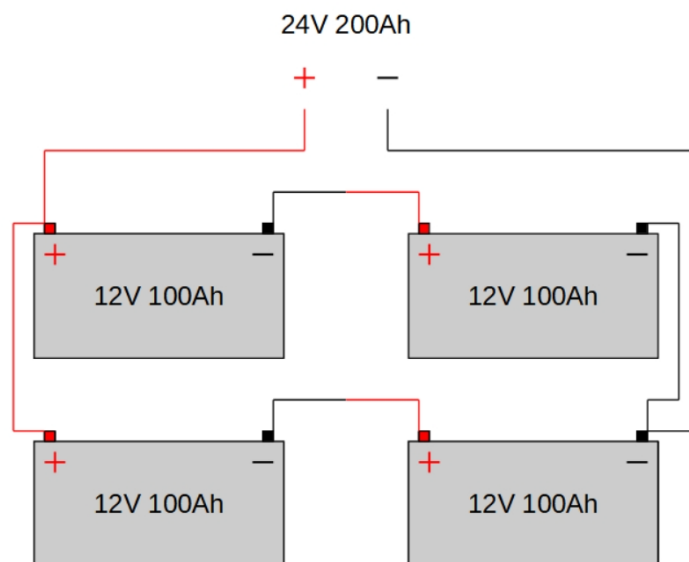
**BRANCHEMENT EN PARALLELE**  
Les intensités s'additionnent

**Figure (II.8) :** Branchement des batteries en parallèle

➤ **Montage en série et parallèle :**

Le branchement de batteries en série et en parallèle simultanément est une combinaison des deux types de connexions pour obtenir à la fois une tension plus élevée et une capacité accrue.

Ce type de connexion est utilisé lorsque vous avez besoin d'augmenter à la fois la tension et l'autonomie (**capacité en Ah**).



**Figure (II.9) :** branchement des batteries série et en parallèle.

**II.4. Le régulateur (contrôleur de charge) :**

Les régulateurs sont mis en place dans le souci d'assurer une longévité de système de stockage, donc de minimiser le coût d'installation. En effet, un régulateur est chargé de :

- Contrôler la surcharge et la décharge de la batterie.
- Assurer l'optimisation du système du point de vue énergétique où il constitue un nœud de transfert d'énergie entre le module, le stockage et l'utilisation.

Pour fonctionner, un régulateur a besoin d'un indicateur qui l'informe sur l'état de charge des batteries. Il doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils : un seuil haut et un autre bas. Le choix des seuils dépend des caractéristiques des batteries et des conditions d'utilisation. Un régulateur est défini par : Ampérage en Ampère et Voltage en Volt [11].

### II.4.1. Les différents types de régulateurs de charge :

#### ➤ Les régulateurs série :

Il Utilise des relais ou des commutateurs électriques en série entre le module et la batterie, il contrôle la charge de la batterie pour déconnecter le générateur photovoltaïque lorsque la tension de la batterie atteint un niveau prédéterminé. Quand l'état de la charge de la batterie baisse après utilisation de la charge, le régulateur reconnecte le chargeur afin qu'il recharge la batterie pendant le cycle solaire suivant. [12]

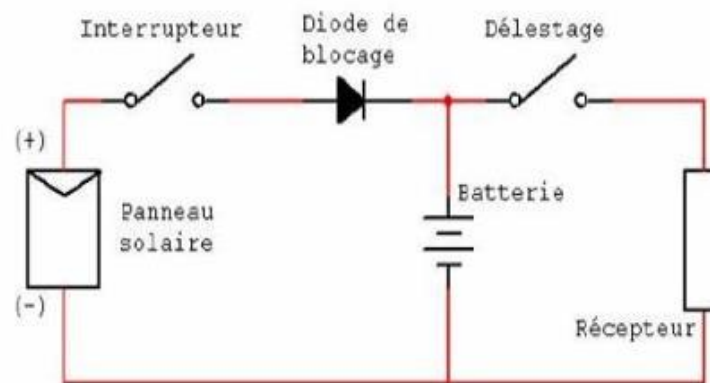


Figure (II.10) : schéma de régulateur série.

#### ➤ Les régulateurs shunt :

Montés en parallèle entre le panneau solaire et la batterie. Il intervient en déviation sur la batterie à l'aide d'un interrupteur et dissipe l'énergie en chaleur, il contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le générateur photovoltaïque lorsque la batterie atteint sa pleine charge. Le courant du module passe directement dans la batterie et dès que le seuil critique est atteint, le courant passe par l'interrupteur. [12]

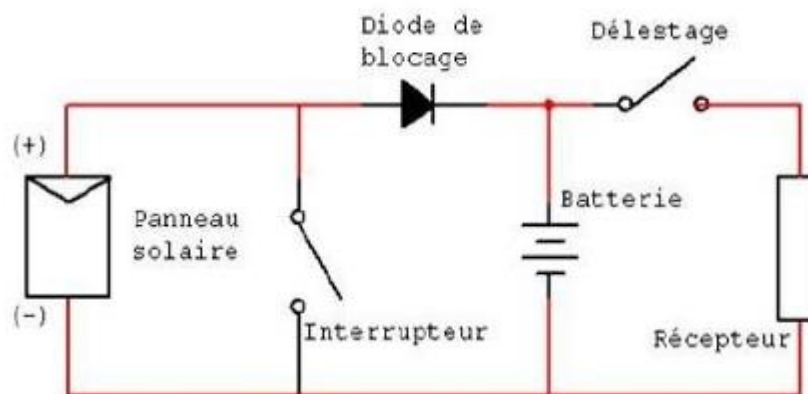


Figure (II.11) : schéma de régulateur shunt.

➤ **Régulateur MPPT :**

Un régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un dispositif utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour optimiser la production d'énergie provenant des panneaux solaires. Son rôle principal est de maximiser la puissance extraite des panneaux solaires en ajustant automatiquement le point de fonctionnement en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.



**Figure (II.12) :** Régulateur MPPT.

➤ **Fonctionnement d'un régulateur MPPT :**

Un régulateur MPPT est un dispositif essentiel dans les systèmes photovoltaïques, conçu pour maximiser la production d'énergie des panneaux solaires. Son fonctionnement repose sur des mesures continues de la tension et du courant générés par les panneaux, permettant ainsi d'identifier le point de puissance maximale (MPP) qui varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Grâce à des algorithmes avancés, le régulateur ajuste en temps réel le point de fonctionnement des panneaux pour garantir une extraction optimale de l'énergie. Il convertit ensuite cette énergie à une tension appropriée pour charger les batteries ou alimenter le réseau électrique, tout en intégrant des fonctionnalités de monitoring et de protection pour assurer la sécurité et l'efficacité du système. En optimisant la performance énergétique, le régulateur MPPT joue un rôle crucial dans la rentabilité et le rendement des installations solaires.

Par exemple si le Niveau de charge de la batterie : 12,0 V, le courant du panneau solaire: 6,5 A, Tension du panneau solaire : 17V, Courant converti par le régulateur MPPT : 8,0 A et la tension sortie régulateur pour la batterie : 13,0 V.



Pour commencer, calculons la puissance fournie par le panneau solaire :

$$P_{\text{panneau}} = I * V = 6.5A * 17V = 110,5W$$

Ensuite, nous calculons la puissance que le régulateur MPPT fournit à la batterie :

$$P_{\text{batterie}} = I_{\text{MPPT}} * V_{\text{batterie}} = 8A * 13V = 104W$$

Pour vérifier le rendement du régulateur MPPT, nous devons comparer la puissance fournie par le panneau avec la puissance fournie à la batterie. Dans ce cas :

$$\text{Rendement} = \frac{P_{\text{batterie}}}{P_{\text{panneau}}} * 100 = \frac{104W}{110,5W} * 100 = 94,2\%$$

Dans cet exemple, le panneau solaire génère environ 110,5 W d'énergie, tandis que le régulateur MPPT fournit environ 104 W à la batterie. Le régulateur opère à un rendement d'environ 94,2 %. La tension de sortie réglée à 13,0 V est supérieure à la tension de charge de 12,0 V de la batterie, ce qui est essentiel pour forcer la charge dans la batterie. Cela montre l'importance d'utiliser un régulateur MPPT pour maximiser l'efficacité et garantir que les batteries reçoivent la charge nécessaire.

## II.5. Les onduleurs :

Un onduleur solaire est un appareil électronique essentiel dans les systèmes de production d'énergie photovoltaïque. Sa principale fonction est de convertir le courant continu (DC) généré par les panneaux solaires en courant alternatif (AC), qui est le type d'électricité utilisé par la plupart des appareils électriques domestiques et adapté à l'injection dans le réseau électrique.

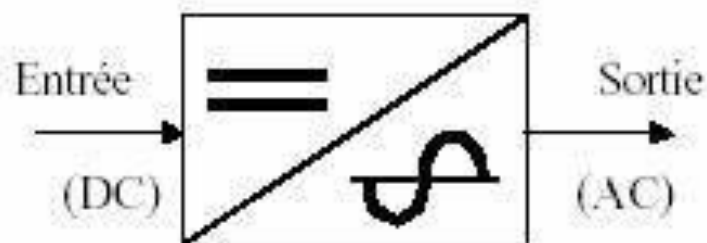
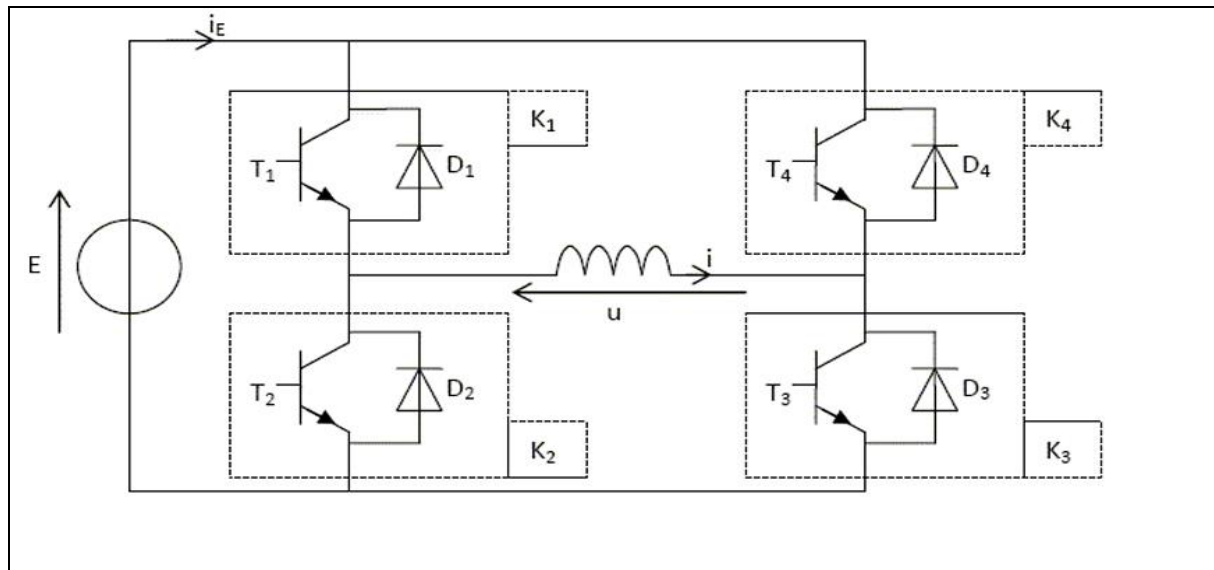


Figure (II.13) : Symbole de l'onduleur.

### II.5.1. Principe de fonctionnement d'onduleur :

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Par un

jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée. [12]



**Figure (II.14) :** Schéma de principe d'un onduleur solaire.

L'onduleur en pont monophasé est composé de quatre interrupteurs de puissance, notés Q1, Q2, Q3 et Q4, répartis en deux bras de commutation. Chaque bras contient deux interrupteurs qui ne doivent jamais être fermés simultanément afin d'éviter un court-circuit direct de la source. En activant Q1 et Q4, on applique une tension positive à la charge, tandis qu'en fermant Q2 et Q3, la tension devient négative. En alternant ces états de manière contrôlée, on génère une tension alternative à partir d'une source continue. Les autres combinaisons d'interrupteurs sont interdites car elles entraîneraient un court-circuit. Le tableau des états des interrupteurs ne retient donc que les configurations sûres respectant ces règles, ce qui permet de commander efficacement l'onduleur pour produire une tension alternative adaptée. Le Tableau (II.1) est présente Les configurations possibles. [14]

**Tableau (II.1) :** Les configurations possibles.

|       |         | Bras 1 | Bras 2  |         | Tension $U_c$ |
|-------|---------|--------|---------|---------|---------------|
|       | Q1      | Q2     | Q3      | Q4      |               |
| Cas 1 | Passent | Bloqué | Passent | Bloqué  | $U_c=0$       |
| Cas 2 | Passent | Bloqué | Bloqué  | Passent | $U_c=E$       |

|       |        |         |         |         |            |
|-------|--------|---------|---------|---------|------------|
| Cas 3 | Bloqué | Passent | Passent | Bloqué  | $U_c = -E$ |
| Cas 4 | Bloqué | Passent | Bloqué  | Passent | $U_c = 0$  |

### II.5.2. Différents types d'onduleurs autonomes :

#### ➤ Onduleurs à onde carré :

Un onduleur à onde carrée est un type d'onduleur qui convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) sous forme d'onde carrée. Ce type d'onduleur est relativement simple et peu coûteux. Les onduleurs à onde carrée sont généralement utilisés pour des applications où la qualité de la puissance n'est pas critique, comme certains petits appareils électriques ou des systèmes de faible puissance.



**Figure (II.15) :** Onduleur électronique a onde carrée.

#### ➤ Onduleurs à onde sinusoïdale modifiée

Les onduleurs à onde sinusoïdale modifiée produisent une forme d'onde en courant alternatif qui n'est pas une sinusoïde parfaite mais une onde trapézoïdale, composée de segments plats et de transitions abruptes. Cette forme est un compromis entre une onde carrée simple et une onde sinusoïdale pure.



Figure (II.16) : Onduleurs à onde sinusoïdale modifiée.

### ➤ Onduleurs à onde sinusoïdale

Un onduleur à onde sinusoïdale pure génère une forme d'onde en courant alternatif très proche de celle fournie par le réseau électrique, avec une montée et une descente régulière et un passage par zéro instantané, ce qui assure une tension stable et propre.



Figure (II.17) : Onduleurs à onde sinusoïdale.

