



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique Université Abderrahmane Mira

-Bejaia-

Réf :

Département électrotechnique

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue d'obtention du diplôme de Master  
en Electrotechnique Option: énergies  
renouvelables en électrotechnique.

**Thème:**

Electrification d'un site isolé par un système énergétique  
autonome

*Réalisé par*

- **DRIES MESSIPSA**
- **DERRAHI MUSTAPHA**

Soutenus le : 26-10-2020

*-Devant le jury :*

- *Président* : Mme : K.Rahrah
- *Encadreur* : Mme : C.serir
- *Examineurs* : Mr : Djarmouni

« Promotion 2020 »

## *Remerciements*

*Je remercie **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent modeste travail.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et témoigner ma profonde gratitude à **M<sup>me</sup> CH. Serir**, qui m'honoré de son encadrement et qui a accepté la lourde tâche de promotrice. Je lui exprime également ma profonde reconnaissance pour son dévouement d'avoir bien voulu me faire profiter pleinement de ses compétences scientifiques et encore de ses idées par lesquelles elle m'a orienté pour l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Nous remercions également **les membres de jury** qui ont bien voulu nous faire l'honneur d'évaluer notre modeste travail.*

*Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous **les enseignants** qui ont contribué à notre formation. sans oublier **les étudiants** de Master.*

## *Dédicace*

*A mon exemple éternel, mon soutien, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde pour moi, à toi **mon père**.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, **maman que j'adore***

*A mon frère et mes sœurs*

*Pour les meilleurs et les plus agréables moments qu'on a partagé pour toute la complicité et l'entente qui nous unissent.*

*A mes grands parents*

*Quoique je puisse dire, je ne peux pas exprimer mes sentiments d'amour et respect à votre égard, puisse le tout puissant vous procure une longue et heureuse vie.*

*A la mémoire de mon grand-père Ali, que son âme repose en paix,*

*A mes oncles et tantes*

*A tous mes cousines et cousins, A tous mes proches*

*A mon binôme Mustapha*

*Merci pour les bons moments qu'on a passé ensemble, pour votre soutien et votre serviabilité*

*A mes chers amis*

*Brahim, Farid, Anis, qui n'ont pas cessé de m'encourager au cours de la rédaction de ce mémoire*

*Messipsa*

## Dédicace

*Je dédie ce travail à mes très chers parents, à mes frères et sœurs, à toute ma famille et à tous mes amis en particulier mon binôme Messipsa .*

# **Sommaire**

# SOMMAIRE

---

Nomenclature	
Listes Des Figures	
Listes Des Tableaux	
Introduction Générale .....	1
<b>CHAPITRE I</b>	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Ressources des énergies renouvelables.....	2
I.3. Définition d'énergie renouvelable.....	3
I.4. Sources d'énergie renouvelable.....	3
I.4.1. Energie éolienne.....	4
I.4.2. Energie hydraulique.....	4
I.4.3. Energie géothermique.....	4
I.4.4. Energie biomasse.....	4
I.4.5. Energie marine.....	5
I.4.6. Energie solaire.....	5
I.5. Energie solaire.....	5
I.5.1. Energie solaire thermique.....	9
I.5.2. Energie solaire passive.....	10
I.5.3. Système solaire photovoltaïque.....	10
I.5.3.1. Type de système photovoltaïque.....	10
I.5.3.2. Cellule photovoltaïque.....	11
I.5.3.3. De la cellule au champ photovoltaïque .....	11
I.5.3.4. Types de cellules .....	12
I.6. Stockage d'énergie électrique .....	14

# SOMMAIRE

---

I.6.1. Principe de fonctionnement d'une batterie.....	15
I.6.2. Caractéristiques principales d'une batterie.....	15
I.7. Convertisseurs statique.....	15
I.7.1. Convertisseur DC/DC (hacheur).....	16
I.8. Boîtes de jonction.....	16
I.9. Mise à la terre.....	17
I.10. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	17
I.10.1. Avantages.....	17
I.10.2. Inconvénients.....	17
I.11. Conclusion .....	17

## CHAPITRE II

II.1. Introduction.....	18
II.2. Système autonome avec stockage.....	18
II.3. Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque.....	19
II.3.1. Le modèle idéalisé .....	19
II.3.2. Modèle à une diode .....	20
II.3.2.1. Détermination des paramètres du modèle.....	21
II.4. Modélisation système de stockage (batteries).....	26
II.4.1. Modèle de CIEMAT.....	26
II.4.2 Simulation de la batterie modèle CIEMAT.....	28
II.5. Modélisation du hacheur.....	30
II.6. Etude d'une technique d'optimisation (MPPT) .....	31
II.6.1. Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max.....	32
II.6.1. 1. Les méthodes indirectes.....	32
II.6.1. 2. Les méthodes directes .....	32

# SOMMAIRE

---

II.6.2. Méthode de perturbation et observation (P&O).....	33
II.7. Conclusion.....	34

## CHAPITRE III

III.1. Introduction.....	35
III.2. Dimensionnement du système photovoltaïque.....	35
III.2.1. Bilan énergétique d'installation.....	36
III.2.2. Dimensionnement de générateur photovoltaïque.....	37
III.2.3. Dimensionnement des batteries.....	39
III.2.4. Dimensionnement du régulateur de charge.....	40
III.2.5. Dimensionnement de l'onduleur.....	40
III.3. Application numérique .....	43
III.4. Supervision du système de production d'énergie.....	46
III.4.1. Extraction du maximum d'énergie .....	46
III.4.2. Gestion des batteries de stockages .....	47
III.5. protection de l'installation .....	49
III.6. Simulation du système photovoltaïque avec stockage.....	49
III.6.1. Les résultats de simulation du système globale.....	50
III.7. Conclusion .....	54
Conclusion générale.....	55

Bibliographie

Annexe



# Nomenclature

---

## 1. Glossaire

$R_S$	Résistance série	$\Omega$
$R_P$	Résistance parallèle	$\Omega$
$V_{CO}$	Tension en circuit ouvert	V
$I_{CC}$	Courant de court-circuit	A
$N_S$	Nombre des cellules en série	-
$w$	déclinaison	$^\circ$
$j$	Numéro du jour de l'année	-
$L$	Latitude	$^\circ$
$\delta$	Angle horaire	$^\circ$
$TS$	Heure solaire	heure
$h$	hauteur du Soleil	$^\circ$
$a$	Azimut	$^\circ$
$D$	Rayonnement diffus	$W/m^2$
$i$	Inclinaison du capteur par rapport au sol	$^\circ$
$\gamma$	Orientation du capteur par rapport au sud	$^\circ$
$\rho$	Densité d'air	$kg/m^3$
$S$	Surface des pales	$m^2$
$m$	Masse d'air en mouvement	kg
$C_p$	Coefficient de puissance	-
$G$	Eclairement dans les panneaux solaires	$W/m^2$
$T_j$	Température des panneaux solaires	$^\circ K$
$R_S$	Résistance série d'une cellule photovoltaïque	$\Omega$
$R_P$	Résistance parallèle d'une cellule photovoltaïque	$\Omega$
$I$	Courant généré par la cellule photovoltaïque	A
$I_{ph}$	Photo-courant créé par une cellule photovoltaïque	A
$I_d$	Courant circulant dans la diode	A
$I_0$	Courant de court de saturation	A
$T$	Température de la jonction des cellules PV	$^\circ K$
$K$	Constante de Boltzman	$J/K^\circ$
$q$	Charge élémentaire	C
$A$	Facteur d'idéalité de la jonction	V
$V$	Tension de sortie	V

# Nomenclature

---

$I_p$	Courant circulant dans la résistance $R_p$	A
$I_{cc}$	Courant de court circuit	A
$V_{co}$	Tension à vide	V
$V_m$	Tension au point de fonctionnement	V
$I_m$	Courant au point de fonctionnement	A
$S$	Surface de la cellule	m <sup>2</sup>
$\eta$	Rendement maximal	%
$G_{ref}$	Eclairement dans les panneaux solaires aux conditions standards	W/m <sup>2</sup>
$T_{ref}$	Température des panneaux solaires aux conditions standards	°K
$nb$	Eléments de batteries	-
$R_b$	Résistance interne d'un élément batteries	$\Omega$
$E_b$	Tension à vide d'un élément batteries	V
$C$	Capacité d'une batterie	Ah
$C_{bat}(t)$	Quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t)	Ah
$\eta_{ond}, \eta_{bat}$	Rendements de l'onduleur et de la batterie	%
$C_{bat}$	La capacité de stockage de la batterie	Ah
$N_a$	Le nombre de jours d'autonomie	Jour
$V_{bat}$	La tension de la batterie	V

## 2.Abbreviation

DC	Courant Continue
AC	Courant Alternatif
GPV	Générateur Photovoltaïque
DOD	Profondeur de la charge
EDC	Etat de charge
PV	Photovoltaïque

# Listes des figures

---

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Sources d'énergie renouvelables.....	3
<b>Figure I.2</b>	Coordonnées solaires d'une structure.....	8
<b>Figure I.3</b>	Composants du rayonnement solaire.....	8
<b>Figure I.4</b>	Système solaire thermique.....	9
<b>Figure I.5</b>	Energie solaire passive.....	9
<b>Figure I.6</b>	De la cellule au champ photovoltaïque.....	11
<b>Figure I.7</b>	Cellule photovoltaïque monocristallines.....	12
<b>Figure I.8</b>	Cellules photovoltaïque poly cristalline.....	12
<b>Figure I.9</b>	Cellules photovoltaïque couche mince(Tandem).....	12
<b>Figure I.10</b>	Schéma d'une cellule PV en silicium.....	13
<b>Figure I.11</b>	Principe d'un hacheur.....	14
<b>Figure I.12</b>	Schéma électrique équivalent d'un hacheur parallèle.....	15

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b>	Système globale à étudier.....	17
<b>Figure II.2</b>	Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	18
<b>Figure II.3</b>	Schéma bloc d'une diode.....	20
<b>Figure II.4</b>	Schéma bloc de générateur PV.....	21
<b>Figure II.5</b>	Influence sur les caractéristiques [ $I_{pv}=f(V_{pv})$ ].....	21
<b>Figure II.6</b>	Influence sur les caractéristiques [ $P_{pv}=f(V_{pv})$ ].....	21
<b>Figure II.7</b>	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques [ $P_{pv}=f(V_{pv})$ ].....	22
<b>Figure II.8</b>	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques [ $I_{pv}=f(V_{pv})$ ].....	22
<b>Figure II.9</b>	Influence de température sur les caractéristiques [ $P_{pv}=f(V_{pv})$ ].....	23
<b>Figure II.10</b>	Influence de température sur les caractéristiques [ $I_{pv}=f(V_{pv})$ ].....	23
<b>Figure II.11</b>	Schéma équivalent du modèle CIEMAT.....	24
<b>Figure II.12</b>	Schéma bloc du modèle CIEMAT.....	26

## Listes des figures

---

<b>Figure II.13</b>	Influence de la température sur la capacité de la batterie .....	27
<b>Figure II.14</b>	Variation de l'état de charge EDC en fonction de la capacité de la batterie ...	27
<b>Figure II.15</b>	Hacheur boost .....	28
<b>Figure II.16</b>	Schéma bloc d'un hacheur boost .....	29
<b>Figure II.17</b>	Caractéristique puissance- tension d'un PV .....	29
<b>Figure II.18</b>	Organigramme de la méthode perturbation et observation.....	31
<b>Figure II.19</b>	Schéma bloc de la méthode P&O .....	31

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1</b>	Schéma bloc de la section des câbles.....	45
<b>Figure III.2</b>	Diagramme de gestion d'un système PV avec batteries .....	46
<b>Figure III.3</b>	Plage de fonctionnement autorisé par les batteries .....	47
<b>Figure III.4</b>	Schéma bloc de gestion de puissance .....	45
<b>Figure III.5</b>	Schéma bloc de système globale .....	50
<b>Figure III.6</b>	Allure de puissance Pch .....	50
<b>Figure III.7</b>	Profile de l'ensoleillement variable .....	51
<b>Figure III.8</b>	Allure de l'état de charge des batteries.....	51
<b>Figure III.9</b>	Tension aux bornes des batteries .....	51
<b>Figure III.10</b>	Allure de puissance Ppv .....	52
<b>Figure III.11</b>	Allure de la tension Vpv.....	52
<b>Figure III.12</b>	Allure de mode 1.....	53
<b>Figure III.13</b>	Allure de mode 2.....	53
<b>Figure III.14</b>	Allure de mode 3.....	53
<b>Figure III.15</b>	Allure de mode 4.....	54
<b>Figure III.16</b>	Allure de mode 5.....	54

# LISTES DES TABLEAUX

---

<b>Tableau III.1</b>	Irradiations globales moyennes mensuelles journalières .....	35
<b>Tableau III.2</b>	Bilan énergétique une maison à Bejaia .....	36
<b>Tableau III.3</b>	Paramètres du panneau photovoltaïque.....	36
<b>Tableau III.4</b>	Dimensionnement du système de stockage .....	43
<b>Tableau III.5</b>	Calcul des sections des câbles .....	44

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

---

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Le besoin -énergétique d'avant n'est plus le même que celui d'aujourd'hui, ce besoin nécessite d'évolution du système de production, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Pour lutter contre ce phénomène les propositions des énergies renouvelable offre de bonne solution car elles ne contiennent aucune de rejet polluant, hydraulique, éolienne, marine, biomasse, thymique, et solaire photovoltaïque qui est le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour habitat.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre [1].

