

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique  
Spécialité : Electromécanique

### Thème

**Dimensionnement d'une installation photovoltaïque à  
usage d'habitation**

Réalisé par :

- ❖ *M<sup>r</sup>* Benrahal Faycal
- ❖ *M<sup>r</sup>* Beldjoudi Amine

Encadré par :

- ❖ *M<sup>me</sup>* Belaid. S
- ❖ *M<sup>r</sup>* Hacini. I

Année Universitaire  
2023/2024

## **Remerciement**

*En premier lieu, je tiens à remercier le bon DIEU, de m'avoir donné Le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail pendant toute cette longue année.*

*Nous remercions très vivement Mme « **Belaid.S** » Professeur à l'université de Bejaia et Mr « **Hacini.I** » Doctorant, pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt dont il nous a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury de nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.*

*Enfin Je remercie mes parents qui n'ont pas arrêté à m'encouragé et qui ont grandement aidé et contribué à la réussite dans mon parcours grâce à leurs sacrifices.*

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>I.1 Introduction</b> .....	3
<b>I.2 L'énergie solaire photovoltaïque</b> .....	3
<b>I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque</b> .....	3
<b>I.3.1 Avantages</b> .....	3
<b>I.3.2 Inconvénients</b> .....	4
<b>I.4. Cellule photovoltaïque</b> .....	4
<b>I.4.1. Fonctionnement de la cellule</b> .....	4
<b>I.4.2 Technologie des cellules photovoltaïques</b> .....	5
<b>I.4.2.1 Silicium monocristallin</b> .....	5
<b>I.4.2.2 Silicium poly cristallin</b> .....	6
<b>I.4.2.3 Silicium amorphe</b> .....	6
<b>I.4.3 Tableau comparatif des différentes technologies de la cellule photovoltaïque :</b> .....	7
<b>I.5. Les différents types de système photovoltaïque</b> .....	8
<b>I.5.1. Système photovoltaïque autonomes</b> .....	8
<b>I.5.1.1. Système autonome sans stockage électrochimique</b> .....	8
<b>I.5.1.2. Système autonome avec stockage électrochimique</b> .....	8
<b>I.5.2. Système PV connecté au réseau</b> .....	9
<b>I.5.3. Système hybride</b> .....	9
<b>I.6. Eléments d'un système photovoltaïque</b> .....	10
<b>I.6.1. Un panneau solaire photovoltaïque</b> .....	10
<b>I.6.2. Les convertisseurs statiques</b> .....	13
<b>I.6.2.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur)</b> .....	13
<b>I.6.2.1.1. Convertisseur Buck (hacheur série)</b> .....	13
<b>I.6.2.1.2. Convertisseur Boost (hacheur parallèle)</b> .....	13
<b>I.6.2.1.3. Convertisseur Buck-Boost</b> .....	14
<b>I.6.2.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur)</b> .....	15
<b>I.6.2.2.1. Critères de choix d'un onduleur solaire :</b> .....	15
<b>I.6.3. Les batteries</b> .....	16
<b>I.6.3.1 Les types de batteries</b> .....	16
<b>I.6.3.2. Les caractéristiques d'une batterie</b> .....	17
<b>I.6.4 MPPT:</b> .....	18

<b>I.7 Conclusion</b> .....	19
<b>II.1. Introduction</b> .....	20
<b>II.2. Les systèmes photovoltaïques isolées et autonomes</b> .....	20
<b>II.3. Présentation de système photovoltaïque avec stockage par batterie</b> .....	21
<b>II.4. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque</b> .....	22
<b>II.4.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque</b> .....	22
<b>II.4.2. Bloc Simulink du modèle à une diode</b> .....	24
<b>II.4.2.1. Caractéristique <math>I_{pv}(V_{pv})</math> et <math>P_{pv}(V_{pv})</math> dans des conditions STC</b> .....	25
<b>II.4.2.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV</b> ...	27
<b>II.4.2.2.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque</b> ...	27
<b>II.4.2.2.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque</b> ....	28
<b>II.5. Modèle d'un hacheur survolteur (boost)</b> .....	30
<b>II.6. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT))</b> .....	31
<b>II.6.1. La méthode perturbation et observation</b> .....	32
<b>II.6.2. Résultats de simulation de la méthode perturbation et observation</b> .....	33
<b>II.6.3. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l'algorithme MPPT</b> .....	35
<b>II.7. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque</b> .....	37
<b>II.7.1. Modélisation de la batterie</b> .....	37
<b>II.7.2. Charge et décharge d'une batterie au plomb</b> .....	38
<b>II.8. Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage</b> .....	39
<b>II.9. Modèle du bus continu</b> .....	41
<b>II.10. Gestion d'énergie du système photovoltaïque</b> .....	41
<b>II.11. Modélisation de l'onduleur</b> .....	43
<b>II.12. Conclusion</b> .....	44
<b>III.1 Introduction</b> .....	45
<b>III.2. Dimensionnement du système photovoltaïque</b> .....	45
<b>III.2.1 Choix des méthodes de dimensionnement</b> .....	45
<b>III.2.1.1 La méthode du mois le plus défavorable</b> .....	45
<b>III.2.1.2 Méthode de la moyenne annuelle</b> .....	46
<b>III.3. Le gisement solaire</b> .....	46
<b>III.4. Présentation de site d'installation :</b> .....	46
<b>III.5. Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV</b> .....	47

III.5.2. Description de la mosquée .....	49
III.5.3. Cahier des charges.....	50
III.6. Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	51
III.6.1. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon le besoin journalier .....	52
III.7. Dimensionnement de l'onduleur .....	52
III.8. Dimensionnements des batteries .....	53
III.8.1. Modèle de câblage électrique du système de stockage .....	54
III.9. Dimensionnement de La section des câbles.....	55
III.10. Le schéma de câblage .....	56
III.11. Conclusion .....	58
IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Simulation du système global.....	59
IV.3. Profil de charge .....	60
IV.4. Résultats de simulation du système globale et interprétation des résultats durant la journée d'été .....	61
IV.4.1. Profil d'ensoleillement.....	61
IV.4.2. Profil de température .....	61
IV.4.3. Système PV .....	62
IV.4.4. Courbe des puissances ( $P_{pv}$ , $P_{ch}$ , $P_{dis}$ ).....	62
IV.4.5. Batterie.....	63
IV.4.6. Le bus continu .....	65
IV.5. Résultats de simulation du système globale et interprétation des résultats durant la journée d'hiver .....	66
IV.5.1. Profil d'ensoleillement.....	66
IV.5.2. Profil de température .....	66
IV.5.3. Système PV .....	67
IV.5.4. Courbe des puissances ( $P_{pv}$ , $P_{ch}$ , $P_{dis}$ ).....	67
IV.5.5. Batterie.....	68
IV.4.6. Le bus continu .....	71
IV.7. Conclusion .....	71
Conclusion générale .....	72

## Liste de figure

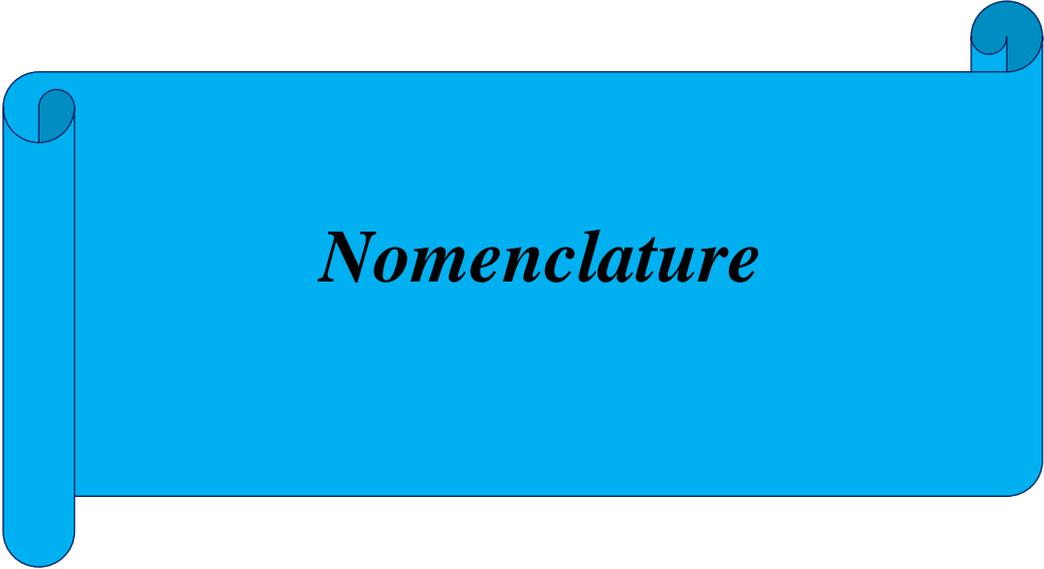
<b>Figure I.1</b> : coupe d'une cellule PV .....	5
<b>Figure I.2</b> : Silicium monocristallin [11].....	6
<b>Figure I.3</b> : Silicium poly cristallin [10].....	6
<b>Figure I.4</b> : Silicium Amorphe [12].....	6
<b>Figure I.5</b> : Schéma d'un système PV autonome avec batterie [14]. .....	9
<b>Figure I. 6</b> : Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau [16].....	9
<b>Figure I.7</b> : Schéma d'un système PV hybride [17] .....	10
<b>Figure I.8</b> : Association en parallèle [2] .....	11
<b>Figure I.9</b> : Association en série [2] .....	11
<b>Figure I.10</b> : Association mixte (série + parallèle) [2] .....	12
<b>Figure I.11</b> Exemple d'association sécurisée de deux modules PV en parallèle avec leur diode de protection [18] .....	12
<b>Figure I.12</b> : Circuit électrique du hacheur <<Buck>> .....	13
<b>Figure I.13</b> : Circuit électrique du hacheur <Boost> [20].....	14
<b>Figure I.14</b> : Circuit électrique du hacheur <Buck-Boost> [18] .....	14
<b>Figure I.15</b> : Schéma symbolique de l'onduleur .....	15
<b>Figure I.16</b> : Construction d'une batterie monobloc .....	17
<b>Figure II. 1</b> :Schéma synoptique du système PV autonome avec stockage d'énergie .....	21
<b>Figure II. 2</b> :Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation .....	22
<b>Figure II. 3</b> :Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque, modèle simplifié à une diode.....	23
<b>Figure II. 4</b> :Schéma bloc du modèle à une diode.....	25
<b>Figure II. 5</b> : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions $G_{stc}=1000w/m^2$ , $T_{stc}=25^{\circ}C$ .....	26
<b>Figure II. 6</b> :Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les condition $G_{stc}=1000w/m^2$ , $T_{stc}=25^{\circ}C$ .....	26
<b>Figure II. 7</b> :Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv} (V_{pv})$ .....	27
<b>Figure II. 8</b> : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .....	28
<b>Figure II. 9</b> Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ .....	29
<b>Figure II. 10</b> :Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$ .....	29
<b>Figure II. 11</b> :circuit électrique de l'hacheur boost.....	30
<b>Figure II. 12</b> : schéma bloc de l'hacheur survolteur .....	31
<b>Figure II. 13</b> : Caractéristique $P=f(V)$ et fonctionnement de la méthode PO .....	32
<b>Figure II. 14</b> :Organigramme de l'algorithme P&O .....	33
<b>Figure II. 15</b> :Courbe de puissance (P&O) .....	33
<b>Figure II. 16</b> :Courbe de tension (P&O). .....	34
<b>Figure II. 17</b> :Courbe de courant (P&O).....	34
<b>Figure II. 18</b> :Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ( $T=25^{\circ}C$ ) sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ .....	35
<b>Figure II. 19</b> :Réponse de l'algorithme P&O pour différentes variations de l'ensoleillement à Température constante ( $T=25^{\circ}C$ ) sur la caractéristique $I_{pv} (V_{pv})$ .....	35

<b>Figure II. 20:</b> Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ( $G=1000W/m^2$ ) sur la caractéristique $P_{pv}$ ( $V_{pv}$ ).....	36
<b>Figure II. 21:</b> Réponse de l'algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ( $G=1000W/m^2$ ) sur la caractéristique $I_{pv}$ ( $V_{pv}$ ).....	36
<b>Figure II. 22:</b> Modèle R-C de la batterie.....	37
<b>Figure II. 23:</b> Allure de Courant de la batterie.....	38
<b>Figure II. 24:</b> Allure d'Etat de charge de la batterie.....	39
<b>Figure II. 25:</b> Allure de tension de la batterie.....	39
<b>Figure II. 26:</b> Schéma d'un hacheur Buck-Boost.....	40
<b>Figure II. 27:</b> Schéma du bus continu.....	41
<b>Figure II. 28:</b> Algorithme de gestion d'énergie du système photovoltaïque.....	42
<b>Figure II. 29:</b> Schéma de l'onduleur.....	43
<b>Figure III.1 :</b> Site de la mosquée d'Oued Ghir.....	47
<b>Figure III.2 :</b> Onduleur SMC 6000TL.....	53
<b>Figure III.3 :</b> Montage des batteries.....	54
<b>Figure III. 4 :</b> plan de câblage de l'installation.....	57
<b>Figure IV.1 :</b> Organigramme du système photovoltaïque étudié.....	59
<b>Figure IV.2 :</b> Schéma bloc global du système étudié.....	60
<b>Figure IV.3 :</b> Profil de charge électrique.....	60
<b>Figure IV.4 :</b> Profil de l'ensoleillement le long d'une journée d'été.....	61
<b>Figure IV. 5 :</b> Profil de température le long d'une journée d'été.....	61
<b>Figure IV. 6 :</b> Courbe de $P_{pv}$ le long d'une journée d'été.....	62
<b>Figure IV. 7 :</b> Courbe des puissances ( <b><math>P_{pv}</math>, <math>P_{ch}</math>, <math>P_{dis}</math></b> ) le long d'une journée d'été.....	63
<b>Figure IV. 8 :</b> Courbe de $V_{batt}$ le long d'une journée d'été.....	64
<b>Figure IV. 9 :</b> Courbe de $I_{batt}$ le long d'une journée d'été.....	64
<b>Figure IV. 10 :</b> Courbe de $P_{batt}$ le long d'une journée d'été.....	64
<b>Figure IV. 11 :</b> Courbe de l'EDC de la batterie le long d'une journée d'été.....	65
<b>Figure IV. 12 :</b> La tension du bus DC le long d'une journée d'été.....	65
<b>Figure IV. 13 :</b> Profil de l'ensoleillement le long d'une journée d'hiver.....	66
<b>Figure IV. 14 :</b> Profil de température le long d'une journée d'hiver.....	66
<b>Figure IV. 15 :</b> Courbe de $P_{pv}$ le long d'une journée d'hiver.....	67
<b>Figure IV. 16 :</b> Courbe des puissances( <b><math>P_{pv}</math>, <math>P_{ch}</math>, <math>P_{dis}</math></b> ) au long d'une journée d'hiver.....	68
<b>Figure IV. 17 :</b> Courbe de $V_{batt}$ le long d'une journée d'hiver.....	69
<b>Figure IV. 18 :</b> Courbe de $I_{batt}$ le long d'une journée d'hiver.....	69

<b>Figure IV. 19</b> : Courbe de Pbatt le long d'une journée d'hiver.....	70
<b>Figure IV. 20</b> : Courbe de l'EDC de la batterie le long d'une journée d'hiver.....	70
<b>Figure IV. 21</b> : La tension du bus DC le long d'une journée d'hiver .....	71

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Etat comparatif des différentes technologies des cellules photovoltaïques [15].....	7
<b>Tableau II.1</b> : Paramètres d'un panneau solaire [37].....	25
<b>Tableau III. 1</b> : Les coordonnées géographiques de la mosquée.....	47
<b>Tableau III. 2</b> :Irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45° à Bejaia [15].....	48
<b>Tableau III. 3</b> : Pièces et équipement électrique de la mosquée.....	49
<b>Tableau III. 4</b> : Les équipements électriques et leurs puissances .....	50
<b>Tableau III. 5</b> : Consommation journalière de la mosquée .....	50
<b>Tableau III. 6</b> : Les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance Crête ...	51
<b>Tableau III. 7</b> : Fiche technique du module photovoltaïque [37] .....	52
<b>Tableau III. 8</b> : Calcul de la taille du générateur photovoltaïque .....	52
<b>Tableau III. 9</b> : Dimensionnement de l'onduleur .....	53
<b>Tableau III. 10</b> : Dimensionnement des batteries .....	53
<b>Tableau III. 11</b> : Dimensionnement du système de stockage .....	54
<b>Tableau III. 12</b> : Calcul de la section des câbles .....	55
<b>Tableau III. 13</b> : Tableau récapitulatif des résultats obtenus du dimensionnement. ....	56



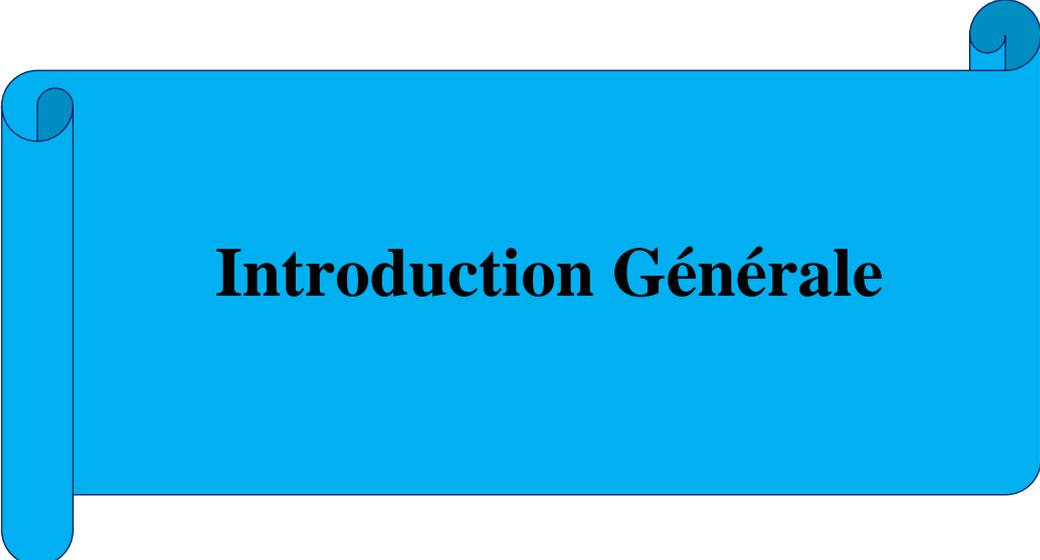
*Nomenclature*

- $I_{pv}$  : Courant photovoltaïque (A).
- $I_d$ : courant de diode(A).
- $I_{ph}$ : photo courant(A).
- $I_s$  : courant inverse de saturation de la diode(A).
- $I_{mpp}$ : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.
- $I_{CC}$ : Courant de court-circuit.
- $V_{mpp}$ : Tension au point de puissance maximale appelée aussi tension optimale.
- $V_{CO}$ : Tension en circuit ouvert.
- $K$  : constante de Boltzmann avec  $K=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$
- $T$ : température absolue  $[T]=K$  (kelvin).
- $I_{ph}$ : courant fournis par la cellule (A).
- $V_{pv}$ : tension fournie par la cellule(V).
- $q$  : la charge d'électron avec  $q= 1.6 \times 10^{-19}$  (C).
- $E_g$  : énergie de gap pour le silicium cristalline 1.12 (ev).
- $V_{pv}$  : Tension photovoltaïque (V).
- $P_{pv}$  : Puissance photovoltaïque (W).
- $G_{stc}$  : Le niveau d'insolation dans les conditions standard de fonctionnement ( $\text{W/m}^2$ ).
- $G$  : Le niveau d'insolation dans des conditions quelconques ( $\text{W/m}^2$ ).
- $V_{CO}$ : Tension de circuit ouvert (V).
- $P_{ppm}$  : Puissance au point de puissance maximale (W).
- $V_{batt}$  : tension de batterie (V).
- $I_{batt}$  : courant de batterie (A).
- $E_b$  : la force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie (V).

- $R_b$  : la résistance interne, variable en fonction de l'état de charge ( $\Omega$ ).
- $C_{batt}$  : Capacité de la batterie (Ah).
- $R_{batt}$  : Résistance de la batterie ( $\Omega$ ).
- $t$  : Temps de décharge de la batterie (h).
- $P_c$  : Puissance totale de champs photovoltaïque (W).
- $I_L$  : courant d'inductance du hacheur (A).
- $E_{mes}$  : Ensoleillement du site d'installation ( $W/m^2$ ).
- $E_{stc}$  : Ensoleillement dans les conditions STC ( $W/m^2$ ).
- $B_j$  : Besoin journalier (Wh/J).
- $N_e$  : nombre d'heure d'équivalent (h).
- $P_{pv/j}$ : puissance photovoltaïque journalière (W).
- $P_{est}$  : nouvelle puissance estimé (W).
- $S_c$ : surface de captage ( $m^2$ ).
- $S_{p.v.u}$ : surface de panneau photovoltaïque unitaire ( $m^2$ ).
- $P$  : puissance crête estimé (W).
- $E_s$  : ensoleillement ( $W/m^2$ ).
- $P_{calculé}$ : puissance calculé (W).
- $I_{calculé}$  : courant calculé (A).
- $V_{max}$  : tension maximal (V).
- $I_{max}$ : courant maximal (A).
- $V_{bat.u}$  : tension de batterie unitaire (V).
- $P_{ch}$  : puissance de la charge (W).
- $P_{bat}$  : puissance de la batterie (W).
- $\rho_1$  : résistivité du matériau conducteur ( $\Omega \cdot mm^2/m$ )
- $L$  : Longueur de canalisation (m)

- $S$  : Section des câbles ( $\text{mm}^2$ )
- $\lambda$ : Réactance linéique des conducteurs ( $\Omega/\text{m}$ )
- EDC : Etat de charge (%)
- $P_{nouv}$  : puissance nouvelle estimé (W).
- $\Delta V$  : la chute de tension (%).
- $N_s$  : Nombre de modules dans le panneau en série.
- $N_p$  : Nombre de modules dans le panneau en parallèle
- $A$ : facteur d'idéalité de la diode avec  $A=1 \dots 5$ .
- $\alpha$ : rapport cyclique.
- $\eta_{batt}$  : Rendement de la batterie.
- PV : Panneaux photovoltaïque.
- MPPT : Recherche du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking).
- PPM : Point de puissance maximum.
- $N_{pv}$  : Nombre du panneau.
- $EDf$  : Energie déficitaire.
- $EDm$  : Energie demandée.
- $\eta$  : Rendement du panneau.
- $N_{pv,prov}$ : nombre du panneau photovoltaïque provisoire.
- $N_{p,max}$  : nombre du panneau maximal.
- $N_{pvs}$  : nombre du panneau photovoltaïque série.
- $N_{pvs,max}$ : nombre du panneau photovoltaïque série maximal.
- $N_{pv,ch}$  : nombre du panneau photovoltaïque chaine.
- $N_{bat,s}$  : nombre de batterie en série.
- AC : Alternatif Curent (Courent Alternatif (CA)).
- DC : Direct Curent (courant continu (CC)).

- $b$  : coefficient qui vaut 1 en triphasé et 2 en monophasé.
- $T_{STC}$  et  $T_c$  : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.
- $T_{STC}$  et  $T_c$  : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.
- $\Delta V_{pv}$  : Représente la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température.
- $\Delta I_{pv}$  : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.
- $\Delta T_c$  : Représente la variation de la température.
- $\alpha_{cc}$  : Coefficient d'incrément de courant quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnement).
- $\beta_{oc}$  : Coefficient d'incrément de tension quand la température augmente (par rapport aux conditions standards de fonctionnement).



# **Introduction Générale**

## Introduction générale

La production d'électricité représente un véritable défi tant sur le plan écologique qu'économique. De nos jours, la majeure partie de cette production d'énergie à l'échelle mondiale provient de sources fossiles. Cette forme d'énergie entraîne des émissions de gaz à effet de serre, ce qui entraîne une hausse de la pollution [1].

Les pays développés et émergents sont contraints de se tourner vers des énergies propres et renouvelables, telles que le solaire, la géothermie, la biomasse et l'énergie éolienne, en raison de la limitation et de l'épuisement des ressources naturelles fossiles [2].

L'énergie solaire est considérée comme une source d'énergie renouvelable à fort potentiel, elle connaît actuellement un fort développement dans le monde.