### II.5.3. Circuit équivalent d'un onduleur monophasé :

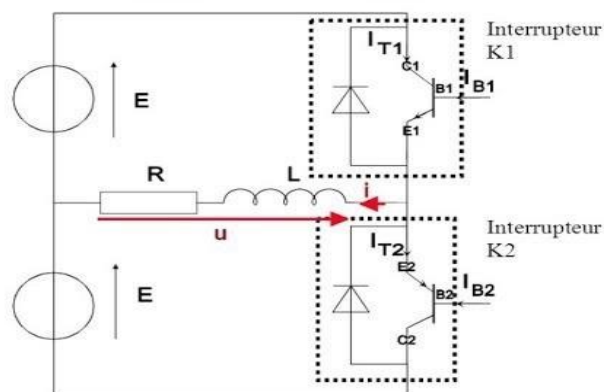


Figure (II.18) : Circuit équivalent d'un onduleur monophasé a deux interrupteurs.

## II.5.4. Modélisation d'un onduleur monophasé :[15]

L'équation mathématique de la tension s'écrit :

$$U(t) = R \times i(t) + L \times \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.1})$$

En appliquant la loi des mailles dans l'intervalle  $0 < t < T/2$ , on aura :

$$U(t) = i(t) + L \times \frac{di(t)}{dt} = 0 \quad (\text{II.2})$$

La solution générale de cette équation est la somme de la solution générale de l'équation sans second membre (SSM) et la solution particulière. On commence par la solution homogène, on a l'équation générale :

$$R \times i(t) + L \times \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.3})$$

En intégrant l'équation (II.15) on trouve :

$$I(t) = \exp\left(-\left(\frac{R}{L}\right)t + \text{cste}\right) \quad (\text{II.4})$$

On peut simplifier l'équation (II.16) comme suit :

$$I(t) = K \times e^{(-t/\tau)} \quad (\text{II.5})$$

Pour la solution particulière, elle s'exprime sous la forme :

$$I_P = At + B \quad (\text{II.6})$$

En remplaçant (II.6) dans l'équation (II.3) on obtient :

$$R \times I_P(t) + L \times \frac{dI_P(t)}{dt} = E \quad (\text{II.7})$$

En remplaçant  $i$  par son expression (II.6) on obtient :

$$At + B + \frac{L}{R}A = \frac{E}{R} \quad (\text{II.8})$$

En appliquant l'identification, on aura la solution particulière :

$$I_P(t) = \frac{E}{R} \quad (\text{II.9})$$

Ainsi, la solution totale de l'équation différentielle est exprimée comme suit :

$$I_t(t) = I_P(t) + i(t) \quad (\text{II.10})$$

D'où

$$I_t(t) = K \times e^{(-t/\tau)} + \frac{E}{R} \quad (\text{II.11})$$

Aux conditions initiales

$$I_t(0) = 0$$

$$K = -IM - E/R$$

La solution totale s'écrit donc sous la forme suivante :

$$I_t(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{(-t/\tau)}) - IM \times e^{(-t/\tau)} \quad (\text{II.12})$$

Pour le cas  $T/2 < t < T$ , l'équation caractéristique s'exprime comme suit :

$$U(t) = R \times i(t) + L \times \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{II.13})$$

De la même manière, la solution totale de cette équation est la somme de la solution générale sans second membre (SSM) et d'une solution particulière.

La solution SSM : est la même que le premier cas, on obtient ainsi

$$I(t) = K \times e^{(-t/\tau)} \quad (\text{II.14})$$

La solution particulière, on obtient le terme :

$$I_t(t) = I_p(t) + i(t) \quad (\text{II.15})$$

D'où :

$$I_t(t) = K \times e^{(-t/\tau)} - \frac{E}{R} \quad (\text{II.16})$$

Dans les conditions suivantes :

$$A \ t = T/2$$

$$I_t(T/2) = +IM$$

$$K = +IM + (E/R)$$

Finalement la solution totale s'exprime dans ce cas comme suit :

$$I_t(t) = \frac{E}{R} (-1 + e^{(-t/\tau)}) + IM e^{(-t/\tau)} \quad (\text{II.17})$$

**II.6. La charge :**

La charge électrique alimentée par un système photovoltaïque correspond aux appareils ou équipements électriques qui consomment l'électricité produite par les panneaux solaires. Cette charge peut être variée : éclairage, électroménager, moteurs, ou encore batteries à recharger.

**➤ L'éclairage :**

L'éclairage photovoltaïque utilise l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Cette électricité est stockée dans des batteries pendant la journée, puis utilisée la nuit pour alimenter des luminaires, souvent à LED, assurant un éclairage autonome et écologique, notamment pour l'éclairage public ou des sites isolés.

**➤ La réfrigération :**

La réfrigération solaire consiste à utiliser l'énergie du soleil pour produire du froid, soit par un système à compression électrique alimenté par des panneaux photovoltaïques, soit par un système à absorption fonctionnant grâce à la chaleur solaire. Dans le premier cas, l'électricité générée est stockée dans des batteries et convertie en courant alternatif pour faire fonctionner un compresseur qui extrait la chaleur de l'intérieur du réfrigérateur. Dans le second, la chaleur solaire active un cycle frigorifique sans compresseur électrique, utilisant des fluides spécifiques pour produire du froid. Cette technologie écologique et autonome est particulièrement utile dans les zones isolées ou pour réduire la consommation d'énergie traditionnelle.

**➤ Les ordinateurs :**

Les ordinateurs sont largement utilisés dans la conception assistée et le contrôle des systèmes utilisant l'énergie solaire, notamment pour optimiser les performances des systèmes de réfrigération solaire. Par exemple, la conception assistée par ordinateur (CAO) permet de modéliser et d'optimiser les cycles thermodynamiques des systèmes frigorifiques solaires, en tenant compte des paramètres du capteur solaire et du cycle de réfrigération pour améliorer leur efficacité.

### ➤ Le pompage de l'eau :

Le pompage solaire consiste à utiliser l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques pour alimenter une pompe électrique qui extrait et transporte l'eau d'un point à un autre. La pompe fonctionne en courant continu et est directement reliée aux panneaux solaires via un contrôleur (booster) qui optimise son fonctionnement en adaptant la vitesse de rotation à l'ensoleillement, permettant ainsi de pomper même avec un faible rayonnement solaire.

### II.7. Le Câblage :

Le câblage dans un système photovoltaïque consiste à relier les panneaux solaires entre eux et aux autres composants (régulateur, batterie, onduleur) pour acheminer l'électricité produite.



**Figure (II.19) :** exemple sur les câbles.

Deux types principaux de câblage existent :

### ➤ Câblage en série :

Les panneaux sont connectés en chaîne, la borne positive d'un panneau reliée à la borne négative du suivant. Cela additionne les tensions tout en conservant le même courant, adapté pour augmenter la tension globale du système.

### ➤ Câblage en parallèle :

Toutes les bornes positives sont reliées ensemble, de même que toutes les bornes négatives. Cela additionne les courants tout en gardant la même tension, utile pour augmenter l'intensité disponible.



## II.8. Différents systèmes photovoltaïques :

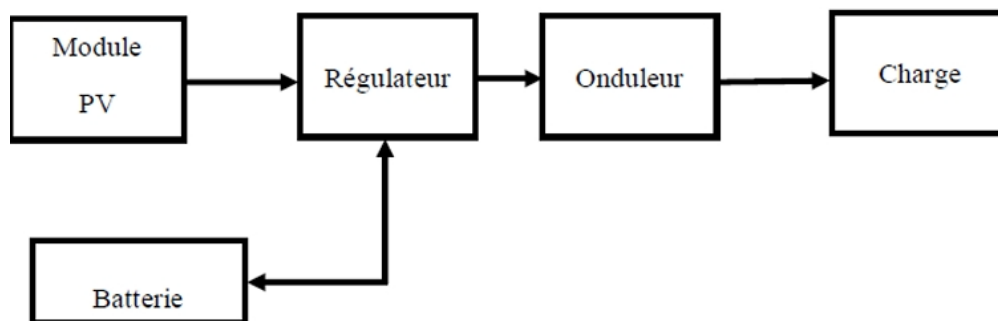
Les trois genres de systèmes PV que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau.

### II.8.1. Systèmes photovoltaïques autonomes (hors réseau) :

Ils fonctionnent indépendamment du réseau électrique. Ces systèmes peuvent être sans stockage (au fil du soleil) ou avec stockage (batteries) pour alimenter des charges en courant continu ou alternatif, notamment dans les zones isolées ou pour des applications comme le pompage d'eau.

#### ➤ Systèmes avec accumulateurs

L'excédent de l'énergie produite est stocké dans des batteries. Le schéma synoptique de la figure suivante décrit ce système.



**Figure (II.20) :** Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie. [15]

#### ➤ Système sans accumulateurs :

Dans ces systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique. Par exemples :

**Pompage** : stockage par réservoir d'eau,

**Réfrigération** : stockage de froid (stockage de glace ou eutectique),

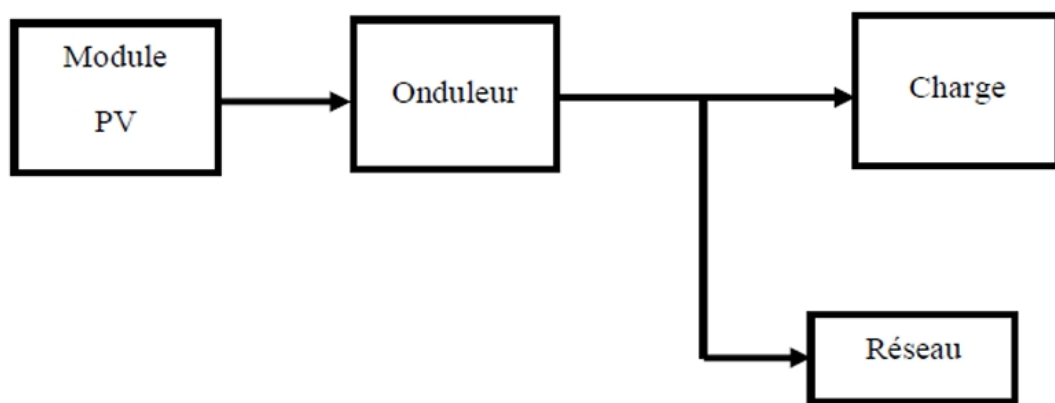
**Électrolyse de l'eau** : stockage d'hydrogène.[15]

### II.8.2. Systèmes connectés au réseau :

Ces systèmes injectent l'électricité produite directement dans le réseau public. Ils permettent à l'utilisateur de consommer sa propre production et d'injecter le surplus, ce qui peut réduire la facture d'électricité. Ils ne fonctionnent pas en cas de coupure réseau pour des raisons de sécurité.

#### ➤ Systèmes photovoltaïques directement relié au réseau

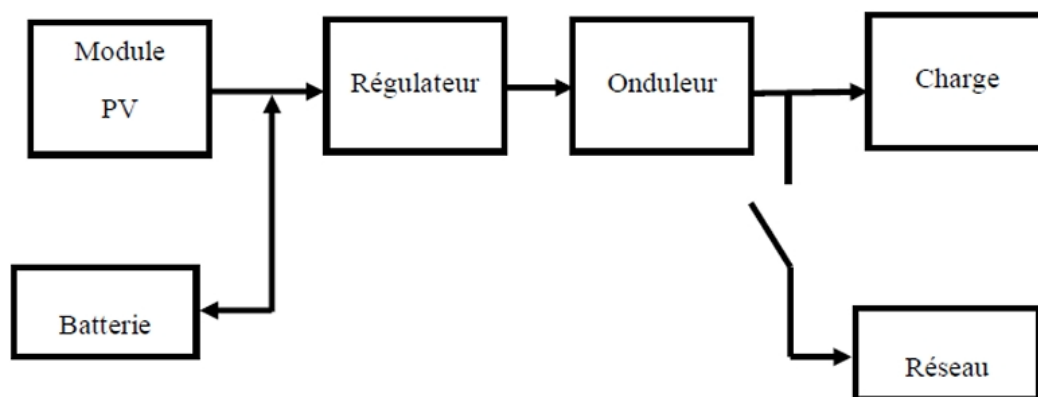
Le système ne peut fournir ou prélever de l'énergie qu'au réseau. La batterie n'est plus présente. Le schéma du système PV directement relié au réseau est donné par la figure suivante.



**Figure (II.21) :** Système photovoltaïque directement relié au réseau.[15]

#### ➤ Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie

Le système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma d'un système PV relié au réseau avec batterie est le suivant.



**Figure (II.22) :** Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.[15]

L'énergie est fournie par le module PV à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie [15].

### **II.8.3. Systèmes hybrides :**

Ils combinent plusieurs sources d'énergie (solaire, éolienne, générateur diesel) avec un stockage par batterie. Ils assurent une alimentation continue même en l'absence de soleil ou de vent, adaptés aux sites isolés ou aux besoins industriels et commerciaux exigeants.

### **II.9. La conclusion :**

En résumé, un système photovoltaïque est composé de plusieurs éléments essentiels qui travaillent ensemble pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable. Le panneau solaire capte la lumière du soleil et la transforme en courant continu, qui est ensuite régulé par le régulateur de charge pour protéger la batterie et optimiser son fonctionnement. La batterie stocke l'énergie pour une utilisation ultérieure, tandis que l'onduleur convertit le courant continu en courant alternatif adapté aux charges électriques. Le câblage assure la connexion sécurisée et efficace entre tous ces composants. Enfin, selon les besoins et les conditions d'utilisation, différents types de systèmes photovoltaïques autonomes, raccordés au réseau ou hybrides permettent de répondre à diverses applications, allant des installations isolées aux réseaux électriques connectés. La compréhension de ces composants et systèmes est fondamentale pour concevoir et exploiter efficacement l'énergie solaire.

# *Chapitre III*

*La commande MPPT*

*dans le système*

*photovoltaïque*

**III.1. Introduction :**

Les caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque (GPV) sont non linéaires et présentent un seul point de fonctionnement optimal, appelé point de puissance maximale (MPP), lorsque les conditions d'éclairement et de température sont homogènes. Ce point optimal dépend directement de la charge connectée au générateur. Pour garantir que le GPV fonctionne toujours à cette puissance maximale, il est nécessaire d'insérer un étage d'adaptation entre le générateur et la charge. Cet étage est généralement un convertisseur statique DC-DC, commandé par un système de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce système ajuste dynamiquement la tension et le courant du générateur afin de maintenir son fonctionnement au MPP malgré les variations des conditions environnementales et de la charge. Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types de convertisseurs DC-DC utilisés ainsi que les principales techniques de commande MPPT permettant d'optimiser la performance des systèmes photovoltaïques.