Dans ce contexte, notre étude s'intéresse à l'énergie solaire photovoltaïque, qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé.

L'énergie solaire est disponible partout sur notre planète par des degrés divers et elle est entièrement renouvelable. L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement. L'exploitation directe de l'énergie solaire relève une technologie bien distincte c'est de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque.

Elle provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement solaire en énergie électrique, cette conversion d'énergie s'exécute par le biais d'une cellule dite cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée au soleil.

La tension générée par une cellule (PV) peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en séries/parallèles donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV), qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale, dépendant de niveau d'éclairement et de la température, ainsi que de vieillissement de l'ensemble de composants.

# Introduction générale

---

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération [1].

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire se porte sur électrification d'un site isolée par un système énergétique autonome avec un élément de stockage. Nous avons structuré notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art de l'énergie photovoltaïque et on va définir son principe de conversion, ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation, optimisation et simulation de chaque élément constituant le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, et la batterie.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter une méthode de dimensionnement et de supervision basés sur les besoins journalier d'un site autonome photovoltaïque avec stockage ainsi que la simulation sous Matlab. On termine ce chapitre par la conception d'un algorithme de gestion et de protection pour l'ensemble de l'installation.

Nous finalisons ce travail par une conclusion générale, dans laquelle nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.



# **Chapitre I**

## **Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

## I.1.Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [2]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

**Photos** : Lumière.

**Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta.

Ce phénomène fut découvert au 19<sup>ème</sup> siècle par le physicien [Alexandre Edmond Becquere]. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70.

Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et des équipements de télécommunications [3].

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques.

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [4] :

- Les systèmes autonomes
- Les systèmes connectés au réseau
- Les systèmes hybrides

## I.2.Ressources des énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de

serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...) [5]. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [6].

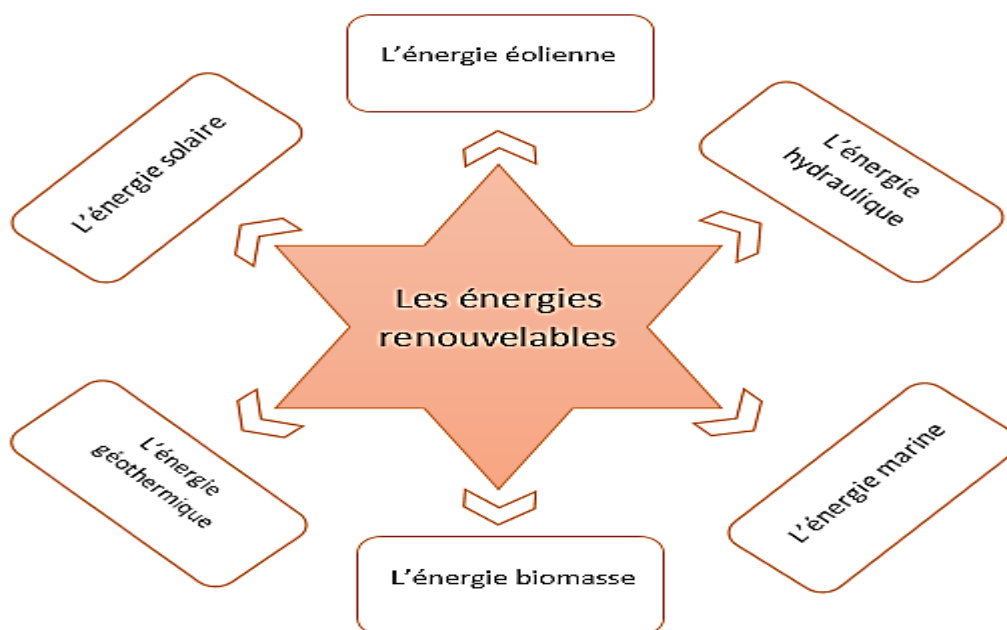
### I.3. Définition d'énergie renouvelable

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation, [6].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie d'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [6], [7].

### I.4. Sources d'énergie renouvelable

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuisent donc jamais à l'échelle du temps humain.



**Fig. I.1** Sources d'énergie renouvelables

Différentes techniques ont été élaborées pour pouvoir extraire de l'énergie des phénomènes et des éléments naturels. Parmi les énergies les plus utilisées on a [8] :

**I.4.1. Energie éolienne :** Cette énergie, utilise la force du vent. Son principe est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis par l'intermédiaire d'un générateur elle transforme cette énergie en énergie électrique.

**I.4.2. Energie hydraulique :** C'est une technique très ancienne qui permet de stocker des masses importantes d'eau ensuite l'on transforme en électricité. On la nomme aussi hydroélectricité. Celle-ci peut être produite par des centrales hydrauliques alimentées en partie par des barrages.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- 1. Barrage :** qui retient l'eau ;
- 2. Centrale :** qui produit l'électricité ;
- 3. Lignes électriques :** qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

**I.4.3. Energie géothermique :** Des centrales géothermiques se servent de la chaleur dégagée par le noyau terrestre. L'avantage de cette énergie est qu'elle ne dépend pas des conditions climatiques ni des saisons.

L'énergie géothermique se présente sous deux formes :

- 1. Basse température :** pour chauffer les habitations des particuliers ;
- 2. Haute température :** dans ce cas, c'est un moyen de produire de l'électricité.

**I.4.4. Energie biomasse :** Cette énergie concerne le bois, les résidus forestiers, les déchets organiques et verts ainsi que le biocarburant ou essence verte.

Cette essence verte est classée en deux types :

- 1. Ethanol** issu du blé, maïs, betterave, canne à sucre ;
- 2. Biodiesel** issu du colza, tournesol, soja.

Ces biocarburants sont souvent mélangés aux carburants classiques pour limiter les effets de serre. Le bois, quant à lui, est un combustible utilisé depuis la nuit des temps pour le chauffage et la cuisine.

Une centrale est composée de 3 parties :

- 1. La chaudière :** dans laquelle est brûlé le combustible ;
- 2. La salle des machines :** qui produisent l'électricité ;
- 3. Les lignes électriques :** qui la transportent.

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire.

**I.4.5. Energie marine :** Elle permet de produire de l'électricité grâce aux flux naturels d'énergie des courants et des marées, et à la matière marine, exploités dans différents types d'installations.

**I.4.6. Energie solaire :** L'énergie solaire provient, comme son nom l'indique, du soleil. Cette énergie peut être transformée utilement en chaleur (le thermique) ou en électricité (le photovoltaïque), On distingue alors trois types d'énergie solaire ; énergie solaire thermique, l'énergie solaire photovoltaïque et énergie solaire passive.

## **I.5. Energie solaire**

Les rayons du soleil chauffent l'eau grâce à des capteurs solaires ou fournissent de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques ou des centrales solaires.

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives [9].

Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires.

Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire.

Comment fonctionne une installation solaire ? Trois éléments sont nécessaires à une installation photovoltaïque : des panneaux solaires, un onduleur et un compteur. Ces trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients [10].

## 1. Géométrie terre-soleil

### a) Sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre considéré infini, ayant pour centre la planète terre. Cette sphère nous sert à positionner et à déterminer les intervalles du temps des objets qui se situent dans le ciel [11].

### b) Les coordonnées géographiques

Ce sont des coordonnées angulaires qui nous permettent de déterminer l'emplacement de n'importe quel point sur terre, on distingue :

#### ➤ Longitude (L)

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens, l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. Les lieux situés à l'Est sont comptés positivement avec le signe plus (+) et ceux situés à l'Ouest sont comptés négativement avec le signe moins (-). Longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , à tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps.

#### ➤ Latitude( $\varphi$ )

Elle correspond à la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elles varient de  $0^\circ$  (équateur) à  $+90^\circ$  pour l'hémisphère nord et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  pour l'hémisphère sud.

#### ➤ Déclinaison( $\delta$ )

L'angle de déclinaison correspond à l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial sa valeur en degré. Cet angle varie de  $-23.27^\circ$  au solstice d'hiver (22 décembre) à  $+23.27^\circ$  au solstice d'été (22 juin) et il est nul aux équinoxes (21 mars et 23 septembre).

#### ➤ Hauteur angulaire du soleil(h)

C'est l'angle entre le plan horizontal du lieu d'observation et la direction du soleil, elle est comptée positivement de  $0^\circ$  à  $+90^\circ$  vers le Zénith et négativement de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  vers le Nadir.

### ➤ L'azimut( $\alpha$ )

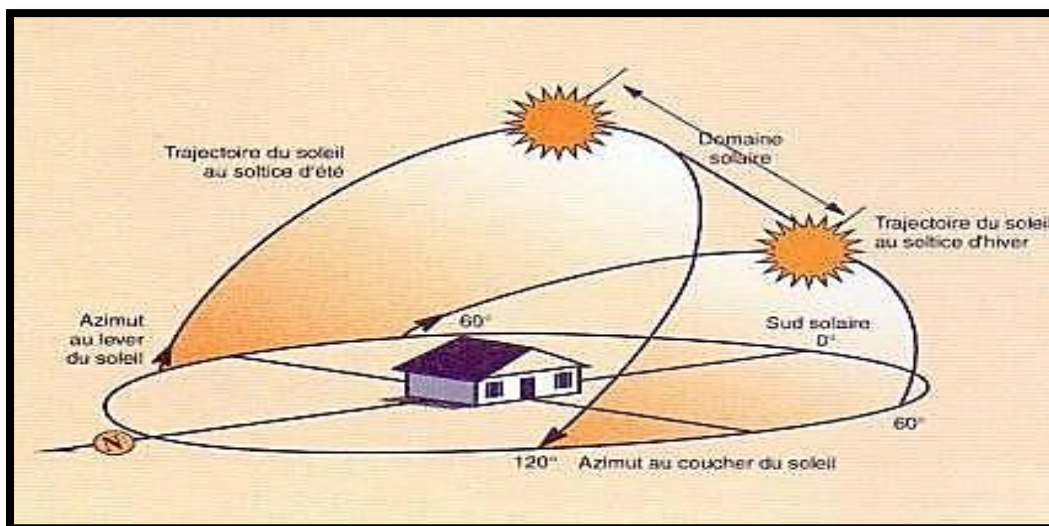
C'est l'angle entre la direction du soleil et la direction du sud, on peut le compter positivement de  $0^\circ$  à  $+180^\circ$  vers l'Ouest et négativement de  $0^\circ$  à  $-180^\circ$  vers l'Est.

### ➤ Angle horaire du soleil et angle horaire du soleil à son coucher

L'angle horaire solaire est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'est en ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle au midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (un tour de  $360^\circ$  en 24h). Ainsi, à 7h :00 du matin (heure solaire), l'angle horaire du soleil vaut  $-75^\circ$  (7h00 du matin est 5h avant midi ; cinq fois  $15^\circ$  égal  $75^\circ$ , avec un signe négatif pour signifier que c'est le matin). [12]

### ➤ L'orientation et l'ensoleillement

L'ensoleillement est caractérisé par la trajectoire du soleil et sa durée. Les conditions géométriques entre le soleil et la terre déterminent la position relative du soleil qui est repéré par son azimut et sa hauteur angulaire. [13]



**Fig. I.2** Coordonnées solaires d'une structure.

## 2. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire signifie l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il se compose d'ultraviolets, de la lumière visible, d'ondes radio et des rayons cosmiques.

**a) Formes du rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10<sup>-6</sup>m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [14].

- **Rayonnement direct** : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un Pyranomètre.

- **Rayonnement diffus** : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

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

- **Rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.