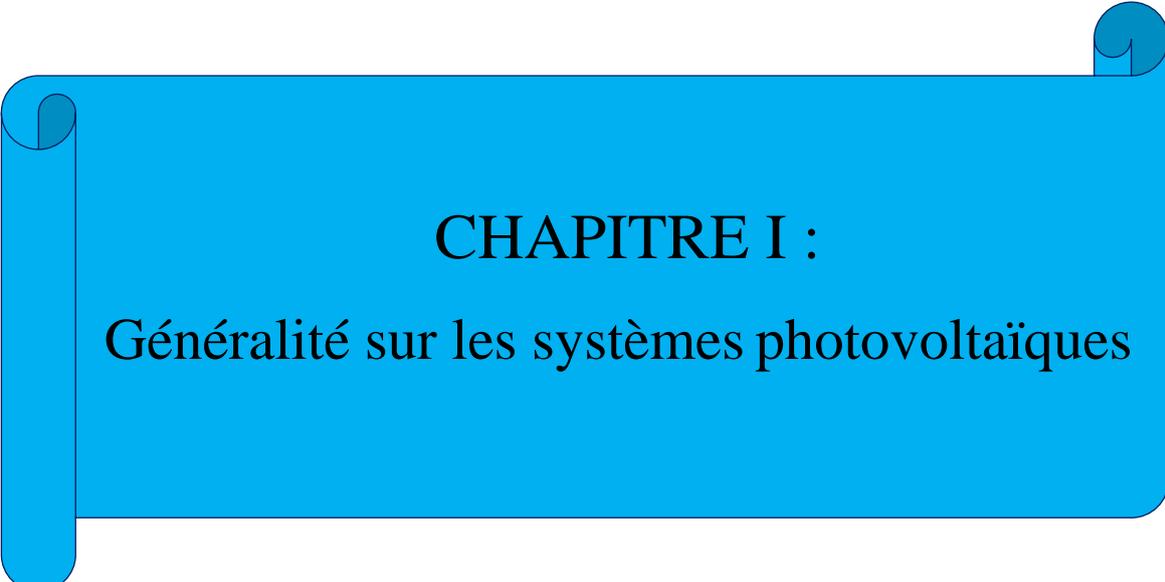
Il convient de souligner que l'Algérie possède l'un des plus grands gisements solaires au monde. L'insolation annuelle moyenne dépasse les 3000 heures. C'est également le plus important de l'ensemble du bassin méditerranéen, avec une valeur annuelle de 169440TWh. Les régions côtières reçoivent une énergie solaire moyenne de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an, tandis que les Hauts-Plateaux reçoivent 1900 kWh/m<sup>2</sup>/an et le Sahara 2650 kWh/m<sup>2</sup>/an. Il est possible pour notre pays de satisfaire certains de ses besoins en énergie grâce aux systèmes photovoltaïques [3].

Étant donné l'importance de l'énergie solaire, la recherche scientifique se développe afin d'améliorer l'utilisation des systèmes solaires en se concentrant sur leur optimisation et leur dimensionnement.

L'objectif de ce travail est donc l'étude et le dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une mosquée « Khaled ibn Walid » située au niveau de la commune Oued Ghir, wilaya de Bejaia. Ce mémoire détaille les différentes parties du travail réalisé dans quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les différents types de système étudié, les convertisseurs statiques utilisés ainsi que les éléments de stockage.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation des différentes du système étudié (panneau PV, hacheur et batterie).

- Dans le troisième chapitre nous présenterons la méthode de dimensionnement qui permettra de satisfaire la demande des différents équipements électriques, et nous proposerons un schéma de câblage pour l'installation PV.
- Le dernier chapitre sera consacré à la simulation globale du système étudié.



**CHAPITRE I :**  
Généralité sur les systèmes photovoltaïques

## I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable qui utilise le rayonnement solaire pour produire de l'électricité à l'aide de cellules photovoltaïques connectées en série et/ou en parallèle. Lorsque plusieurs cellules sont connectées entre elles, elles forment un module solaire photovoltaïque. Il est donc très important de pouvoir exploiter cette énergie, mais l'utilisation de cette forme d'énergie nécessite la connaissance de certains concepts généraux et préalables, ainsi qu'une parfaite compréhension des principes de la conversion photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous décrivons un aperçu des systèmes photovoltaïques (définition de l'énergie solaire photovoltaïque, différents types de systèmes photovoltaïques, cellules photovoltaïques, composants du système photovoltaïque, etc.).

## I.2 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium recouvert d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure, c'est l'effet photovoltaïque [4]. L'énergie est apportée par les photons (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et libèrent un courant électrique continu. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles [5] [6].

## I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### I.3.1 Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### I.3.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées ;
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru ;
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [7].

### I.4. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque ou photopile est l'élément de base de la conversion photovoltaïque, elle est assimilable à une diode photosensible son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs [8].

#### I.4.1. Fonctionnement de la cellule

Elle est constituée de deux couches de silicium que l'on a exposées au préalable à des faisceaux d'ions, l'une à des ions de phosphore (-), l'autre à des ions de bore (+). La première couche présente un excédent d'électron et l'autre un déficit, elles sont dites respectivement dopée N et dopée P. Ce procédé est appelé le « dopage » et sert à créer un champ électrique entre les deux zones où se crée une jonction dite PN, et dirigé de la zone (P) vers la zone (N) [9], la figure suivante représente le coup d'une cellule PV :

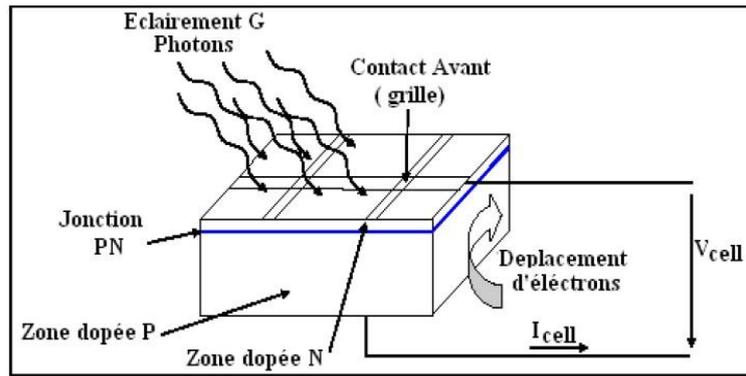


Figure I.1 : coupe d'une cellule PV

Lorsque les deux couches dopées sont mises en contact, les électrons en excès dans le matériau dopé N diffusent dans le matériau dopé P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P; une jonction dite PN a été formée.

Les photons ayant une énergie excitent les atomes de silicium et créent des charges positives et négatives, ainsi les électrons et les trous créés respectivement dans les régions P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérés par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement, la région P accepte des trous et se charge positivement. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, créant ainsi un courant électrique.

#### I.4.2 Technologie des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïque. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant quel que soit le type, le rendement reste assez faible entre : 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Les cellules les plus utilisées sont [10]:

##### I.4.2.1 Silicium monocristallin

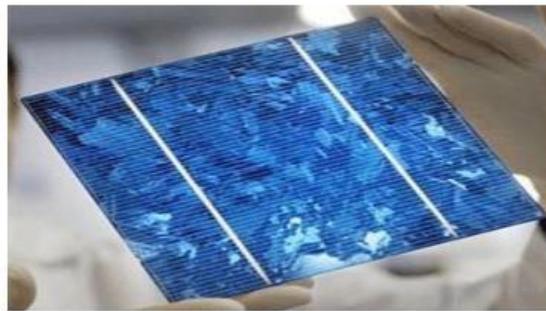
Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 10 à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie.



**Figure I.2 :** Silicium monocristallin [11]

#### I.4.2.2 Silicium poly cristallin

Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de 11 à 13 %, et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines.



**Figure I.3 :** Silicium poly cristallin [10]

#### I.4.2.3 Silicium amorphe

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10%), mais la technologie évolue rapidement, ils fonctionnent avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 2 à 3000 lux).



**Figure I.4 :** Silicium Amorphe [12]

Les types et technologies de cellules photovoltaïques citées ci-dessus diffèrent et ces différences nous ont permis d'élaborer un tableau comparatif. Nous montrons dans ce tableau (Tableau. I.1) les caractéristiques des différentes cellules classées par leur rendement, longévité et leurs principales utilisations.

**I.4.3 Tableau comparatif des différentes technologies de la cellule photovoltaïque :**

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
<b>Silicium monocristallin</b>	10 à 16% (24,7% au laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production. *Méthode de production couteuse et laborieuse.	Aerospatiale, Modules pour toits, façades,...
<b>Silicium Poly cristallin</b>	11 à 13% (19.8% en laboratoire)	20 à 30 ans	*Très performant *Stabilité de production *Méthode de production couteuse et laborieuse.	Modules pour toits, façades, générateurs...
<b>Amorphe</b>	6 à 10% (13% au laboratoire)	≤ 10 ans	*Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. *Fonctionnement faible si luminosité. *Fonctionnement par temps couvert. *Fonctionnement si ombrage Partiel. *La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareil électroniques (montres, calculatrice...), Intégration dans les bâtiments

**Tableau I.1 :** Etat comparatif des différentes technologies des cellules photovoltaïques [13]

### I.5. Les différents types de système photovoltaïque

Généralement il existe trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de réseau distribution d'électricité, on les retrouve généralement dans les régions isolées.

#### I.5.1. Système photovoltaïque autonome

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignés du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [14]:

##### I.5.1.1. Système autonome sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome [15].

##### I.5.1.2. Système autonome avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes. Elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, la figure (I.5) suivante présenter un schéma d'un système PV autonome avec batterie.

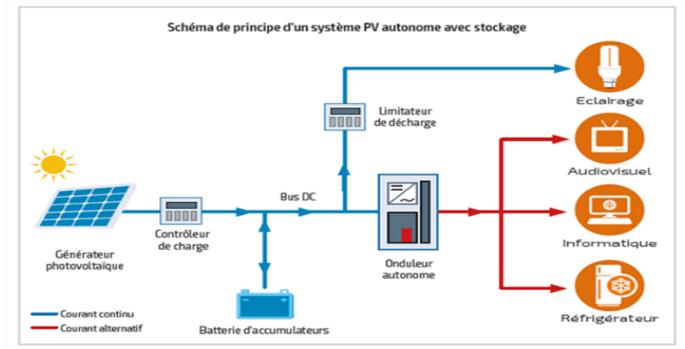


Figure I.5 : Schéma d'un système PV autonome avec batterie [14].

### I.5.2. Système PV connecté au réseau

La figure (I.6) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les charges locales de l'habitat. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau. Le réseau est utilisé en appoint à la production PV [15].

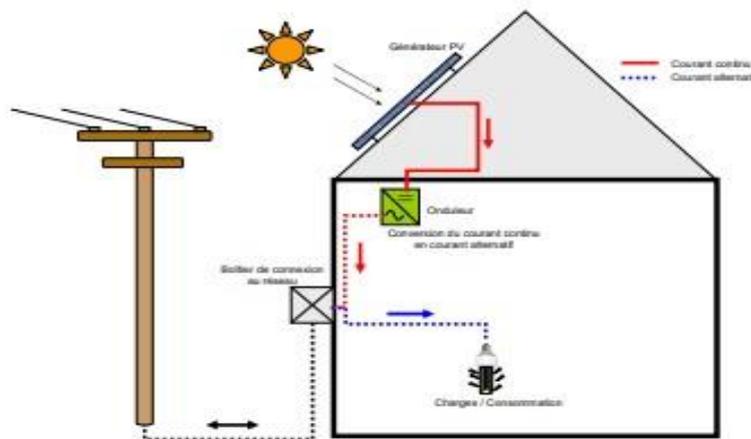


Figure I. 6 : Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau [16]

### I.5.3. Système hybride

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes. On prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, ce qui permet d'optimiser

au maximum les systèmes de production d'électricité. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise [1].

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimisées. Etant entendu que le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [17], la figure (I.7) suivante représente schéma d'un système PV hybride :

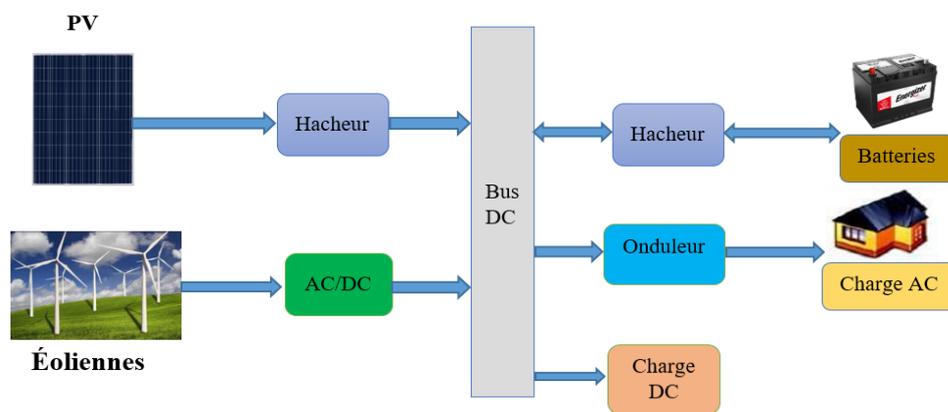


Figure I.7 : Schéma d'un système PV hybride [17]

## I.6. Éléments d'un système photovoltaïque

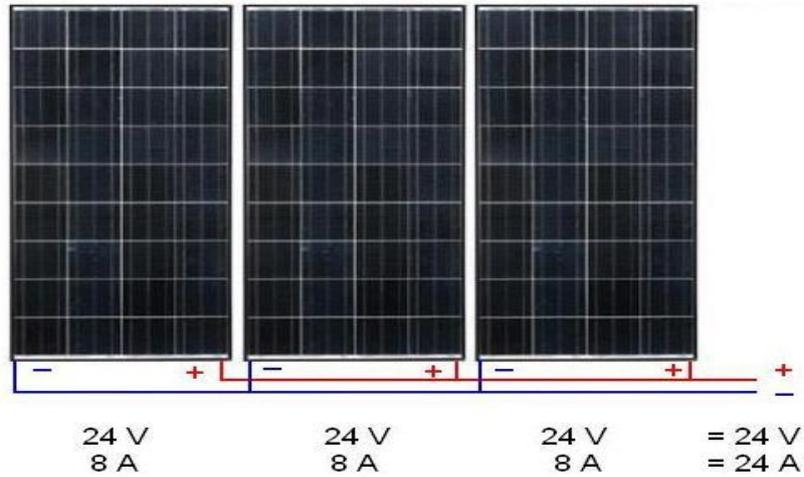
Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

### I.6.1. Un panneau solaire photovoltaïque

Un panneau solaire transforme l'énergie du soleil en énergie électrique : Le panneau est constitué de couches de silicium chargées positivement et négativement. Quand les rayons du soleil entre en contact avec le panneau, cela crée une différence de potentiel électrique et donc crée un courant électrique. Cette énergie sera transportée vers le réseau électrique pour la revente ou vers votre tableau électrique pour votre propre consommation. Plus le panneau reçoit d'énergie solaire, plus il produit d'électricité [2].

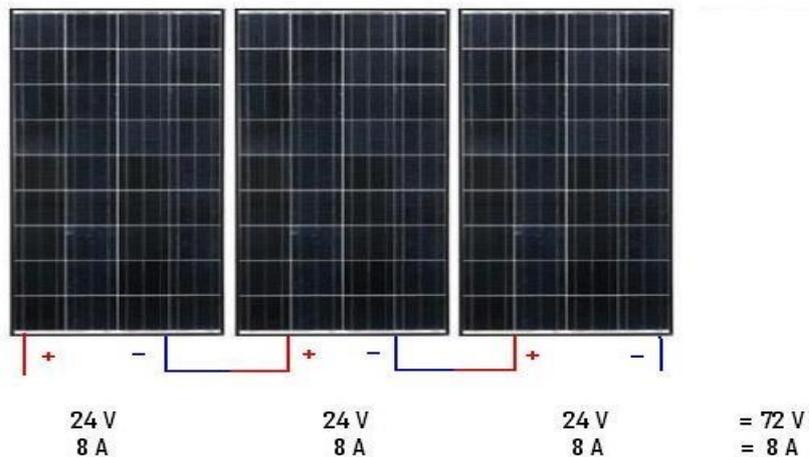
**A. Association des modules photovoltaïques**

Pour augmenter le courant du générateur on associe les modules en parallèle comme montrer dans la figure (I.8) suivante [2] :



**Figure I.8 :** Association en parallèle [2]

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur on associe les modules en série comme montrer dans la figure (I.9) suivante :



**Figure I.9 :** Association en série [2]

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et

parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque comme montrer dans la figure (I.10) suivante :

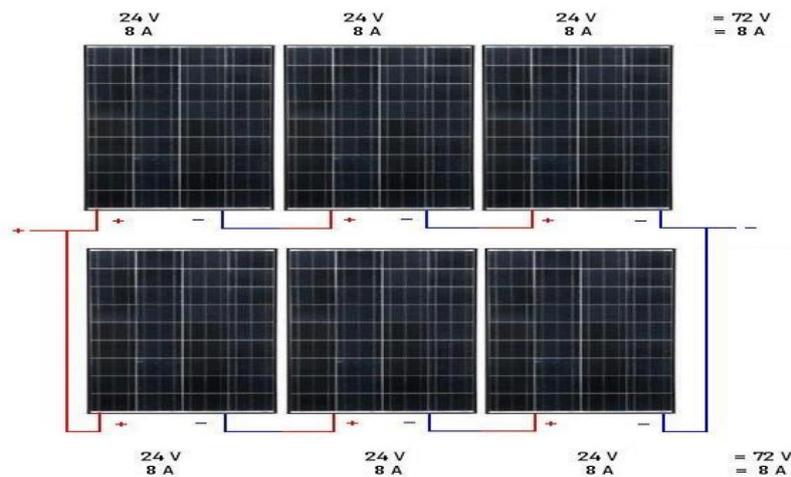


Figure I.10 : Association mixte (série + parallèle) [2]

### A. Protection du panneau

**La diode anti-retour** : empêchant un courant négatif dans les modules photovoltaïques. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur en mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [18].

**Les diodes by-pass** : peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [18].

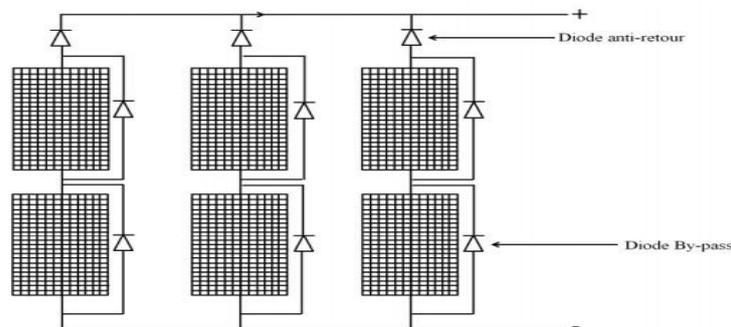


Figure I.11 Exemple d'association sécurisée de deux modules PV en parallèle avec leur diode de protection [18]

## I.6.2. Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

### I.6.2.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Un hacheur est un convertisseur statique, (continue  $\Rightarrow$  continue). Il permet d'alimenter une source de tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue constante. L'hacheur peut être abaisseur ou élévateur en tension (un quadrant), réversible en courant, en tension (deux quadrant) ou en courant et tension (quatre quadrants) [19].

#### I.6.2.1.1. Convertisseur Buck (hacheur série)

Un convertisseur Buck permet de convertir une tension continue en une tension continue d'une faible valeur, c'est un abaisseur de tension. La topologie du convertisseur « Buck » est donnée par la Figure (I.). Les composants clés sont l'inductance (L), interrupteur (S), la diode (D) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de (S) qui fait décharger son énergie à travers la diode sur le charge (R) pour un cycle de période de fonctionnement [20].

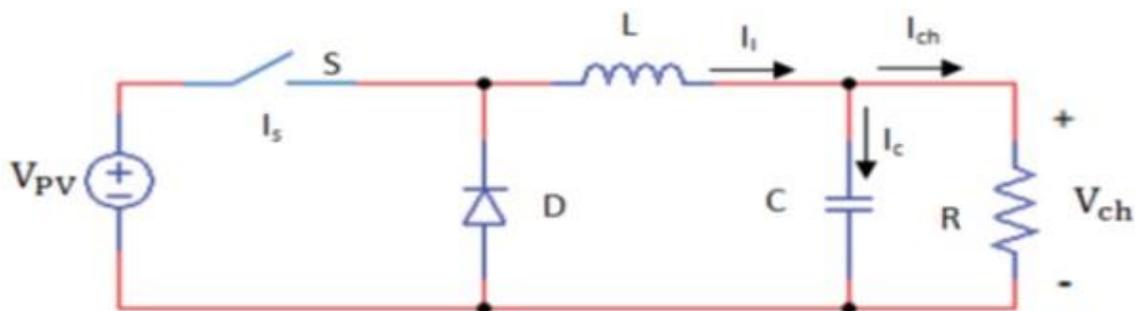


Figure I.12 : Circuit électrique du hacheur <<Buck>>

#### I.6.2.1.2. Convertisseur Boost (hacheur parallèle)

Un convertisseur élévateur dit Boost permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est pour cela qu'il est dit élévateur de tension [20].

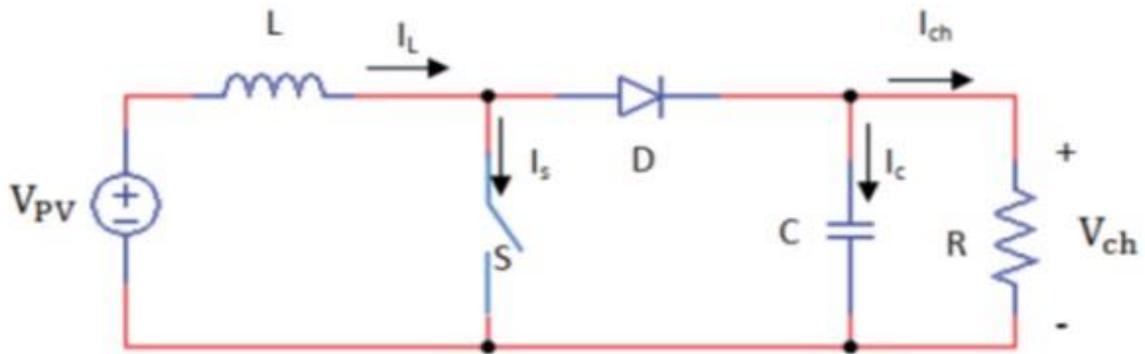


Figure I.13 : Circuit électrique du hacheur <Boost> [20]

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. Son fonctionnement est comme suit : Au premier temps ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. L'interrupteur (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur la charge (R) à travers la diode (D) [21].

### I.6.2.1.3. Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [20].

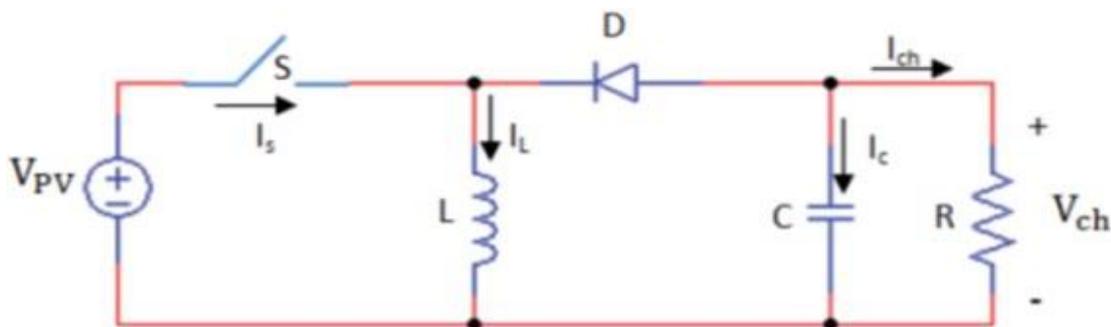


Figure I.14 : Circuit électrique du hacheur <Buck-Boost> [18]

La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque l'interrupteur (S) est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée; tandis que, lorsque le commutateur (S) tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance (L) est renversée, l'énergie stockée et se transfère vers la charge (R) via la diode (D) [20].

### I.6.2.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge en courant alternatif à partir d'une source continue. C'est un convertisseur continue-alternatif, l'onduleur est dit autonome quand il impose sa propre fréquence à la charge.

-Si la source continue est une source de tension, l'onduleur est appelé onduleur de tension. Il impose la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge, la forme d'onde du courant dépend de la charge.

-Si la source continue est une source de courant, l'onduleur est appelé onduleur de courant. Il impose la forme d'onde du courant (alternatif) qui traverse la charge. On parle de commutateur de courant. Par contre la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge dépend de la nature de la charge [19].

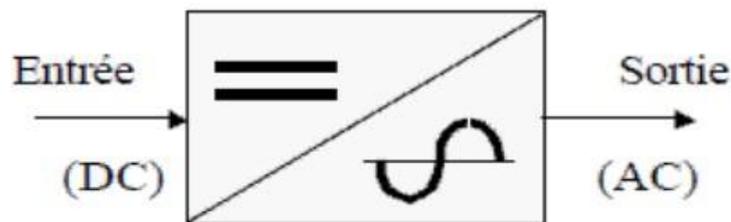


Figure I.15: Schéma symbolique de l'onduleur

#### I.6.2.2.1. Critères de choix d'un onduleur solaire :

On a plusieurs critères pour choisir un onduleur solaire certains sont indispensables et d'autres sont optionnelles.