**III.2. Convertisseur DC/DC :**

Le convertisseur DC ou l'hacheur transforme une tension continue de batterie (12V, 24V ou 48V) en une tension continu différente. L'hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien) [16].



**Figure (III.1) :** Convertisseur DC/DC

**III.3. Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire :**

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandé (un transistor de puissance qui fonctionne en commutation ; 0 1) à l'ouverture et à la fermeture tels que les

thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe de l'hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. Pour cela les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante [17].

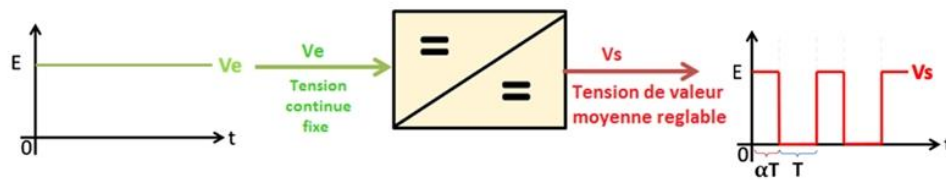


Figure (III.2) : Tensions  $V_e$  et  $V_s$  dans le convertisseur DC/DC.[17]

### III.4. Composition du convertisseur :

#### III.4.1. Le transistor MOSFET :

Le transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) joue un rôle central dans le fonctionnement du convertisseur Buck (hacheur abaisseur). Dans ce type de circuit, il sert d'interrupteur électronique commandé : il s'ouvre et se ferme à une fréquence élevée pour hacher la tension d'entrée et ainsi réguler la tension de sortie.

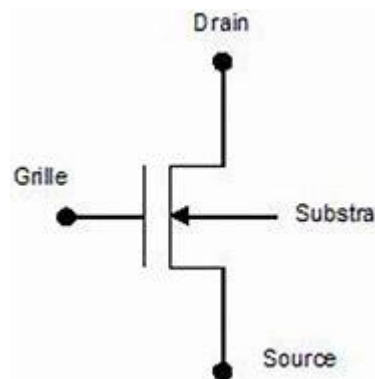
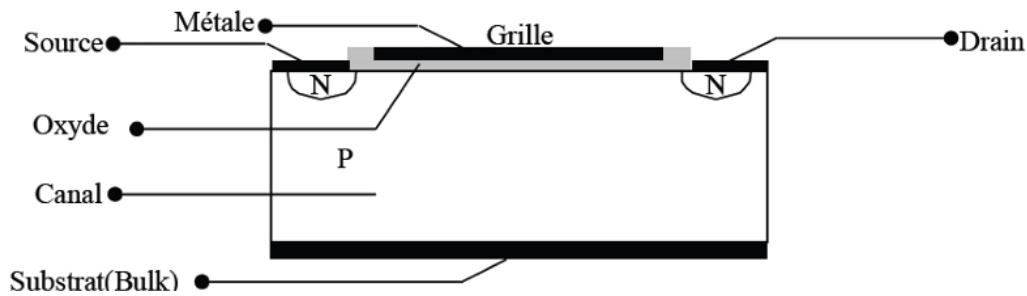


Figure (III.3) : Représentation symbolique de le MOSFET.

Dans un semi-conducteur dopé de type P (figure III.4), on a diffusé deux zones de type N sur lesquelles sont soudés les deux contacts de source S et de drain D. Une couche d'oxyde recouvre la zone P située entre la source et le drain ; sur cette couche est soudé le contact de

grille (gâte) G. C'est la succession Metal-Oxyde-Semi-conductors qui donne le préfixe MOS utilisé pour caractériser ce type de transistor [17].



**Figure (III.4) :** Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance.[17]

#### III.4.2. Le condensateur :

Les condensateurs que nous rencontrons dans les alimentations à découpage remplissent deux rôles distincts : ils servent d'énergie lors des variations de commande ou de charge, mais aussi ils servent également de condensateur de découpage ou filtrage vis-à-vis du fonctionnement en haute fréquence de l'alimentation. Ce sont les condensateurs chimiques dits à faible résistance série qui présentent des valeurs de capacité importantes, tout en présentant une excellente tenue en fréquence. Le condensateur se caractérise par des grandeurs physiques qui définissent ses domaines d'application. La capacité d'un condensateur est égale au rapport de la charge électrique  $Q$  emmagasinée à la tension  $V$  appliquée entre ses armatures.

$$C(F) = \frac{Q(C)}{V(V)} \quad (III.1)$$

Dans le cas simplifié d'un condensateur dont la surface  $S$  des armatures en regard est plane, l'expression de la capacité est :

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{e} \quad (III.2)$$

Avec :

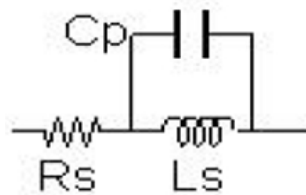
$\epsilon_0$  : permittivité du vide.

$\epsilon_r$  : permittivité relative (2 à 20000) du diélectrique.

$e$  : épaisseur du diélectrique [17].

### III.4.3. L'inductance :

L'inductance est un composant essentiel dans un convertisseur DC-DC, car elle stocke l'énergie sous forme de champ magnétique lorsque l'interrupteur de puissance est fermé, puis la restitue progressivement lorsque celui-ci est ouvert. Cette fonction permet de lisser le courant et de réduire les ondulations de tension à la sortie, assurant ainsi une alimentation stable et efficace. Le choix de l'inductance dépend de plusieurs paramètres clés, notamment sa valeur, son courant de saturation, sa résistance série et sa capacité à dissiper la chaleur. Une inductance bien dimensionnée garantit un fonctionnement optimal du convertisseur en minimisant les pertes et en évitant la saturation magnétique, ce qui contribue à améliorer la fiabilité et la durée de vie de l'ensemble du système. Le schéma électrique équivalent d'une inductance réelle  $L$  est le suivant :



**Figure (III.5) :** Schéma équivalent d'une inductance réelle  $L$ . [17]

Où  $R_s$  représente la résistance série du fil bobiné et  $C_p$  les capacités parasites inter spires. La valeur de l'inductance est obtenue par :

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{S_e}{l_e} N^2 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$\mu_0$  :  $4 \pi \cdot 10^{-7}$  (SI) .

$\mu_e$  : perméabilité relative (y compris entre fer éventuel).

$S_e$  : section effective magnétique du noyau (section moyenne).

$l_e$  : longueur magnétique effective (longueur moyenne du circuit magnétique) .

$N$  : nombre de spires [17].



#### III.4.4. La diode :

La diode dans un convertisseur DC-DC, souvent appelée diode de roue libre, joue un rôle crucial en assurant la continuité du courant lorsque l'interrupteur de puissance est ouvert. En effet, lors de la phase où le transistor est bloqué, la diode devient passante et permet au courant stocké dans l'inductance de circuler, évitant ainsi une coupure brutale qui pourrait engendrer des surtensions dangereuses. Cette diode protège donc les composants en écrêtant ces surtensions et assure un fonctionnement stable et sûr du convertisseur. Elle doit être dimensionnée pour supporter la tension d'alimentation ainsi que le courant maximal du circuit afin d'assurer fiabilité et durabilité.



**Figure (III.6) :** Module à diode de roue libre .

#### III.5. Les types des convertisseurs DC-DC :

Les principaux types de convertisseurs DC-DC se divisent en deux grandes catégories : non isolés et isolés.

➤ **Les topologies isolées de la source :**

Les convertisseurs DC-DC isolés sont des dispositifs qui intègrent une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie grâce à l'utilisation d'un transformateur. Cette isolation améliore la sécurité électrique et permet d'adapter les niveaux de tension tout en évitant les problèmes de boucles de masse. Parmi les topologies isolées les plus courantes, on trouve le convertisseur Flyback, utilisé pour des puissances faibles à moyennes, le convertisseur Forward adapté à des puissances plus élevées, ainsi que les convertisseurs résonnants LLC et LCC, qui offrent une grande efficacité pour des applications industrielles et d'alimentation à haute fréquence. Enfin, le Dual Active Bridge est une topologie bidirectionnelle employée dans les systèmes de forte puissance, notamment pour la recharge des véhicules électriques. Ces

convertisseurs sont essentiels dans de nombreuses applications où la sécurité, la fiabilité et la performance énergétique sont prioritaires.

➤ **Les topologies non isolées de la source :**

Les convertisseurs DC-DC non isolés sont des convertisseurs qui ne comportent pas de transformateur d'isolation galvanique entre l'entrée et la sortie. Ils sont composés essentiellement d'interrupteurs (MOSFET, IGBT), de diodes, d'inductances et de condensateurs. Les topologies non isolées les plus courantes sont :

- Buck : convertisseur abaisseur de tension.
- Boost : convertisseur élévateur de tension.
- Buck-Boost : convertisseur pouvant abaisser ou élever la tension selon le rapport cyclique.

On peut classer ces convertisseurs par rapport à leurs rendements dans le tableau suivant :

**Tableau (III.1) :** Rendement des quelques convertisseurs DC-DC [18].

| Convertisseurs | Rendement du convertisseur (%) | Batterie |
|----------------|--------------------------------|----------|
| Buck           | 93                             | 12 V     |
| Boost          | 92                             | 24 V     |
| Buck-Boost     | 92                             | 12-24 V  |

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé dans des systèmes de pompage de l'eau mais aussi comme chargeur de batteries. La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost... Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC [18].

### III.5.1. Convertisseur survolteur (Boost) :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage permettant d'augmenter la tension fournie et diminuer ainsi, le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Donc les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur [19].

#### ➤ Schéma du convertisseur Boost :

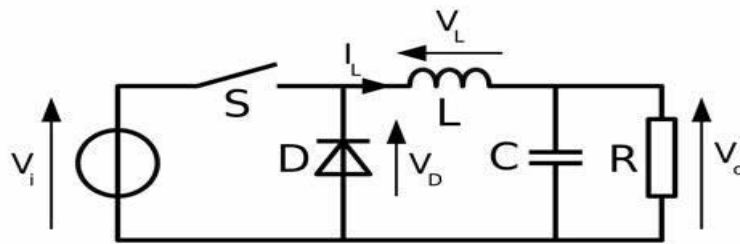


Figure (III.7) : Schéma de convertisseur Boost.

#### ➤ Principe de fonctionnement :

Pour  $(0 < t < \alpha T)$  :

L'interrupteur K est fermé, la diode D est bloquée.

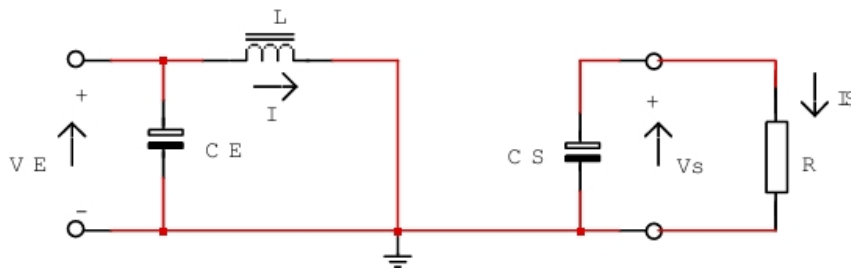


Figure (III.8) : schéma d'un convertisseur Boost (K fermé).

On a :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad \text{d'où : } \frac{di}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{III.4})$$

Donc : sur la durée d'activation :  $(t_{on} = \alpha T)$

$$\Delta I_L = \frac{V_e}{L} * \alpha T \quad (\text{III.5})$$

Où :  $\alpha$  est le rapport cyclique.

Lorsque l'interrupteur K est fermé dans le convertisseur Boost (comme illustré sur le schéma), le courant fourni par la source de tension d'entrée  $V_E$  traverse l'inductance  $L$ , permettant ainsi à cette dernière d'emmagasiner de l'énergie sous forme magnétique. Durant cette phase, la diode (non représentée ici mais normalement en série avec la charge) est bloquée, ce qui empêche tout courant de circuler vers la charge  $R$  et le condensateur de sortie  $C_S$ . La charge est alors alimentée uniquement par le condensateur de sortie  $C_S$ , dont la tension  $V_S$  tend à rester constante si sa capacité est suffisante. Pendant ce temps, le courant dans l'inductance  $L$  augmente linéairement selon la relation  $\frac{dI}{dt} = \frac{V_E}{L}$ , préparant ainsi la restitution d'énergie lors de la phase suivante où l'interrupteur s'ouvre.

**Pour ( $\alpha T < t < T$ ) :**

A  $t = \alpha T$  on ouvre l'interrupteur K. La diode D devient conductrice.

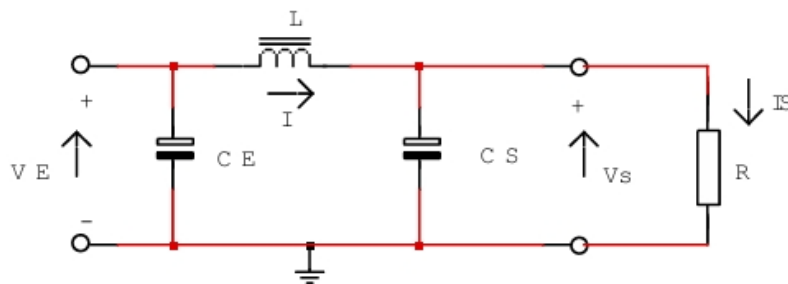


Figure (III.9) : schéma d'un convertisseur boost (K ouvert).

On a :

$$V_E - V_S = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{III.6})$$

$$I_L = \int \frac{V_E - V_S}{L} dt \quad (\text{III.7})$$

$$I_L = \frac{(\alpha - 1)(V_E - V_S)}{L} \cdot t \quad (\text{III.8})$$

Lorsque K est ouvert, l'énergie stockée dans l'inductance est transférée à la fois au condensateur de sortie et à la charge via la diode, qui est alors passante. Cela permet d'obtenir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

### III.5.2. Convertisseur abaisseur (BUCK) :

Un convertisseur Buck, ou hacheur abaisseur, est un convertisseur électronique à découpage qui transforme une tension continue d'entrée en une tension continue de sortie plus

faible. Il utilise un interrupteur commandé (souvent un MOSFET) et une diode pour commuter rapidement la tension, combinés à une inductance et un condensateur qui lissent la sortie pour obtenir une tension stable et régulée. La tension de sortie moyenne est proportionnelle au rapport cyclique de l'interrupteur, ce qui permet de réduire efficacement la tension d'entrée tout en maintenant un rendement élevé, pouvant atteindre jusqu'à 95 %.