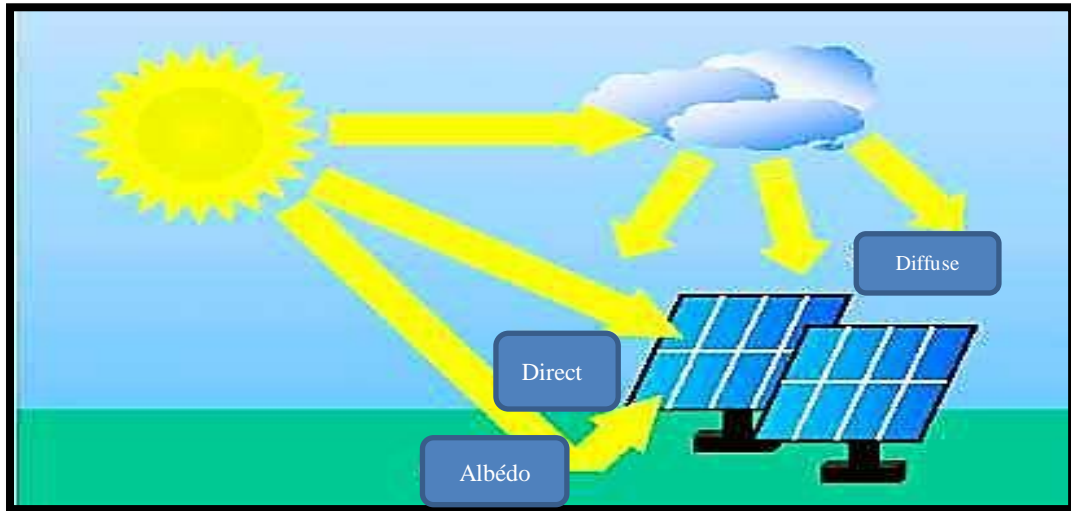


Fig. I.3 Composants du rayonnement solaire [14]

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

**I.5.1. Energie solaire thermique :**

Consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cède leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour échauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. [9]

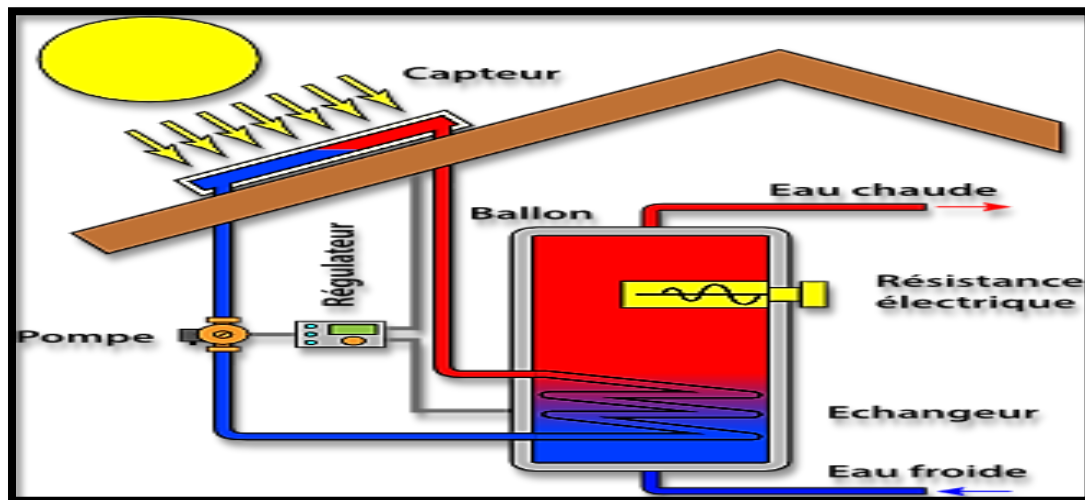


Fig. I.4 Système solaire thermique

### I.5.2. Energie solaire passive :

Est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.



Fig. I.5 Energie solaire passive

### I.5.3. Système solaire photovoltaïque :

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. [15]

#### I.5.3.1. Système photovoltaïque autonome

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergies. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [16] :

##### 1. Système autonome sans stockage électrochimique

Dans ce cas, système 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 [17].

## 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 [17].

### I.5.3.2. 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 [18].

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction P-N (homo jonction ; les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas).
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.

#### 1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un composant électronique capable de fournir de l'énergie si elle est éclairée convenablement, elle est composée de deux semi-conducteurs, une des faces est dopée N l'autre dopée de type P. Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique [18].

### I.5.3.3. De la cellule au champ photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module soit en série au bien en parallèle ou les deux à la fois. Si tous les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le module photovoltaïque qui fournit un courant ( $I_{pv}$ ) sous une tension ( $V_{pv}$ ). Donc un champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus élevé.

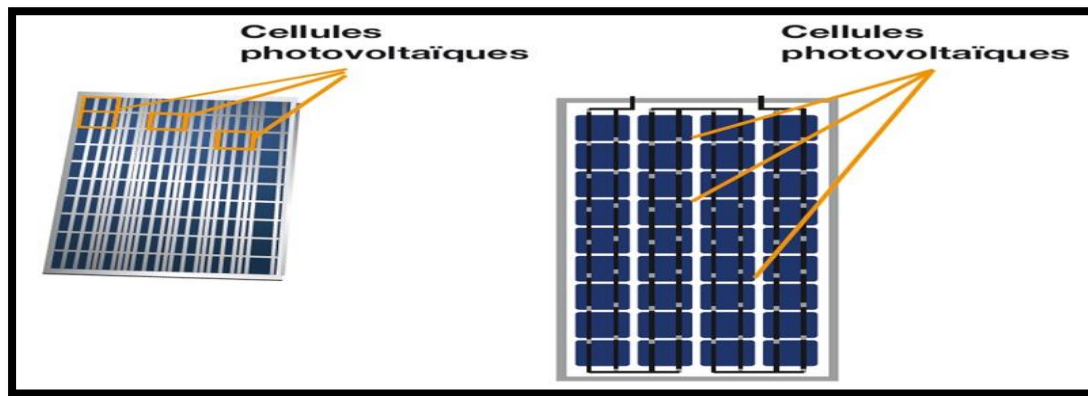


Fig. I.6 De la cellule au champ photovoltaïque [19]

### 1. Association en série

En additionnant des cellule (module) identique en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellule (module) en série.

### 2. Association en parallèle

En additionnant des cellule (module) identique en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellule (module) en parallèle dans la branche

### 3. Association mixte (série+ parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, il est nécessaire d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle.

#### I.5.3.4. Types de cellules

Il existe différents types de cellules photoélectriques en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. La cellule de silicium cristallin (Si) est Le type le plus courant. Ce matériau est découpé en feuilles très minces en forme d'un disque, monocristallines ou poly-cristallines, en fonction du processus de fabrication de la barre de silicium [18].

### 1. Cellules monocristallines

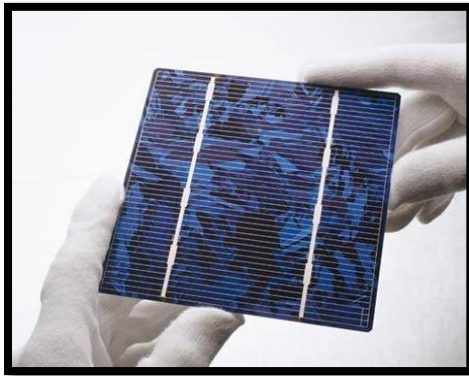
Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles

sont en général d'un bleu uniforme.

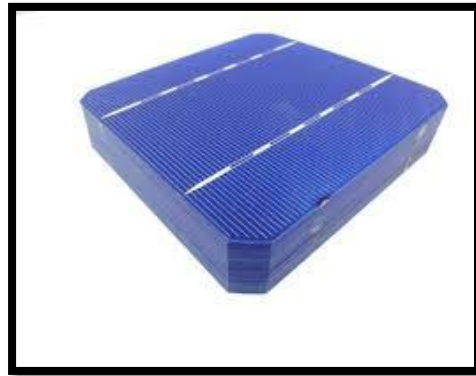
- Un bon rendement, sensibilité accrue au rayonnement direct, cout élevé .

## 2. Cellules poly-cristallines

Elles sont constituées de plusieurs cristaux .la cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement moins que les celles monocristalline Fort sensibilité a la température Cout moins élevé.



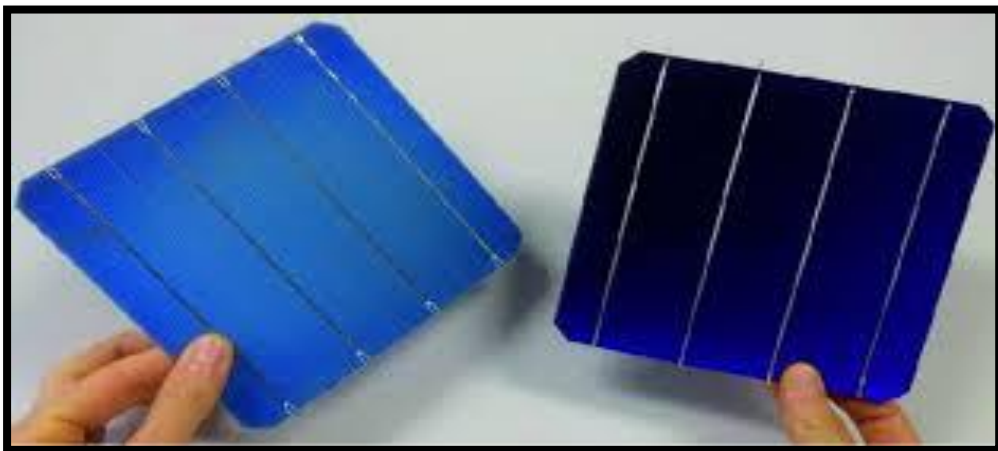
**Fig. I.7:** Cellule photovoltaïque Monocristallines



**FigI.8 :** Cellule photovoltaïque poly-cristallines

## 3. Cellules couches minces(Tandem)

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice).



**Fig. I.9** Cellule photovoltaïque couche mince (Tandem)

#### 4. Cellule multi-jonction

Les cellules multi jonctions sont constituées de différentes couches qui permettent d'absorber la majorité de spectre solaire.

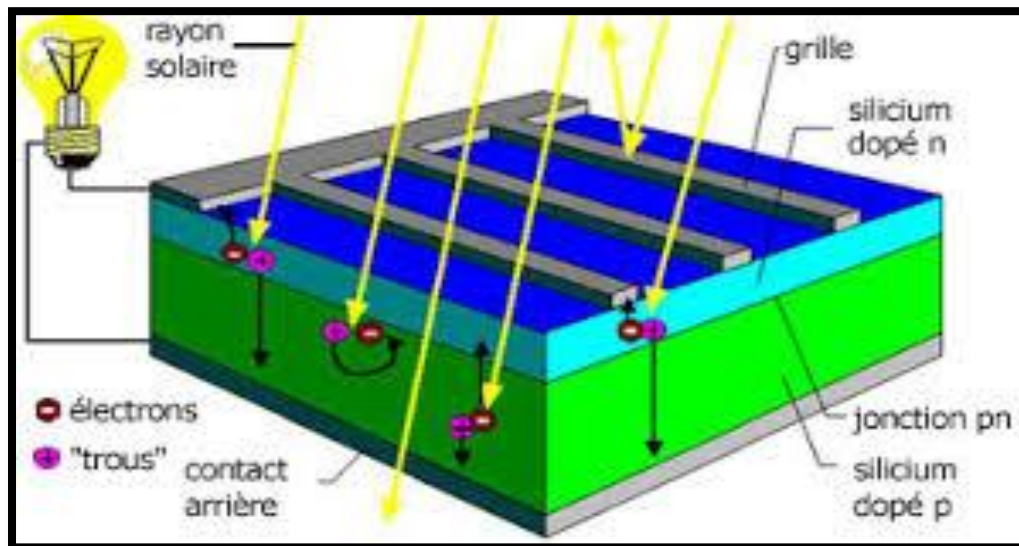


Fig. I.10 Schéma d'une cellule PV en silicium [ 19 ].

### I.6. Stockage d'énergie électrique

Les lois de la physique nous apprennent qu'on ne peut pas stocker d'une façon directe l'électricité. Pour ça il faut la transformer en d'autres formes d'énergies potentiellement stockables, (mécanique, thermique, électrochimique ...etc.). La transformation se fait à l'aide des convertisseurs réversibles capable par transformation inverse de récupérer l'énergie. Un classement des techniques de stockage peut se faire :

**1. Techniques de stockage à grande échelle** : dont les usages peuvent être utilisés par un gestionnaire de réseau. Ces techniques comprennent le stockage : sous forme d'énergie gravitaire (systèmes hydrauliques), sous forme d'énergie thermique, sous forme d'énergie de pression (air comprimé), et enfin sous forme chimique (batteries chimiques) [20].

**2. Techniques de stockage à moyenne et faible échelles** : dont les usages peuvent également servir le réseau, mais aussi la production décentralisée pour de nombreuses applications. Ces techniques comprennent le stockage : sous forme (mécanique...ext) [20].

Actuellement, plusieurs types d'accumulateurs sont utilisés dans les systèmes PV comme :



- **Les accumulateurs au plomb-acide** sont les plus utilisés, ils fonctionnent par un électrolyte.
- **Les accumulateurs au nickel-cadmium** sont les plus fiables, les fabricants de ces batteries assurent qu'elles peuvent totalement déchargées sans aucun dommage.

### I.6.1. Principe de fonctionnement d'une batterie

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre.

Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système.

Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire.

### I.6.2. Caractéristiques principales d'une batterie

- Parmi les caractéristiques de la batterie, nous pouvons citer :

**1. Capacité en Ampère heure (Ah) :** Les ampères heures d'une batterie sont simplement le nombre d'ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

**2. Densité d'énergie massique Wh/kg (ou volumique Wh/l) :** Cela correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) de l'accumulateur.

**3. Densité de puissance massique :** En watt par kilogramme (W/kg).

**4. Cyclable (Exprimée en nombre de cycles):** caractérise la durée de vie de l'accumulateur. [20]

### I.7. Convertisseurs statique

Le convertisseur d'énergie a un rôle d'adapter le transfert de l'énergie entre le générateur photovoltaïque et la charge. Il peut être un convertisseur DC/AC pour une charge à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour une charge à courant continu [21].

### 1.7.1. Convertisseur DC/DC (hacheur)

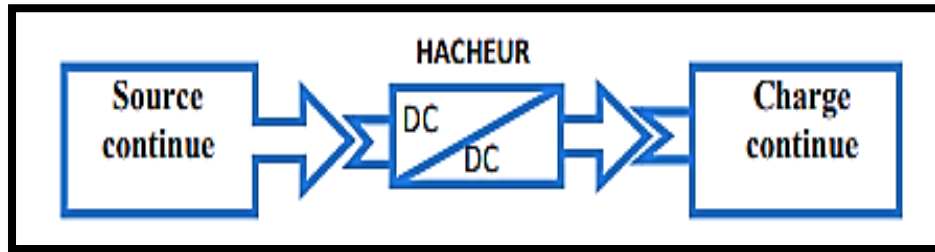


Fig. I.11.principe d'un hacheur

Ils ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.