Les critères indispensables sont :

- Puissance électrique.
- Tension d'entrée.
- Tension de sortie.
- Forme d'onde.

Les critères optionnels sont généralement :

- Puissance de pic.

- Plage de tension d'entrée.
- Protection contre le court – circuit
- Protection contre la surcharge.
- Protection contre la baisse tension d'entrée.
- Protection contre la baisse tension d'entrée.
- Incorporation d'un régulateur de charge.

### I.6.3. Les batteries

Une batterie ou un accumulateur électrochimique est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge. C'est la modification chimique d'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie [22].

#### I.6.3.1 Les types de batteries

Dans les systèmes solaires autonomes on utilise principalement :

- **Les batteries alcalines (Ni/Cd et Ni/MH) :** sont beaucoup plus robustes mais aussi plus coûteuses. Elles sont mieux adaptées aux basses températures. Par contre, leur recyclage est compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant.
- **Les batteries au lithium :** présentent « techniquement » les meilleures performances. L'autodécharge des accumulateurs Li-ion est en effet faible alors que leur énergie massique stockée est relativement bien supérieure.
- **Les batteries « gel » :** L'électrolyte est figé par l'addition de gel de silice. Dans certaines batteries, de l'acide phosphorique est additionné afin d'améliorer la durée de vie en cyclage profond.
- **Les batteries au plomb :** constituent l'investissement le plus économique pour un système multi-sources et présentent l'avantage d'être recyclable à plus de 90%. Cependant, ces batteries sont sensibles aux mauvais usages et leur durée de vie est souvent bien inférieure à celle du dispositif générateur d'électricité [1].

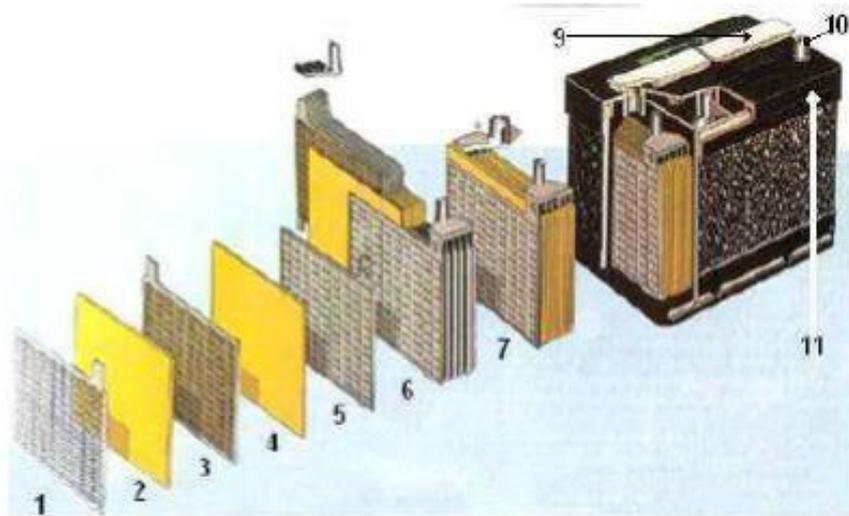


Figure I.16 : Construction d'une batterie monobloc

- |                     |                      |                        |
|---------------------|----------------------|------------------------|
| 1 : Grille          | 5 : Barrette         | 9 : Rampe de bouchons. |
| 2 : Séparateur      | 6 : Faisceau négatif | 10 : Borne             |
| 3 : Plaque positive | 7 : Elément complet  | 11 : Bac               |
| 4 : Plaque négative |                      |                        |

### I.6.3.2. Les caractéristiques d'une batterie

#### ➤ Capacité en Ampère heure

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de **200 Ah** peut fournir **200 A** pendant une heure, ou **50 A** pendant **4** heures, ou **4 A** pendant **50** heures. Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

#### ➤ Rapports de chargement et déchargement

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

### ➤ **Température**

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement.

Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

### ➤ **La durée de vie**

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).

### ➤ **Profondeur de décharge**

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

### ➤ **La tension d'utilisation**

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

### ➤ **Le rendement**

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

### ➤ **Le taux d'autodécharge**

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné [11] [23].

### **1.6.4 MPPT:**

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV [24].

### I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions de bases sur l'énergie solaire, cellules photovoltaïques et les différentes technologies utilisées pour la conception de module photovoltaïques. Ensuite nous avons cité quelques types de convertisseurs utilisés dans notre installation. De plus, les différents types de stockage d'énergies par batterie électrochimique ont été mis au point, et le chapitre suivant sera consacré à l'étude et la modélisation des éléments de notre installation.

A blue graphic element resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends. The text is centered within the horizontal strip.

**CHAPITRE II :**  
**Modélisation et Simulation des composants du  
système étudié**

## II.1. Introduction

Ce deuxième chapitre se concentre sur la production d'électricité à partir de sources solaires, en mettant en relation ces systèmes avec des dispositifs de stockage électrochimique.

Nous abordons le fonctionnement des systèmes photovoltaïques autonomes, ainsi que les caractéristiques essentielles d'un générateur photovoltaïque (GPV). Les courbes courant-tension  $I(V)$  d'un GPV sont spécifiques, non linéaires et présentent des points de puissance maximale variables en fonction de l'éclairement et de la température des cellules. Nous illustrerons également une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque avec stockage, ainsi qu'un convertisseur statique et sa commande, afin de mettre en évidence les principaux critères d'optimisation utilisés.

## II.2. Les systèmes photovoltaïques isolées et autonomes

Les générateurs photovoltaïques autonomes intègrent leur propre système de stockage d'énergie, souvent calibré pour une autonomie d'environ 3 jours, garantissant ainsi une alimentation électrique stable indépendamment de la qualité de l'ensoleillement. Ce stockage d'énergie est assuré par des dispositifs électrochimiques permettant de restituer l'électricité selon les besoins. Les batteries jouent un rôle crucial dans ce contexte, offrant des caractéristiques spécifiques idéales. Ces systèmes sont couramment déployés pour alimenter des habitations isolées, des sites insulaires, des zones montagneuses, ainsi que pour des applications telles que la surveillance à distance et le pompage d'eau. En général, les systèmes photovoltaïques autonomes sont installés là où ils représentent la source d'énergie électrique la plus économique [25].

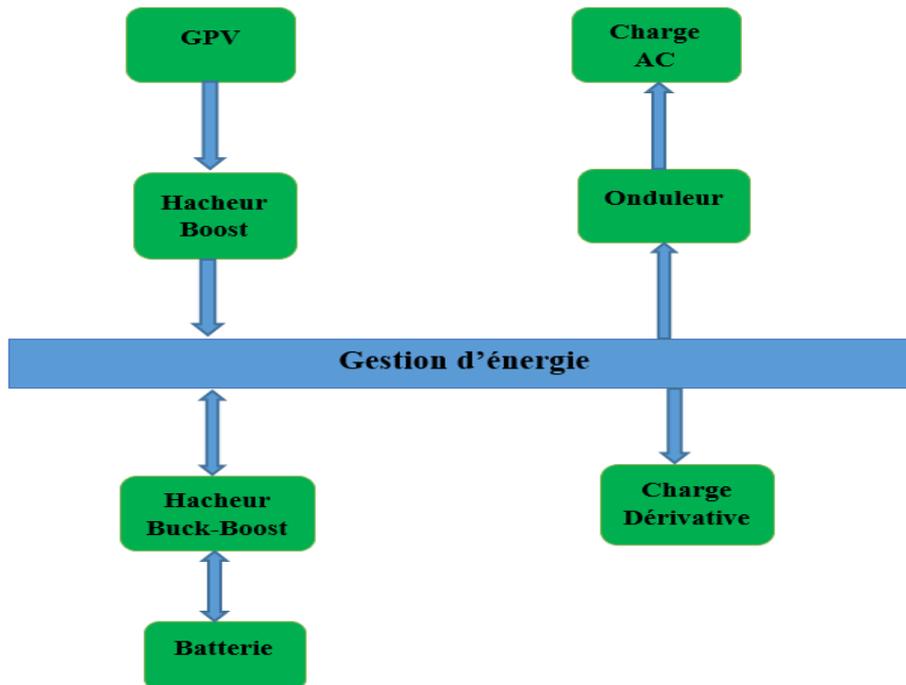
Le stockage intermittent de l'énergie photovoltaïque représente un défi, car peu de dispositifs acceptent une charge variable au fil du temps, caractérisée par des pics de courant suivis de périodes d'absence de courant, pouvant varier en durée. Dans notre cas, où un système photovoltaïque autonome alimente une charge dont les besoins énergétiques sont estimés à 23,55 kWh/jour, le système de gestion de l'énergie doit être conçu pour gérer les fluctuations importantes des courants d'entrée dues aux conditions météorologiques, ainsi que des courants de sortie en fonction des besoins de l'utilisateur en énergie.

Actuellement, les accumulateurs électrochimiques stationnaires à base de technologie au plomb dominent le marché des systèmes photovoltaïques. Avec une durée de vie estimée entre

3 et 5 ans [25], ces accumulateurs constituent environ 30% du coût total d'une installation photovoltaïque autonome.

### II.3. Présentation de système photovoltaïque avec stockage par batterie

C'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries



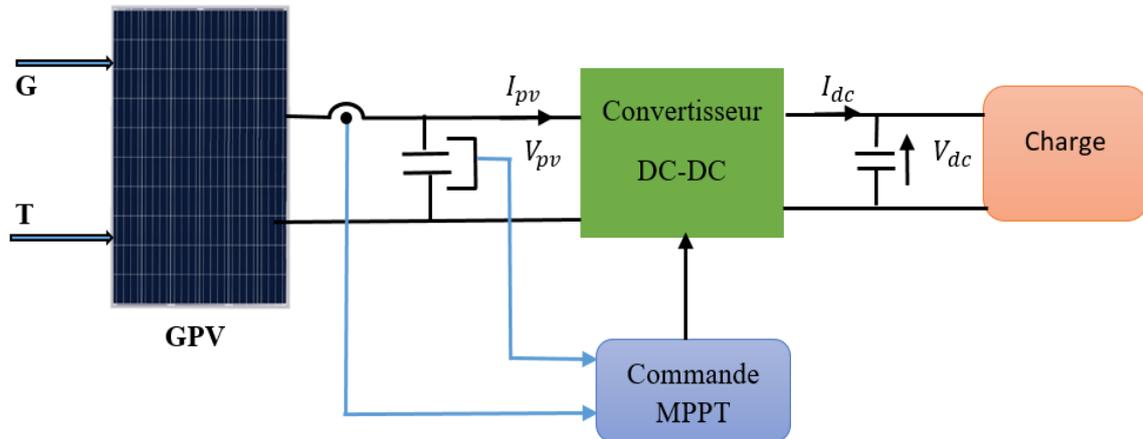
**Figure II. 1:** Schéma synoptique du système PV autonome avec stockage d'énergie

Un système photovoltaïque (PV) autonome est composé dans son ensemble d'un:

- Panneaux photovoltaïques.
- Moyen de stockage : électrochimique (batteries) ou électrique (super capacités).
- Hacheur permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum.
- Onduleur permettant d'alimenter les charges alternatives.
- Module de contrôle pour la charge et la décharge des batteries.

La source d'énergie de notre système est assurée par des panneaux photovoltaïques de  $270 W_c$ , les échanges d'énergies entre les composants se font à travers un bus continu de 4.

## II.4. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque



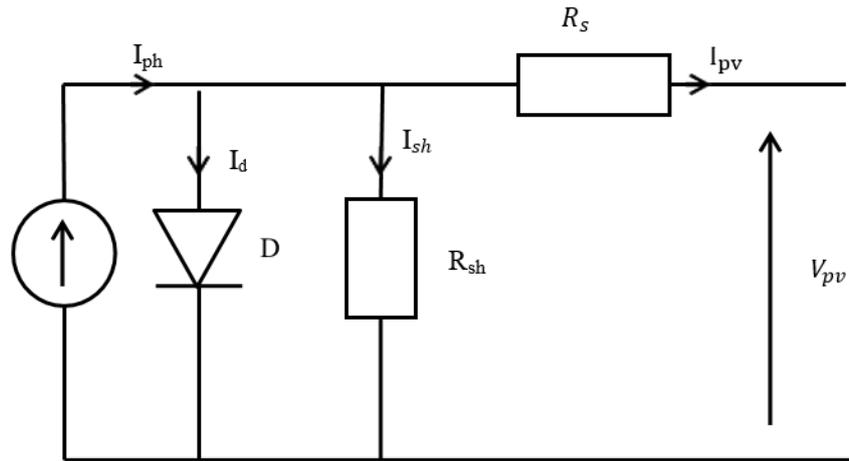
**Figure II. 2:** Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation

Un système photovoltaïque se compose de tous les éléments nécessaires pour convertir l'énergie solaire reçue en énergie électrique destinée à alimenter une charge spécifique adaptée à une application particulière. Il comprend, comme illustré dans la Figure (II.1), un générateur photovoltaïque, un convertisseur boost (hacheur survolteur) et un système de commande (MPPT).

### II.4.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Il existe de nombreuses études sur les modèles mathématiques des générateurs photovoltaïques. Nous avons choisi un modèle simplifié à cinq paramètres ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $R_s$ ) qui prend en compte la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions météorologiques.

Le schéma ci-dessous figure (II.2) représente l'équivalent d'un module photovoltaïque, comprenant un générateur de courant pour modéliser l'éclairement, une diode en parallèle pour modéliser la jonction PN, ainsi que des résistances en série et en parallèle pour tenir compte de l'effet résistif des défauts de fabrication.



**Figure II. 3:**Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque, modèle simplifié à une diode

D'après la figure (II.2), le courant  $I_{pv}$  du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement, est donné par l'équation (II.1) :

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

L'expression (II.1) s'écrit aussi de cette manière :

$$I_{pv} = I_{cc} \cdot [1 - K_1 \cdot (e^{K_2 \cdot V_{pv}^m} - 1)] \quad (\text{II.2})$$

Dans cette équation, le courant  $I_{pv}$  dépend des paramètres  $K_1, K_2, m$  et de la tension aux bornes du générateur PV.

Les coefficients  $K_2, K_3$  et  $K_4$  sont donnés par les équations suivantes :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (\text{II.3})$$

$$K_3 = \ln\left[\frac{I_{cc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{cc}}\right] \quad (\text{II.4})$$

$$K_4 = \ln\left[\frac{1+K_1}{K_1}\right] \quad (\text{II.5})$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{K_3}{K_4}\right]}{\ln\left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}}\right]} \quad (\text{II.6})$$

Il est à noter que l'équation (II.2) est applicable que pour un niveau d'ensoleillement  $G_{STC}$  et de température particulière ( $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{STC} = 25 \text{ °C}$ ). Relatifs aux conditions standards de fonctionnement (STC). Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque changent suivant ces équations :

$$\Delta T_c = T_c - T_{STC} \quad (II.7)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \cdot \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot \Delta T_c + \left( \frac{G}{G_{STC}} - 1 \right) \cdot I_{cc,STC} \quad (II.8)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (II.9)$$

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par

$$V_{pv, nouv} = V_{pv, STC} + \Delta V_{pv} \quad (II.10)$$

$$I_{pv, nouv} = I_{pv, STC} + \Delta I_{pv} \quad (II.11)$$

Les paramètres ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{co}$ ,  $V_{mpp}$ ) du module sous les conditions standard de fonctionnement c'est-à-dire ( $G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{STC}=25 \text{ °C}$ ) sont fournis par les constructeurs de panneaux photovoltaïques.

Chaque groupe de panneau est une association série-parallèle de  $N_s$ ,  $N_p$  cellule élémentaires. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons un GPV, selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées.

#### II.4.2. Bloc Simulink du modèle à une diode

Le bloc réalisé en utilisant l'environnement Matlab/Simulink est représenté sur figure (II.3). Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension ont été obtenues pour des conditions standards de fonctionnement (ensoleillement  $1000 \text{ w/m}^2$  et température  $25 \text{ °C}$ ). Les paramètres ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{co}$ ,  $V_{mpp}$ ) sous les conditions standards de fonctionnement ( $G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{stc}=25 \text{ °C}$ ) sont fournis par le constructeur de panneaux photovoltaïque et énuméré dans le tableau (II.1)

Puissance max du panneau $P_{mpp}$	270 W
Courant au point de puissance max $I_{mpp}$	8.52 A
Tension au point de puissance max $V_{mpp}$	31.7 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	9.21 A
Tension en circuit ouvert $V_{co}$	38.04 V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc}(\alpha_{cc})$	4.6 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{co}(\beta_{co})$	-114.12mV/°C

Tableau II.1 : Paramètres d'un panneau solaire [26]

Afin de retrouver les caractéristiques principales de notre panneau photovoltaïque, nous avons créé le modèle mathématique cité précédemment (modèle à une diode) sous conditions STC avec l'environnement Matlab/Simulink.

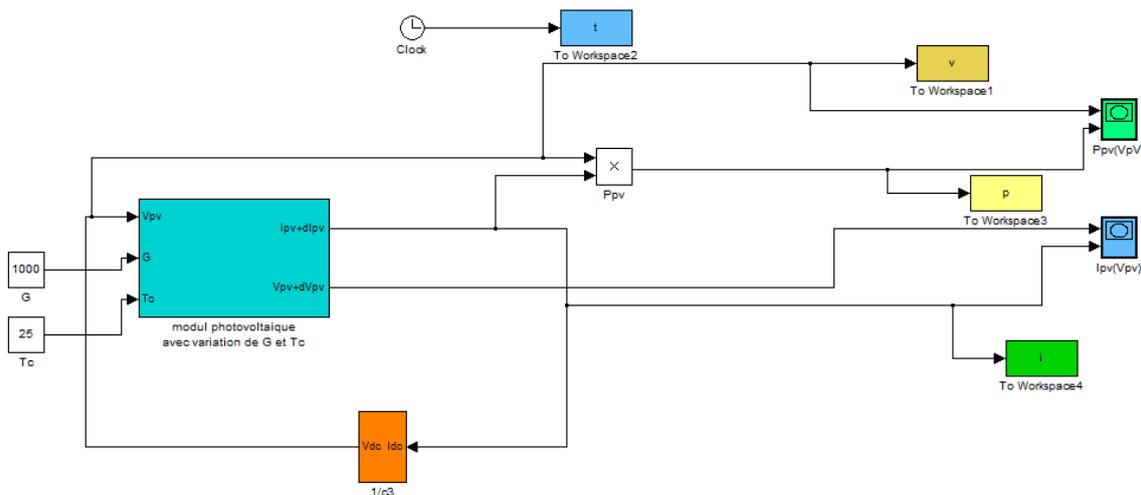
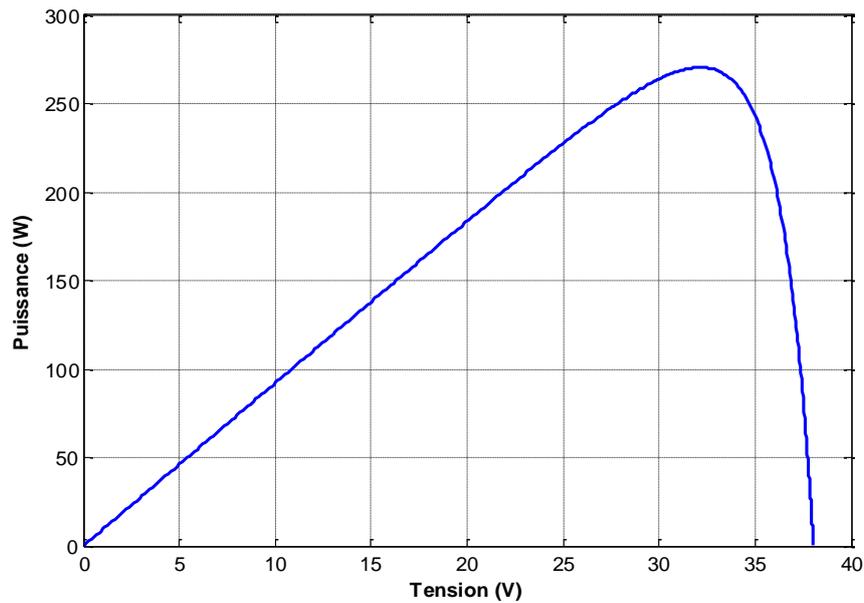


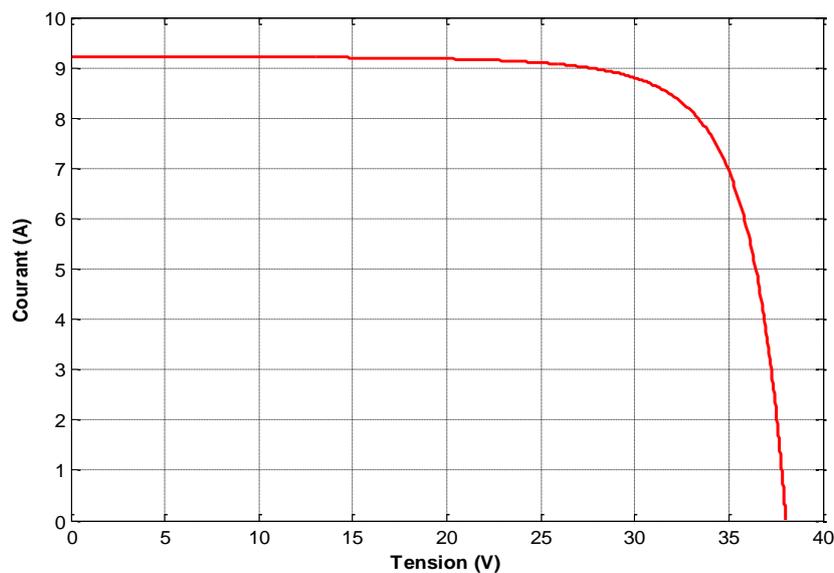
Figure II. 4:Schéma bloc du modèle à une diode.

#### II.4.2.1. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standard de fonctionnement à l'ensoleillement  $G = 1000\text{W/m}^2$  et à la température  $T = 25\text{C}^\circ$ .



**Figure II. 5:** Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  dans les conditions  $G_{stc}=1000\text{w/m}^2$ ,  $T_{stc}=25^\circ\text{C}$



**Figure II. 6:** Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  dans les condition  $G_{stc}=1000\text{w/m}^2$ ,  $T_{stc}=25^\circ\text{C}$

Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le modèle à une diode les résultats des caractéristiques Puissance-Tension et Courant- Tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque.

On remarque dans la caractéristique (courant-tension) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont :

- La zone (1) : le courant reste presque constant quel que soit la tension, pour cet intervalle, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (2) : qui se distingue dans par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.
- La zone (3) : correspond au coude de la caractéristique, la région intermédiaire en les deux zones précédentes, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

#### II.4.2.2 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

Nous avons validé ce modèle en simulant son fonctionnement avec une connexion directe du panneau photovoltaïque à une charge capacitive. Pour ce faire, nous avons étudié les variations des caractéristiques courant-tension et puissance-tension à différents niveaux d'irradiation, tout en maintenant la température constante. De même, nous avons observé ces caractéristiques pour différentes températures tout en maintenant l'irradiation constante.

##### II.4.2.2.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Pour voir l'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module, en fait varier la valeur de l'ensoleillement ( $1000\text{W/m}^2$ ,  $800\text{W/m}^2$ ,  $600\text{W/m}^2$ ,  $400\text{W/m}^2$ ) en gardant la température constante ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ ) et en trace les caractéristiques  $P_{pv}-V_{pv}$  et  $I_{pv}-V_{pv}$ .