Le circuit équivaut d'un hacheur Buck dans la figure III.11

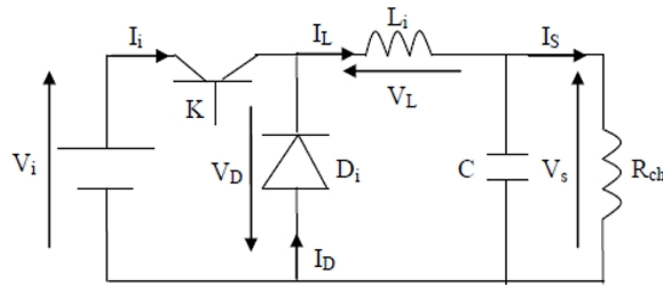


Figure (III.10) : Circuit idéal du convertisseur dévolteur (Buck).

#### ➤ Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur  $K$  :

- **Lorsque l'interrupteur  $k$  est fermé**, Si le commutateur  $Q$  est activé à  $t_0$ , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode  $D$  puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant  $i_L$  n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance  $L$ . [20]

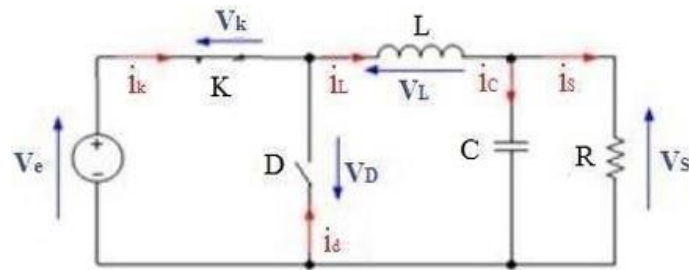


Figure (III.11) : Convertisseur Buck Durant l'état On.

**Pour  $0 < t < \alpha T$ , l'interrupteur  $K$  fermé** : La source d'alimentation fournit de l'énergie à l'inductance et à la charge. Le courant dans l'inductance, initialement nul ou faible, augmente linéairement car la tension d'entrée est appliquée directement à ses bornes. Pendant cette phase, l'inductance stocke de l'énergie sous forme magnétique. La diode est bloquée, car elle est

polarisée en inverse par la tension d'entrée. Cette période correspond à l'état passant de l'interrupteur, durant lequel le courant fourni par la source s'élève progressivement, préparant ainsi le transfert d'énergie à la charge lors de la phase suivante où l'interrupteur sera ouvert.

On suppose l'interrupteur idéal donc  $V_k=0$ ,

$$V_L = V_e - V_s \quad (\text{III.9})$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.10})$$

Donc :

$$L \frac{di}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{III.11})$$

Pour  $(t=0)$  le courant de l'inductance est à la valeur minimale,  $i_L(0) = i_{\min}$

Pour  $(t = \alpha T)$ ,  $i_L$  atteindra sa valeur maximale,  $i_L(\alpha T) = i_{\max}$

L'ondulation de courant :  $\Delta i_L = i_{\max} - i_{\min}$

$$\text{Donc : } \Delta i_L = \frac{V_e - V_s}{L} \cdot \alpha T \quad (\text{III.12})$$

**Lorsque l'interrupteur k est ouvert :** la source d'alimentation est déconnectée du circuit, et l'énergie stockée dans l'inductance est alors libérée pour alimenter la charge. La diode de roue libre devient passante, permettant au courant de continuer à circuler dans l'inductance, la diode et la charge. Le courant dans l'inductance décroît progressivement, transférant son énergie magnétique vers la charge et le condensateur, qui maintient la tension de sortie stable. Cette phase assure une alimentation continue de la charge même lorsque l'interrupteur est ouvert, garantissant ainsi une tension de sortie régulée et inférieure à la tension d'entrée.

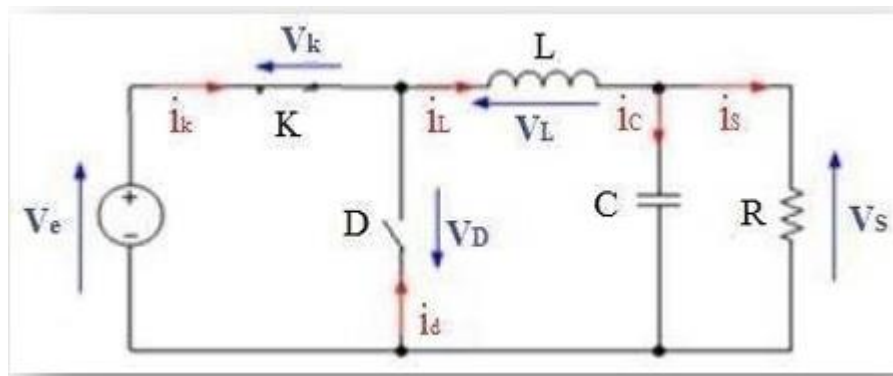


Figure (III.12) : Convertisseur Buck Durant l'état OFF.

Pour  $\alpha T < t < T$ , La diode devient passante afin d'assurer, la continuité du courant dans l'inductance.

On suppose la diode est idéal donc  $V_d=0$ ,

$$V_L = -V_s \quad (\text{III.13})$$

Donc :

$$L \frac{di}{dt} = -V_s \quad (\text{III.14})$$

On a L'équation du premier ordre donne la Solution :

$$I_L = \frac{-VS}{L} T + i_{\max} \quad (\text{III.15})$$

A l'instant  $t T$  le courant de l'inductance diminue de sa valeur maximale à une valeur minimale

$$I_{\min} = \frac{-VS}{L} (1-\alpha) T + i_{\max} \quad (\text{III.16})$$

De  $T=1/f$ , Ondulation du courant dans ce cas :

$$\Delta i_L = i_{\max} - i_{\min} = \frac{VS}{Lf} (1-\alpha) \quad (\text{III.17})$$

Alors :  $\Delta i_L \text{ on} + \Delta i_L \text{ off} = 0$

Donc :

$$\alpha V_e = V_s \quad (\text{III.18})$$

$$\alpha = \frac{V_e}{V_s} \quad (\text{III.19})$$

Donc La relation de la tension d'entrée  $V_s$  et de sortie  $V_e$  en fonction du rapport cyclique est donnée par l'équation :  $v_s(t) = \alpha v_e(t)$ . [20]

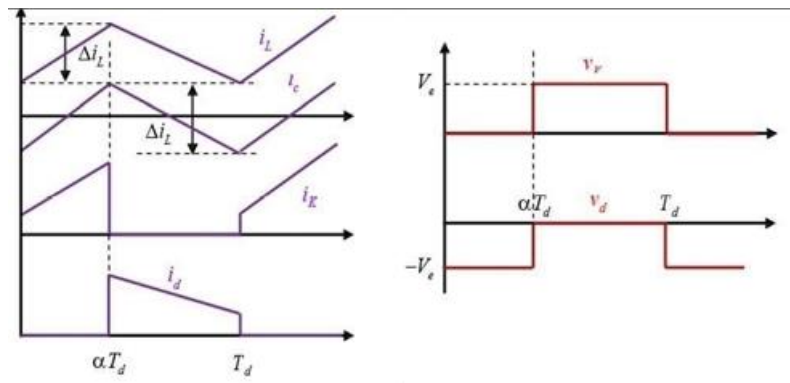


Figure (III.13) : Caractéristique de l'hacheur BUCK. [20]

### III.5.3. Convertisseur abaisseur BUCK-BOOST :

Un convertisseur Buck-Boost est un hacheur statique DC-DC capable d'abaisser ou d'élever une tension continue d'entrée selon le rapport cyclique appliqué à l'interrupteur. Il combine les fonctions des convertisseurs Buck (abaisseur) et Boost (élevateur) en un seul circuit, permettant d'obtenir une tension de sortie réglable, supérieure ou inférieure à la tension d'entrée.

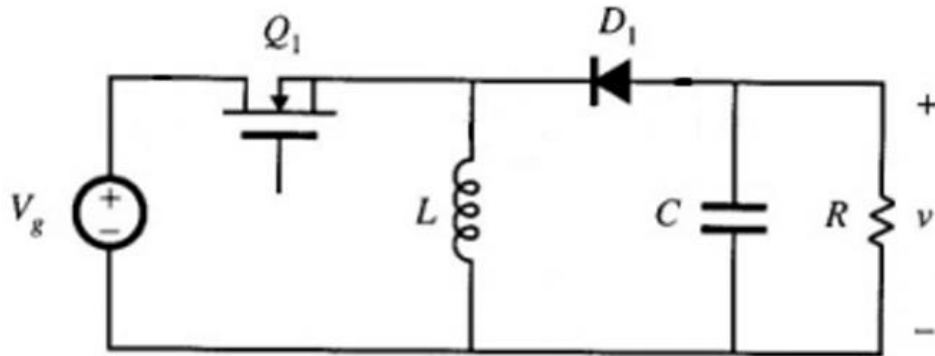


Figure (III.14) : schéma d'un Convertisseur BUCK-BOOST.

### III.5.4. Principe de fonctionnement d'un convertisseur BUCK-BOOST :

Le convertisseur Buck-boost fonctionne en deux phases principales : la phase de stockage d'énergie et la phase de transfert d'énergie.

#### a) Phase de stockage d'énergie

Lorsque le commutateur (généralement un transistor) est fermé, le courant circule à travers l'inductance et le commutateur, ce qui permet de stocker de l'énergie dans l'inductance sous forme de champ magnétique. Durant cette période, la diode est bloquée, et la charge est alimentée par le condensateur.

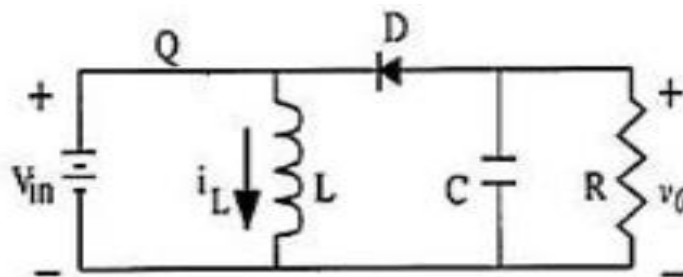


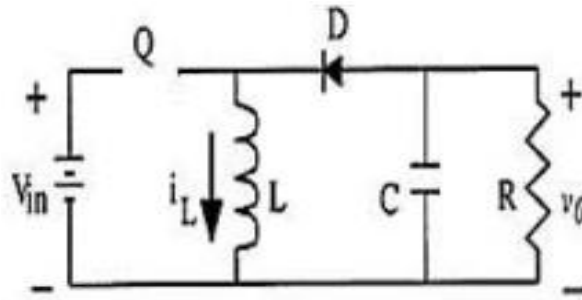
Figure (III.15) : état de K passant



**Pour ( $0 < t < \alpha T$ ) :** L'interrupteur K est fermé, la diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

### b) Phase de transfert d'énergie

Lorsque le commutateur s'ouvre, l'énergie emmagasinée dans l'inductance est restituée. L'inductance contraint le courant à circuler à travers la diode pour alimenter la charge. La tension de sortie peut être contrôlée en modifiant le rapport cyclique (duty cycle) du commutateur.



**Figure (III.16) :** état de K bloqué

**Pour ( $\alpha T < t < T$ ) :** C'est l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert la diode devient passante, l'inductance restitue son énergie à la charge [24].

La tension de sortie moyenne :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{III.20})$$

L'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{III.21})$$

L'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (\text{III.22})$$

La valeur du courant moyen traversant l'inductance :

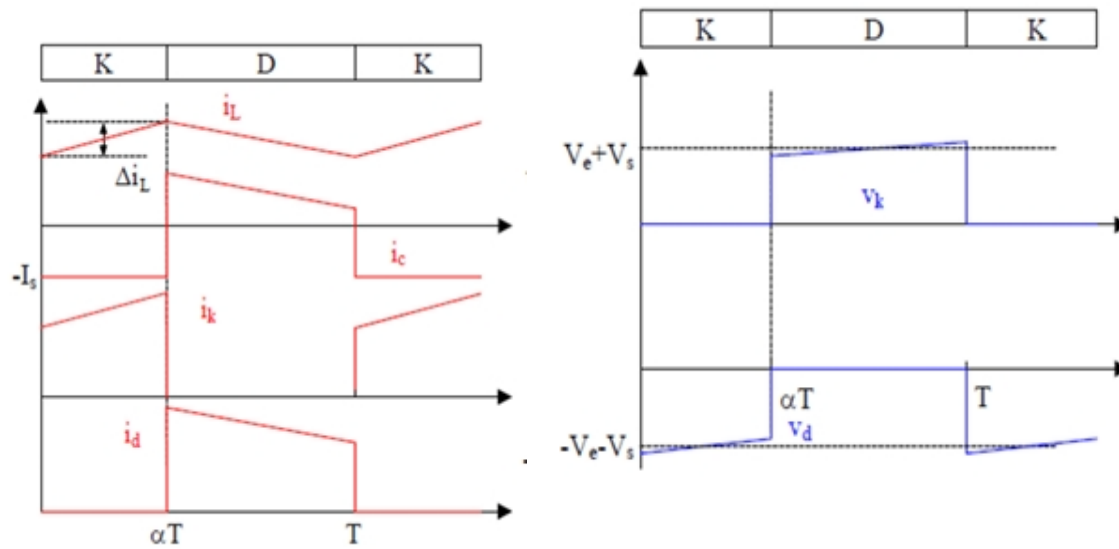
$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{III.23})$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.

$$\text{En tension : } V_{K \max} = [V_{d \max}] = V_{s \max} + V_e = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (\text{III.24})$$

$$\text{En courant : } i_{K \max} = i_{L \max} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{III.25})$$

- Les formes d'ondes de courants et de tensions du convertisseur Buck-Boost sont présentées dans la figure suivante :



1) : les formes d'ondes de courants.