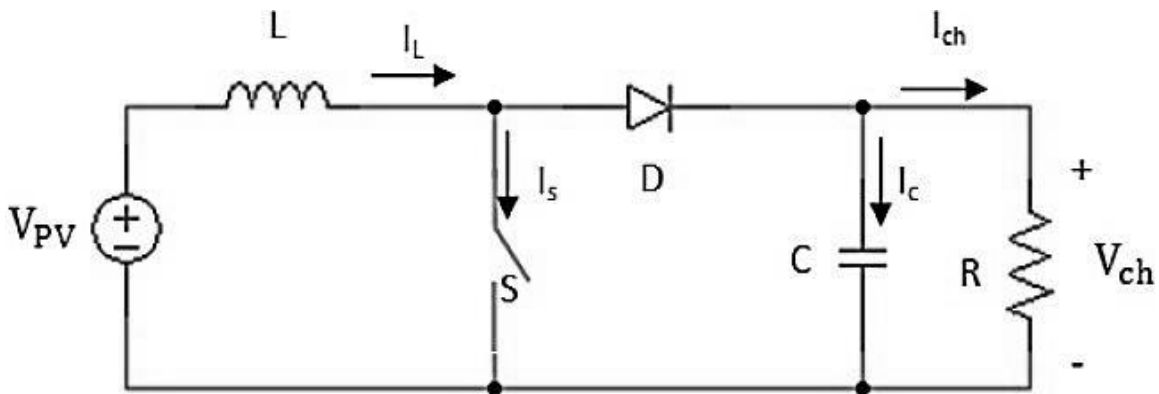


Fig. I.12 : Schéma électrique équivalent d'un hacheur parallèle.

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée [22]. L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. 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 la source. Elle sera appliquée sur la charge (R) à travers la diode (D) [23].

## I.8. Boîtes de jonction

Dans un système photovoltaïque, les modules sont divisés en strings et en champs. Le raccordement en série des modules s'effectue depuis les modules eux-mêmes, tandis que des boîtes de jonction sont utilisées pour le branchement en parallèle des strings [24].

Après avoir calculé les sections des conducteurs analytiquement, le choix final doit être prit



selon les normes correspondantes, tout en prend compte des facteurs technico- économique et de la disponibilité commerciale.

### **I.9.Mise à la terre**

La mise à la terre d'une installation photovoltaïque est obligatoire pour assurer la protection des équipements et des personnes. Pour cela elle doit subvenir à la conformité des normes du constructeur et aux normes UTE 15-712 et UTE 15-100. Son mal façonnement peut avoir des conséquences graves comme la détérioration des biens et la mise en danger de la vie. [25]

### **I.10.Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques**

#### **I.10.1. Avantages**

- Ils sont des fonctionnements sûrs, sont pas polluants et silencieux
- Ils sont très fiables, Ils n'exigent presque aucun entretien
- Ils sont compétitifs dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales, la durée de vie (20 à 30 ans)

#### **I.10.2. Inconvénients**

Les systèmes solaires électriques ont aussi des limites :

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie,
- Ils sont dépendants des conditions météorologiques.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Il est difficile de stocker de l'énergie solaire.
- Le cout élevé

### **I.11.Conclusion**

Dans ce chapitre, Nous avons définie l'énergie renouvelable et rétabli ces ressources et ces types, ainsi le système PV et son stockage, On a mis en évidence son principe de fonctionnement et ces différentes technologies. Nous avons également essayé de détailler et d'identifier les majors parties constituantes de ce type d'installation tout en expliquant vaguement son processus de production.

**Chapitre II**  
**Modélisation, optimisation et**  
**simulation du système**  
**photovoltaïque**

### II.1.Introduction

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système photovoltaïque avec stockage, nous allons procéder à sa modélisation. Ceci nécessite l'identification d'un ensemble d'équations et de modèles mathématiques qui caractérisent chaque élément que comporte notre mécanisme.

L'objectif de cette modélisation est de construire une procédure de simulation sous le logiciel Matlab-Simulink, pour déterminer les caractéristiques dynamiques du panneau photovoltaïque et de la batterie. À partir de ces composants, nous allons finalement optimiser le système de production pour augmenter son rendement.

### II.2. Système autonome avec stockage

C'est le système le plus répandu dans les sites isolés. 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, le stockage d'hydrogène, les volants d'inerties, les super capacités et les batteries électrochimiques ont été présentés au chapitre 1.

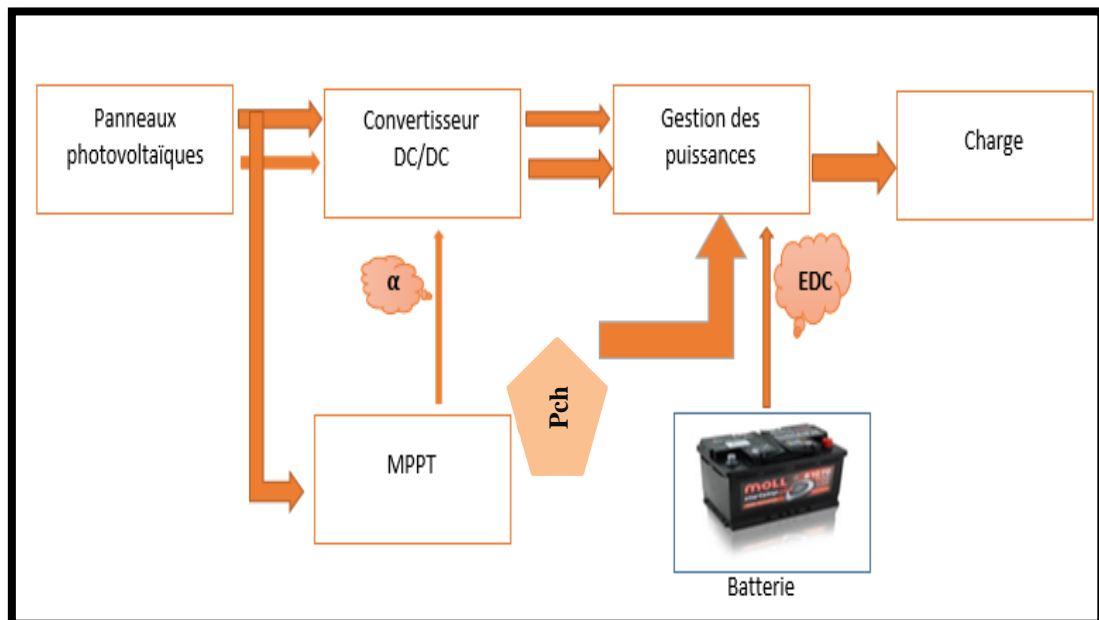


Fig. II .1 Système globale à étudier

### II.3. Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque

On rencontre dans la littérature scientifique plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent par la procédure et le nombre de paramètre intervenant dans le calcul de la tension et du courant que va produire le GPV. Parmi ces modèles on peut citer les suivants [26] :

#### II.3.1. Le modèle idéalisé

C'est le module le plus simplifié car la valeur de la résistance ( $R_p$ ) étant généralement grande elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée). Ainsi la valeur de la résistance ( $R_s$ ) est généralement petite elle est supposé nulle.

##### 1. Le modèle à une diode

Pour tenir compte des chutes de tension dans les zones P et N on doit ajouter dans le modèle idéalisé une résistance série (équivalente à  $R_s$ ) et pour le courant de fuite une résistance parallèle (équivalente à  $R_p$ ).

##### 2. Le modèle à deux diodes

D'autre part des modèles plus complexes voit aussi le jour le modèle à deux diodes ayant une diode supplémentaire en parallèle à la première, permettant de reproduire les effets chimiques de recombinaison des électrons.

##### 3. Le modèle à trois diodes

La troisième diode incluant dans le modèle à deux diodes fait reprendre les effets non pris en compte dans les autres modèle (ex : courant de fuite liée aux diodes).

Par manque de précision par rapport au modèle idéalisé et la complexité des autres modèles, le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision, il apparait mieux adapté pour notre étude.

**« Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle à une diode »**

II.3.2. Modèle à une diode

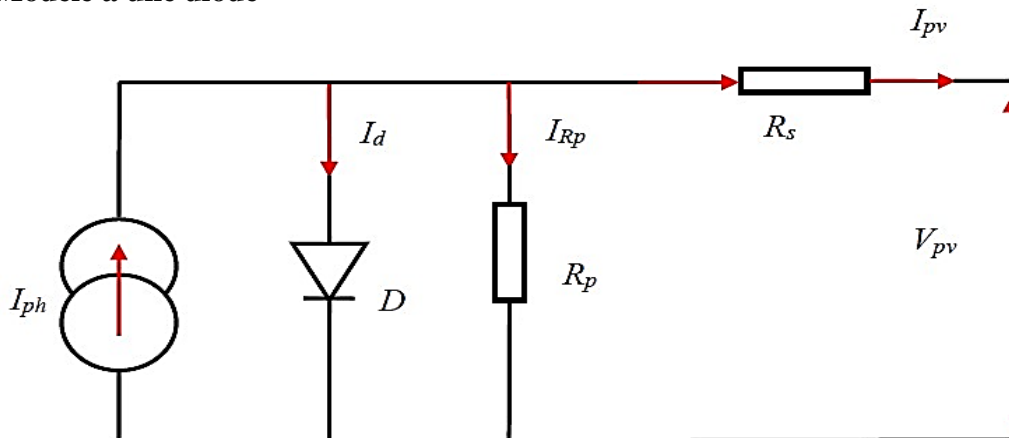


Fig. II.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.

A partir de la Fig. II.2, la loi de Kirchhoff nous a permis d'écrire la relation suivante [27] :

a) Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

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

Avec :

- $I_{pv}$  : le courant délivré par le module (A) ;
- $I_{ph}$  : le courant photo (A) ;
- $I_d$  : le courant de la diode (A) ;
- $I_{Rp}$  : le courant de shunt (A) ;

b) Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 \times E_s \left( 1 + P_2(E_s - E_{s \text{ ref}}) + P_3(T_j - T_j \text{ ref}) \right) \quad (\text{II.2})$$

- $E_{s \text{ ref}}, T_j \text{ ref}$  : Représente l'éclairement et la température sous conditions STC ;
- $T_j$  : Température de jonction ;
- $P_1, P_2, P_3, P_4$  : Paramètres constants ;

$T_j$  est donné par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \left[ \frac{Noct-20}{800} \right] \quad (\text{II.3})$$

- $N_{oct}$  : Température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire ;
- $T_a$  : Température ambiante.

$$I_{0d} = P_4 \times T_j^3 \times \exp\left(\frac{E_g}{k.T_j}\right) \quad (\text{II.4})$$

**Avec :**

- $E_g$  : Energie de gap ( $1.76 \times 10^{-19}$ ) ;
- $I_{0d}$  : Courant de saturation de la diode (A) ;
- $q$  : Charge élémentaire ( $1.6 \times 10^{-19}$  C) ;
- $k$  : Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/k) ;
- $A$  : Coefficient idéalisé de la cellule ;
- $N_s$  : Nombre de cellules connectées en séries.

**c) Le courant de la diode est donné par :**

$$I_d = I_{0d} \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s.I_{pv})}{k.A.N_s.T_j}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

**d) Le courant de la résistance shunt et donné par :**

$$I_{Rp} = \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

**Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante :**

$$I_{pv} = P_1 \times E_s \left( 1 + P_2(E_s - E_{s,ref}) + P_3(T_j - T_{j,ref}) \right) - P_4 \times T_j^3 \times \exp\left(\frac{E_g}{k.T_j}\right) \times \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s.I_{pv})}{k.A.N_s.T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.7})$$

### **II.3.2.1 Détermination des paramètres du modèle :**

Les paramètres constants  $P_i$ , le facteur d'idéalité  $A$  et les résistances du modèle du GPV sont obtenus par la résolution numérique (moindre carrés) sous Matlab/Simulink :

<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>A</b>	<b>Rs</b>	<b>Rp</b>
0.00345	$0.58 \times 10^{-5}$	$-0.336 \times 10^{-4}$	31.2367	1	0.6	150

**Tableau II. 1** Paramètres obtenu du modèle à une diode [27]

C'est le modèle le plus simple a utilisé, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident.

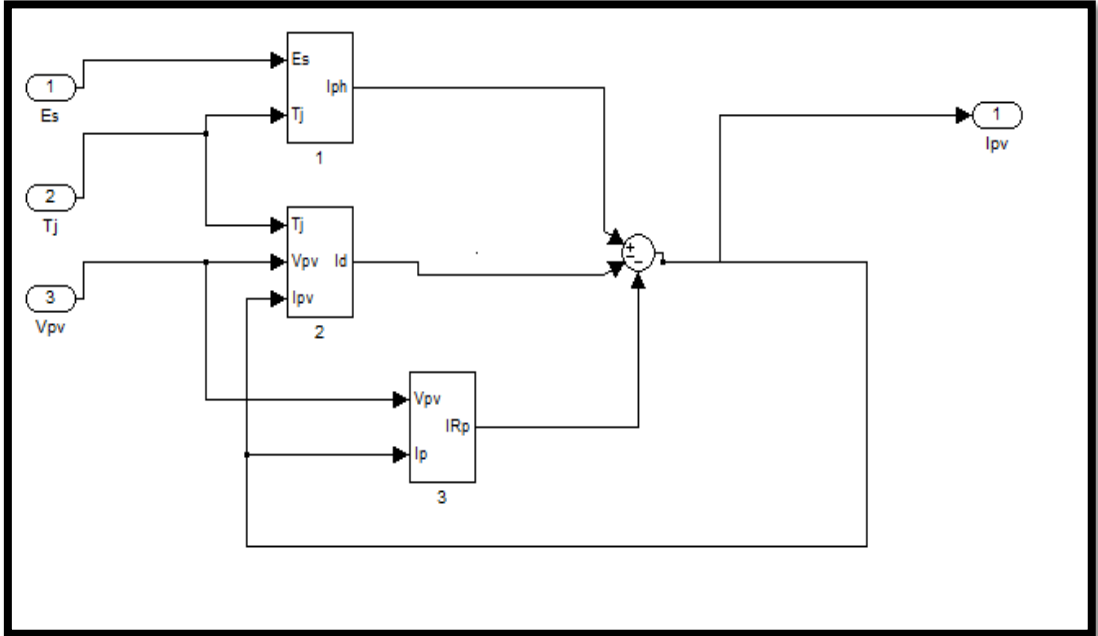


Fig. II.3 Schéma bloc d'une diode.