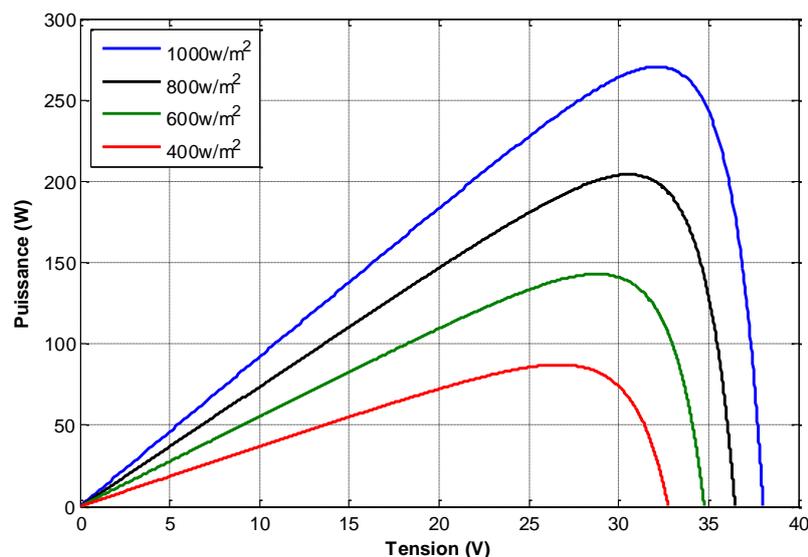
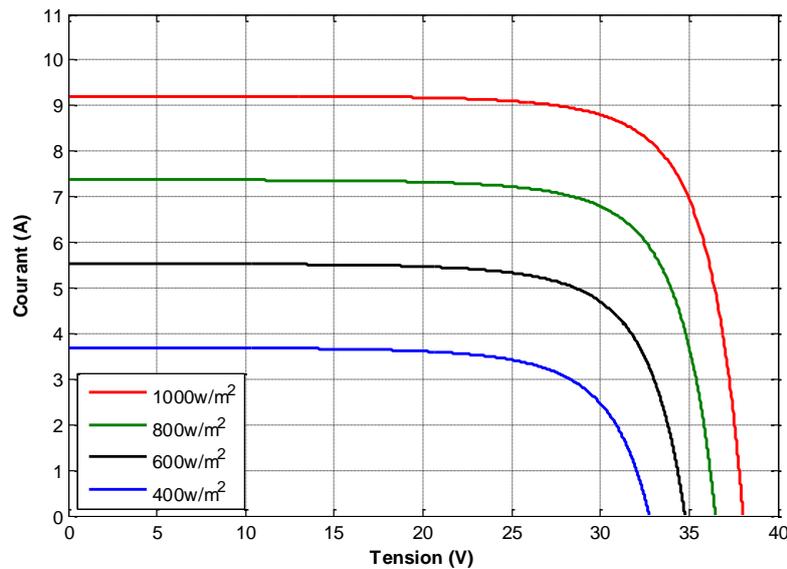


Figure II. 7:Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique Ppv (Vpv).



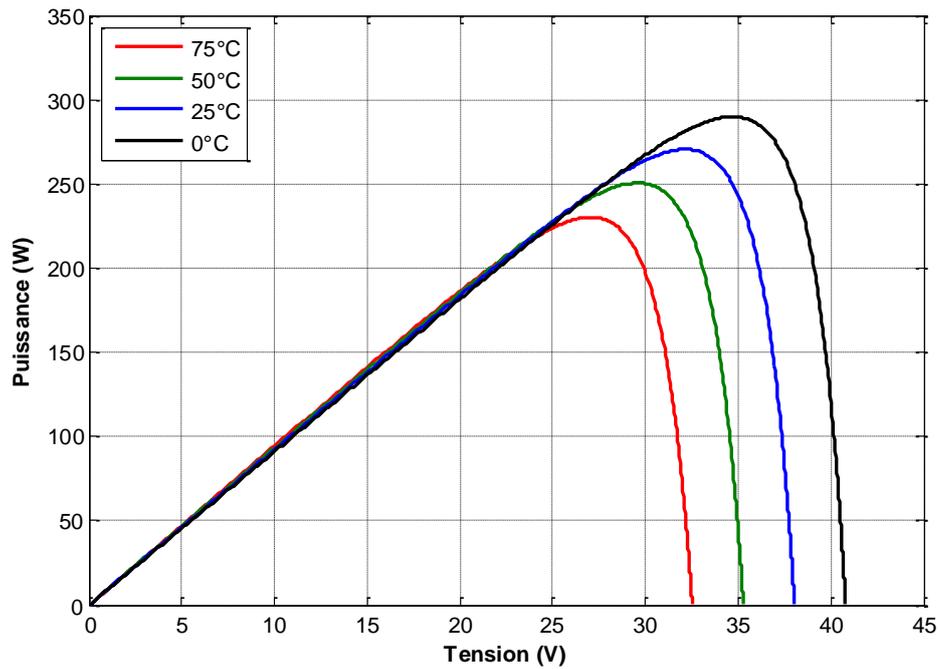
**Figure II. 8:** Influence de l'insolation sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ .

D'après ces résultats on remarque que :

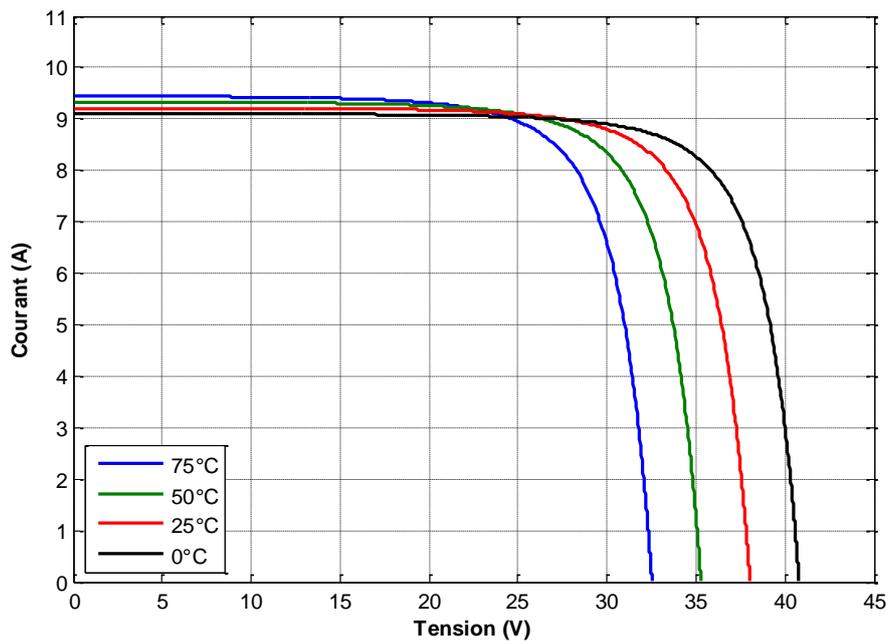
- La diminution de l'éclairement entraîne une forte baisse du courant de court-circuit  $I_{CC}$ , tandis que la tension de circuit ouvert  $V_{Co}$  diminue de manière moins prononcée.
- Le point de puissance optimale chute brusquement si l'insolation diminue.
- Le courant généré par le module, représenté par  $I_{ph}$ , est essentiellement proportionnel à l'intensité lumineuse  $G$ . En revanche, la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est déterminée par la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même.

#### II.4.2.2.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques  $P_{pv}-V_{pv}$  et  $I_{pv}-V_{pv}$ , pour des différentes températures (0°C, 25°C, 50°C, 75°C) et avec un ensoleillement constant  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .



**Figure II. 9** Influence de la température sur la caractéristique Ppv(Vpv).



**Figure II. 10:**Influence de la température sur la caractéristique Ipv= (Vpv)

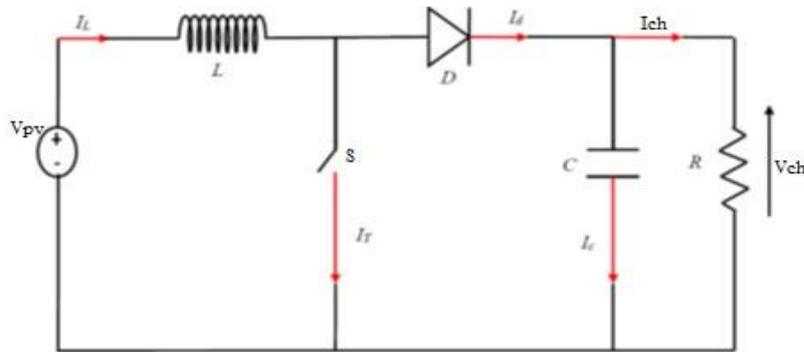
On remarque que :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est légèrement dépendant de la température, alors que la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  est très sensible à la variation de la température.

➤ L'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de température.

### II.5. Modèle d'un hacheur survolteur (boost)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension d'une source continue, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de principe est montré dans la figure (II-10) [27].



**Figure II. 11:**circuit électrique de l'hacheur boost

Nous avons choisi d'utiliser le convertisseur Boost dans notre système, car sa structure est simple et il offre un gain en tension plus élevé que d'autres types de convertisseurs pour un rapport cyclique donné. Cette décision est motivée par notre objectif de maximiser la puissance à partir du panneau photovoltaïque en utilisant une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale (MPPT) [27].

D'après la figure précédente de l'hacheur survolteur :

Lorsque l'interrupteur (S) est fermé :

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \tag{II.12}$$

$$0 = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \tag{II.13}$$

Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} + V_{ch} \tag{II.14}$$

$$I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \tag{II.15}$$

En posant  $u = 1$  lorsque l'interrupteur S est fermé et  $u = 0$  pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique. En valeurs moyennes, la

tension de sortie est en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique. Son expression est donnée par l'équation (II.13). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique [28].

$$V_{ch} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \tag{II.16}$$

$$I_{ch} = (1-\alpha) I_L \tag{II.17}$$

La réalisation du modèle de cet hacheur c'est fait sous Matlab/Simulink comme le montre la figure (II-11) :

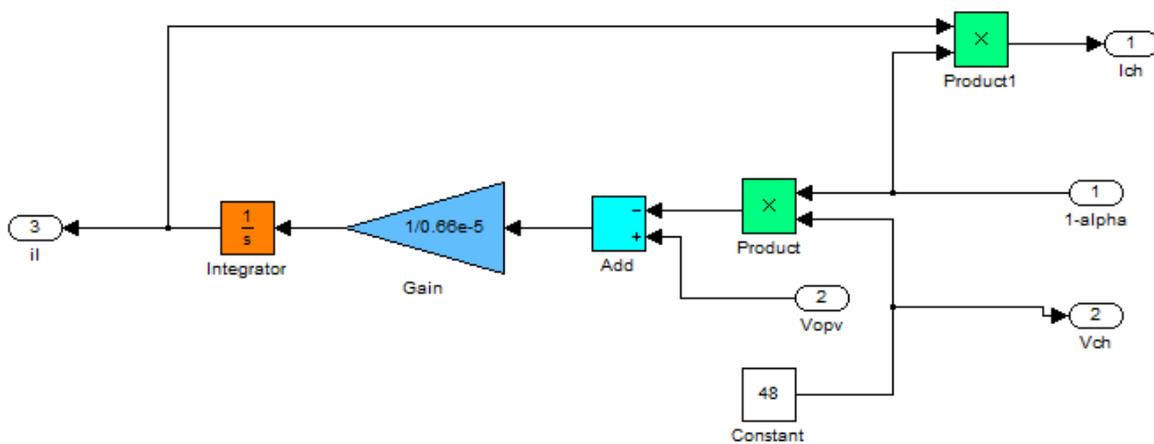


Figure II. 12: schéma bloc de l'hacheur survolteur

### II.6. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT))

Pour garantir le fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque (GPV) à son point de puissance maximale (MPP), on recourt souvent à un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce dispositif vise à minimiser l'écart entre la puissance de fonctionnement réelle et la puissance maximale de référence, laquelle varie en fonction des conditions climatiques.

Une commande MPPT, combinée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de maintenir le générateur PV en permanence à son rendement maximal. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et éclairage), le système est ajusté par la commande du convertisseur pour opérer au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

Pour optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, diverses méthodes peuvent être employées. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode Perturbation et Observation (P&O) [28].

### II.6.1. La méthode perturbation et observation

La méthode Perturbation et Observation (P&O) est largement préférée en raison de sa simplicité ; elle requiert une simple boucle de rétroaction et peu de mesures. Elle fonctionne en perturbant intentionnellement la tension aux bornes des panneaux solaires (soit en l'augmentant, soit en la diminuant), puis en comparant la puissance obtenue avant et après la perturbation.

Plus précisément, si la puissance augmente suite à la perturbation, la prochaine perturbation est effectuée dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, la perturbation suivante est effectuée dans le sens opposé [29].

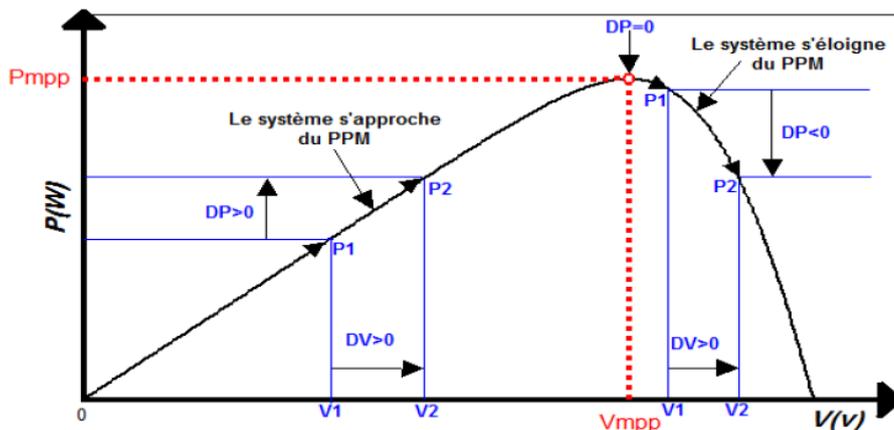


Figure II. 13: Caractéristique  $P=f(V)$  et fonctionnement de la méthode PO

La figure (II.13) représente l'algorithme associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant. L'algorithme de la méthode perturber et observer est illustré à la figure (II.13).

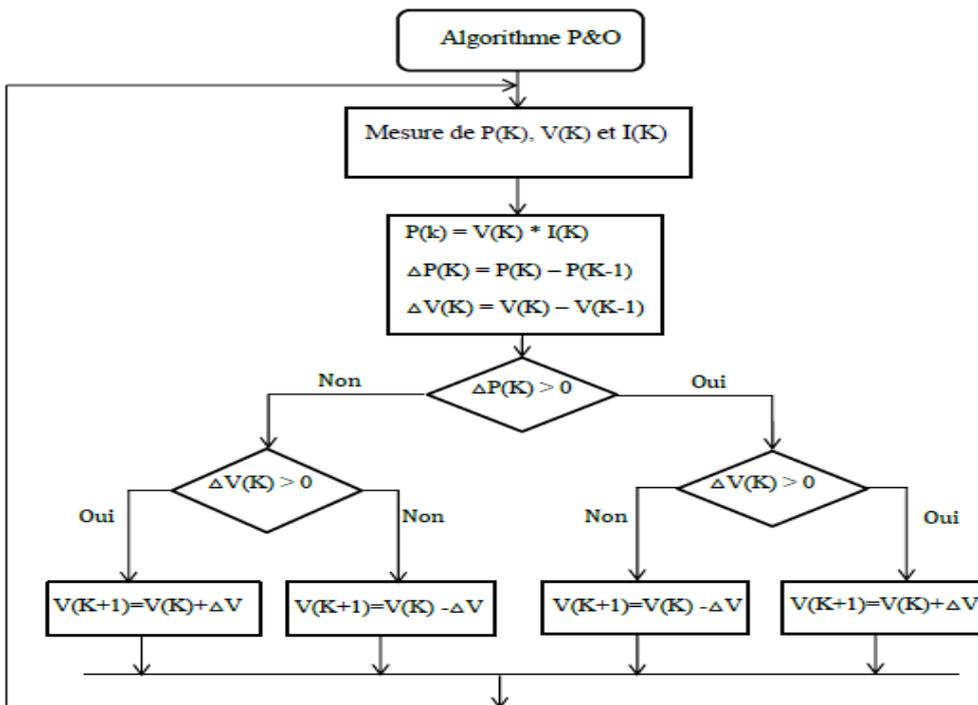


Figure II. 14: Organigramme de l’algorithme P&O

II.6.2. Résultats de simulation de la méthode perturbation et observation

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions STC (G=1000W/m<sup>2</sup>, T=25C°) par la commande MPPT (P&O) en suivant l’organigramme de cette méthode, les résultats de simulation sont les suivants:

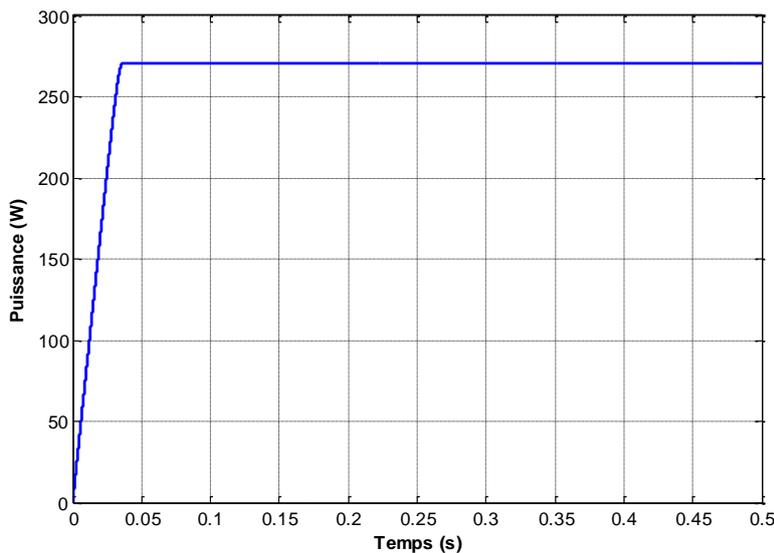
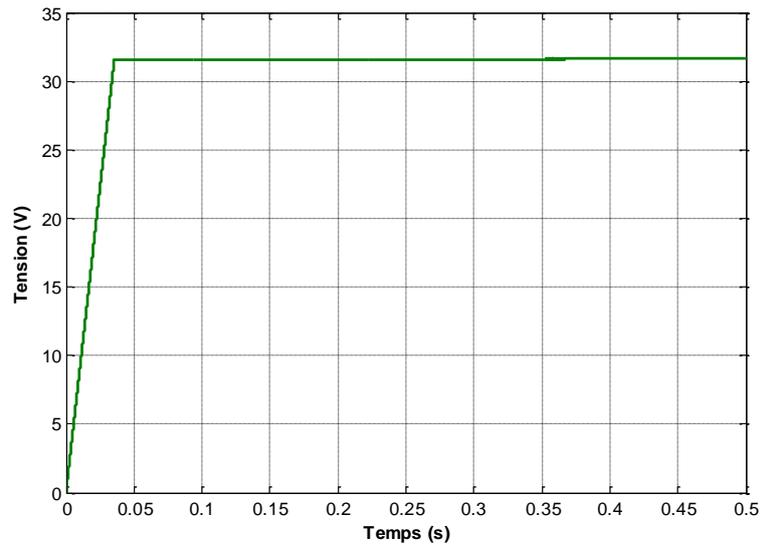
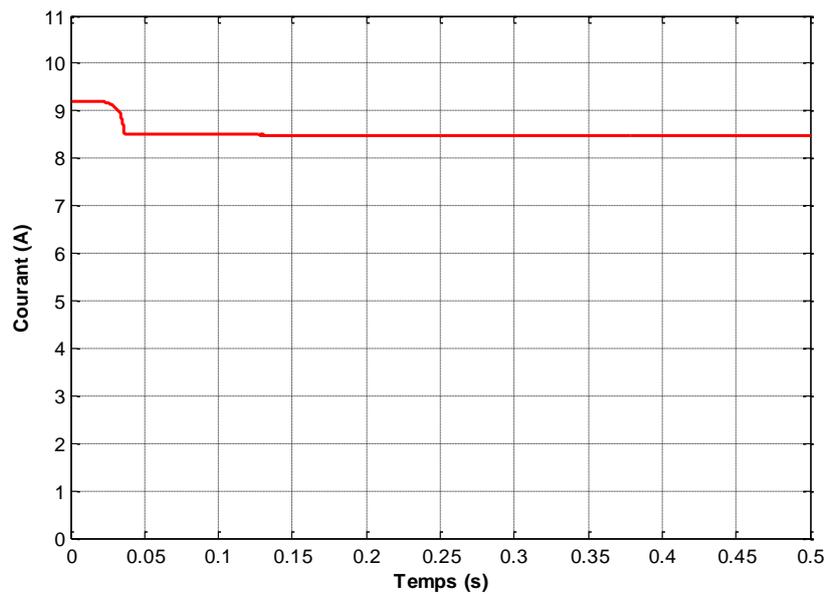


Figure II. 15: Courbe de puissance (P&O)



**Figure II. 16:** Courbe de tension (P&O).



**Figure II. 17:** Courbe de courant (P&O)

Suite aux résultats de simulation, il est observé que les courbes de puissance, tension et courant entrent en régime permanent une fois que le point de puissance maximale est atteint. Cela signifie que ces paramètres se stabilisent à des valeurs constantes une fois que le système est optimisé pour maximiser la production d'énergie solaire.

### II.6.3. Caractéristique électrique du module photovoltaïque avec l’algorithme MPPT

Les caractéristiques de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque sont présentées ci-dessous en utilisant l'algorithme d'optimisation MPPT, afin d'extraire la puissance maximale en fonction de la variation de l'ensoleillement et de la température.

Pour évaluer l’efficacité de l’algorithme MPPT utilisé dans le système de conversion photovoltaïque avec stockage, nous avons effectué divers tests afin d’évaluer les perturbations causées par les fluctuations de l’ensoleillement et de la température.

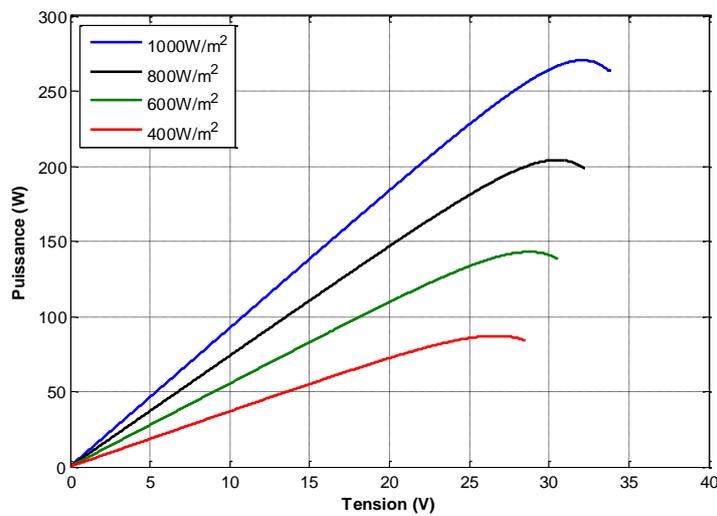


Figure II. 18: Réponse de l’algorithme P&O pour différentes variations de l’ensoleillement à Température constante (T=25°C) sur la caractéristique Ppv(Vpv)

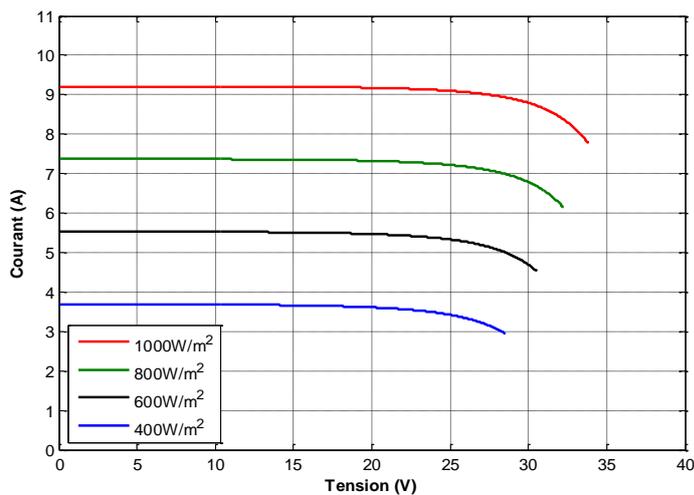
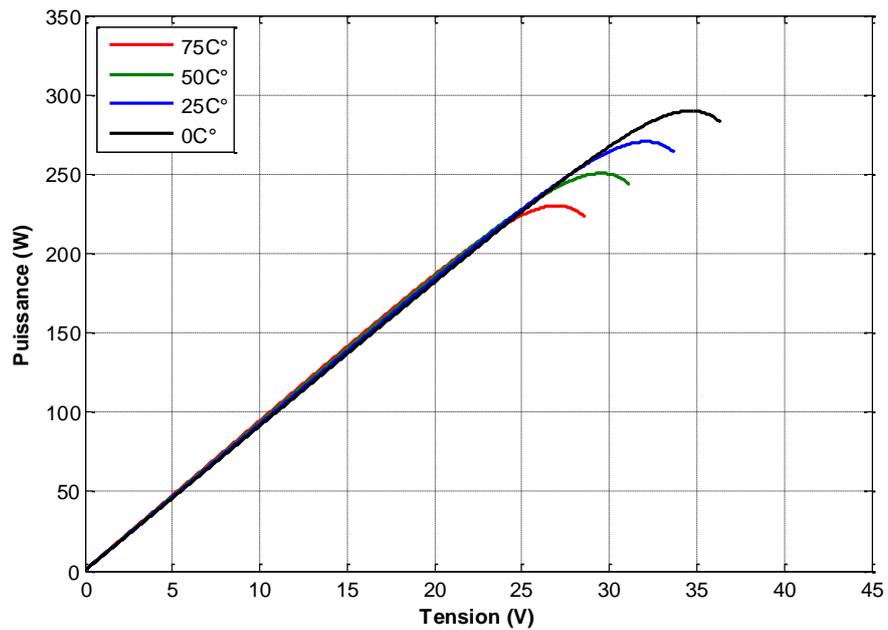
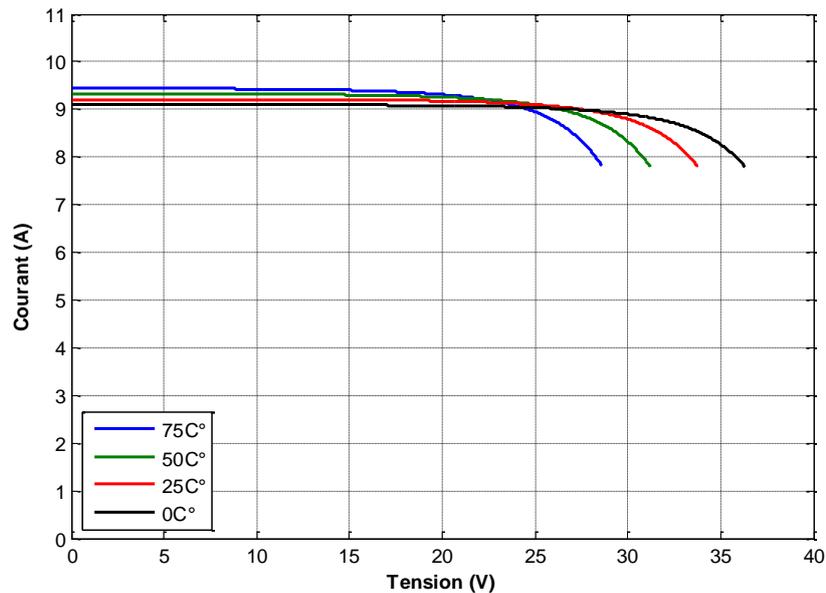


Figure II. 19: Réponse de l’algorithme P&O pour différentes variations de l’ensoleillement à Température constante (T=25°C) sur la caractéristique Ipv(Vpv)



**Figure II. 20:** Réponse de l’algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ( $G=1000W/m^2$ ) sur la caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ )



**Figure II. 21:** Réponse de l’algorithme P&O pour différentes valeurs de températures pour un ensoleillement constante ( $G=1000W/m^2$ ) sur la caractéristique  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ )

Pour les deux tests on remarque toujours une convergence de la puissance vers le point de puissance maximal (PPM), le courant converge également vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximale.