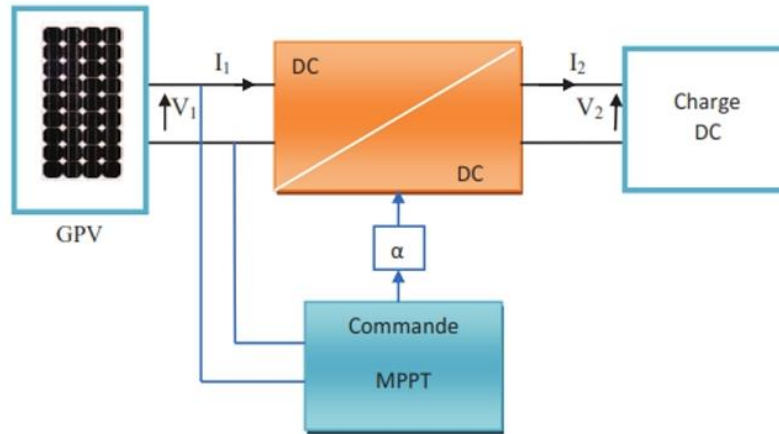
2) : les formes d'ondes de tensions.

Figure (III.17) : les formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost.

### III.6. La commande MPPT d'un système photovoltaïque :

#### III.6.1. Modélisation du système :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance extraite des panneaux solaires. Elle consiste à ajuster en temps réel le point de fonctionnement du panneau, en modifiant notamment le rapport cyclique d'un convertisseur DC/DC, afin que le système fonctionne toujours au point de puissance maximale (où le produit tension-courant est optimal). Ce suivi permet de compenser les variations d'ensoleillement, de température et d'autres conditions environnementales, garantissant ainsi une production d'énergie maximale. Le contrôleur MPPT adapte la tension et le courant pour que la batterie ou la charge reçoive la puissance la plus élevée possible, améliorant l'efficacité globale du système de 5 à 30 % par rapport à un régulateur classique.

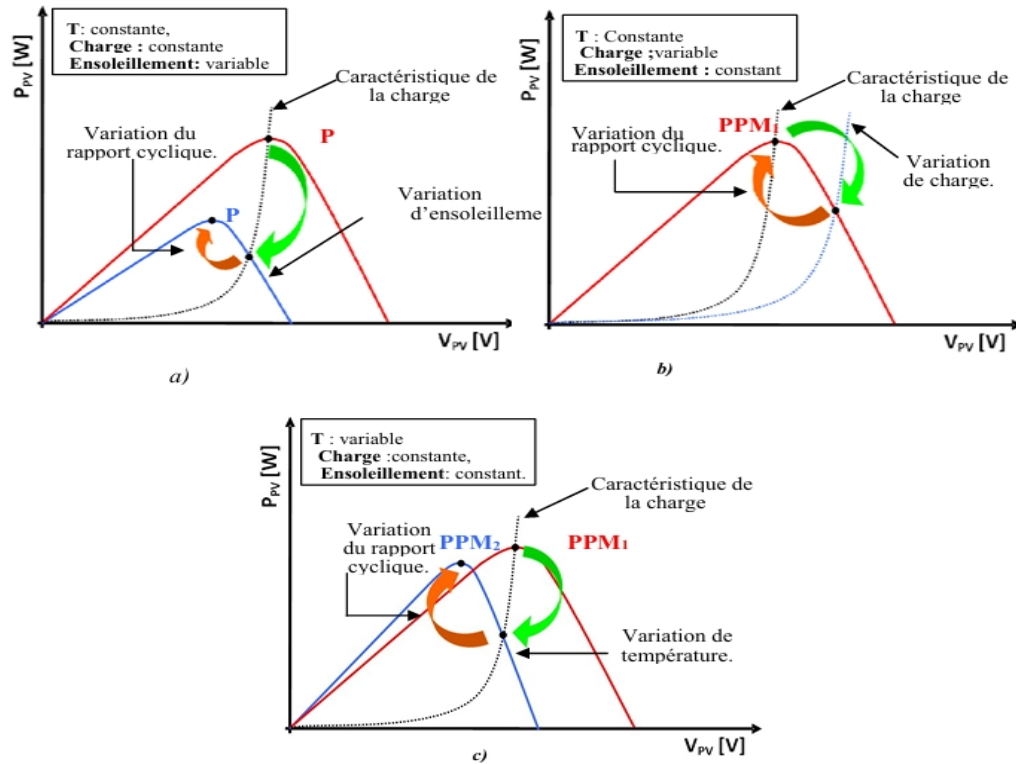


**Figure (III.18) :** Schéma d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.

### III.6.2. Le Principe de la commande MPPT :

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

A partir (la figure III.17), suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. [21]



**Figure (III.19) :** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal. a) suite à une variation d'insolation, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

### III.7. Classification Des Commandes MPPT :

La classification des commandes MPPT correspond effectivement aux différentes méthodes utilisées pour rechercher et suivre le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques. Ces méthodes sont généralement regroupées en catégories selon leur principe de fonctionnement, leur complexité, leur précision et les capteurs nécessaires. Par exemple, on distingue souvent les méthodes indirectes, qui estiment le point maximal à partir de grandeurs facilement mesurables comme la tension en circuit ouvert ou le courant de court-circuit, et les méthodes directes, qui ajustent en temps réel la tension ou le courant pour maximiser la puissance, comme les algorithmes Perturb and Observe (P&O) ou Incrément de Conductance. D'autres classifications incluent les méthodes classiques (P&O, InCond), les méthodes intelligentes (algorithmes métaheuristiques) et les méthodes hybrides. Ainsi, la classification des commandes MPPT englobe bien les différentes techniques (P&O, InCond, etc.) utilisées pour le suivi du maximum de puissance.

**III.7.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les paramètres d'entrée :****a. Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres d'entrée du CS :**

Les commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du courant solaire (CS) utilisent principalement la mesure de la tension et du courant fournis par le panneau photovoltaïque pour ajuster en temps réel la charge et maximiser la puissance extraite. Ces régulateurs MPPT exploitent des algorithmes qui analysent la variation du courant et de la tension pour localiser le point de puissance maximale malgré les fluctuations d'ensoleillement et de température.

Par exemple, la méthode Perturb and Observe (P&O) perturbe la tension d'entrée et observe la variation du courant pour ajuster la consigne, tandis que la méthode de l'incrément de conductance compare la dérivée du courant par rapport à la tension pour détecter le point optimal. Le contrôleur MPPT utilise ces mesures d'entrée pour piloter un convertisseur DC/DC qui adapte la tension et le courant délivrés à la batterie ou à la charge, assurant ainsi un rendement maximal. Ces systèmes se calibrent souvent automatiquement à la tension du parc batterie et ajustent en permanence les paramètres pour maintenir la puissance maximale, sans intervention manuelle.

**b. Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple ; les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de  $P_{\max}$  est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [22].

**III.7.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche :**

La classification des commandes MPPT selon le type de recherche distingue principalement deux grandes catégories :

**a) Méthodes indirectes :**

Ces méthodes utilisent des grandeurs facilement mesurables comme la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) ou le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) pour estimer la position approximative du point de puissance maximale (MPP). Elles reposent souvent sur des relations empiriques ou des modèles paramétriques du panneau photovoltaïque. Ces techniques sont simples à mettre en œuvre, nécessitent peu de capteurs et conviennent aux systèmes peu coûteux ou fonctionnant dans des environnements stables. Par exemple, la méthode de la fraction de la tension en circuit ouvert ou la méthode de la fraction du courant de court-circuit font partie de ce groupe.

**b) Méthodes directes :**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [22].

Cette classification permet de choisir la méthode MPPT adaptée selon les contraintes de précision, de coût, de complexité et de conditions environnementales du système photovoltaïque.

### III.8. Les Algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant.

#### III.8.1. La méthode perturbe et observe P&O :

La méthode la plus courante pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est une technique itérative qui ajuste la tension du générateur photovoltaïque ( $V_{pv}$ ) en agissant sur le rapport cyclique ( $\alpha$ ) du convertisseur. Elle fonctionne en faisant varier légèrement la tension autour de sa valeur actuelle et en observant l'effet de cette variation sur la puissance produite ( $P_{pv}$ ). Si une augmentation de la tension entraîne une hausse de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement est situé à gauche du point de puissance maximale (PPM), et la tension continue d'être augmentée. En revanche, si la puissance diminue, cela indique que le point de fonctionnement a dépassé le PPM, et la tension doit alors être réduite. Un raisonnement similaire s'applique lorsque la tension diminue : selon que la puissance augmente ou diminue, le sens de variation du rapport cyclique est inversé pour revenir vers le PPM. Cette méthode simple et efficace permet ainsi de suivre en continu le point optimal malgré les variations d'ensoleillement et de température.

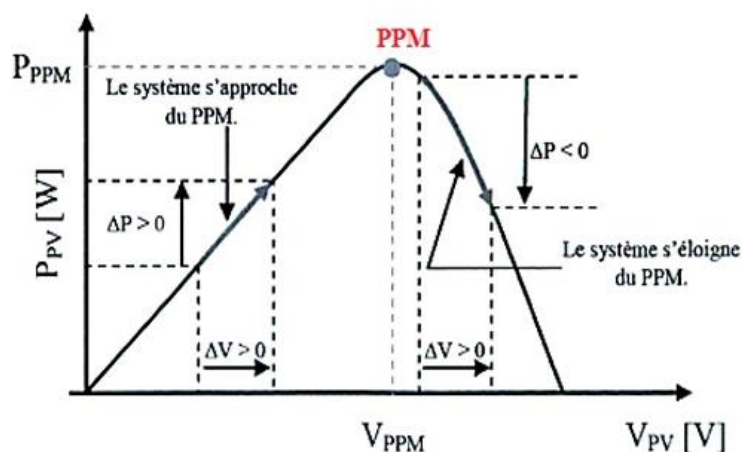
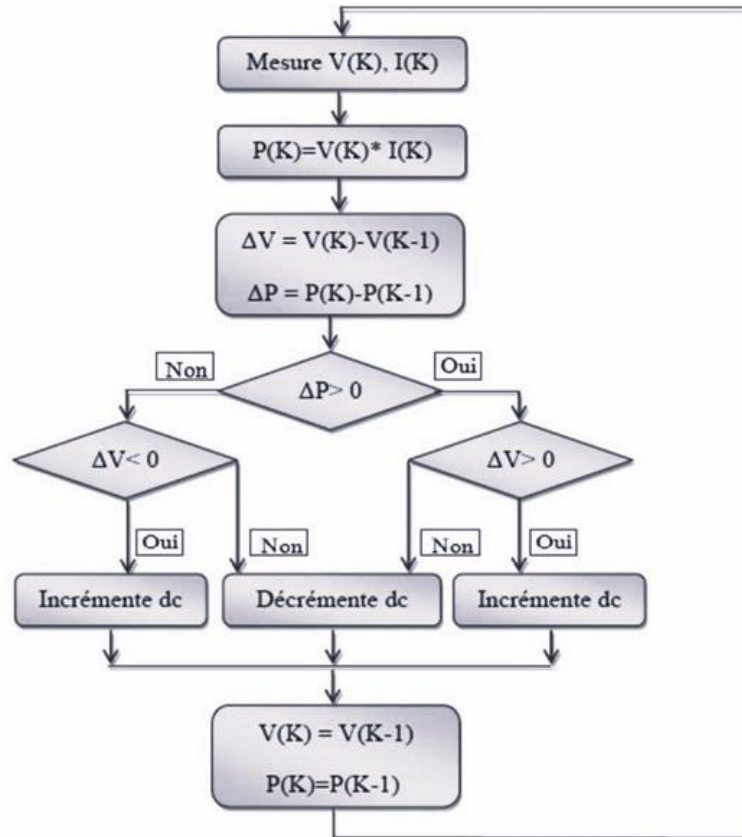


Figure (III.20) : Caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) P&O.

Cette méthode facilite de situer le point de fonctionnement par rapport au ppm, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié (figure III.18), si suite à une perturbation de tension, la puissance du générateur augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.[23]



**Figure (III.21) :** Organigramme de la méthode P&O.

Tel que : À chaque cycle de l'algorithme P&O, on mesure la tension  $V(K)$  et le courant  $I(K)$  du panneau photovoltaïque. La puissance instantanée est alors calculée par la formule suivante :

$$P(K) = V(K) \times I(K) \quad (III.26)$$

Ou :

$V(K)$  est la tension mesurée au cycle  $K$ .

$I(K)$  est le courant mesuré au cycle  $K$ .

$P(K)$  est la puissance calculée au cycle  $K$ .



$$\Delta V = V(K) - V(K-1) \quad (\text{III.27})$$

$$\Delta P = P(K) - P(K-1) \quad (\text{III.28})$$

Si  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V > 0$ , on continue à perturber la tension dans la même direction (incrémentation ou décrémentation du rapport cyclique).

Si  $\Delta P < 0$ , on inverse la direction de la perturbation.

Le tableau ci-dessous résume les quatre cas de variation possible :

**Tableau (III.2) : Fonctionnement de la méthode P&O. [23]**

| Perturbation précédente | Changement dans la puissance | Perturbation prochaine |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| Positive                | Positive                     | Positive               |
| Positive                | Négative                     | Négative               |
| Négative                | Positive                     | Négative               |
| Négative                | Négative                     | Positive               |

### III.8.2. La méthode de l'Incrémentation de la Conductance :

La méthode de l'Incrémentation de la Conductance (IncCond) est une technique avancée de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisée dans les systèmes photovoltaïques. Contrairement à la méthode Perturbe et Observe (P&O), qui se base sur la variation de puissance, la méthode IncCond utilise la dérivée de la puissance par rapport à la tension pour déterminer précisément la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale (MPP).