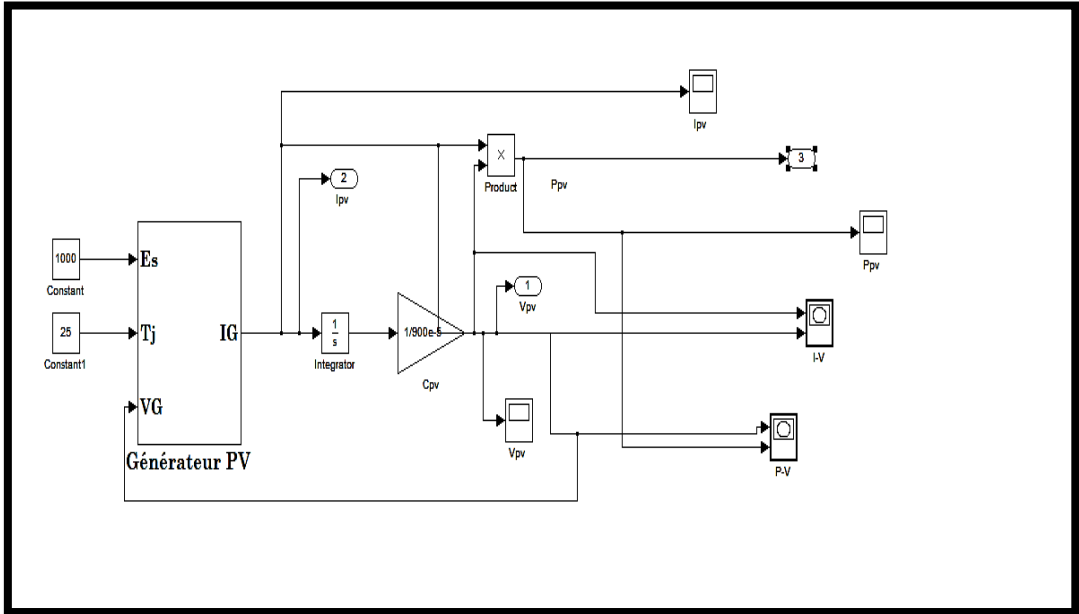


Fig. II.4 Schéma bloc de générateur PV

➤ Résultat de simulation du modèle à une diode :

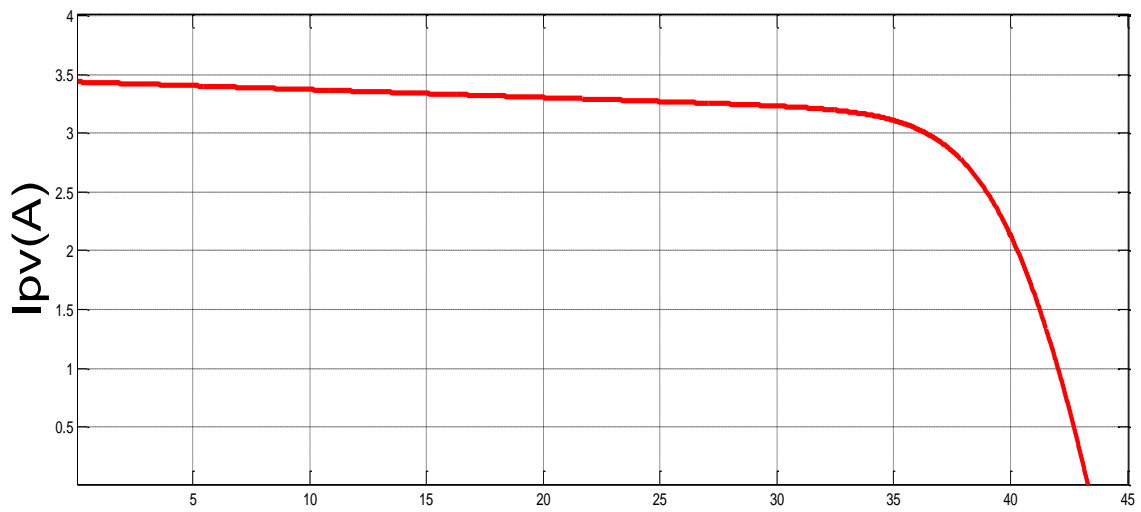


Fig. II.5 Influence sur la caractéristique [ $I_{pv}=f(V_{pv})$ ]

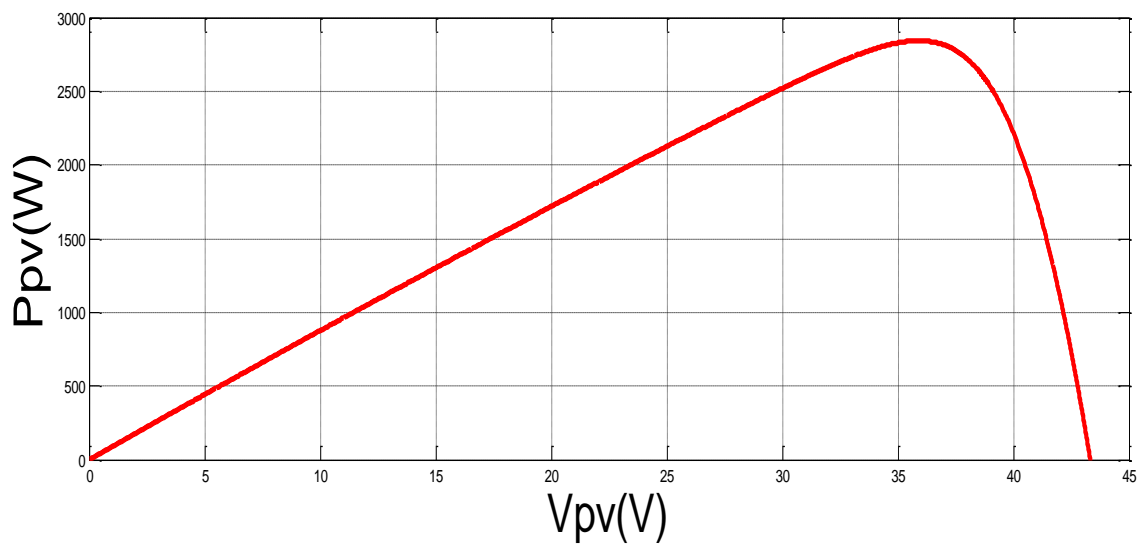
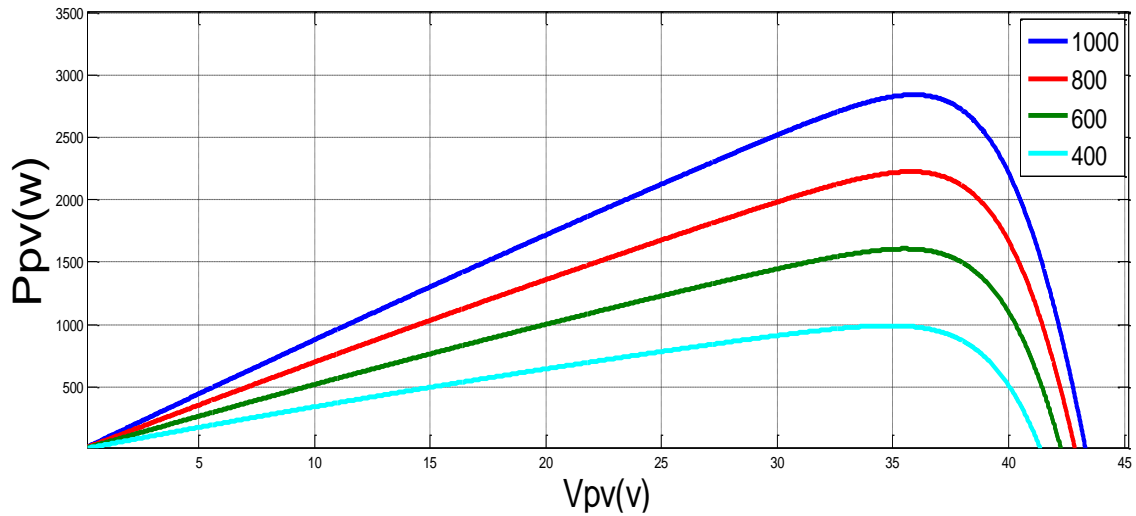


Fig. II.6 Influence sur la caractéristique de [ $P_{pv}=f(V_{pv})$ ]

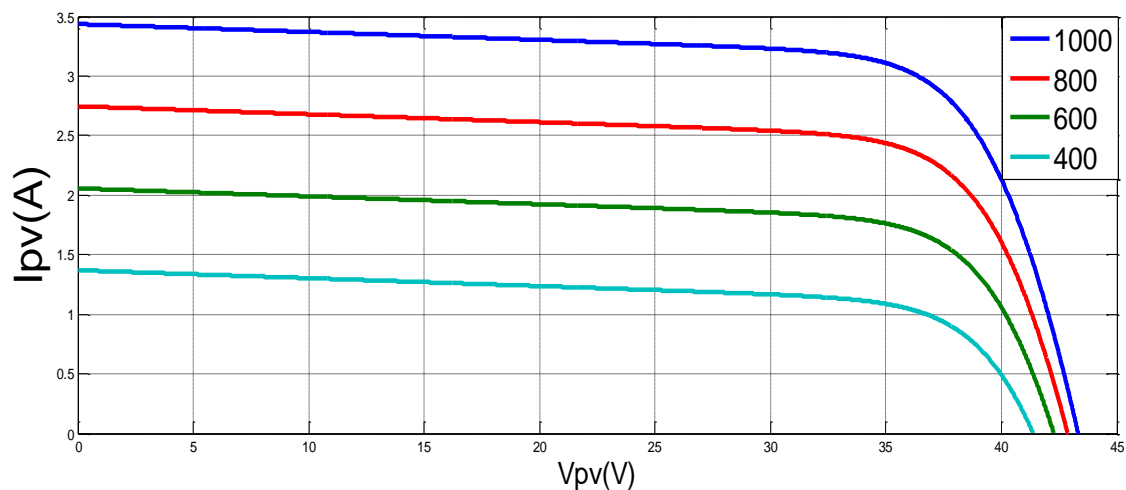
Pour voir l'influence de l'ensoleillement nous allons tracer les caractéristiques de [ $P_{pv}=f(V_{pv})$ ] et [ $I_{pv}=f(V_{pv})$ ] pour différentes valeurs d'ensoleillement et une température constante  $T_c=25^\circ\text{C}$ .



➤ **Résultat de simulation :**



**Fig. II.7** Influence de l'éclairement sur la caractéristique [ $P_{pv}=f(V_{pv})$ ]



**Fig. II.8** Influence de l'éclairement sur la caractéristique [ $I_{pv}=f(V_{pv})$ ]

• **Discussion des résultats :**

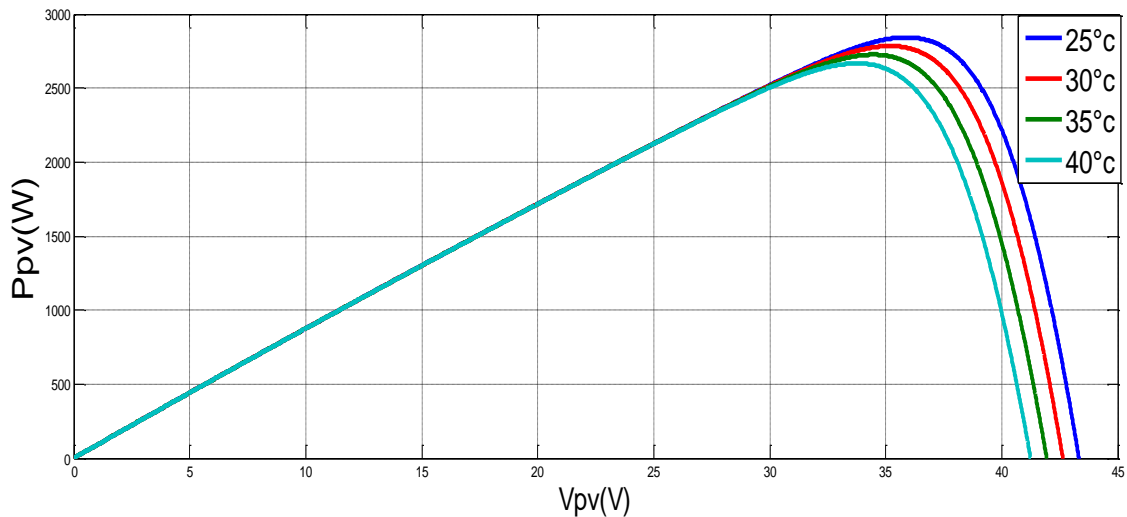
A-Influence de l'ensoleillement une température de 25°C est maintenue constante, l'ensoleillement ( $E_s$ ) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (Figure II.7, II.8).