## II.7. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque

Les performances des systèmes photovoltaïques dépendent étroitement de l'état de leur système de stockage. Pour atteindre un équilibre optimal entre précision et simplicité, on adopte souvent un modèle basé sur l'observation des processus physico-chimiques de charge et de décharge du système de stockage.

### II.7.1. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs types de batteries au plomb, chacun avec ses propres caractéristiques et défis lors de leur utilisation. La complexité de leur mise en œuvre réside dans la prise en compte de multiples paramètres. Étant donné que les batteries réagissent différemment selon les applications et les contraintes, il n'existe pas de modèle universel qui soit précis dans toutes les situations. Pour éviter une complexité excessive, on se tourne souvent vers le modèle R-C, également appelé modèle simple. Contrairement à d'autres modèles couramment utilisés, le modèle R-C ne nécessite pas l'identification de paramètres empiriques à partir d'expériences. De plus, il permet de choisir un simulateur à pas fixe, ce qui est adapté à la période de découpage des convertisseurs.

Le modèle R-C comprend une tension à vide  $E_0$  qui représente la tension de la batterie sans charge, un condensateur qui simule la capacité interne de la batterie ( $C_{bat}$ ), et une résistance interne ( $R_s$ ) [30].

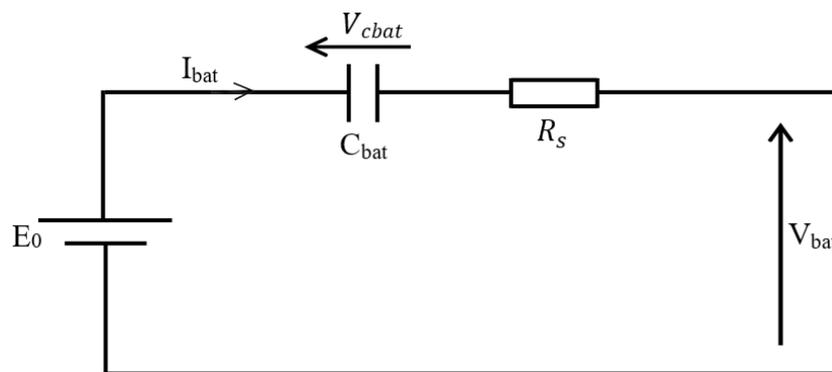


Figure II. 22:Modèle R-C de la batterie

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{cbat} \quad (II.18)$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \int I dt \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$C_{bat}$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

### II.7.2. Charge et décharge d'une batterie au plomb

Notre objectif est d'étudier le comportement d'un système photovoltaïque autonome sur plusieurs jours tout en prenant en compte toutes les charges sollicitées. La fiabilité des convertisseurs est cruciale, ce qui nous oblige à garantir la robustesse de leur boucle de commande lors des simulations. Cependant, imposer un pas de calcul correspondant au temps de commutation des interrupteurs entraînerait des temps de calcul extrêmement longs, de l'ordre de plusieurs jours pour simuler seulement quelques heures.

Pour contourner cette contrainte, nous avons opté pour un changement d'échelle temporelle, où une seconde correspond à une heure.

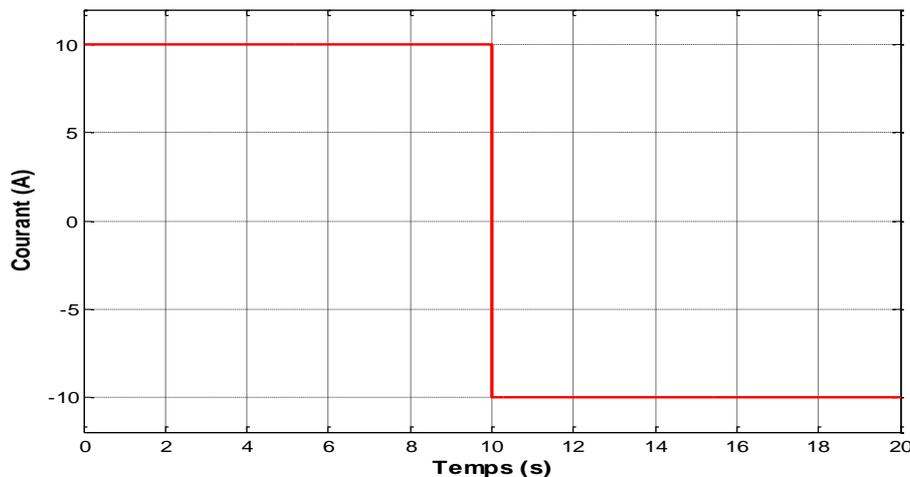
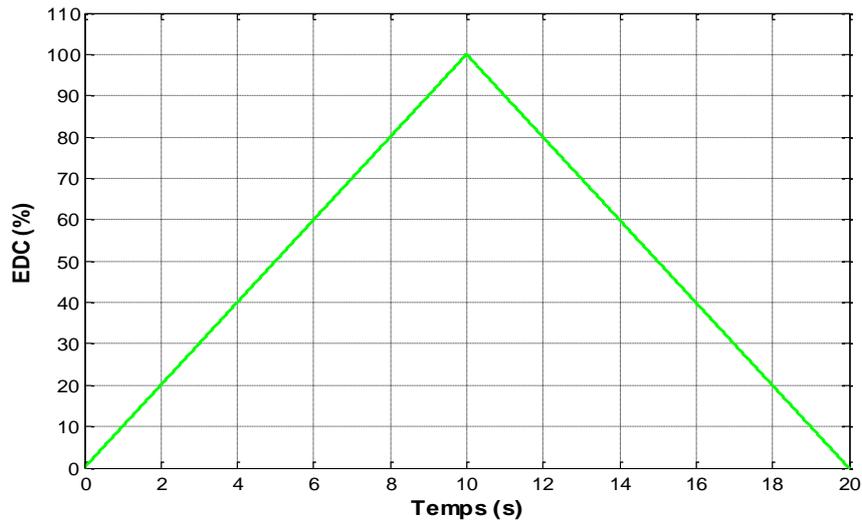
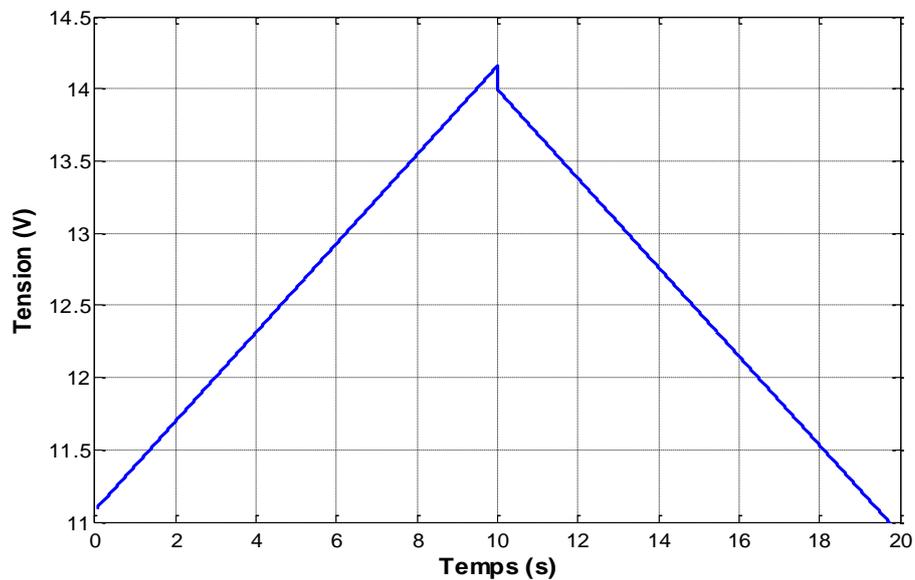


Figure II. 23: Allure de Courant de la batterie



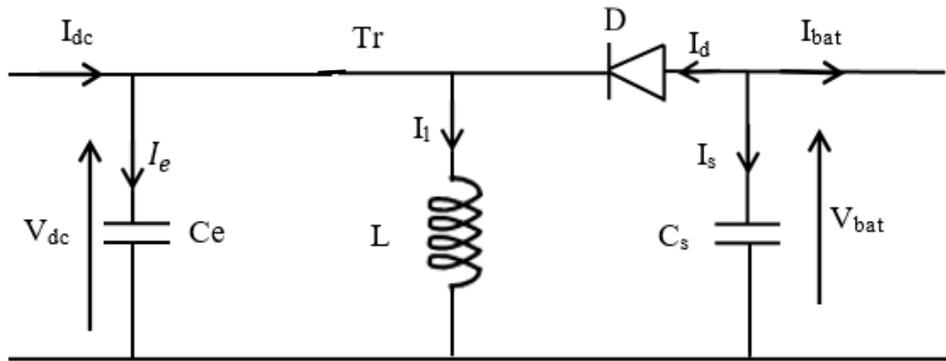
**Figure II. 24:** Allure d'Etat de charge de la batterie



**Figure II. 25:** Allure de tension de la batterie

## II.8. Modélisation du convertisseur DC-DC côté unité de stockage

Le convertisseur Buck-Boost fonctionne comme un inverseur de tension avec stockage inductif. En sortie, la tension est toujours de polarité opposée à celle en entrée. Lorsque le transistor est activé, le courant dans l'inductance augmente, permettant ainsi le stockage de l'énergie. En revanche, lorsque le transistor est désactivé, la tension à travers l'inductance est inversée, ce qui entraîne le transfert de l'énergie stockée vers la charge via la diode [31].



**Figure II. 26:** Schéma d'un hacheur Buck-Boost

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{bat} = - \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_{dc} \quad (\text{II.20})$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire:

$$I_{bat} = - \frac{(1-\alpha)}{\alpha} I_{dc} \quad (\text{II.21})$$

Pour les ondulations données, les valeurs des capacités et de la bobine de l'hacheur peuvent être déterminées comme suit :

$$L = \frac{V_{dc} - R_l I_l}{2\Delta I_l} \alpha T \quad (\text{II.22})$$

$$C_e = \frac{V_{dc} - I_l}{2\Delta V_{dc}} \quad (\text{II.23})$$

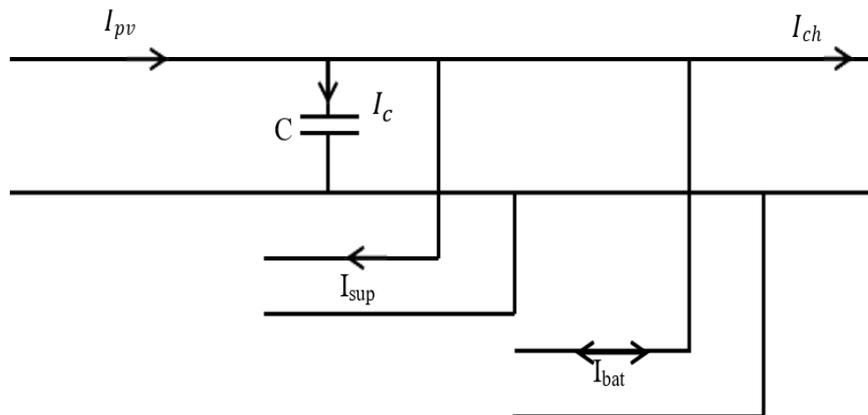
$$C_s = - \frac{I_d}{2\Delta V_{bat}} \alpha T \quad (\text{II.24})$$

Avec :

- $\Delta I_l$ : ondulation du courant ;
- $\Delta V_{bat}$ : ondulation de la tension de la sortie ;
- $R_l$ : résistance interne de la bobine ;

### II.9. Modèle du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension.



**Figure II. 27:** Schéma du bus continu

D'après la figure (II.27), on a :

$$I_{ch} = I_{pv} - I_c - I_{sup} - I_{bat} \quad (\text{II.25})$$

$$I_c = \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.26})$$

Tel que :  $I_{pv}$  est négatif étant donné c'est une source de production d'énergie.

### II.10. Gestion d'énergie du système photovoltaïque

Les batteries rechargeables sont couramment utilisées dans les systèmes photovoltaïques autonomes pour stocker l'énergie excédentaire et alimenter les charges de faible à moyenne puissance. Les batteries au plomb-acide sont préférées en raison de leur coût abordable, de leur maintenance aisée et de leur adaptabilité à diverses applications. Cependant, elles sont sensibles aux surcharges, aux décharges profondes ainsi qu'aux variations de température et de courant.

Pour contrer ces défis, il est nécessaire d'intégrer un module de supervision dans le système. Ce module surveille et régule les échanges d'énergie entre les composants du système, tout en gérant le processus de charge et de décharge des batteries. En somme, les batteries au plomb-acide requièrent une surveillance minutieuse pour garantir leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie dans les systèmes photovoltaïques autonomes [32].

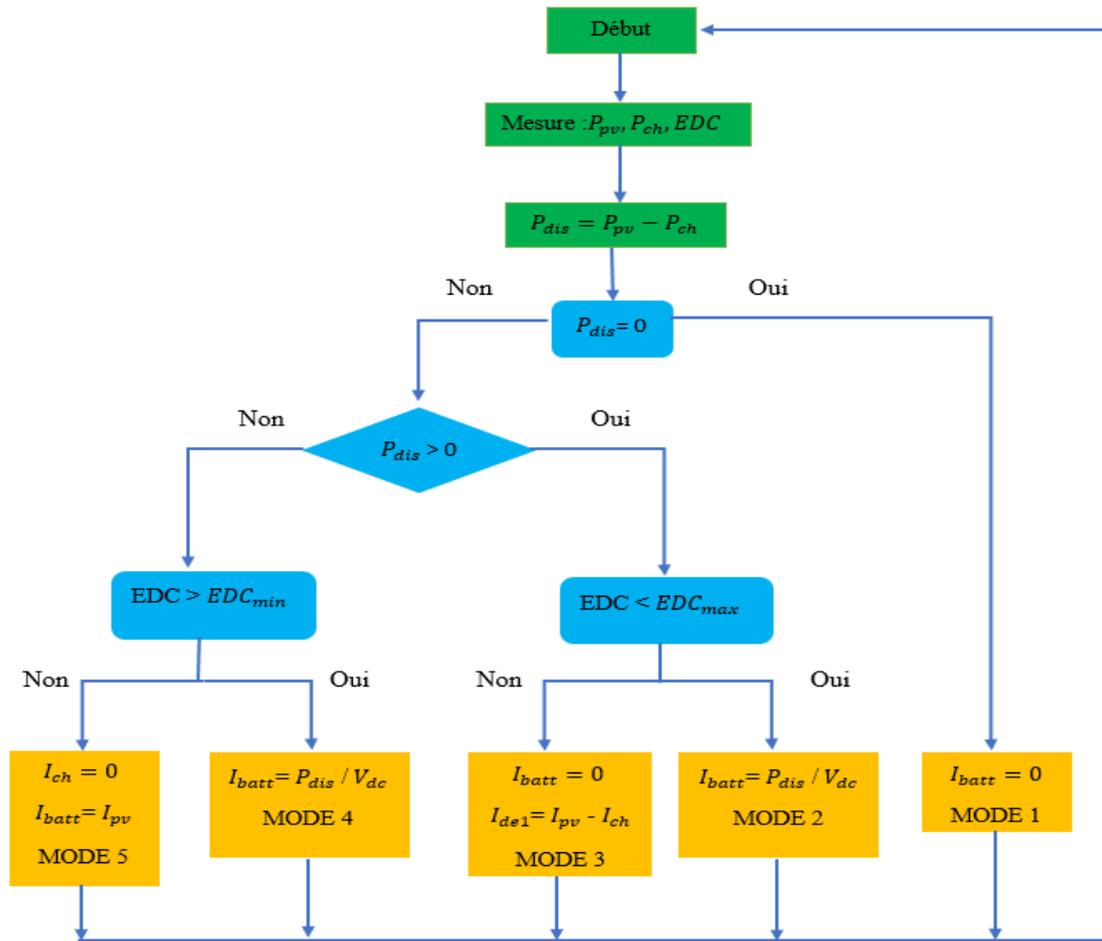


Figure II. 28: Algorithme de gestion d'énergie du système photovoltaïque

A partir de cet algorithme, on peut définir les modes de fonctionnement de ce système de gestion.

Soit  $P_{pv}$  la puissance fournie par les panneaux et  $P_{ch}$  la puissance demandée par la charge, la différence entre ces deux puissances est noté  $P_{dis}$  (puissance disponible) nous obtenons :

$$P_{dis} = P_{pv} - P_{ch} \quad (\text{II.27})$$

➤ **Modes de fonctionnement :**

- **Mode 1:** Dans ce cas, la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.

- **Mode 2:** Quand la puissance disponible est supérieure à la puissance demandée par la charge, et que l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{max}$  (90%), on alimente la charge et on charge la batterie.
- **Mode 3:** Quand la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{max}$  (90%), on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par les panneaux photovoltaïques, et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage.
- **Mode 4:** Ce cas représente la situation où la puissance photovoltaïque est inférieure à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{min}$  (30%).
- **Mode 5:** Dans ce cas, la puissance photovoltaïque est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{min}$  (30%), donc on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible.

### II.11. Modélisation de l'onduleur

Un onduleur est un appareil de conversion d'énergie électronique qui transforme un courant continu en courant alternatif. Il est composé de cellules de commutation, généralement des transistors, organisés en trois bras. Chaque bras comprend deux interrupteurs, montés en antiparallèle avec une diode de récupération pour assurer la continuité du courant, comme illustré dans le schéma ci-dessous.:

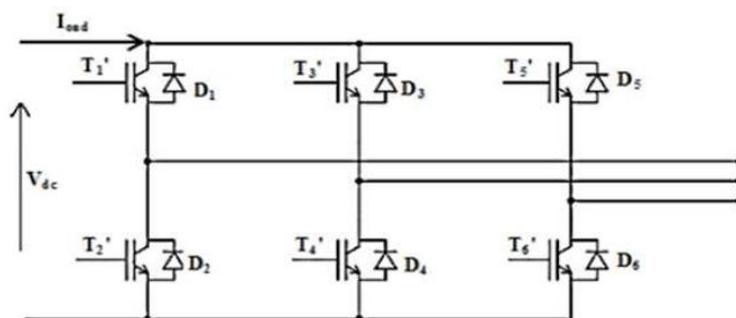


Figure II. 29: Schéma de l'onduleur

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{cha} \\ V_{chb} \\ V_{chc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$I_{ond} = S'_a i_{cha} + S'_b i_{chb} + S'_c i_{chc} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

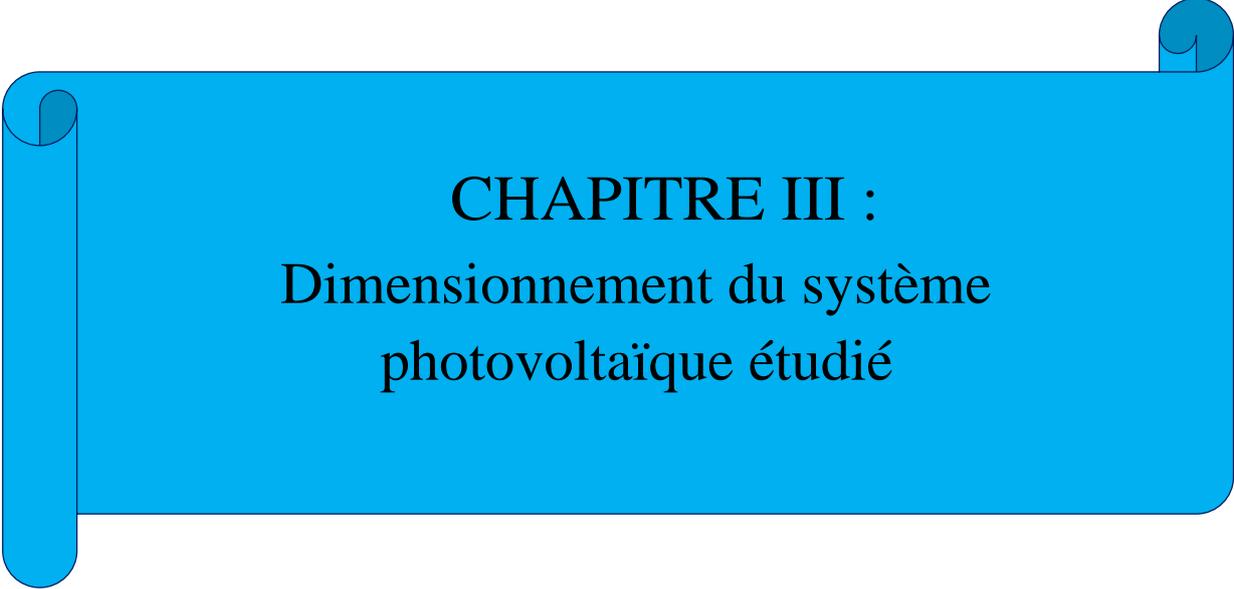
$I_{ond}$  : le courant ondulé par l'onduleur ;

$S'_a, S'_b, S'_c$  : sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égale à 1 si l'interrupteur est fermé ou égale à 0 dans le cas contraire).

## II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les différentes composantes d'un système photovoltaïque ainsi que la modélisation du générateur PV. Nous avons également analysé le comportement du système et ses performances sous l'influence de divers paramètres météorologiques tels que l'ensoleillement et la température, en visualisant les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module photovoltaïque.

Ensuite, nous avons procédé à la modélisation des autres éléments de l'installation photovoltaïque, notamment le panneau photovoltaïque, le convertisseur DC/DC, le MPPT, la batterie et l'onduleur. Dans la section suivante, nous allons aborder le dimensionnement du système étudié.

A blue scroll graphic with a white border, featuring a vertical strip on the left side and a small circular detail at the top right corner. The text is centered within the scroll.

**CHAPITRE III :**  
Dimensionnement du système  
photovoltaïque étudié

### III.1 Introduction

Actuellement, il existe plusieurs approches pour exploiter les énergies renouvelables dans les habitations, et nous nous concentrons particulièrement sur l'utilisation de l'énergie solaire. Pour réaliser une installation photovoltaïque, il est crucial de réaliser divers calculs afin de choisir le matériel le mieux adapté pour répondre aux besoins énergétiques de manière efficiente et économique. Ce processus est ce qu'on appelle le dimensionnement.

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur le dimensionnement d'une installation photovoltaïque, ce qui implique de déterminer la taille optimale du générateur photovoltaïque, la capacité nécessaire des batteries, le choix de l'onduleur compatible, les besoins électriques spécifiques de l'utilisateur. Notre objectif principal est de présenter les méthodes de dimensionnement les plus efficaces pour couvrir le besoin énergétique de l'utilisation.

### III.2. Dimensionnement du système photovoltaïque

#### III.2.1 Choix des méthodes de dimensionnement

Parmi les différentes méthodes de dimensionnement des systèmes photovoltaïques, nous nous concentrons sur la méthode du mois le plus défavorable, réputée pour sa simplicité et sa fiabilité. Cette approche consiste à estimer l'énergie récupérable sur une période critique d'un mois, souvent désigné comme le mois présentant le moins d'irradiation solaire de l'année. Dans certains pays, cela correspond à la saison hivernale, caractérisée par des conditions climatiques rigoureuses [33].