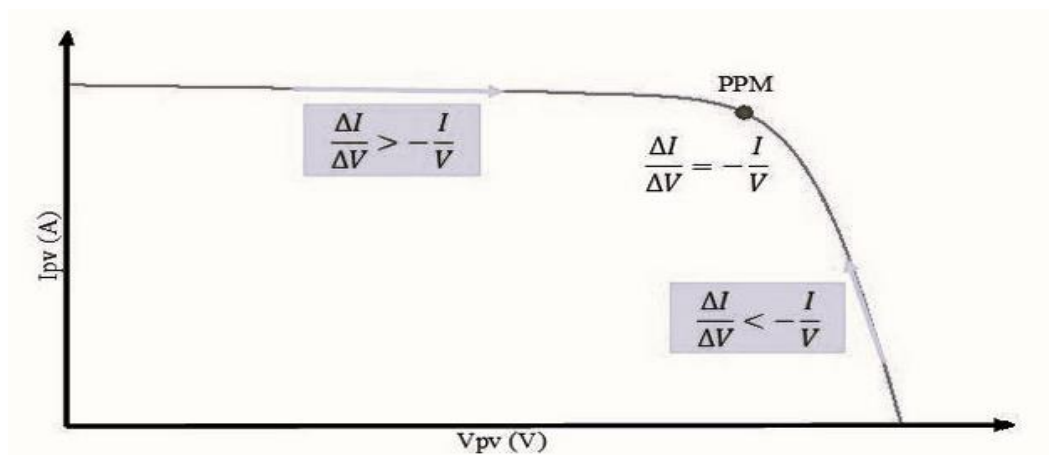
Au MPP, la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle :

$$\frac{dp}{dv} = 0 \quad (\text{III.29})$$

La puissance maximale est obtenue lorsque la dérivée de la puissance du GPV par rapport à la tension s'annule :

$$\frac{dp}{dv} = I + V \frac{dI}{dv} \quad (\text{III.30})$$

En comparant la conductance et l'incrément de la conductance, trois positions du PF peuvent être distinguées :



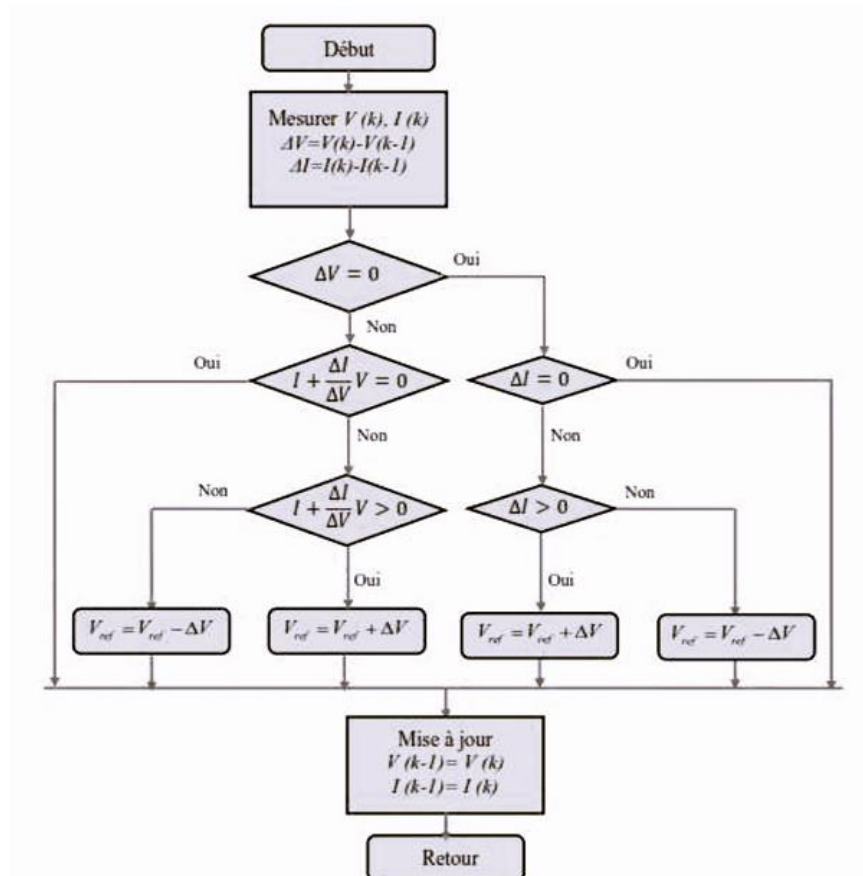
**Figure (III.22) :** Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond.

Si :  $\frac{dp}{dv} = 0 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$  , le point de fonctionnement est sur le PPM.

Si :  $\frac{dp}{dv} \geq 0 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} \geq -\frac{I}{V}$  , le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

Si :  $\frac{dp}{dv} \leq 0 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} \leq -\frac{I}{V}$  , le point de fonctionnement est à droite du PPM.

L'un des principaux atouts de l'algorithme d'Incrémentation de la Conductance (IncCond) réside dans sa grande précision et sa rapidité à atteindre le point de puissance maximale (PPM), même lorsque les conditions d'ensoleillement ou de température varient brusquement. Cela en fait une solution efficace face aux limites de la méthode Perturbe et Observe (P&O), qui peut être moins performante dans ces situations. Toutefois, la mise en œuvre de l'IncCond s'avère plus complexe, car elle requiert un circuit de commande sophistiqué et la capacité de calculer en temps réel la dérivée, ce qui nécessite un processeur rapide. En pratique, l'algorithme IncCond demande donc un temps de traitement supérieur à celui du P&O, et il peut lui aussi générer des oscillations autour du PPM. Selon une étude comparative du rendement MPPT des deux méthodes, IncCond atteint un rendement de 89,9 %, contre 81,5 % pour la méthode P&O, ce qui souligne l'avantage de la première en termes d'efficacité énergétique.



**Figure (III.23) : Organigramme de la méthode IncCond.**

### III.8.3. La méthode basée sur la mesure de la tension du circuit ouvert :

La méthode basée sur la mesure de la tension du circuit ouvert (Open Circuit Voltage Method) La méthode de la tension du circuit ouvert (Open Circuit Voltage, ou OCV) est une technique simple de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisée dans les systèmes photovoltaïques. Contrairement aux méthodes comme P&O ou IncCond, elle ne nécessite pas de calculs complexes ou de perturbations continues du point de fonctionnement.

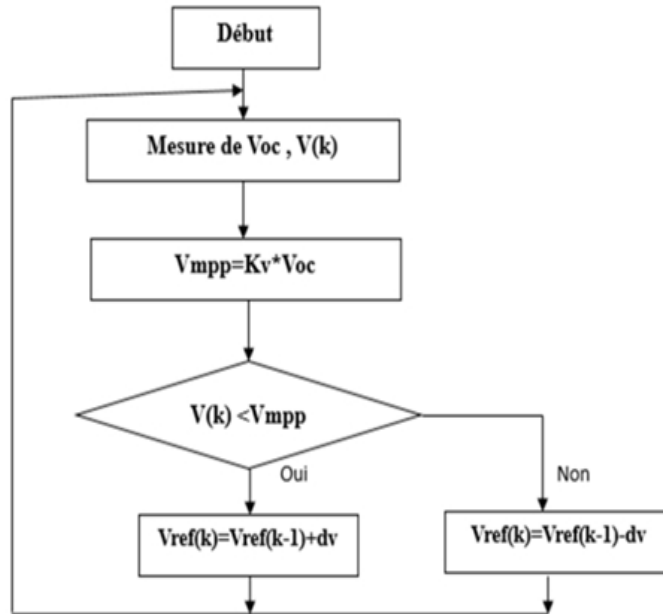
Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{MPP}=K.V_{OC} \quad (III.31)$$

Ou  $k$  : Coefficient proportionnel, typiquement compris entre 0,72 et 0,80 selon la technologie du module et les conditions d'ensoleillement.

Pour déterminer la tension optimale, il est nécessaire de mesurer la tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ ). Ainsi, le point de fonctionnement du panneau peut être maintenu près du point de

puissance optimale en ajustant la tension du panneau à la tension optimale calculée. Ce processus consiste à agir de manière cyclique sur le rapport cyclique afin d'atteindre cette tension optimale.



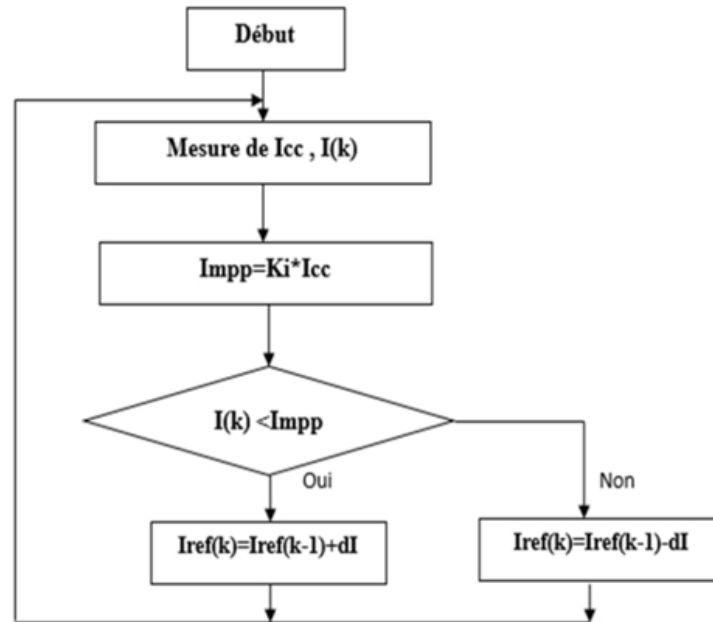
**Figure (III.24) :** Organigramme de la méthode de mesure du VCO.

#### III.8.4. Commande à base de la mesure du courant de court-circuit :

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{opt} = k2 * I_{cc} \quad (III.32)$$

Où  $k$  est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92. [23]



**Figure (III.25) :** Organigramme de la méthode de mesure su  $I_{cc}$ .

Le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal (figure III.25). Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale.

### III.9. La conclusion :

Ce chapitre a permis de poser les bases nécessaires à la compréhension de la commande MPPT dans un système photovoltaïque. Nous avons commencé par introduire le rôle crucial du convertisseur DC-DC dans l'optimisation de la puissance extraite des panneaux solaires. Ensuite, nous avons présenté les principales compositions d'un convertisseur, ainsi que les différents types existants (Buck, Boost, Buck-Boost), accompagnés de leur principe de fonctionnement.

La modélisation du système a été développée pour mettre en évidence les paramètres influents sur le rendement énergétique. Nous avons ensuite abordé le principe de la commande MPPT, dont l'objectif est de suivre en temps réel le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, malgré les variations de l'ensoleillement et de la température.

Enfin, une classification des différentes techniques de commande MPPT a été présentée, suivie d'une analyse des algorithmes les plus utilisés, mettant en avant leurs avantages, leurs limites, ainsi que leurs domaines d'application. Ces éléments serviront de base pour la mise en œuvre pratique d'une commande MPPT dans les chapitres suivants.

*Chapitre IV*

*Optimisation et*

*simulation d'un*

*système*

*photovoltaïque*

**IV.1. Introduction :**

Dans ce chapitre on a présenté la simulation d'un système photovoltaïque qui alimente une charge, par le biais d'un hacheur commandé par la méthode P&O au but d'atteindre le point maximum de la puissance quel que soit l'ensoleillement et la température. Un onduleur de tensions triphasé a deux niveaux a commandé par MLI sinus-triangle. La simulation de ce système a été faite à base du logiciel MATLAB SIMULINK.

L'objectif de ce travail est de voir la performance de système PV lors de la variation de trois signaux irradiances et de la température fixe. Pour cela, on a fait la simulation de système globale pour trois signal irradiation différent avec l'analyser et d'interpréter les résultats obtenus (courant, tension, puissance).

**IV.2. Les Caractéristiques des panneaux solaires :**

Dans le cadre de ce projet, la source principale d'énergie est un générateur photovoltaïque composé de panneaux solaires Solarfennel PS7A-290. Ces panneaux sont utilisés pour recharger un ensemble de batteries lithium-ion

**IV.2.1. Configuration du générateur photovoltaïque :**

Afin d'alimenter notre système de batteries destiné à une voiture électrique, nous avons opté pour des panneaux solaires de type Solarfennel PS7A-290.

Nous avons opté pour une configuration 4 panneaux en série, formant une chaîne, et 3 chaînes en parallèle. Cette disposition permet d'atteindre :

- Une tension de sortie de :  $4 \times 36,01 \text{ V} = 144 \text{ V}$
- Un courant total de :  $3 \times 8,06 \text{ A} = 24,18 \text{ A}$

Cette configuration est bien adaptée pour alimenter le contrôleur de charge MPPT et charger les batteries de 48 V. Elle permet aussi une meilleure efficacité et une adaptation plus souple aux conditions d'ensoleillement variables.

**IV.2.2. Dimensionnement du système de stockage :**

Le stockage de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est une étape essentielle dans notre système, Pour cela, le choix des batteries et leur dimensionnement doivent répondre précisément aux besoins énergétiques du système PV.

### IV.2.3. Schéma de connexion des batteries :

Les batteries seront connectées **en parallèle** afin de conserver une tension constante de **48 V** tout en augmentant la capacité totale en courant. Cette configuration est adaptée au système choisi et permet une recharge équilibrée et une décharge stable.

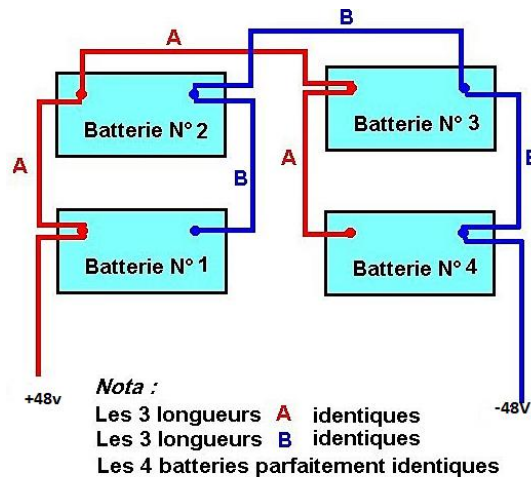


Figure (VI.1) : schéma de principe des batteries en parallèle.

### IV.3. Étude du convertisseur DC-DC :

Le convertisseur DC-DC joue un rôle essentiel dans le système, car il assure le transfert optimal de l'énergie provenant des panneaux photovoltaïques vers le banc de batteries. Pour cette application, un **convertisseur abaisseur (Buck)** est utilisé, car la tension en sortie des panneaux photovoltaïques (environ 72 V) est supérieure à la tension des batteries (48 V).

Ce type de convertisseur permet d'adapter dynamiquement la tension et le courant en fonction des conditions de fonctionnement du système, notamment en présence d'ensoleillement variable.

Dans le modèle développé sous Matlab/Simulink, ces paramètres ont été intégrés pour simuler le comportement réel du convertisseur et étudier sa réponse dynamique lors des phases de charge et de décharge des batteries.

### IV.4. Étude du contrôleur MPPT :

Dans un système photovoltaïque, la puissance produite par les panneaux dépend fortement de l'ensoleillement et de la température. Pour exploiter au maximum cette puissance,



un **algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking)** est utilisé. Ce dernier permet de suivre en temps réel le **point de puissance maximale (MPP)** des panneaux solaires.