On remarque que l'augmentation de l'éclairement fait augmenter la valeur du courant, et le point de puissance optimale par contre la tension augment faiblement, contrairement aux effets de température qui sont proportionnellement inverses.

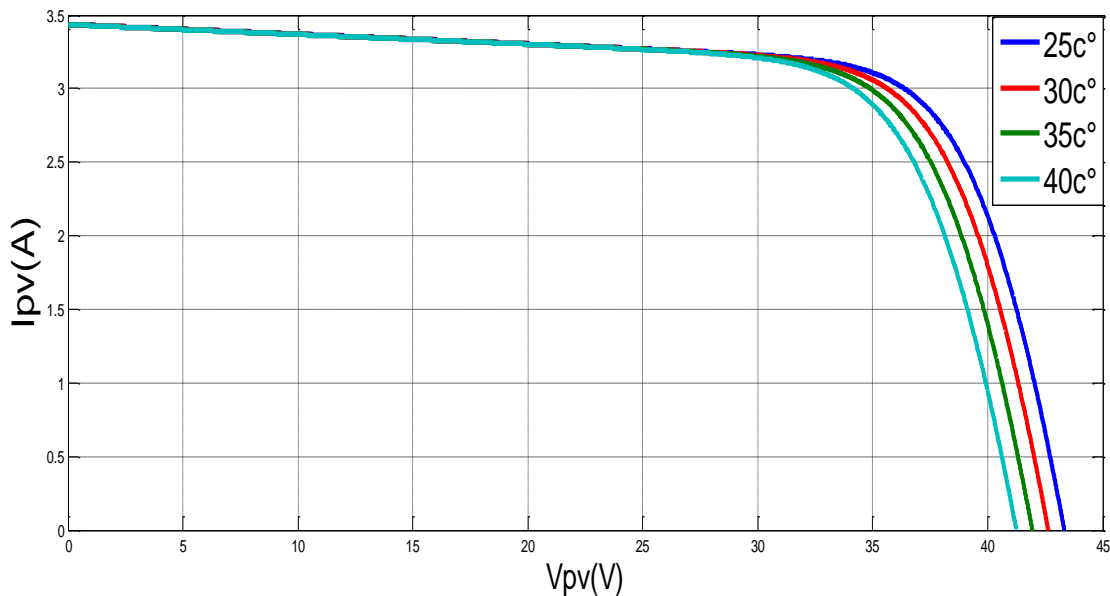
Pour voir l'influence de température nous tracer les caractéristiques de  $[P_{pv}=f(V_{pv})]$  et  $[I_{pv}=f(V_{pv})]$ , profil du l'enseillement PV pour différent valeur température et un l'enseillement constant

$E=1000W/m^2$ .

✓ **Résultat de simulation :**



**Fig. II.9:** Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$



**Fig. II.10** Influence de la température sur la caractéristique  $[I_{pv}=f(V_{pv})]$

- **Discussion des résultats**

Influence de la température Pour un ensoleillement  $1000\text{W}/\text{m}^2$  maintenu constant, nous varions la température, les figures (II.9 ; II.10) représentent les résultats de notre simulation.

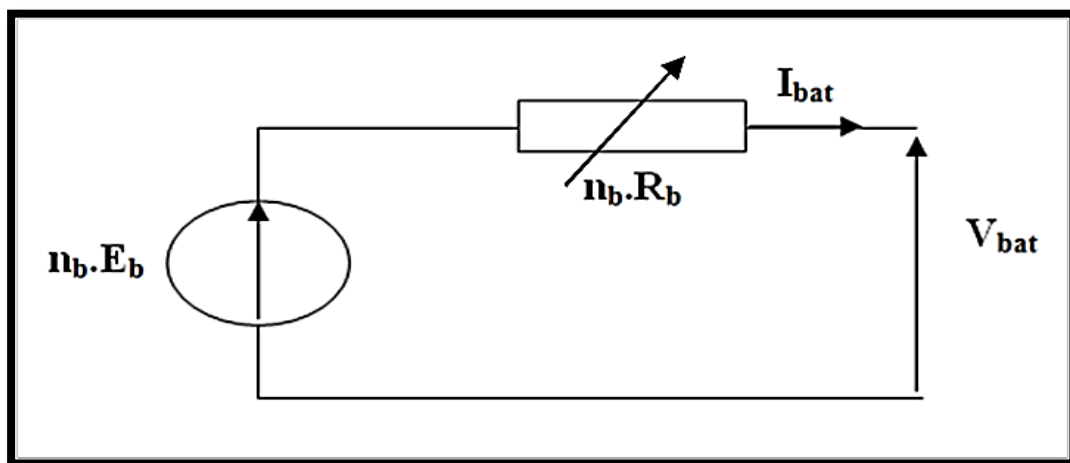
On remarque que l'augmentation de la température fait diminuer la valeur de la tension et le point de puissance optimale, par contre le courant diminue faiblement.

### II.4. Modélisation système de stockage (batteries)

Il existe plusieurs modèles de batterie de plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise de compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et leurs contraintes auxquelles elles sont les batteries réagissent différemment et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances.

#### II.4.1 Modèle de CIEMAT :

C'est un modèle caractérisé par la mise en série d'une f.é.m. avec une résistance variable, comme le montre la figure II.11. Les caractéristiques de la source de tension ( $E_b$ ) et la résistance interne ( $R_b$ ) dépendent de la température et l'Etat de charge de batterie [20].



**Fig. II.11** Schéma équivalent du modèle CIEMAT [20]

La modélisation de l'élément de stockage de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est importante dans la simulation des systèmes autonome :

Pour un nombre de cellule  $n_b$  l'équation de la tension est :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_b \cdot I_{bat} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- $V_{bat}$  : Tension de batterie,  $I_{bat}$  : Courant de la batterie ;
- $E_b$  : Force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie ;
- $R_b$  : Résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.

### 1. Modèle de la capacité

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie ( $C_{bat}$ ) que peut restituer la batterie, en fonction du courant de décharge ( $I_{bat}$ ). Son expression est établie à partir du courant (II0) correspondant au régime de fonctionnement (C10).

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1,67}{1 + 0,67 \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0,9}} (0,005 \cdot \Delta T) \quad (\text{II.9})$$

$$\Delta T = T - T_{ref}$$

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

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II.10})$$

Avec:

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

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes :

➤ **Tension en décharge :**

$$V_{bat-d} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (\text{II.11})$$

➤ **Tension en charge :**

$$V_{bat-c} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left( \frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0,86}} + \frac{0,48}{(1-EDC)^{1,2}} + 0.036 \right) (0,025 \cdot \Delta T) \quad (\text{II.12})$$

## 2. Résistance de la batterie

La résistance interne varie selon l'état de charge, la température et l'état de vieillissement.

De façon générale la résistance interne d'une batterie augmente quand l'état de charge croît.

De même pour un état de charge donné, la résistance interne d'une batterie augmente quand la batterie vieillit.

- **Résistance en décharge**

L'équation de la résistance de la batterie pendant la décharge est la suivante :

$$R_d = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{6}{1+|I_{bat}|^{0,86}} + \frac{0,48}{(1-EDC)^{1,2}} + 0.036 \right) (0,025 \cdot \Delta T) \quad (II.13)$$

- **Résistance en charge**

Pendant la charge la résistance de la batterie est la suivante :

$$R_c = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{4}{1+|I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (II.14)$$

### II .4.2. Simulation de la batterie modèle CIEMAT

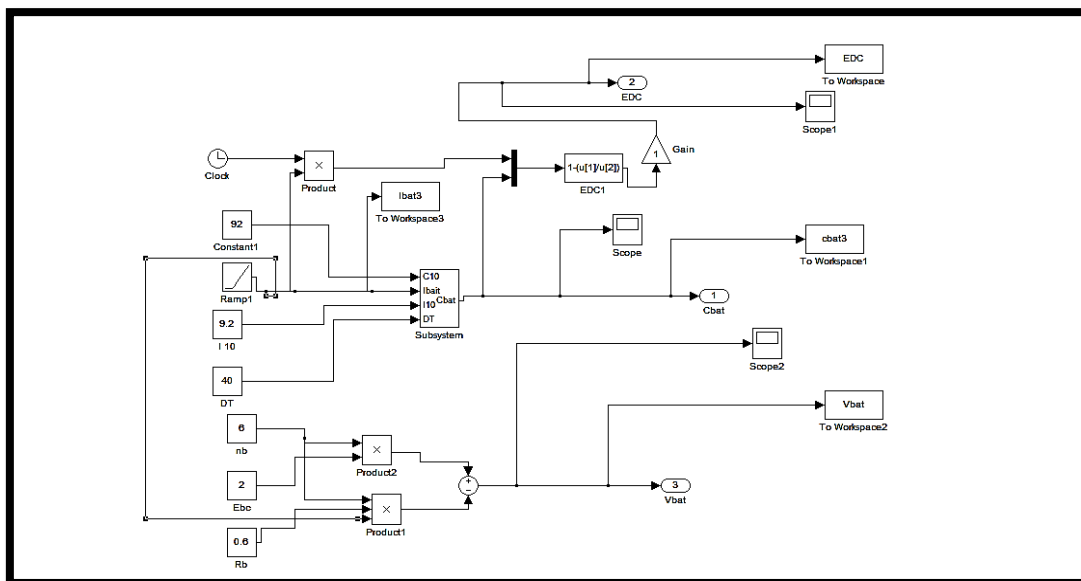


Fig. II.12 Schéma bloc du modèle CIEMAT

### • Influence de la température sur la capacité

La température de la batterie influe énormément sur le comportement des caractéristiques de fonctionnement de base du système de stockage et en particulier sur sa capacité de stockage.

La figure (13) montre l'influence de la température sur capacité de stockage des batteries :

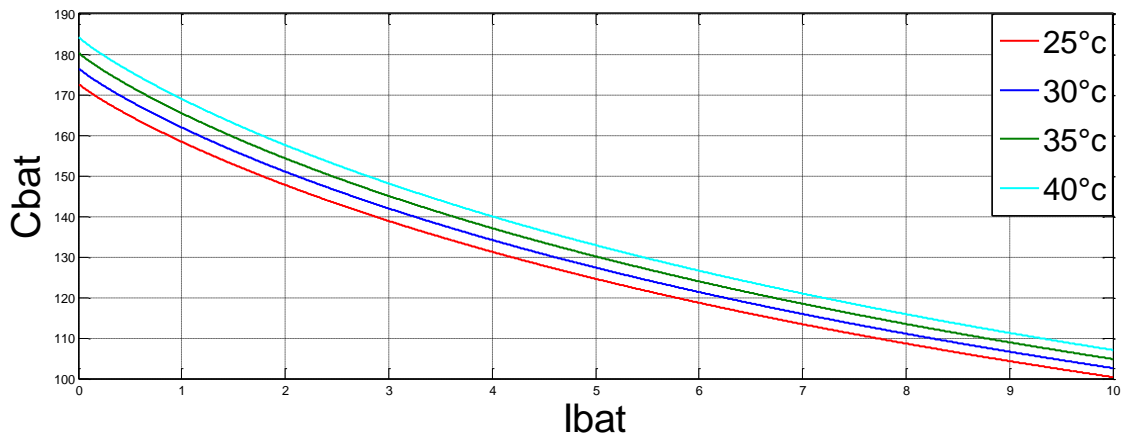


Fig. II.13 : Influence de la température sur la capacité de la batterie

### ➤ Remarque :

On remarque que l'augmentation de la température est accompagnée d'une remontée modérée de la capacité de stockage et ceci peut diminuer la durée de vie de la batterie.