##### III.2.1.1 La méthode du mois le plus défavorable

L'irradiation solaire joue un rôle crucial dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. Dans cette approche, on évalue les besoins énergétiques pendant le mois présentant le moins d'irradiation de l'année, souvent appelé le mois le plus défavorable. En Algérie, par exemple, ce mois peut correspondre à décembre, qui est généralement la période hivernale. Le choix de ce mois dépend du climat local et de l'usage prévu de l'installation.

Il est important de déterminer le nombre de jours d'autonomie maximal que la batterie doit pouvoir assurer pendant les périodes sans ensoleillement. Si le bilan énergétique montre que le système peut fonctionner pendant cette période, alors sa performance est garantie tout au long de l'année.

### ➤ *Domaines d'applications :*

- Les installations de télécommunication.
- Les centres de soins des zones rurales.
- Cette méthode est utilisée généralement pour les systèmes autonomes.

### III.2.1.2 Méthode de la moyenne annuelle

Elle est proche de celle du mois le plus défavorable. Elle utilise aussi l'irradiation journalière (**kWh/m<sup>2</sup>. J**). Mais pour la moyenne qui s'étend sur toute l'année au lieu d'un seul mois. Et par conséquent on calcule la moyenne annuelle de l'énergie récupérable sur un site pour les 12 mois.

### ➤ *Domaines d'applications :*

- Elle est utilisable sur tous les systèmes, plus précisément les systèmes ayant un profil de charge assez élevé.
- C'est la méthode la plus appliquée au système photovoltaïque hybride.

### III.3. Le gisement solaire

L'optimisation des performances des installations photovoltaïques repose fondamentalement sur une évaluation précise du gisement solaire local.

Du fait de sa position géographique privilégiée, l'Algérie bénéficie d'un des niveaux d'irradiation solaire les plus élevés au monde. La plupart des régions du pays bénéficient de plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, avec des pics pouvant atteindre 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara [34].

### III.4. Présentation de site d'installation :

Dans ce travail, nous allons présenter un dimensionnement d'un système PV autonome destiné à alimenter une mosquée « Khaled ibn Walid » située au niveau de la commune Oued Ghir, wilaya de Bejaia. Ses coordonnées géographiques sont :

Latitude (N)	Longitude (E)	L'altitude (m)
36.710	4.975	145

Tableau III.1 : Les coordonnées géographiques de la mosquée

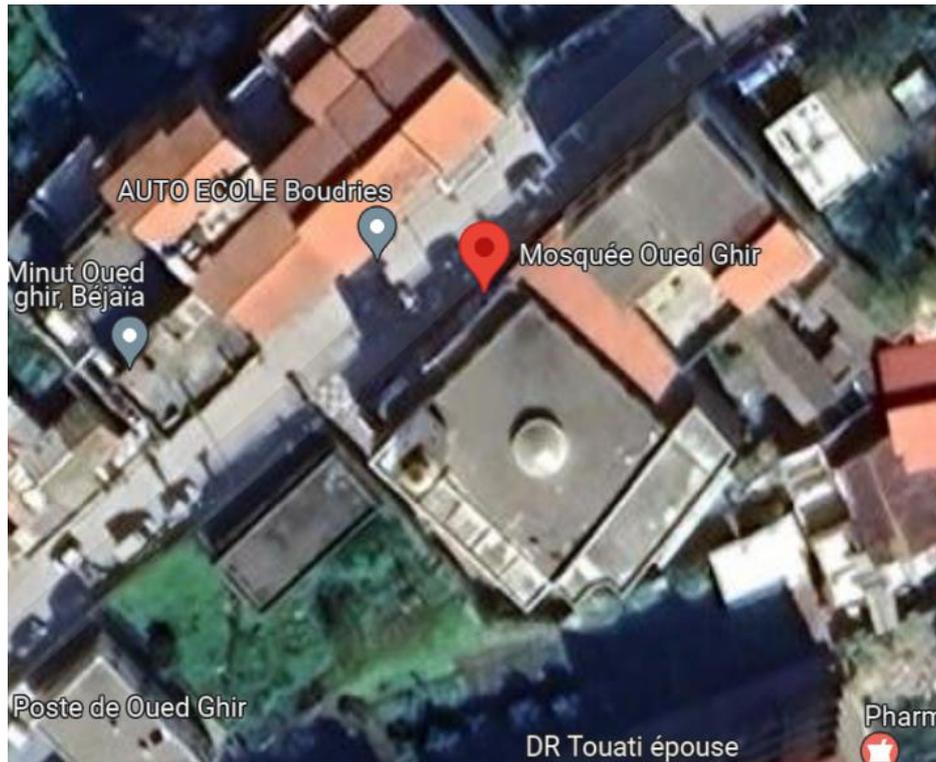


Figure III.1 : Site de la mosquée d'Oued Ghir

### III.5. Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV

Les informations sur l'ensoleillement, mesurées en kWh/m<sup>2</sup>/j, peuvent être obtenues sur le terrain, à partir de cartes régionales de l'ensoleillement ou en consultant les données de la station météorologique la plus proche. Pour assurer une autonomie totale et minimiser les variations saisonnières de la consommation, il est recommandé de se référer à l'ensoleillement du mois le plus défavorable [35], le tableau (III.2) montre Irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45°.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc
Gj(KWh/j/m <sup>2</sup> )	2,4	3,1	3,6	5,3	5,7	6,7	6,9	6,2	4,9	3,8	2,6	2,3

**Tableau III. 2** :Irradiation globale moyenne mensuelle sur un plan incliné de 45° à Bejaia [13]

L'orientation des panneaux photovoltaïques par rapport au soleil est cruciale pour optimiser leur production énergétique. Il est essentiel de les placer correctement pour en tirer le meilleur parti. L'orientation fait référence au point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest, etc.). L'inclinaison, exprimée en degrés, représente l'angle entre le panneau et le plan horizontal. Idéalement, un panneau photovoltaïque devrait être orienté vers l'équateur pour bénéficier d'une exposition solaire maximale.

Ce qui donne l'orientation vers :

- Le sud dans l'hémisphère nord.
- Le nord dans l'hémisphère sud.

Pour optimiser la production d'énergie solaire, l'inclinaison des panneaux photovoltaïques doit être ajustée en fonction de la période de l'année, notamment en se basant sur les deux méthodes le mois le plus défavorable et de la moyenne annuelle. Les panneaux doivent être positionnés de manière à capturer efficacement l'énergie solaire même lorsque le soleil est bas sur l'horizon. Cette inclinaison est déterminée en tenant compte de la latitude du site et de la périodicité des changements d'inclinaison.

Dans le cas de l'étude menée à Bejaia, la position optimale des modules sera définie de la manière suivante [36]:

- ✓ Orientation des panneaux : plein sud.
- ✓ L'inclinaison (45°).

### III.5.1. L'estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité

La consommation énergétique moyenne quotidienne E (Wh/j) correspond à la somme des consommations énergétiques des différents équipements qui composent le système à étudier, tels que les climatiseurs, les ventilateurs, les lampes d'éclairage, etc... La loi suivante fournit cette information. [37] :

$$E_t = \sum E_i \tag{III.2}$$

Ainsi, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit [38] :

$$E_i = P_i * t_i \tag{III.3}$$

L'énergie journalière consommée d'un équipement (Wh/j) = la puissance de cet équipement (W)\* le temps d'utilisation (h).

### III.5.2. Description de la mosquée

Cette mosquée est constituée de 2 salles de prières, 1 bureau, et une salle d'ablution.

Désignation	L'équipement électrique
<b>2 salles de prières</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 8 lustres de 5 lampes (9W)</li> <li>▪ 38 Lampes (9W)</li> <li>▪ 26 ventilateurs (50W)</li> <li>▪ 2 climatiseurs (1000W)</li> <li>▪ 1 aspirateurs (150W)</li> </ul>
<b>Bureau</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 4 Lampes (9W)</li> <li>▪ 1 pc (65W)</li> <li>▪ 1 ventilateur (50W)</li> </ul>
<b>Salle d'ablution</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 18 Lampes (9W)</li> <li>▪ 2 pompes d'eau (500W)</li> </ul>
<b>Eclairage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3 Lampes (25W)</li> </ul>

Tableau III.3 : Pièces et équipement électrique de la mosquée

Type d'équipements	Equipements	Puissance (W)
<b>Eclairage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 100 Lampes (9w)</li> <li>▪ 3 Lampes (25w)</li> </ul>	900 75
<b>Electronique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 pc</li> </ul>	65

<b>Electroménager</b>	▪ 2 climatiseurs	2000
	▪ 27 ventilateurs	1350
	▪ 1 Aspirateurs	150
<b>Divers</b>	▪ 2 pompes d'eau	1000

**Tableau III.4** : Les équipements électriques et leurs puissances

### III.5.3. Cahier des charges

Pour optimiser la consommation journalière de la mosquée, nous prenons en compte toutes les pertes du système, y compris les rendements des composants. Les récepteurs seront alimentés par un onduleur, en tenant compte des rendements suivants : (le rendement de conversion de l'onduleur est de 98%. Ainsi, la puissance à fournir à l'onduleur est calculée pour garantir que les récepteurs AC reçoivent l'énergie nécessaire à leur fonctionnement.

Equipement	Nombre	Puissance (w)	Durée (h/j)	Consommation journalière E(Wh/j)	$P_{ch,unit}$ (w)
<b>Lampes LED</b>	<b>100</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>4500</b>	<b>900</b>
<b>Eclairage extérieur</b>	<b>3</b>	<b>25</b>	<b>9</b>	<b>675</b>	<b>75</b>
<b>Climatiseurs</b>	<b>2</b>	<b>1000</b>	<b>4</b>	<b>8000</b>	<b>2000</b>
<b>Ventilateurs</b>	<b>27</b>	<b>50</b>	<b>6</b>	<b>8100</b>	<b>1350</b>
<b>PC</b>	<b>1</b>	<b>65</b>	<b>2</b>	<b>130</b>	<b>65</b>
<b>Pompes d'eau</b>	<b>2</b>	<b>500</b>	<b>2</b>	<b>2000</b>	<b>1000</b>
<b>Aspirateurs</b>	<b>1</b>	<b>150</b>	<b>1</b>	<b>150</b>	<b>150</b>
<b>Consommation journalière moyenne (Wh/j)</b>				<b>23555</b>	<b>5540</b>

**Tableau III.5** : Consommation journalière de la mosquée

Dans notre cas :

- ❖ La mosquée consomme une énergie totale égale à **23555 Wh/jour**.
- ❖ La puissance totale demandée est égale à **5540 W**.

- ❖ En prenant en considération  $\eta_{ond}$  on aura **5653,1 W** qui correspond à une énergie de **24036 Wh/jour**.

-Pour la tension d'alimentation : cette dernière sera choisie d'après le tableau (III.6)

$P_c < 10\text{KWc}$  on choisit une tension de  $U=48$  Volt courant continu.

Puissance crête	<500Wc	500Wc2KWc	2-10KWc	>10 kWc
Tension du système	12 V <sub>DC</sub>	24 V <sub>DC</sub>	48 V <sub>DC</sub>	>48 V <sub>DC</sub>

Tableau III.6 : Les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance Crête

### III.6. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

L'efficacité de toute installation électrique dépend fondamentalement de la rigueur de son dimensionnement et de son utilisation [39], donc le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système PV en site isolé, il constitue donc une étape cruciale lors de la mise en place du système. La puissance du champ photovoltaïque est donnée par l'équation suivante :

$$P_{pv} = \frac{E}{N_{eq}(ensoleillement) * (Cp)} \tag{III.5}$$

Avec :

$N_{eq}$ : Nombre d'heures par jour d'exposition aux conditions STC.

$Cp$ : Coefficient de pertes qui est dû aux pertes par salissure du panneau photovoltaïque (neige, sable), pertes aux niveaux du régulateur et du câblage ainsi que l'efficacité énergétique des batteries. En règle générale on retrouve des pertes de 0.5 à 1% ( $Cp=0.9$  à  $0.95$ ).

Le nombre de panneaux photovoltaïques est calculé par le rapport de la puissance totale ( $P_{pv}$ ) et de la puissance unitaire ( $P_{pv,u}$ ), et on prend le rapport entier par excès:

$$N_{pv} \geq \text{ENT} \left[ \frac{P_{pv}}{P_{pv,u}} \right] \tag{III.6}$$

**Fiche technique du module photovoltaïque**

La puissance crête	$P_c = 270 W_c$
La tension à vide	$U_{co} = 38.04 V$
Le courant de puissance maximale	$I_{mpp} = 8.52 A$
La tension de puissance maximale	$U_{mpp} = 31.7 V$
Le courant de court-circuit	$I_{cc} = 9.21 A$

**Tableau III.7 :** Fiche technique du module photovoltaïque [26]

**III.6.1. Calcul de la taille du générateur photovoltaïque selon le besoin journalier**

Le tableau ci-dessous montre les lois de calculs de la méthode de dimensionnement selon le besoin journalier

NB :  $N_e = 4.45$  et  $C_p = 0.95$

Le besoin journalier (Wh /j)	Puissance photovoltaïque journalière (W)	Nombre de panneaux Photovoltaïque	La nouvelle puissance estimée (W)	La surface de captage (m <sup>2</sup> )
$B_j = \sum P_{ch} \times \Delta t$	$P_{pv/j} = B_j / N_e \times C_p$	$N_{pv} = P_{pv} / P_{pv.u}$	$P_{est} = N_{pv} \times P_c$	$S_c = N_{pv} \times S_{p.v.u}$
<b>24036</b>	<b>5685.63</b>	<b>22</b>	<b>5940</b>	<b>26.4</b>

**Tableau III.8 :** Calcul de la taille du générateur photovoltaïque

**III.7. Dimensionnement de l'onduleur**

L'onduleur qu'on doit choisir, est de marque SMC 6000TL de puissance max de  $6200 W_c$ .



Figure III.2 : Onduleur SMC 6000TL

A partir de ce critère, le dimensionnement des onduleurs va imposer la façon de câbler les modules entre eux.

Le tableau ci-dessous illustre la loi de calculs des paramètres de compatibilité en puissance :

**Compatibilité en puissance**

Pond, min (kW)	Pond, max (kW)
<b><math>P_{ond, min} = 0.9 \times P_{c, tot}</math></b>	<b><math>P_{ond, max} = 0.95 \times P_{c, tot}</math></b>
5.35	5.64

Tableau III.9 : Dimensionnement de l'onduleur

**III.8. Dimensionnements des batteries**

Le tableau ci-dessous montre les lois de calculs de la méthode de dimensionnement selon le besoin journalier :

Capacité des batteries (Ah)	Nombre de batteries calculé	Nombre de batteries totale
$C_{batt} = \frac{B_j J_{aut}}{U_{bat} \cdot P_{DD} \cdot \eta_b}$	$N_{batt} = \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}}$	$N_{bat,tot} = N_{bat,s} * N_{bat,p}$

Tableau III.10 : Dimensionnement des batteries

On choisira des batteries de 550Ah/12V.

➤ NB :

- le jour d'autonomie ( $J_{aut}$ ) est de deux jours.
- $U_{batt} = 48V / P_{DD} = 0.75 / \eta_b = 0.9$

Capacité des batteries (Ah)	Nombre de batteries en série	Nombre de batteries en parallèle	Nombre de Batteries retenu
1483.7	4	3	12

Tableau III.11 : Dimensionnement du système de stockage

### III.8.1. Modèle de câblage électrique du système de stockage

Après le calcul de nombre de batteries nécessaire pour l'installation nous avons fait un schéma de montage parallèle et série des 8 batteries comme le montre la figure III.3 :

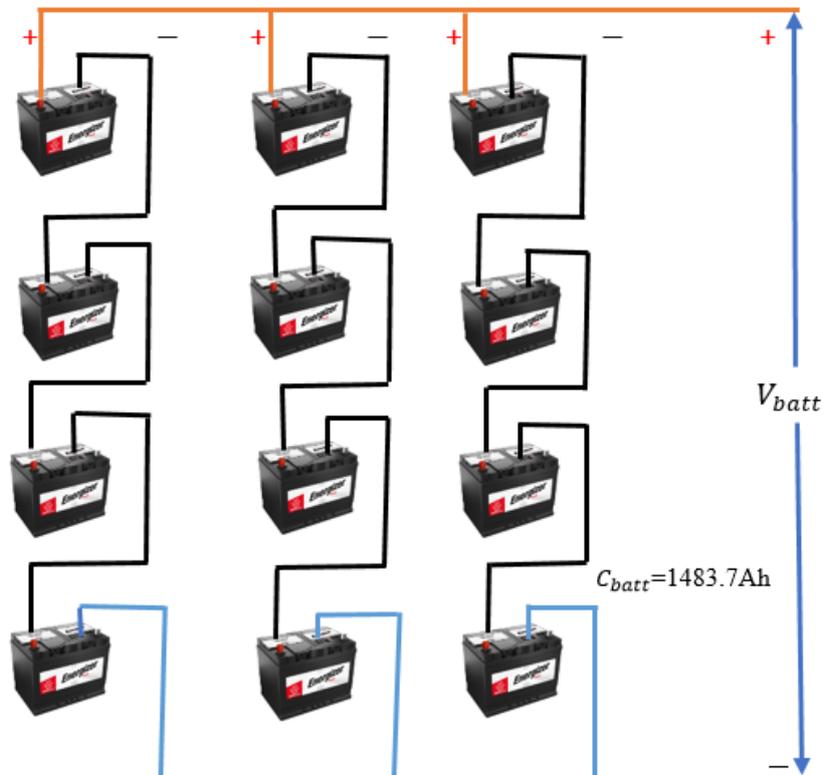


Figure III.3 : Montage des batteries

III.9. Dimensionnement de la section des câbles

Dans ce qui suit, un calcul de la section des câbles est établi pour la méthode de dimensionnement selon le besoin journalier.

Section des câbles coté DC		
Section des câbles entre un panneau et la boîte de raccordement (L=5m)	$S = \frac{\rho * L * I}{\Delta V * V}$	$\frac{1.6 * 10^{-8} * 5 * 8.52}{0.02 * 31.7}$  $= 1.07 \text{ mm}^2$
Section des câbles entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC (L=9m)	$I = I_{mpp} * N_{pv}$  $S = \frac{\rho * L * I}{\Delta V * V}$	$8.52 * 22 = 187.44 \text{ A}$  $\frac{1.6 * 10^{-8} * 9 * 187.44}{0.02 * 31.7}$  $= 42.57 \text{ mm}^2$
Branchement des batteries		
Section des câbles entre le DC/DC et les Batteries et Section des câbles entre les batteries et l'onduleur (L=4 m)	-Calcul de la tension de la batterie $V_{batt} = V_{batt.u} * N_{batt,s} = 12 * 4 = 48 \text{ V}$ -Calcul du courant de batterie $I_{batt} = \frac{P}{U} = \frac{5653.1}{48} = 117.77 \text{ A}$  $S = \frac{\rho * L * I}{\Delta V * V} = \frac{1.6 * 10^{-8} * 4 * 117.77}{0.02 * 48} = 7.85 \text{ mm}^2$	

Tableau III.12 : Calcul de la section des câbles

Les résultats obtenus du dimensionnement précédent sont réunis dans le tableau III.13 :

Composants	Nombre
Panneaux photovoltaïques ( $N_{pv}$ )	22
$N_{batt}$	12
$N_{batts}$	4
$N_{battp}$	3
Coffret	1
Régulateur	1
Onduleur	1
disjoncteur	1
Câbles DC	
Longueur (m)	Section ( $mm^2$ )
5	1.07
9	42.57
4	7.85

Tableau III. 13 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus du dimensionnement.

### III.10. Le schéma de câblage

Une fois le système est constitué, et le dimensionnement de toutes ses parties est fait, il reste à envisager de proposer un plan de câblage qui convient à l'installation comme le montre la figure III.4 :

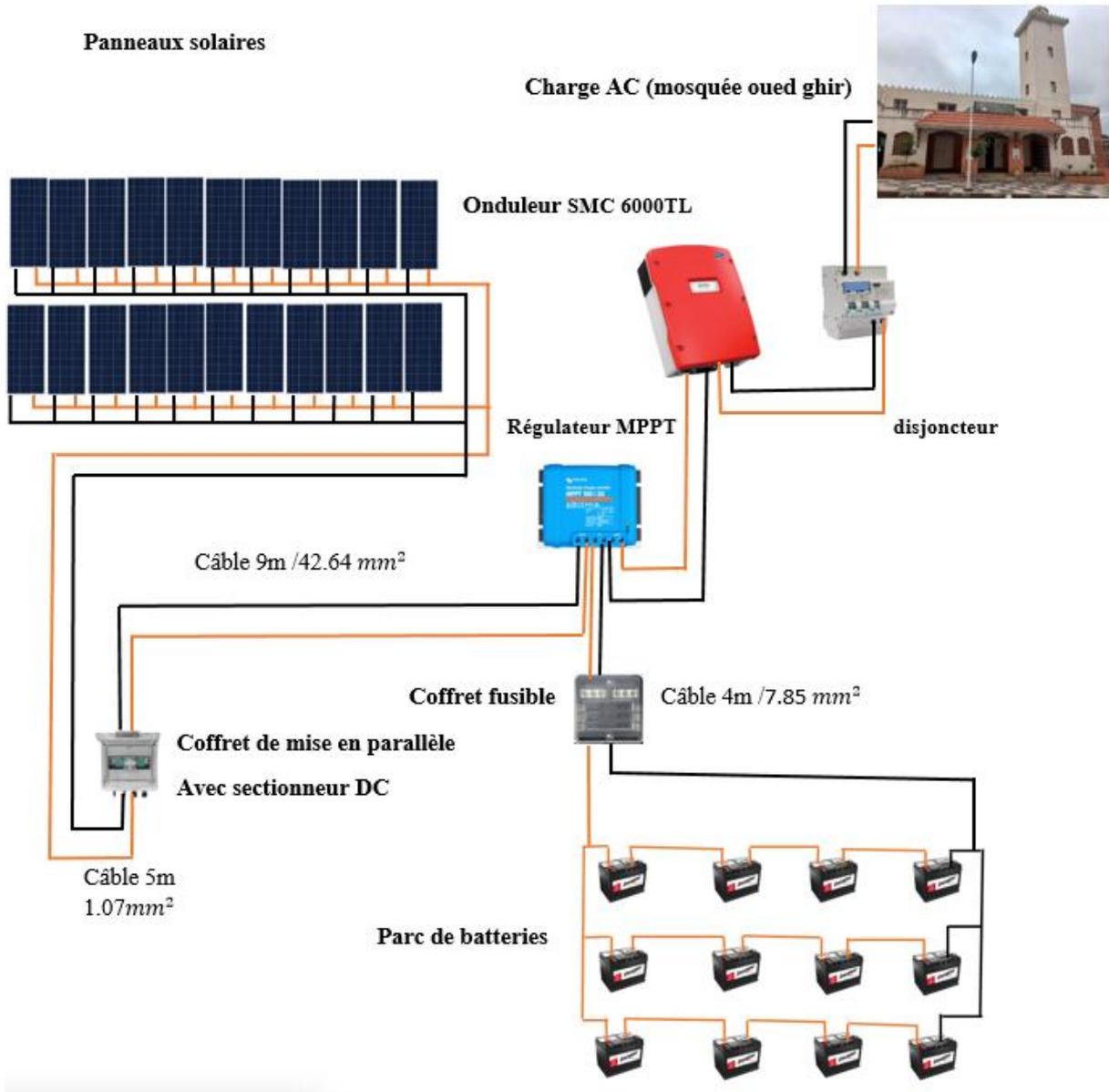
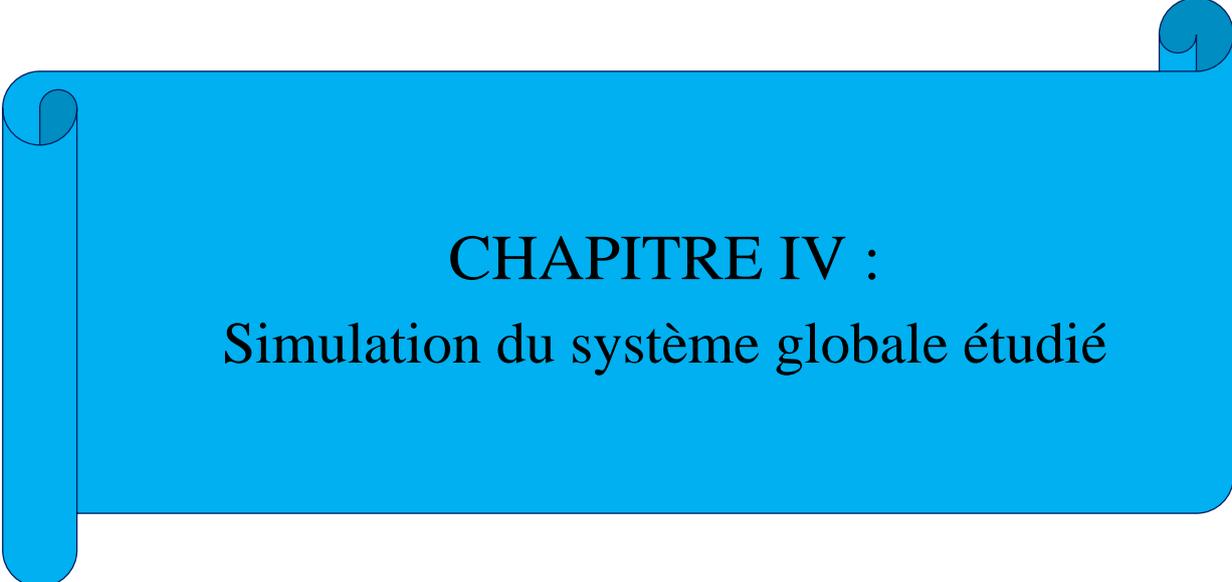


Figure III. 4 : plan de câblage de l'installation

Dans le schéma précédent nous avons 22 Panneaux en parallèle, 12 batteries dont 3 en parallèle 4 en série, un coffret de mise en parallèle avec sectionneur DC, un régulateur, un onduleur, un coffret de fusibles, un différentiel, un disjoncteur, différents types de câbles, et enfin une charge alternative (Mosquée).