Pour notre projet, nous avons implémenté et comparé plusieurs algorithmes de commande MPPT afin d'optimiser le rendement énergétique :

#### IV.5. Les Algorithmes MPPT :

Le tableau suivant présente les algorithmes MPPT et les Caractéristiques principales :

**Tableau (IV.1) : Les Algorithmes MPPT.**

| Les algorithmes                          | Les caractéristiques                                                                                             |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>P&amp;O (Perturb and Observe)</b>     | Méthode classique, simple, mais sensible aux variations rapides d'ensoleillement.                                |
| <b>PSO (Particle Swarm Optimization)</b> | Algorithme inspiré du comportement collectif des oiseaux, efficace pour la recherche globale du MPP.             |
| <b>GWO (Grey Wolf Optimizer)</b>         | Méthode inspirée de la hiérarchie sociale des loups, offrant un bon compromis entre exploration et exploitation. |

Ces algorithmes ont été testés sur le modèle Matlab/Simulink du convertisseur DC-DC. L'objectif est de trouver la valeur optimale du rapport cyclique (duty cycle) qui maximise la puissance transférée vers les batteries.

#### IV.6. Simulation sous MATLAB/Simulink

Dans le cadre de ce projet, j'ai réalisé une simulation complète du système en utilisant l'environnement **MATLAB/Simulink**, afin de mieux comprendre le comportement global et d'évaluer l'efficacité des différentes stratégies de commande.

Le modèle que nous avons conçu intègre plusieurs sous-blocs essentiels :

- Le modèle des **panneaux photovoltaïques**, basé sur les caractéristiques du module *SOLARTENNEL PS7A-290*.
- Le **convertisseur DC-DC Buck**, qui permet d'abaisser la tension des panneaux vers celle des batteries.

- Un **contrôleur MPPT**, dans lequel j'ai implémenté et testé plusieurs algorithmes : *P&O, PSO, GWO*.

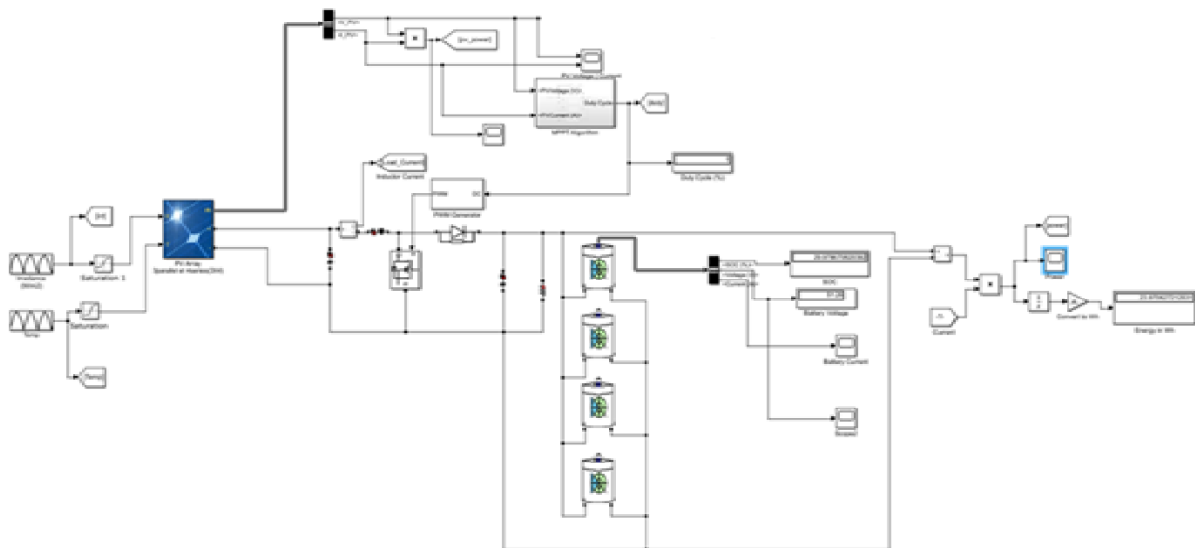
#### IV.6.1. Objectif de la simulation :

L'objectif principal de cette simulation était d'observer :

- Comment la tension et le courant varient lors de la charge et la décharge des batteries.
- Comment chaque algorithme réagit face aux changements de l'irradiation solaire.

#### IV.7. Schéma du modèle de simulation sous MATLAB/Simulink :

Le modèle de simulation réalisé sous MATLAB/Simulink représente l'ensemble du système étudié. Il comprend le générateur photovoltaïque, le convertisseur Buck, le bloc de batteries lithium-ion et le contrôleur MPPT.



**Figure (IV.2) :** Schéma global du système simulé sous MATLAB/Simulink.

#### IV.7.1. Comportement dynamique de l'algorithme MPPT :

L'algorithme MPPT est un composant essentiel du système, permettant d'extraire la puissance maximale disponible des panneaux photovoltaïques en temps réel.

##### ➤ Fonctionnement :

- Le bloc MPPT Algorithme reçoit les mesures de tension ( $V_{pv}$ ) et de courant ( $I_{pv}$ ) provenant du champ photovoltaïque.
- Il calcule un rapport cyclique optimal (Duty Cycle), qui est ensuite transmis au générateur PWM pour commander le convertisseur DC-DC (type boost).

➤ **Analyse :**

- La qualité du signal de commande généré par le MPPT détermine la rapidité de suivi du point de puissance maximale (MPP).
- Un bon algorithme doit minimiser les oscillations et garantir une tension de sortie stable malgré les variations d'irradiation solaire.

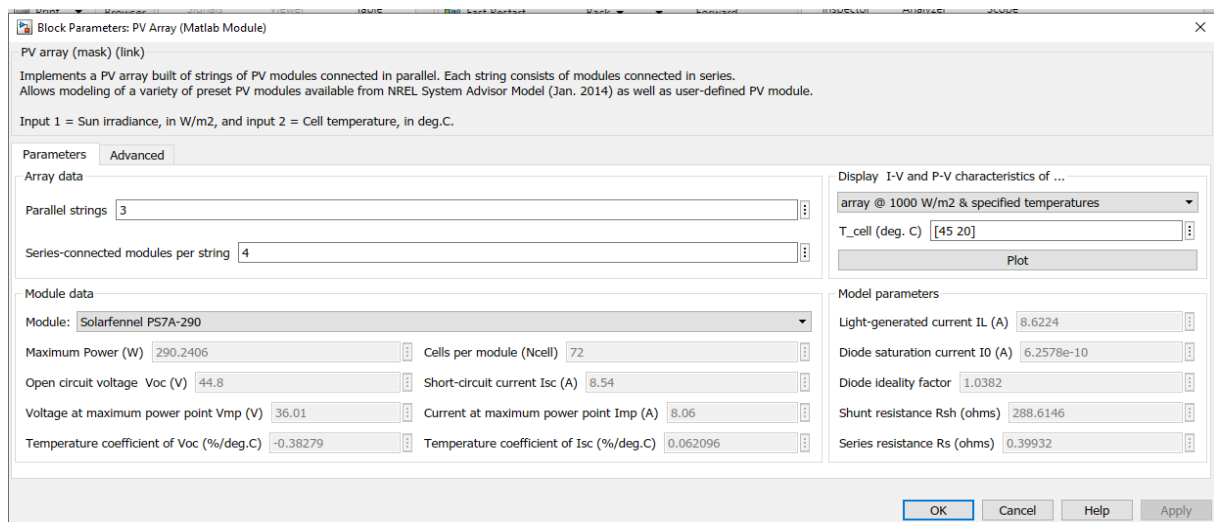
➤ **Bloc MPPT Algorithme :**

- Reçoit les signaux de tension et courant PV, génère un **rapport cyclique (Duty Cycle)** optimisé.
- Ce rapport est envoyé au **PWM Générateur** pour contrôler le convertisseur boost.

➤ **Observation :**

- La stabilité et la réactivité de ce signal influencent directement la performance du système (suivi rapide du MPP, stabilité de la tension de sortie, réduction des oscillations).

Les paramètres du panneau de type ARRAY sont donnés par la figure suivant :



**Figure (IV.3) : Paramètre de cellule PV.**

#### IV.7.2. Analyse électrique des batteries : tension, courant et état de charge :

- Les blocs affichent :
  - **Voltage** : tension de chaque batterie.
  - **Courant** : courant de charge.

**Analyse :**

- Le système semble bien équilibré, ce qui est critique pour éviter la surcharge ou la sous-charge d'une batterie.

**IV.8. Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT :**

Pour tester les fonctionnements des algorithmes modélisés précédemment, on a inséré le bloc de commande MPPT pour le système photovoltaïque, les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau, ainsi que la réponse du système à différentes conditions d'irradiation.

**IV.8.1. Simulation avec la commande P&O :**

L'algorithme MPPT Perturb and Observe (P&O) est une méthode simple et largement utilisée pour extraire la puissance maximale d'un panneau photovoltaïque. Son principe repose sur une approche d'essai-erreur : il perturbe périodiquement la tension de fonctionnement du panneau et observe la variation de la puissance délivrée. Si la puissance augmente après la perturbation, l'algorithme continue dans la même direction ; sinon, il inverse la direction de la variation de tension. Cette méthode permet de suivre le point de puissance maximale (MPP) en ajustant la tension, mais elle génère souvent des oscillations autour du MPP, ce qui peut réduire l'efficacité et augmenter le temps de stabilisation. Malgré ces limitations, P&O reste populaire pour sa simplicité d'implémentation et son faible coût computationnel.

**IV.8.2. Simulation avec la commande PSO :**

L'algorithme MPPT PSO (Particle Swarm Optimization) est une méthode d'optimisation inspirée du comportement collectif des essaims d'oiseaux. Il génère un groupe de particules, chacune représentant une solution possible (par exemple, une tension de sortie), qui évoluent dans l'espace de recherche en se déplaçant selon leur meilleure position personnelle et celle du groupe. Cette dynamique permet à l'algorithme de converger rapidement vers le point de puissance maximale (MPP) du panneau photovoltaïque, même lorsque la courbe puissance-tension présente plusieurs pics, comme en cas d'ombrage partiel. PSO est efficace pour suivre le MPP avec une bonne rapidité et stabilité, surpassant souvent les méthodes classiques comme P&O en termes de précision et temps de stabilisation.

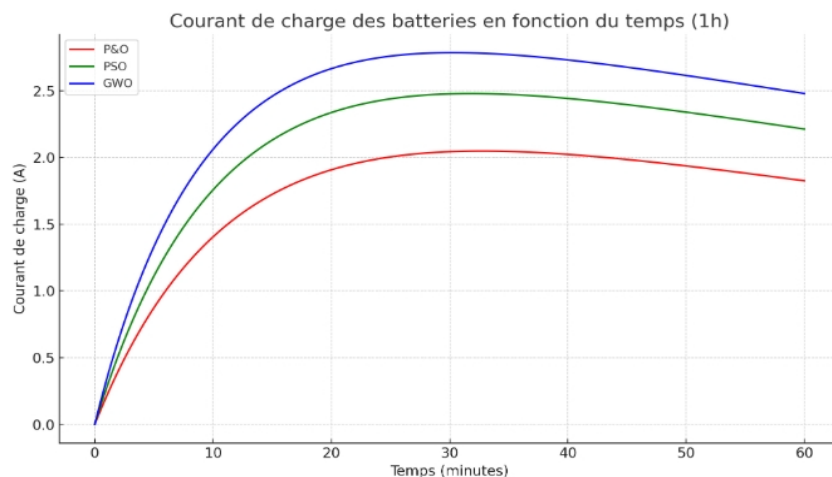
**IV.8.3. Simulation avec la commande GWO :**

L'algorithme MPPT Grey Wolf Optimization (GWO) est une technique métaheuristique inspirée du comportement social et de la stratégie de chasse des loups gris. Il modélise la

hiérarchie sociale des loups (alpha, bêta, delta, oméga) et leurs phases de chasse (recherche, encerclement, attaque) pour optimiser la recherche du point de puissance maximale (MPP) d'un panneau photovoltaïque. En ajustant dynamiquement le cycle de service du convertisseur DC-DC, GWO guide la tension de fonctionnement vers le MPP avec un bon équilibre entre exploration (recherche globale) et exploitation (affinage local). Cette méthode offre une meilleure stabilité et moins d'oscillations que les algorithmes classiques, tout en étant capable de s'adapter efficacement aux variations rapides des conditions d'éclairement et de température. GWO est reconnu pour sa robustesse et sa capacité à éviter les minima locaux, ce qui améliore la performance globale du suivi MPPT.

Les Figures suivantes représentent, respectivement, l'évolution du rapport cyclique, la puissance à la sortie du Buck et le courant de trois algorithmes MPPT et la tension de batterie.

#### IV.8.4. Évolution du courant de charge avec les algorithmes P&O, PSO et GWO:



**Figure (IV.4) :** les courbes de charge en fonction de temps des 3 algorithmes MPPT.

##### ➤ Analyse des résultats de simulation :

#### 1.Algorithme P&O (Perturb and Observe)

L'algorithme P&O présente un courant de charge relativement faible comparé aux deux autres méthodes. La montée du courant est progressive au début, mais il atteint rapidement une limite autour de 3 A, puis reste quasiment stable sans exploiter totalement la capacité du panneau solaire. Cela reflète une efficacité modérée dans le suivi du point de puissance maximale, ce qui se traduit par une charge plus lente des batteries.

**2. Algorithme PSO (Particle Swarm Optimization)**

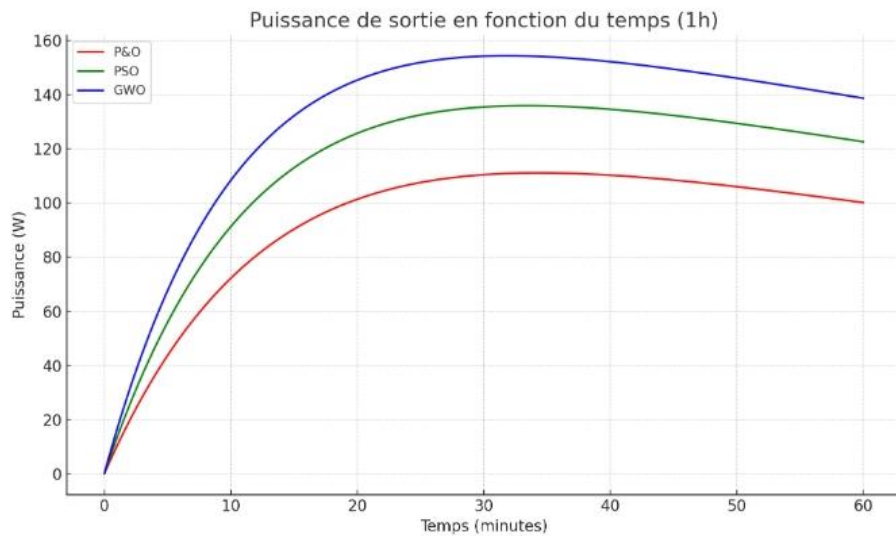
Le PSO améliore clairement les performances par rapport à P&O. Le courant de charge atteint environ 3.3 A, avec une montée plus rapide et une meilleure stabilité en régime permanent. Cela indique un meilleur suivi du MPP et une capacité à exploiter une puissance plus importante sur une durée prolongée. PSO assure donc une charge plus rapide et plus efficace des batteries, tout en maintenant une bonne stabilité.