### • Influence de la température sur l'état de charge de la batterie :

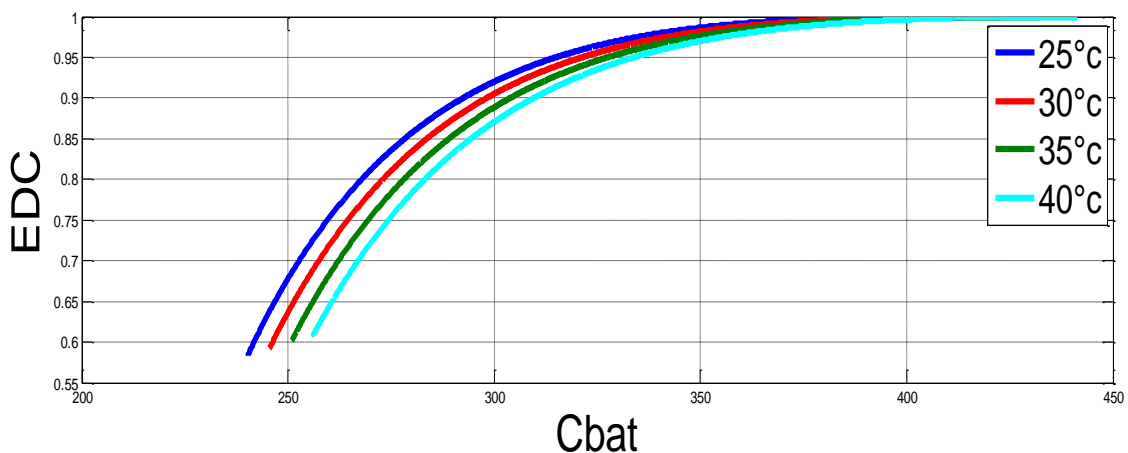


Fig. II.14: Variation de l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures

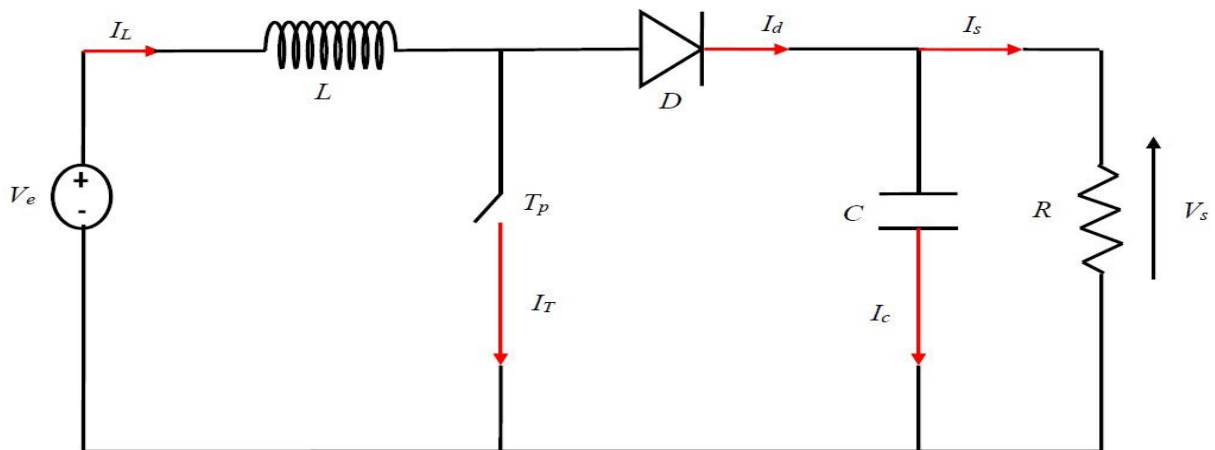
➤ **Remarque :**

D'après cette figure nous remarquons que l'augmentation de la température fait diminuer l'état de charge de la batterie, ce qui veut dire qu'une batterie soumise à une basse température se charge plus rapidement qu'une autre à haute température.

**II.5. Modélisation du hacheur :**

La figure (II.15) représente le circuit électrique, il est constitué d'un interrupteur de puissance (K), une inductance (L), une diode de redressement (D) et un condensateur (C) et une résistance (R).

- **1ere étape :** L'interrupteur est fermé (passant) et la diode bloquée, cette phase dure de 0 à  $\alpha T$ , sachant que le rapport cyclique  $\alpha$  est compris entre 0 et 1. Le condensateur est supposé initialement chargé, il fournit de l'énergie à la charge et un courant  $I_{Ch}$  circule dans cette dernière ; d'où la déduction des équations suivantes : [29]



**Fig. II.15** Hacheur boost

$$I_L = 0 = I_c + I_s \quad \text{(II.15)}$$

$$V_e = V_L \quad \text{(II.16)}$$

- **2ème étape :** L'interrupteur est ouvert (bloqué), la diode est passante, cette phase dure de  $\alpha T$  à T.

$$I_L = I_c + I_s \quad \text{(II.17)}$$

$$V_e = V_L + V_s \quad \text{(II.18)}$$

-On représente l'interrupteur lorsqu'il est fermé par un 1 (K=1), et lorsque l'interrupteur est ouvert par un 0 (K=0).

$$V_e = V_L + V_s (1-K) \quad (\text{II.19})$$

$$I_L = (1 - K) I_c + I_s \quad (\text{II.20})$$

-On déduit alors la tension aux bornes du panneau photovoltaïque et l'intensité du courant de charge par les équations suivantes :

$$v_e = \frac{L di}{dt} + v_s (1 - \alpha) \quad (\text{II.21})$$

$$I_s = I_L (1 - \alpha) - \frac{c dv_s}{dt} \quad (\text{II.22})$$

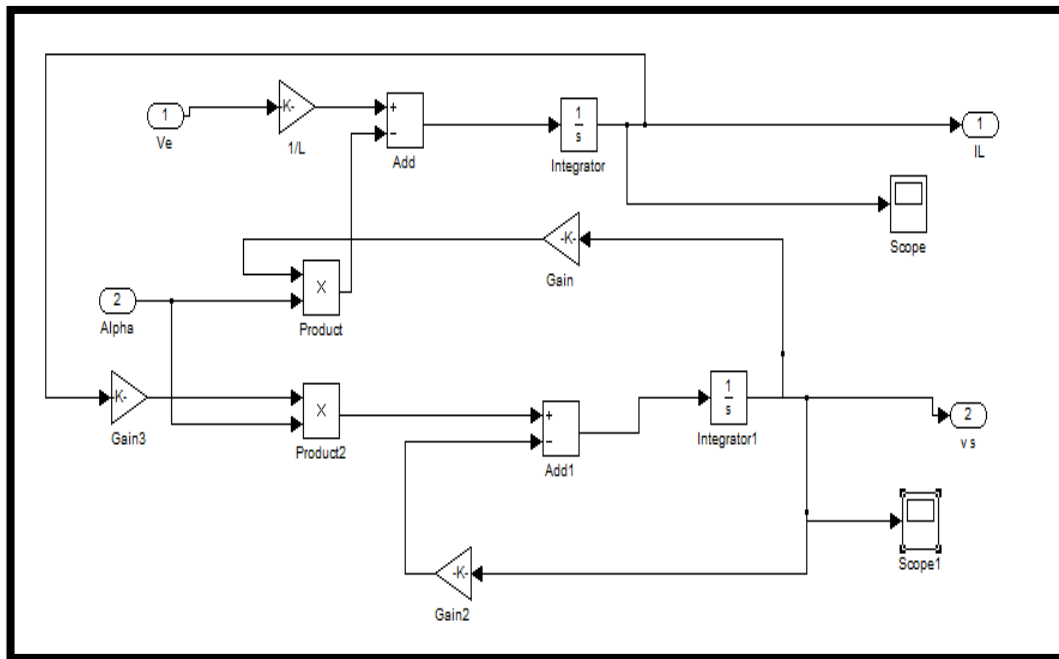


Fig. II.16 Schéma bloc d'un hacheur boost

## II.6. Etude d'une technique d'optimisation (MPPT) :

D'appliquer un algorithme d'optimisation le plus classique à un système photovoltaïque. Par définition, une commande MPPT associée à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quel que soit les conditions météorologiques (irradiation, température) [30].



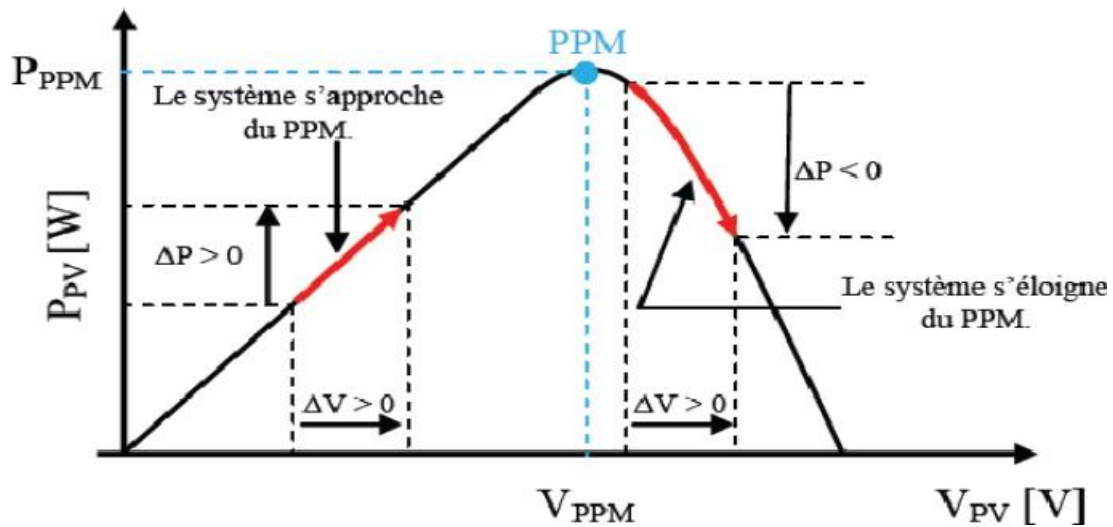


Fig. II.17 : Caractéristique puissance – tension d'un panneau photovoltaïque [30]

La figure II.17 montre la caractéristique de la puissance tension ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ ) d'un panneau photovoltaïque fournit la puissance disponible maximum  $P_{max}$ . Le point de puissance maximums (MPP) lorsque le pente ( $dP_{pv}/dV_{pv}$ ) est nulle.

### II.6.1. Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max :

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes.

#### II.6.1.1 Les méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum, comme ( méthode de courant constant).

#### II.6.1.2 Les méthodes directes :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux, les méthodes existes sont :

- Méthode de perturbation et observation (P&O).

- Méthode de conductance incrémentielle (CI).
- Méthode de logique floue.

Le contrôle qui fournit une extraction continue du point de puissance maximale est donné par l'équation suivante :

$$v_{opt} = K \int \frac{dp}{dv} \times dt = K \int \frac{\Delta p}{\Delta v} \times dt \quad (\text{II.23})$$

« Dans notre travail, nous avons utilisé la méthode (P&O) »

### II.6.2 La méthode de perturbation et observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée de fait de sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires, la tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Si la puissance aux bornes du panneau est augmentée la perturbation suivante est faite la même direction, si la puissance diminue la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.

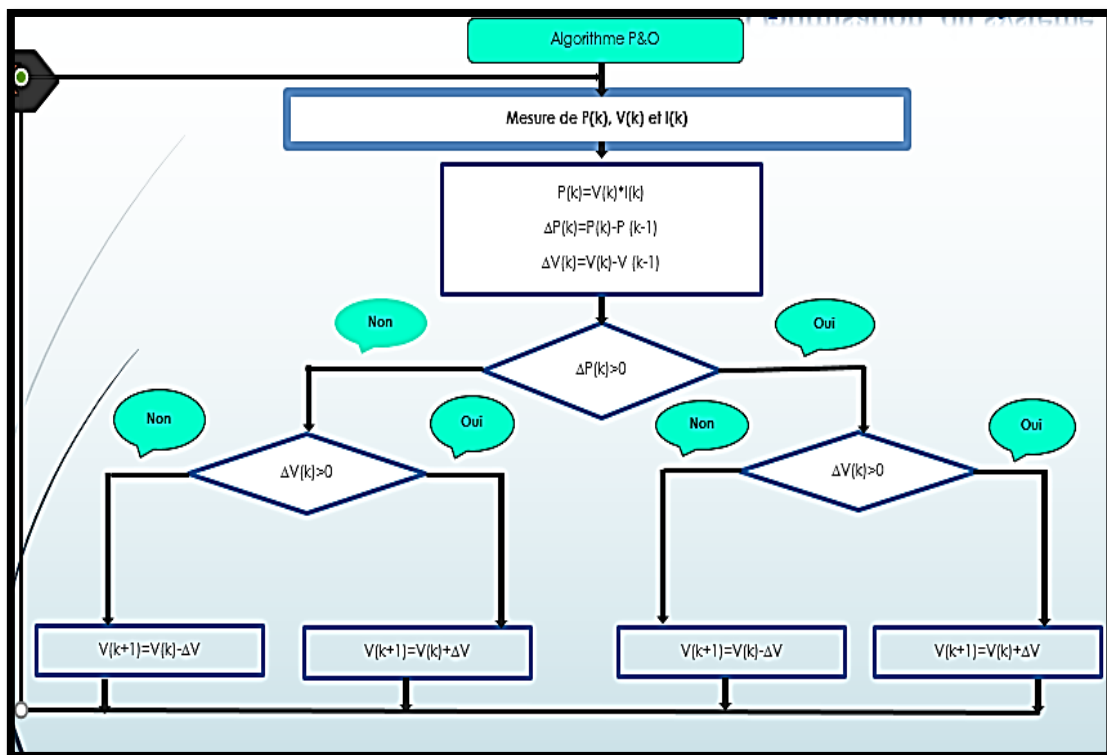


Fig. II.18 Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O)