### III.11. Conclusion

Il est nécessaire de mesurer les installations photovoltaïques afin qu'elles puissent produire de l'énergie dans les conditions les plus difficiles, ce qui nous permet d'optimiser davantage les installations photovoltaïques. Dans ce chapitre, nous avons exposé le plan de la mosquée à étudier, ainsi que sa consommation électrique. Ensuite, nous avons exposé en détail la méthode de dimensionnement pour la taille du générateur photovoltaïque. Enfin, nous avons décrit et dimensionné les autres éléments de l'installation PV, tout en élaborant un schéma de câblage.



**CHAPITRE IV :**  
Simulation du système globale étudié

### IV.1. Introduction

Les différents composants de l'installation photovoltaïque ont été modélisés dans les chapitres précédents. Pour extraire la puissance maximale du panneau photovoltaïque, nous utiliserons la commande d'optimisation par perturbation et observation (P&O). Cette puissance sera ensuite utilisée pour alimenter le parc de batteries et les charges. Dans ce chapitre, nous présentons la simulation globale du système étudié dans l'environnement Matlab/Simulink sous différentes conditions météorologiques pendant les deux saisons (été, hiver), afin de mettre en évidence le fonctionnement de notre installation.

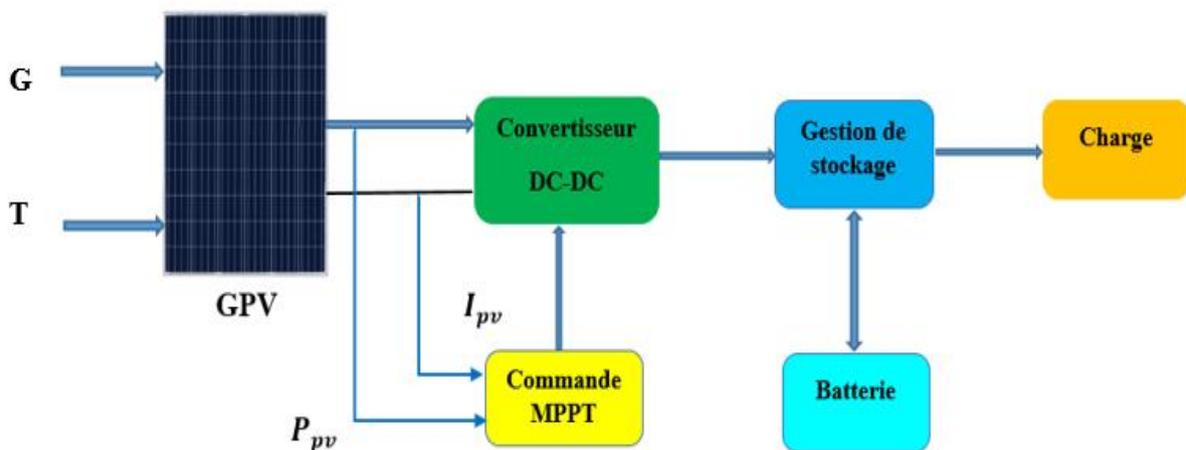


Figure IV.1 : Organigramme du système photovoltaïque étudié

### IV.2. Simulation du système global

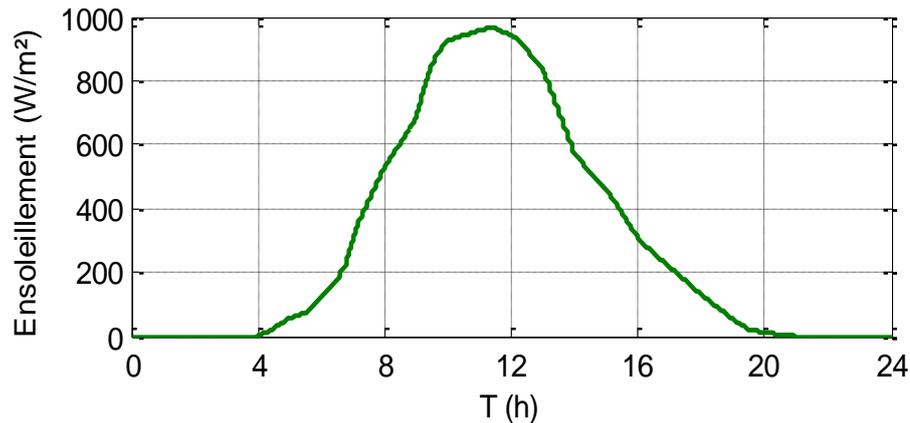
Le système photovoltaïque autonome est composé de 22 panneaux photovoltaïque de  $270 W_c$ , de 12 batteries de stockage de 12V, 550 Ah, d'un profil de charge. Différentes simulations ont été effectuées pour évaluer les performances du système. La figure (IV.2) montre le schéma bloc global du système étudié :



## IV.4. Résultats de simulation du système globale et interprétation des résultats durant la journée d'été

### IV.4.1. Profil d'ensoleillement

Les valeurs de l'ensoleillement typique, sur une période de journée durant l'été sont représentées sur la figures (IV.4).

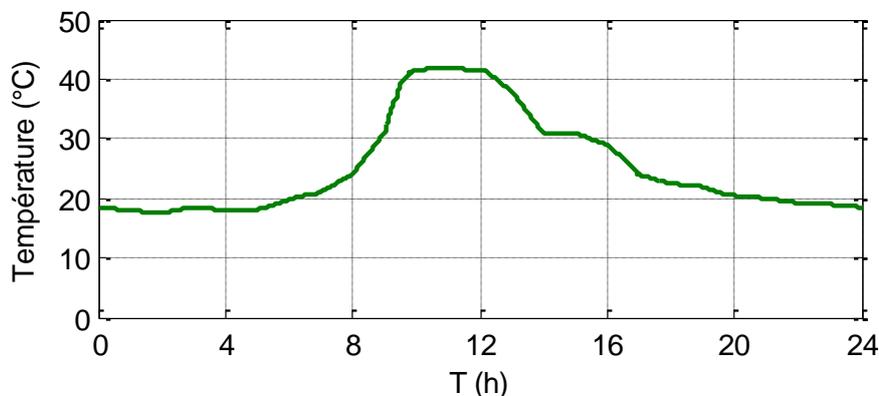


**Figure IV.4 :** Profil de l'ensoleillement le long d'une journée d'été.

- Pour la journée d'été : A partir de quatre heures du matin les valeurs de l'ensoleillement commence à s'accroître jusqu'à  $950\text{W}/\text{m}^2$  à midi qui représente la crête, ensuite il décroît pour s'annuler à vingt heures.

### IV.4.2. Profil de température

Les valeurs de température typique, sur une période de journée durant l'été sont représentées sur la figure (IV.5).



**Figure IV.5 :** Profil de température le long d'une journée d'été

- Pour une journée d'été : A minuit on a dix-neuf degrés Celsius les valeurs de la température commence à s'accroître jusqu'à midi elle va atteindre une valeur maximale de quarante et un degrés, ensuite elle diminue jusqu'à atteindre les dix-neuf degrés.

#### IV.4.3. Système PV

La puissance électrique mise en jeu dans notre système durant la journée d'été de fonctionnement, dépend du profil d'ensoleillement durant chaque journée.

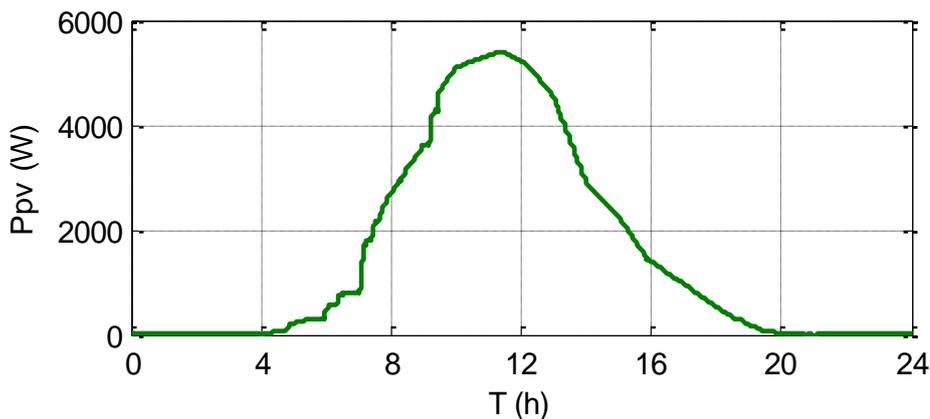


Figure IV.6 : Courbe de  $P_{pv}$  le long d'une journée d'été

- Pour une journée d'été : on distingue deux intervalles essentiels, le premier est caractérisé par une production où le pic de cette dernière est donnée à midi de la journée avec une puissance de 5500W, ensuite elle décroît pour s'annuler à vingt heures. Le deuxième intervalle, de vingt heures à quatre heures du matin aucune production n'est fournie.

#### IV.4.4. Courbe des puissances ( $P_{pv}$ , $P_{ch}$ , $P_{dis}$ )

Les allures des puissances photovoltaïques, de la charge et la puissance disponible ont été relevés sur le même graphe durant l'été représenter sur les figures (IV.7) suivante :

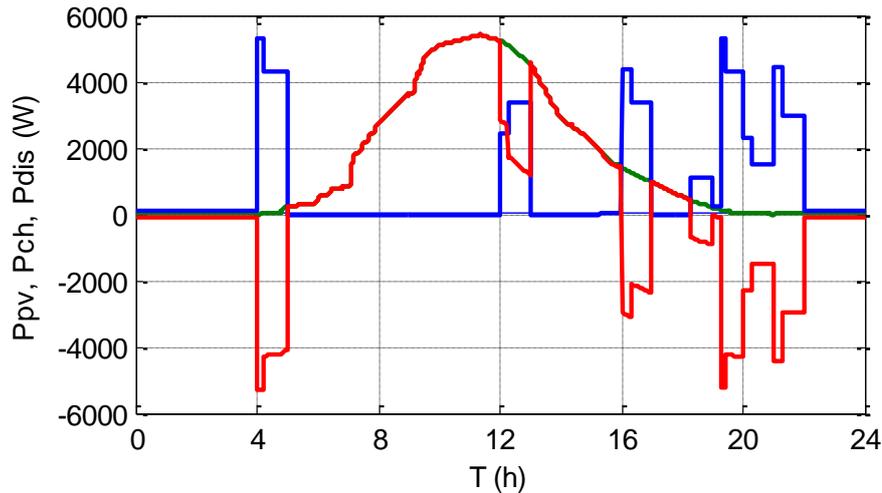


Figure IV.7 : Courbe des puissances ( $P_{pv}$ ,  $P_{ch}$ ,  $P_{dis}$ ) le long d'une journée d'été

- ✓ À partir du graphe on déduit que pour une journée d'été :
- De minuit à cinq heures de matin la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est inférieure à la puissance demandée par la charge, les batteries alimentent exclusivement la charge (Mode 4).
  - De cinq heures à midi le champ PV produit suffisamment d'énergie et la puissance de charge est nul donc on charge les batteries de stockage (Mode 2).
  - De midi à treize heures la puissance des panneaux est supérieure à la puissance de charge donc l'alimentation de la charge est assurée par le champ PV et par le système de stockage et un surplus fourni aux batteries de stockage (Mode 2).
  - De treize heures à seize heures le champ produit suffisamment d'énergie et la puissance de charge est nul donc on charge les batteries de stockage (Mode 2).
  - De seize heures à minuit la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est inférieure à la puissance demandée par la charge, les batteries alimentent exclusivement la charge (Mode 4).

#### IV.4.5. Batterie

Les figures suivantes (IV.8), (IV.9), (IV.10), (IV.11) représentées les allures de la tension, du courant, la puissance et l'EDC de la batterie d'une journée d'été:

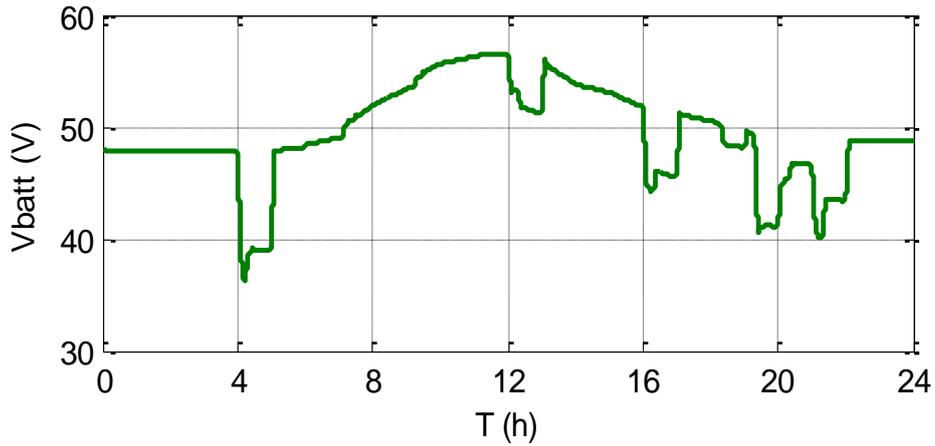


Figure IV.8 : Courbe de  $V_{batt}$  le long d'une journée d'été

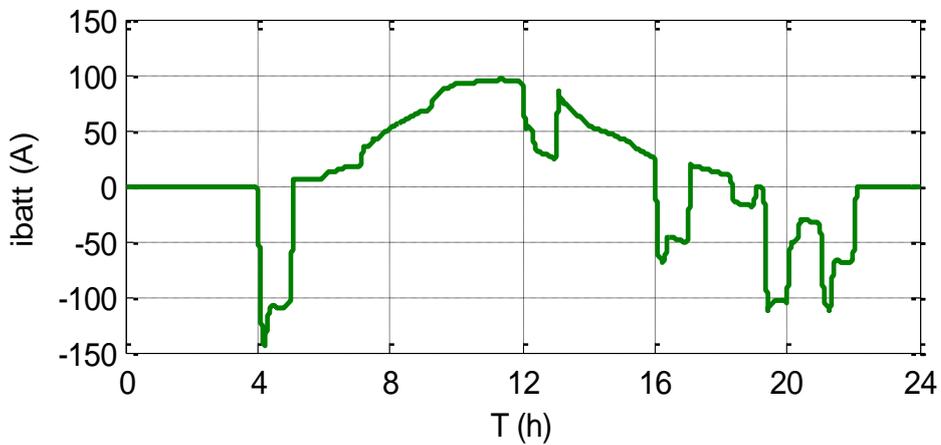


Figure IV.9 : Courbe de  $I_{batt}$  le long d'une journée d'été

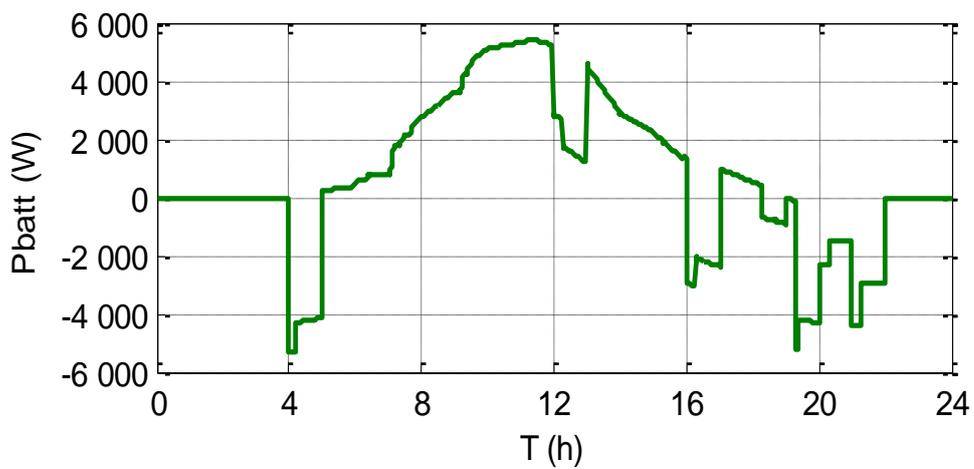


Figure IV.10 : Courbe de  $P_{batt}$  le long d'une journée d'été

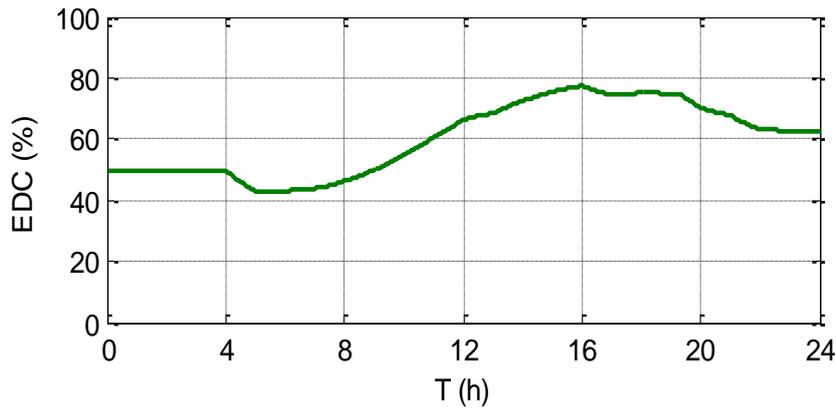


Figure IV.11 : Courbe de l'EDC de la batterie le long d'une journée d'été

- De cinq heures à seize heures la puissance de la batterie est supérieure à 0 donc elle se charge.
- De seize heures à dix-sept heures la puissance de la batterie est inférieure à 0 donc elle se décharge.
- De dix-sept heures à dix-huit heures la puissance de la batterie est supérieure à 0 donc elle se charge.
- De dix-huit heures à cinq heures la puissance de la batterie est inférieure à 0 donc elle se décharge.
- D'après la figure (IV.17), Nous remarquons que la courbe de EDC dans une journée d'été varié entre  $EDC_{min} = 43\%$  et  $EDC_{max} = 78\%$  .

#### IV.4.6. Le bus continu

La figure (IV.12) représente la tension du bus continue durant de la journée d'été. Après un régime transitoire, la tension du bus est gardée constante.

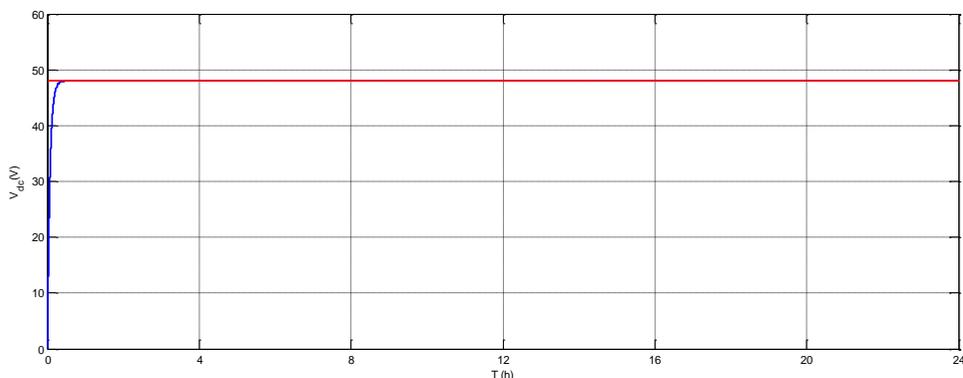


Figure IV.12 : La tension du bus DC le long d'une journée d'été

## IV.5. Résultats de simulation du système globale et interprétation des résultats durant la journée d'hiver

### IV.5.1. Profil d'ensoleillement

Les valeurs de l'ensoleillement typique, sur une période de journée durant l'hiver sont représentées sur la figures (IV.13) :

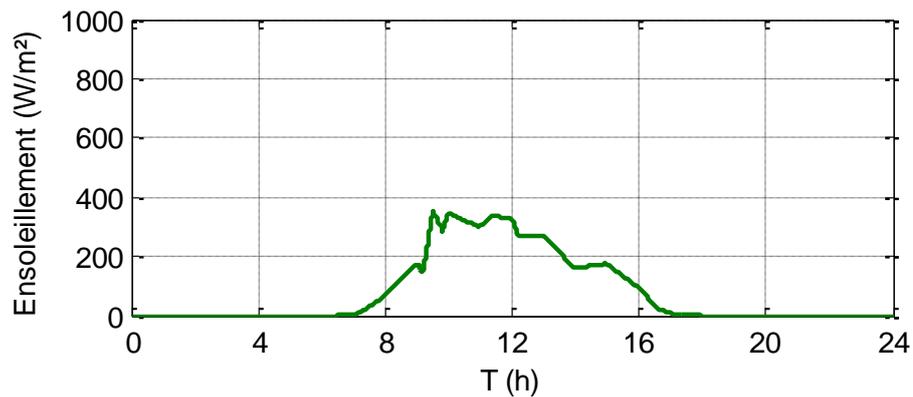


Figure IV.13 : Profil de l'ensoleillement le long d'une journée d'hiver.

- Pour une journée d'hiver : A partir de sept heures du matin les valeurs de l'ensoleillement commence à s'accroitre jusqu'à  $350\text{W}/\text{m}^2$  à midi qui représente la crête, ensuite il décroit pour s'annuler à dix-sept heures.

### IV.5.2. Profil de température

Les valeurs de température typique, sur une période de journée durant l'hiver sont représentées sur la figure (IV.14).

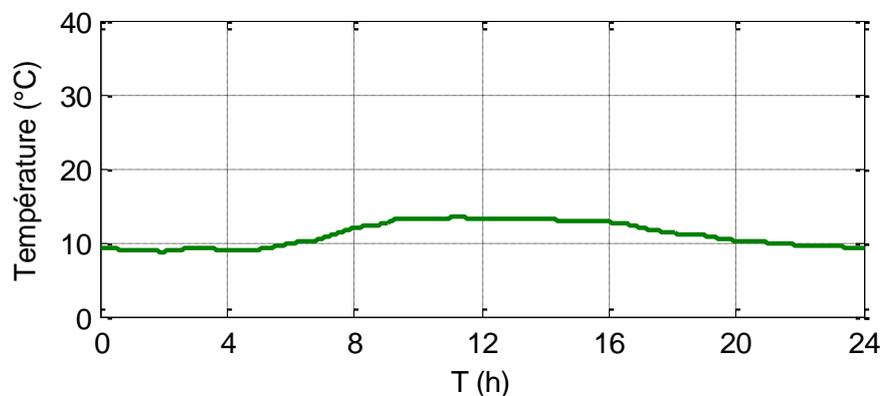
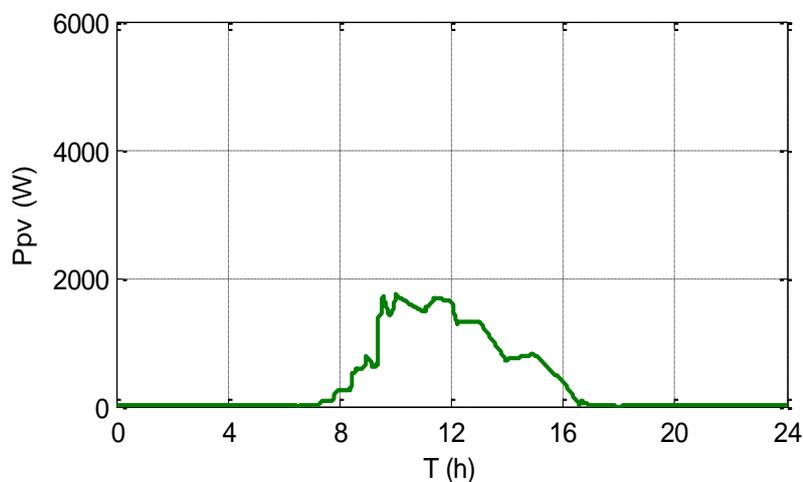


Figure IV.14 : Profil de température le long d'une journée d'hiver

- Pour une journée d'hiver : A minuit on a neuf degrés Celsius les valeurs de la température commence à s'accroître jusqu'à onze heures, après elle reste constante jusqu'à quatorze heures, elle va atteindre une valeur maximale de quatorze degrés, ensuite elle diminue jusqu'à atteindre les neuf degrés.