**3. Algorithme GWO (Grey Wolf Optimization)**

L'algorithme GWO se distingue nettement par ses performances supérieures. Le courant de charge atteint jusqu'à 3.6 A, avec une montée rapide dès les premières minutes. Il maintient ensuite un courant plus élevé que les deux autres tout au long de la simulation. Cette capacité à exploiter davantage d'énergie du panneau se traduit par une charge plus rapide et un rendement énergétique optimal. GWO montre ainsi une excellente dynamique de suivi MPPT et se positionne comme le plus performant des trois.

**En résumé :**

L'analyse des courants de charge montre clairement que l'algorithme GWO permet une exploitation plus efficace de l'énergie solaire, avec un courant de charge plus élevé et plus stable tout au long du processus. L'algorithme PSO suit avec de bonnes performances, assurant une charge rapide et relativement stable, bien qu'un peu en retrait par rapport à GWO. En revanche, l'algorithme P&O présente les résultats les plus faibles, avec un courant de charge plus limité et une montée plus lente, ce qui reflète une efficacité moindre dans le suivi du point de puissance maximale. Ainsi, GWO s'impose comme le plus performant pour optimiser la charge des batteries dans ce système photovoltaïque.

**IV.8.5. Puissance de sortie en fonction du temps pour trois Algorithmes MPPT :**

**Figure (IV.5) :** La puissance de sortie en fonction de temps des 3 algorithmes MPPT.

➤ **Analyse des résultats de simulation pour les trois algorithmes :**

**1. Algorithme P&O (Perturb and Observe)**

La courbe de puissance issue de l'algorithme P&O montre une montée progressive, atteignant un pic d'environ 110 W vers la 30 minutes. Après ce point, la puissance commence à diminuer lentement, ce qui reflète une limitation dans sa capacité à suivre efficacement le point de puissance maximale (MPP) sur la durée. L'algorithme est simple mais souffre d'un manque d'adaptabilité, surtout face aux variations de conditions de charge ou d'irradiance. Il en résulte une performance énergétique inférieure comparée aux autres méthodes.

**2. Algorithme PSO (Particle Swarm Optimization)**

Avec l'algorithme PSO, la courbe atteint une puissance maximale d'environ 135 W autour de la 25e minute, puis reste relativement stable pendant une grande partie de la durée. Cette stabilité indique que PSO réussit à maintenir le fonctionnement du système autour du MPP de manière plus efficace que P&O. La forme arrondie et prolongée du plateau de puissance prouve une exploitation plus continue du potentiel du panneau solaire. PSO offre donc une meilleure efficacité globale, surtout en régimes prolongés.

**3. Algorithme GWO (Grey Wolf Optimization)**

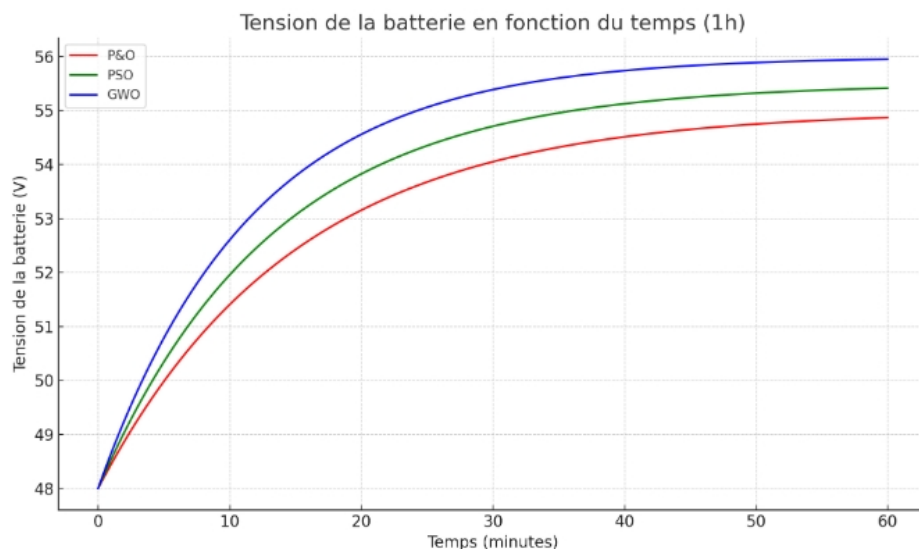
GWO montre une montée très rapide de la puissance, atteignant un pic d'environ 150 W dès la 15e minute. Il conserve cette puissance élevée pendant un bon moment avant une très

légère décroissance. Cette réponse rapide et stable démontre une capacité supérieure à localiser et suivre rapidement le MPP, même lorsque les conditions changent. Grâce à cette performance, GWO assure une extraction d'énergie maximale sur toute la durée de fonctionnement, ce qui le rend particulièrement adapté aux systèmes solaires avancés.

**Donc :**

Parmi les trois algorithmes MPPT, **GWO** offre la meilleure performance avec une montée rapide de la puissance atteignant **150 W** dès les premières minutes et une stabilité remarquable. **PSO** suit avec un pic de **135 W** et une bonne constance. En revanche, **P&O** est le moins performant, atteignant seulement **110 W** avec une montée lente et une baisse progressive. Ainsi, **GWO se démarque comme la solution la plus efficace** pour maximiser la puissance de sortie dans un système solaire.

#### IV.8.6. Évolution de la tension de la Batterie pour trois algorithmes MPPT :



**Figure (IV.6) :** La tension de l'ensemble des batteries en fonction de temps des 3 algorithmes MPPT.

##### ➤ Analyse des 3 algorithmes :

##### 1. Algorithme P&O (Perturb and Observe)

La tension de la batterie avec l'algorithme P&O augmente lentement au début, passant de 48 V à environ 54.5 V au bout de 60 minutes. La courbe montre une pente relativement faible, surtout après la 30e minute où elle commence à se stabiliser. Cela indique que P&O ne permet



pas une exploitation optimale de la puissance du panneau, ce qui se traduit par une charge plus lente et une tension finale inférieure à celle des autres algorithmes.

## 2. Algorithme PSO (Particle Swarm Optimization)

Avec l'algorithme PSO, la montée de la tension est plus rapide et plus régulière, atteignant environ 55.3 V au bout d'une heure. Par rapport à P&O, la courbe est plus raide dans les premières minutes, ce qui signifie une meilleure réactivité du système. PSO assure ainsi une charge plus efficace de la batterie, en maintenant un meilleur point de fonctionnement sur toute la durée.

## 3. Algorithme GWO (Grey Wolf Optimization)

L'algorithme GWO présente la courbe de tension la plus performante. Dès les 20 premières minutes, la batterie dépasse les 55 V, pour atteindre environ 55.9 V à la 60e minute. La courbe est plus raide au début, avec une stabilisation rapide à une tension plus élevée. Cela traduit une excellente capacité de suivi du MPP, permettant une charge plus rapide et plus profonde de la batterie par rapport aux autres algorithmes.

Donc l'analyse des courbes de tension montre que l'algorithme GWO offre les meilleures performances, avec une montée rapide et une tension finale atteignant environ 55.9 V après 1 heure. L'algorithme PSO suit avec une tension légèrement inférieure (55.3 V), mais avec une bonne stabilité. En revanche, l'algorithme P&O reste en retrait, atteignant seulement 54.5 V, ce qui indique une charge moins efficace. Ainsi, GWO permet une charge plus rapide et plus complète, confirmant sa supériorité dans la gestion MPPT.

Les résultats obtenus montrent que :

- L'algorithme P&O est simple à implémenter et présente un bon comportement en conditions stables. Toutefois, il souffre de petites oscillations autour du MPP et peut perdre le point optimal lors de changements brusques d'irradiation ou de température.
- Le PSO offre une meilleure rapidité de convergence et réduit significativement les oscillations par rapport au P&O. Cependant, il nécessite un temps de calcul plus important et dépend du bon choix des paramètres d'inertie et d'accélération.
- Le GWO présente une performance stable et robuste, avec une meilleure précision que le PSO dans certaines situations. Il est moins sensible aux variations aléatoires, mais reste plus lent que le PSO en phase de démarrage.

En conclusion, l'algorithme GWO est considéré comme le plus performant dans notre étude. Il représente un bon compromis entre vitesse, stabilité, et précision, ce qui le rend particulièrement adapté pour des systèmes PV dynamiques destinés à la recharge de batteries.

**IV.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation complète d'un système photovoltaïque destiné à la recharge d'un banc de batteries lithium-ion pour une voiture électrique. L'environnement MATLAB/Simulink a permis de construire un modèle détaillé, intégrant les différents composants du système : panneaux solaires, convertisseur DC-DC, contrôleur MPPT et batteries.

Nous avons implémenté et comparé quatre algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (P&O, PSO, et GWO), en analysant leurs performances à travers plusieurs courbes (puissance, tension, SOC, etc.). Les résultats ont mis en évidence les avantages de chaque méthode, tout en montrant que l'algorithme GWO offre les meilleures performances globales dans notre cas.

Ce travail a permis de mieux comprendre le comportement dynamique du système, d'évaluer l'impact du choix de la stratégie MPPT, et de proposer une solution plus efficace pour améliorer le rendement énergétique d'un système solaire.

# Conclusion générale

*La conclusion générale de ce travail sur le rayonnement solaire et les systèmes photovoltaïques souligne l'importance cruciale de la modélisation et de la simulation pour optimiser la conversion de l'énergie solaire en électricité. En effet, une grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules photovoltaïques n'est pas convertie en énergie électrique, mais provoque une élévation de la température des cellules, ce qui réduit leur efficacité. L'étude approfondie des paramètres externes comme l'irradiation solaire, la température, et l'orientation des modules montre que l'irradiation est le facteur le plus influent sur la performance des panneaux. La modélisation du générateur photovoltaïque permet de comprendre et de prévoir ces variations, tandis que la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) joue un rôle essentiel pour ajuster en temps réel le fonctionnement du système afin d'extraire la puissance maximale disponible malgré les fluctuations des conditions climatiques. L'optimisation et la simulation, notamment à l'aide d'outils comme MATLAB-Simulink ou PVsyst, permettent de dimensionner précisément les installations, en tenant compte des technologies des modules PV et des conditions spécifiques d'ensoleillement. Ces travaux montrent que les systèmes hybrides optimisés avec MPPT offrent des performances supérieures et une meilleure rentabilité énergétique, ce qui ouvre la voie à des solutions plus efficaces pour l'électrification autonome et la production d'énergie renouvelable. Enfin, la comparaison des coûts et performances des différentes configurations reste une étape nécessaire pour valider la viabilité économique des systèmes photovoltaïques optimisés dans divers contextes d'application.*

وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

فعلتها وانا اجمع شظايا قلبي وكل انتصاراتي كانت بفضل الله وحده

## *Bibliographique*

- [1] M.N. Mchaliikh et CH. Hamada 'Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-ouagrla 2013.
- [2] K.Helali 'Modélisation d'une cellule photovoltaïque Etude comparative 'Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 25/06/2012.
- [3] M.N.Mchaliikh et CH.Hmada 'Modélisation et simulation d'un système photovoltaïques en fonctionnement autonome et connecté au réseau' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-ouagrla 2013.
- [4] M.L. Louazane 'Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla 'Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008.
- [5] M.Blhadj 'Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ' Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [6] ZEHRI.NASSIM' Modélisation et simulation d'un système photovoltaïques 'Mémoire de Master en Automatique Ecole Nationale Polytechnique El Harrach, Alger, Juin 2015.
- [7] MEHIMMEDETSI Boudjemaa - Application du formalisme Bond Graph a une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque-Mémoire de magister en électrotechnique, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE-2007
- [8] DJAAFRI houssin 'Etude et Simulation d'un système photovoltaïque appliqué machine asynchrone' Université Ahmed Daria Adrar, 2018.
- [9] Othemane BENSEDDIK, Mémoire de master « Etude et optimalisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque, Université Kasdi MERBAH ourgla ,2012
- [10] GUEDAOURIA H., ' Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar ', Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.
- [11] GOAR Nouredine, MAHMOUDI Abdelkader, ' Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque ', Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Juin 2017.
- [12] Sylvain Briugand, Installations solaire photovoltaïque : dimensionnement installations et mise en œuvre maintenance, Paris : le Moniteur, 2011.

- [13] Labouret Anne, Energie solaire photovoltaïque, Paris : Dunod, 2006, 3emeEdition.
- [14] S. MECHERI, Réalisation d'un onduleur de tension monophasée centrale par carte ARDUINE, Université de Constantine I, 2013/2014.
- [15] GUEDAOURIA H., ‘‘ Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar ‘’, Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.
- [16] DRAIDI, D. (2022). Réalisation d'un chargeur de Batterie Basé sur La commande MPPT photovoltaïque.
- [17] Abada S. ‘‘ Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur Sepic ‘’. Mémoire de grade de Maître des Sciences (M. Se.), Université Laval Québec, 2011.
- [18] ABID Ayyoub, BECHLAGHEM Yassine, ‘‘ Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque ‘’, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2017.
- [19] Meddah M., Bourahla M., Bouchetata N., ‘‘ Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. Revue des Energies Renouvelables, 2011.
- [20] SAIDI Sirine, ‘‘ Conception d'un régulateur solaire avec la commande MPPT‘’, Mémoire de fin d'étude, Université 8Mai 1945 – Guelma, Juin 2023.
- [21] Cabal, C. (2008). Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse
- [22] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006.
- [23] Moussi, A., & Saadi, A. (2002). Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque. LARHYSS Journal, 158.
- [24] HUANG BIN Deaportee. « Convertisseur continu- continu A rapport de transformation élève pour application pile à combustible ». Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, Département de Génie électrique, Mai 2009.