### IV.5.3. Système PV

La puissance électrique mise en jeu dans notre système durant la journée d'hiver de fonctionnement, dépend du profil d'ensoleillement durant chaque journée.



**Figure IV.15** : Courbe de  $P_{pv}$  le long d'une journée d'hiver

- Pour une journée d'hiver : le premier intervalle est caractérisé par une production où le pic est donné à midi de la journée avec une puissance de 1800W, ensuite elle décroît pour s'annuler à dix-sept heures, de dix-sept heures à sept heures du matin aucune production n'est fournie.

### IV.5.4. Courbe des puissances ( $P_{pv}$ , $P_{ch}$ , $P_{dis}$ )

Les allures des puissances photovoltaïques, de la charge et la puissance disponible ont été relevés sur le même graphe durant l'hiver représenté sur les figures (IV.16) suivante :

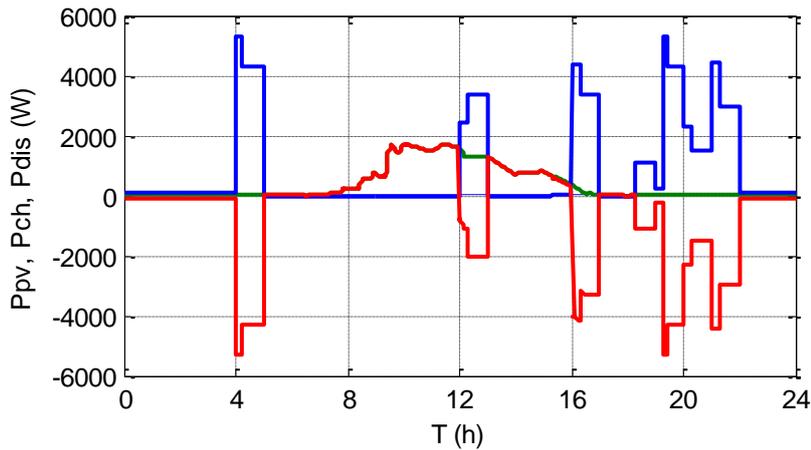


Figure IV.16 : Courbe des puissances ( $P_{pv}$ ,  $P_{ch}$ ,  $P_{dis}$ ) au long d'une journée d'hiver

- ✓ À partir du graphe on déduit que pour une journée d'hiver :
- De minuit à cinq heures de matin la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est inférieure à la puissance demandée par la charge, les batteries alimentent exclusivement la charge (Mode 4).
  - De cinq heures à midi le champ produit suffisamment d'énergie et la puissance de charge est nul donc on charge les batteries de stockage (Mode 2).
  - De midi à treize heures la puissance des panneaux est inférieure à la puissance de charge donc l'alimentation de la charge est assurée par les batteries de stockage (Mode 4).
  - De treize heures à seize heures le champ produit suffisamment d'énergie et la puissance de charge est nul donc on charge les batteries de stockage (Mode 2).
  - De seize heures à minuit la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est inférieure à la puissance demandée par la charge, les batteries alimentent exclusivement la charge (Mode 4).

#### IV.5.5. Batterie

Les figures suivantes (IV.17), (IV.18), (IV.19), (IV.20) représentées les allures de la tension, du courant, la puissance et l'EDC de la batterie d'une journée d'hiver:

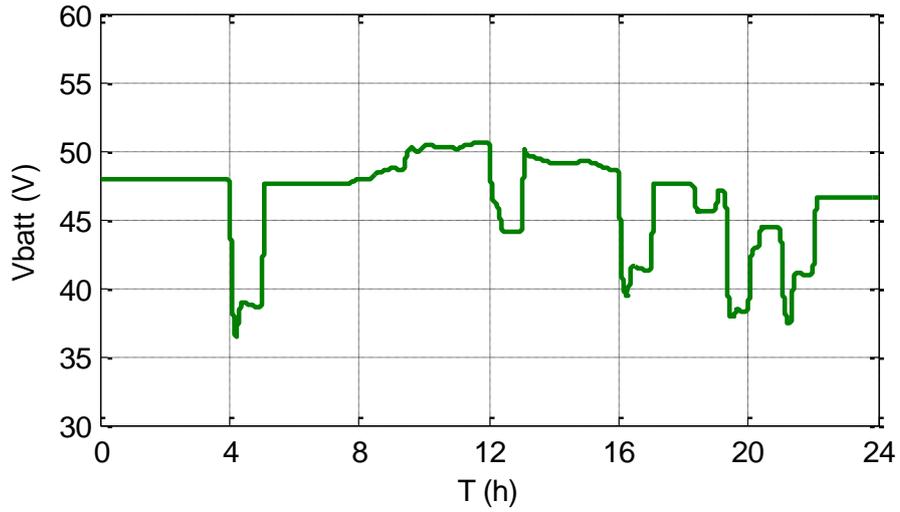


Figure IV.17 : Courbe de  $V_{batt}$  le long d'une journée d'hiver

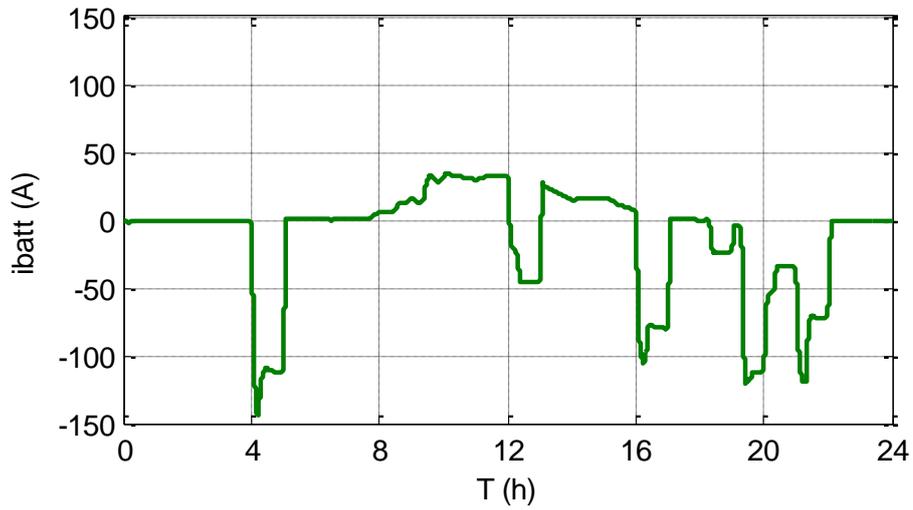


Figure IV.18 : Courbe de  $I_{batt}$  le long d'une journée d'hiver

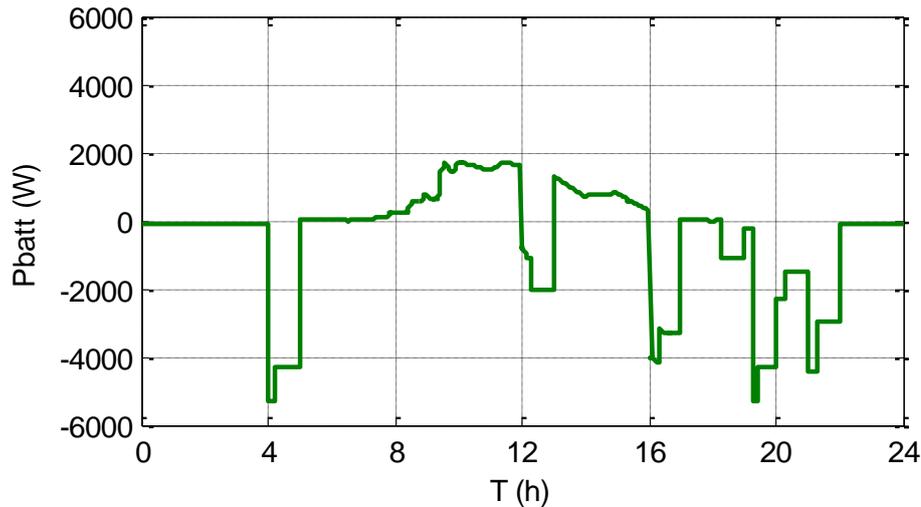


Figure IV.19 : Courbe de  $P_{batt}$  le long d'une journée d'hiver

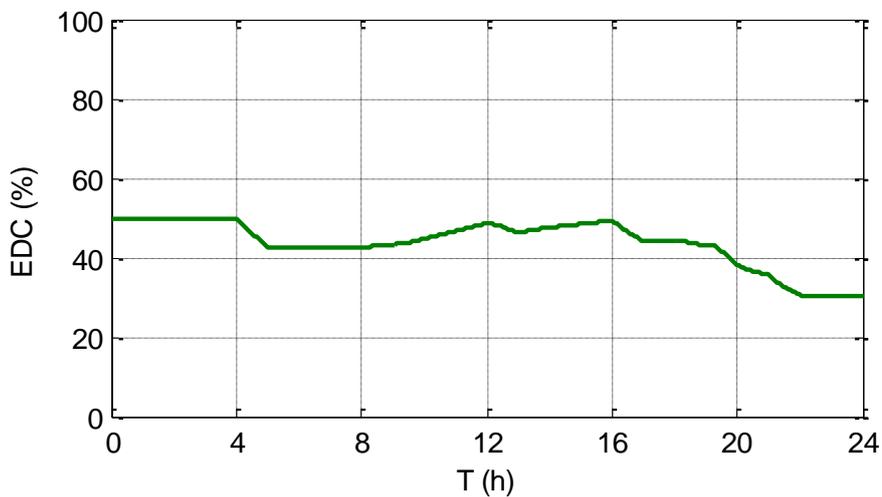


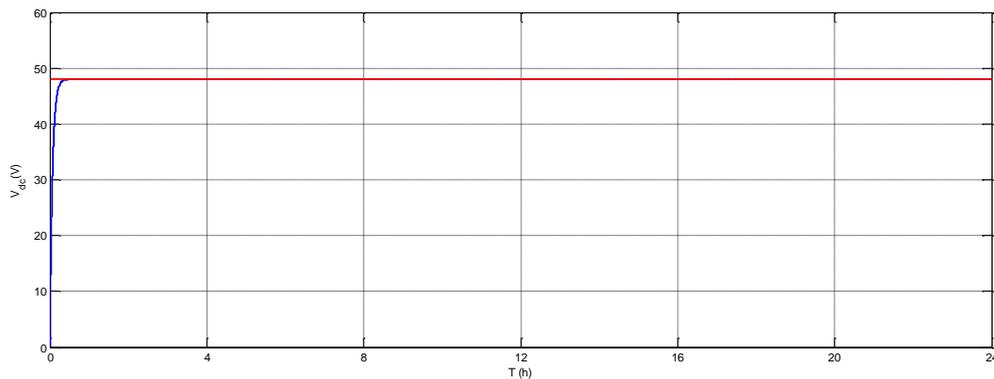
Figure IV.20 : Courbe de l'EDC de la batterie le long d'une journée d'hiver

- De cinq heures à douze heures la puissance de la batterie est supérieure à 0 donc elle se charge.
- De douze heures à treize heures la puissance de la batterie est inférieure à 0 donc elle se décharge.
- De treize heures à seize heures la puissance de la batterie est supérieure à 0 donc elle se charge.
- De seize heures à sept heures la puissance de la batterie est inférieure à 0 donc elle se décharge.

- D'après la figure (IV.18), Nous remarquons que la courbe de EDC dans une journée d'hiver varie entre  $EDC_{min} = 30\%$  et  $EDC_{max} = 50\%$  .

#### IV.4.6. Le bus continu

La figure (IV.21) représente la tension du bus continue durant de la journée d'été. Après un régime transitoire, la tension du bus est gardée constante.

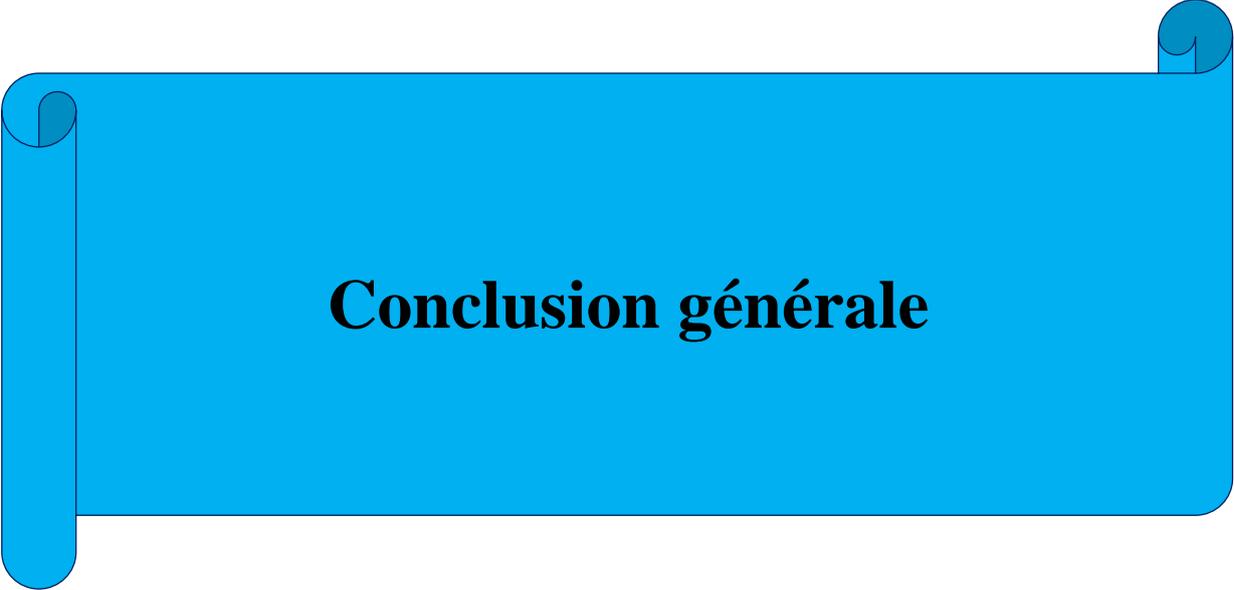


**Figure IV.21** : La tension du bus DC le long d'une journée d'hiver

#### IV.7. Conclusion

La simulation globale d'un système photovoltaïque (PV) sur deux saisons distinctes, l'été et l'hiver, révèle des insights cruciaux sur la performance et l'efficacité des systèmes PV en fonction des variations saisonnières. Les résultats de la simulation montrent clairement que les performances d'un système PV sont fortement influencées par les conditions climatiques et la disponibilité de la lumière solaire, qui varient considérablement entre les saisons.

Dans ce chapitre, nous avons simulé le système global sous l'environnement (MATLAB/Simulink), les profils charge, d'ensoleillement et température ont été relevées, aussi les résultats de système PV et batterie pendant les deux saisons (été, hiver), après on aura une conclusion générale pour l'étude.



## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque est la principale source d'énergie renouvelable, très appréciée aujourd'hui en raison de sa rentabilité et de sa disponibilité. Nous avons traité dans ce mémoire une installation photovoltaïque en fonctionnement autonome. L'objectif principale étant le dimensionnement de cette installation pour alimenter une mosquée, qui se compose d'un champ photovoltaïque et d'un système de stockage par batterie.

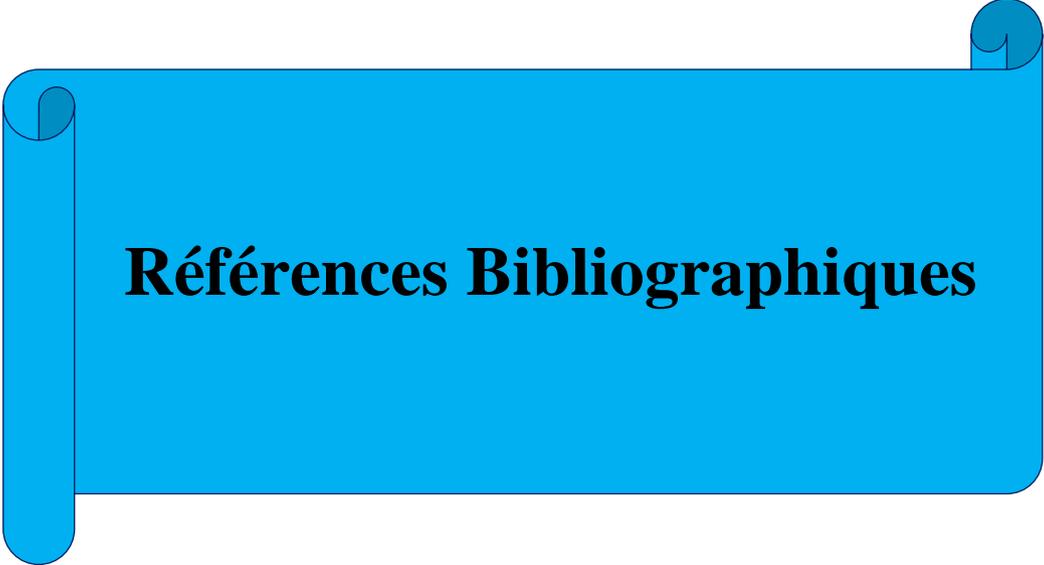
Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque et les différents systèmes photovoltaïques en général. Leur principe de fonctionnement et les différentes cellules qui constituent le module photovoltaïque, et les avantages et les inconvénients de ce type d'énergie. Ainsi que les composants nécessaires pour une installation autonome.

Dans le deuxième chapitre, nous avons examiné les différentes composantes d'un système photovoltaïque ainsi que la modélisation du générateur PV. Nous avons également analysé le comportement du système et ses performances sous l'influence de divers paramètres météorologiques tels que l'ensoleillement et la température, en visualisant les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module photovoltaïque. Ensuite, nous avons procédé à la modélisation des autres éléments de l'installation photovoltaïque, notamment convertisseur DC/DC, l'algorithme d'optimisation de l'énergie PV, la batterie et l'onduleur.

Dans le troisième chapitre, nous avons fait une étude des méthodes de dimensionnement du système étudié on a choisi la plus adapté qui est basé sur le besoin journalier afin de déterminer le nombre de panneaux, batteries qui répondent aux besoins énergétiques de la charge, tout en choisissant un onduleur compatible à l'installation.

Dans le dernier chapitre, nous avons simulé le système global sous l'environnement (MATLAB/Simulink), et nous avons présenté pour deux jours (été, hiver). Les résultats ont montré la satisfaction des besoins de la mosquée.

Comme perspectives, on peut dire que les systèmes PV autonomes peuvent jouer un rôle très important en apportant une solution réellement économique pour couvrir les besoins énergétiques, il serait intéressant de compléter notre travail de simulation et de dimensionnement par des tests de validation sur le terrain afin de connaître les performances réelles du système photovoltaïque autonome étudié.



## **Références Bibliographiques**

- [1] Djilat Zahra et Bouras Sara, « Méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque, application à la région de M'sila », Master Académique en Physique Energétique et Energies Renouvelables, Université - M'SILA, 2019.
- [2] AYACHE IDIR, « Etude et contrôle d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome », Master en Electromécanique, Université Abderrahmane-Mira de Bejaia, 2020.
- [3] Y.Baklli «Etude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur PV » mémoire Magister ,Université de Boumerdes 2005.
- [4] Belkhir Yanis et Babahamed Khadidja. « Etude et faisabilité d'une installation photovoltaïque pour une mosquée ». Mémoire Master en energie renouvelable . Université Abderrahmane-Mira de Bejaia 2020.
- [5] Boudehouche Mouhamed Djallal et Ouenoughi Mokhtar. « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage », Mémoire Master en électrotechnique, Université Abderrahmane-Mira de Bejaia 2016.
- [6] Ouchene Nacime et Idir Farid, « Etude et réalisation d'un système photovoltaïque avec stockage », Mémoire Master en énergie renouvelable, Université Abderrahmane-Mira de Bejaia 2019.
- [7] J .Royer,T.Djiako, E.Schiller « le pompage photovoltaïque » manuel de cour a l'intention des ingénieurs et techniciens bibliothèque national de Canada 1998. Bendjamâa Ibrahim. « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » Mémoire de Magister, université de Tlemcen Génie électrique 2011.
- [8] O. DERUELLE, « Mise Au Point D'un Système De Spectroscopie Pour Mesurer Des Sections Efficaces Neutroniques Applicables A Un Possible Développement Du Nucléaire Comme Source D'énergie », Thèse de doctorat, Université De Paris XI, Génie électrique 2002.
- [9] TRAHY Fatiha. « Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA. » Mémoire de Magister, université de Tizi Ouzou Génie électrique 2011.
- [10] I. Vechiu « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » thèse doctorat. Université du Havre de france, 2005.

- [11] N. Achaibou, A Malek, N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), Génie électrique 2000.
- [12] I. Vechiu « modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » thèse doctorat. Université du Havre , France, 2005.
- [13] MEZIANI Zahra. « Modélisation de modules photovoltaïques » . Mémoire de magister, Université de Batna Génie électrique 2012.
- [14] J .Royer,T.Djiako, E.Schiller « le pompage photovoltaïque » manuel de cour a l'intention des ingénieurs et techniciens bibliothèque national de Canada 1998.
- [15] A.Belhoucine et S.Zaidi. « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome ». Mémoire de master II. Université de Bejaia Génie électrique 2012.
- [16] Yann Riffonneau. « Gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau-Application à l'habitat », Thèse doctorat en Energie électrique. Université Joseph-Fourier –Grenoble I, 2009.
- [17] Salim Arab et Dalila Toudert, « Etude d'un Système Photovoltaïque ». MASTER ACADEMIQUE en Réseaux Electriques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2017.
- [18] Clarence Semassou, « Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétique adaptés aux besoins de bénin », Thèse doctorat en Mécanique, L'Université Bordeaux I Ecole doctorale : Sciences Physiques pour l'Ingénieur (SPI), 2011.
- [19] Valerie Léger, « Conversion d'énergie électrotechnique électronique de puissance » 3eme édition, 2009.
- [20] Corinne Alonso Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre Génie électrique 2003.
- [21] D. Sera, R. Teodorescu, T.Kerekes. <<Teaching maximum power point trackers using a photovoltaic array model with graphical user interface>>. Instates of energy technology, Aalborg pontoppidanstreade 101DK-9220, Aalborg, Denmark.
- [22] A. J. Dhers « 10 questions sur le stockage de l'énergie électrique » académie des technologies commission énergie et environnement, 2006.

- [23] E. Buchet, « Etude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide à la conception de système de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Thèse de Doctorat, Faculté de Science et Technique de Saint-Jérôme, d'Aix Marseille, juillet 1988.
- [24] Alayat Mahmoud et Boucetta Issam, « Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents », Memoir master en Electronique de puissance. Université Badji Mokhtar Annaba 2017.
- [25] J. F. Reynaud, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.
- [26] <https://www.solaris-store.com/1210-panneau-solaire-270w-20v-poly-1640x992x35mm-series-4a-victron-spp042702000.html>.
- [27] Bensmail samia « Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïques » mémoire de magister, université de Bejaia A.mira Génie électrique 2011/2012 .
- [28] Mansouri Kamilia, Mehdioui Taninna « Etude d'un système hybride dédié à habitat » Mémoire de master, université de Bejaia 2018.
- [29] Bendjamâa Ibrahim. « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » Mémoire de Magister, université de Tlemcen Génie électrique 2011.
- [30] A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri, 2010.
- [31] K. Zaouche, « Etude et Développement de Différentes Méthodes MPPT pour un Système Photovoltaïque », Mémoire de magister, USTHB, 2011.
- [32] L. Messikh, S. Chikhi, F. Chikhi et T. Chergui, "Mise au point d'un régulateur de charge / décharge de batterie avec seuils adaptatifs de tension pour les applications photovoltaïques" Revue des Energies Renouvelables, 2008.
- [33] Anne Labouret-Michel Villos, « Energie solaire photovoltaïque le manelle professionnelle », édition dunot, Paris Génie électrique 2003.

- [34] Pierre VANGELUWE « Solaire photovoltaïque » Power green- solaire développement durable, Génie électrique, 2005.
- [35] S. Petibon, « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat de l'université de toulouse, 2009.
- [36] <https://www.energienature.fr/stockage-energie-photovoltaïque> .
- [37] Merabti Yousef 'Mémoire de fin d'étude master, « Etude et réalisation d'un système photovoltaïque hybride à trois sources », université de Biskra 2016.
- [38] FOGELMAN & Régis MONTLOIN, « Installations Photovoltaïques dans l'habitat isolé », livre édité par: EDISUD, 1983.
- [39] M. Belhadj, « Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister, Universitaire De Bechar, 2008.