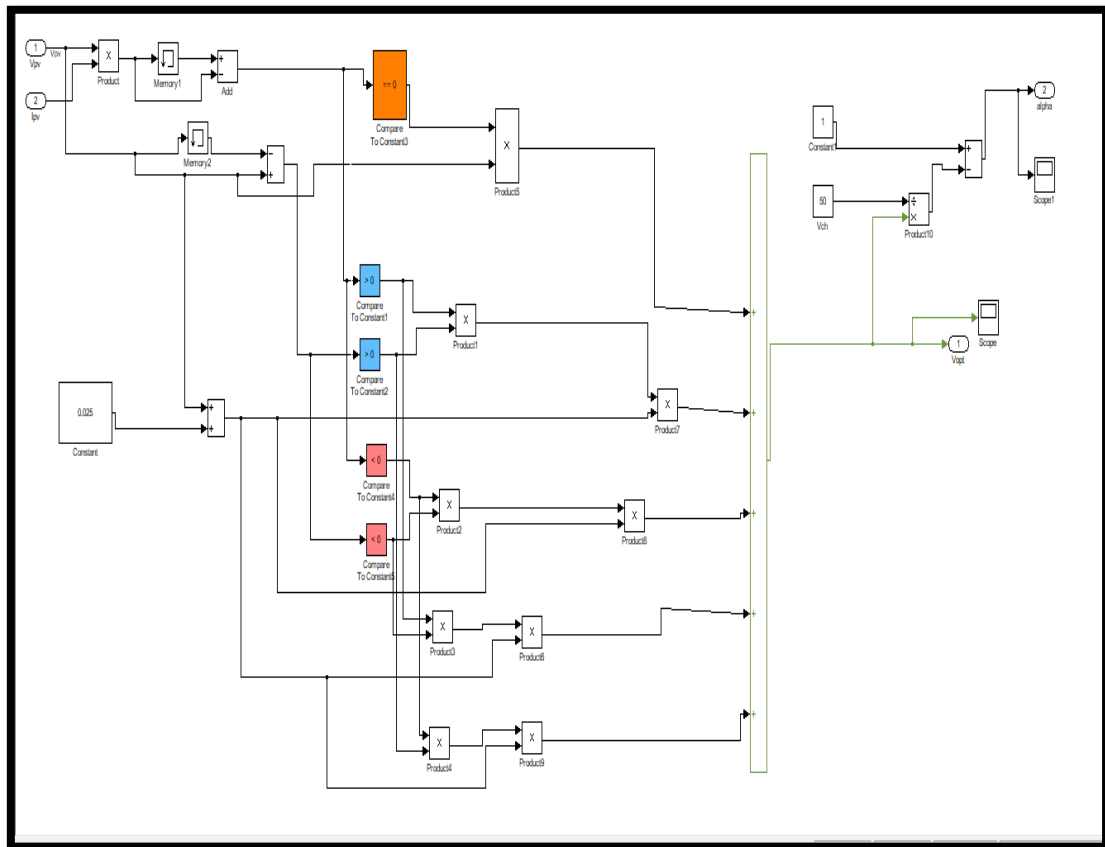


Fig. II.19 Schéma bloc de la P&O

## II.7.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation de chaque composant du système photovoltaïque (champ PV, convertisseurs (DC/DC) et la batterie).

En suit, nous avons décrit la commande MPPT qui permet la recherche de point précis de la puissance maximale sous les variations des conditions environnementales, pour cela on a appliqué l'algorithme perturbation et observation "P&O" car cette méthode a la particularité d'avoir une structure de régulation simple et peu de paramètres de mesure.

Cela nous a permis d'élaborer un bloc de simulation du système photovoltaïque.

**Chapitre III**  
**Dimensionnement et**  
**supervision d'un système**  
**photovoltaïque avec stockage**

### III.1. Introduction

De nos jours il existe différents modes d'exploitation des énergies renouvelables dans l'habitat, dans notre cas on s'intéresse plus précisément à l'utilisation de l'une de ces énergies inépuisables, qui est le solaire. Afin d'alimenter une installation solaire autonome, il est important de faire un certain nombre de calculs et de suivre des étapes permettant de déterminer le matériel le mieux adapté permettant de satisfaire les besoins énergétiques de notre charge avec un coût minimal. On appelle cela « dimensionnement ».

Dans le présent chapitre, l'étude se portera sur le dimensionnement et optimisation d'une installation photovoltaïque cela revient à déterminer le nombre nécessaire des panneaux solaires constituant le champ photovoltaïque pour adopter un système PV suffisant pour couvrir les besoins de notre maison à tout instant ainsi que le nombre d'onduleurs, nombres batteries et leur protection. Notre travail a pour but de présenter les méthodes de dimensionnement optimales pour la production d'énergie électrique .

### III.2. Dimensionnement du système photovoltaïque

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque. La méthode de probabilité d'erreur dans la consommation, de la moyenne annuelle, du mois le plus défavorable. Notre travail se base sur cette dernière qui est une méthode simple et sûre, on estime l'énergie récupérable pour une période critique d'un mois appelé le mois le plus défavorable, ce mois correspond au mois pendant lequel la valeur de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année (décembre) ou dans certains pays où la période d'hiver est rude. [31]

Le tableau ci-dessus représente l'irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur un plan horizontal du site de Bejaia et les moyennes mensuelles sont présentées dans le tableau suivant :

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	Sep.	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.1 Irradiations globales moyennes mensuelles journalières [32]

III.2.1. Bilan énergétique d'installation

Appareils	Nombre	Puissance unitaire(W)	Durée d'utilisation (h/j)	Energie (Wh/j)
Réfrigérateur	1	100	24	2400
Four micro-onde	1	80	0.25	20
Mixeur	1	200	0.3	60
Machine à laver	1	300	1	300
Chargeur téléphone portable	6	5	1	30
Téléviseur	1	200	6	1200
Ordinateur portable	1	30	4	120
Modem wifi	1	5	24	120
Radio	1	60	4	240
Pompe centrifuge	1	500	3	1500
Lampe basse consommation	3	12	1	36
	2	9	3	54
	3	18	3	162
	2	12	4	96
P charge =1531W			Le besoin journalier totale	6338 (Wh/j).

Tableau III.2: Bilan énergétique d'une maison a Bejaia [32]

La puissance crête d'un module :	$P_c=110W_c$
La tension de circuit ouvert :	$U_{co} = 43.5V$
Le courant de puissance maximale :	$I_{ppm}=3.15 A$
La tension de puissance maximale :	$U_{ppm} =35V$
Le courant de court-circuit :	$I_{cc} = 3.45 A$

Tableau III.3 : Paramètres du panneau photovoltaïque

### III.2.2. Dimensionnement de générateur photovoltaïque

➤ **Les méthodes de dimensionnement**

1. Méthode du besoin journalier.
2. Méthode des puissances.
3. Méthode des surfaces.

**1. Méthode de besoin journalier**

**a) Besoin journalier**

$$BJ = \sum_1^n P_{ch} * \Delta T \quad (III.1)$$

**Avec**

**G<sub>j</sub>** : La consommation journalière du panneau  $\Delta T$  durée de fonctionnement de l'appareil.

**b) Puissance photovoltaïque journalier**

$$\frac{P_{pv}}{j} = P_c \times N_e \quad (III.2)$$

**Avec :**

**P<sub>pv/j</sub>** : puissance journalier de panneau, **P<sub>c</sub>** : puissance crête du panneau, **N<sub>e</sub>** nombre heure équivalentes

**c) Nombre d'heure équivalente en (Heure)**

$$N_e = \frac{G_s}{1000} \quad (III.3)$$

**d) Puissance réelle**

$$\frac{P_{pv}}{j_{réelle}} = P_c \times N_e \times (1 - 0.2) \quad (III.4)$$

**Avec :**

- **G<sub>s</sub>** : Valeur de l'ensoleillement moyenné mensuelle du mois le plus défavorable de l'ensoleillement.
- **1000** Valeur de l'ensoleillement dans les conditions STC.

**e) Nombre de panneaux**

$$N_{pv} = \frac{B_j}{P_{pv/j_{réelle}}} \quad (III.5)$$

**f) Nouvelle puissance estimée**

$$P_{pv, est} = N_{pv} \times P_c \quad (III.6)$$

g) **Surface de captage**

$$Scap = Sc, u \times Npv \quad (III.7)$$

Avec :

- **Sc,u** : surface unitaire d'un panneau.

2. **Méthodes des puissances**

a) **Puissance crête estimée (W)**

$$Pc = Es \times S \times \eta \quad (III.8)$$

b) **Nombre provisoire de panneaux**

$$Npv = \frac{Pcst}{Pc} \quad (III.9)$$

c) **Nouvelle puissance estimée (W)**

$$Pnouv = Npv, prod \times Pc \quad (III.10)$$

3. **Méthode des surfaces**

a) **Nombre de panneau :**

$$Npv = \frac{Stoit}{Spv, u} \quad (III.11)$$

Avec :

- **Stoit** ; la surface du toit [**m<sup>2</sup>**] ;
- **Spv,u** : la surface unitaire de panneau [**m<sup>2</sup>**];
- **Npv** : nombre de panneaux selon la surface.

b) **La puissance estimée :**

$$Pnouv = Npv, prov \times Pc \quad (III.12)$$

Avec : **P<sub>nouv</sub>** : la nouvelle puissance de l'installation.

c) **Montage des panneaux selon les dimensions du toit et des panneaux**

- **Montage selon le sens de la longueur :**



$$NL1 = \frac{\text{longueur du toit}}{\text{longueur du panneau}} / NL2 = \frac{\text{largeur du toit}}{\text{largeur du panneau}} \quad (\text{III.13})$$

Donc le nombre minimum de panneaux dans le sens de la **longueur** est :

$$N_{pv, \min} = NL1 \times NL2 \quad (\text{III.14})$$

➤ **Montage selon le sens de la largeur :**

$$N_{11} = \frac{\text{longueur du toit}}{\text{largeur du panneau}} \quad (\text{III.15})$$

$$N_{12} = \frac{\text{largeur du toit}}{\text{longueur du panneau}} \quad (\text{III.16})$$

Donc le nombre maximum de panneaux dans le sens de la **largeur** est :

$$N_{pv, \max} = N_{11} \times N_{12} \quad (\text{III.17})$$

**Avec :**

- $N_{L1, N_{11}}$  : Nombre de panneaux minimum selon le sens de la longueur et de largeur ;
- $N_{L2, N_{12}}$  : Nombre de panneaux maximum selon le sens de la longueur et de largeur ;
- $N_{pv, \min}$  : Nombre minimum de panneaux /  $N_{pv, \max}$  : Nombre maximum de panneaux.

**d) La nouvelle puissance totale et la surface à installer**

$$P_{t, \text{nou}} = N_{pv, \text{nou}} \times P_c \quad (\text{III.18})$$

$$S_{\text{inst}} = N_{pv, \text{nou}} \times S_{pv, u} \quad (\text{III.19})$$

**Avec :**

- $N_{pv, \text{nou}}$  : le nouveau nombre de panneaux calculé selon la surface
- $S_{pv, u}$  : la surface unitaire de panneau [m<sup>2</sup>].

### III.2.3. Dimensionnement des batteries

#### 1. Calcul de la capacité de la batterie

$$C_{\text{batt}} = \frac{B_j \times J_{\text{aut}}}{V_{\text{batt}} \times \text{DOD} \times \eta} \quad (\text{III.20})$$

**Avec :**

- $J_{\text{aut}}$  : Nombre de jour d'autonomie ;
- $V_{\text{batt}}$  : Tension des batteries ;
- **DOD** : Le taux de décharge maximum des batteries ;
- $\eta$  : Le rendement de la batterie.

**2. Calcule nombre de batterie**

$$N_{bat} = \frac{Cbatt}{Cbatt,u} \tag{III.21}$$

**a) Calcule nombre de batterie en série  $N_{batt}$**

$$N_{bat,s} = \frac{\text{tension de fonctionnement}}{\text{tension de la batterie}} \tag{III.22}$$

**b) Calcule nombre de batterie en parallèle**

$$N_{bat,p} = \frac{\text{nombre de batterie total}}{\text{nombre de batterie serie}} \tag{III.23}$$

**III.2.4. Dimensionnement du régulateur de charge**

Le régulateur est dimensionné d'après les paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie.[33].

- 1. Tension nominale :** Elle doit être celle du champ photovoltaïque.
- 2. Courant d'entrée  $I_e$  :** C'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il doit être supporté sans problème par le régulateur. Pour estimer ce courant, le plus sûr est de prendre 1,5 fois le courant maximal.
- 3. Courant de sortie  $I_s$  :** L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la Valeur maximale.

**III.2.5. Dimensionnement de l'onduleur**

Le choix et le nombre d'onduleurs repose sur 3 critères :

- La compatibilité en puissance ;
- La compatibilité en tension ;
- La compatibilité en courant.

A partir de ces 3 critères, le dimensionnement des onduleurs va imposer la façon de câbler les modules entre eux.

**1. La compatibilité en puissance**

$$P_{ond, min} = 0.9 \times P_{pv, nouv} \tag{III.24}$$

$$P_{ond, max} = 0.95 \times P_{pv, nouv} \tag{III.25}$$

**Avec :**

$P_{ond, min}$  : Puissance minimale de l'onduleur,  $P_{ond, max}$  : Puissance maximale de l'onduleur ;  $P_{pv, nouv}$  : Nouvelle puissance de panneau.

$$P_{cal} = N_{ch} \times N_s \times P_c \quad (III.26)$$

$$P_{ct} = P_c \times N_{pv} \quad (III.27)$$

$$N_{ch} = ENT \left[ \frac{I_{mmp,ond}}{I_{cc} \times 1.25} \right] \quad (III.28)$$

Avec :

$P_{cal}$  : Puissance calculée [W]

$N_{ch}$  : Nombre maximale de chaine en parallèle,  $N_s$  : Nombre maximale de chaine série.

## 2. La compatibilité en tension

Le nombre minimum et maximum de modules photovoltaïques en série se calcule par les formules suivantes :

$$Ns1 = ENT \left[ \frac{U_{mpp,min,ond}}{U_{mpp,pv} \times 0.95} \right] \quad (III.29)$$

$$Ns2 = ENT \left[ \frac{U_{mpp,max,ond}}{U_{mpp,pv} \times 1.25} \right] \quad (III.30)$$

$$U_{mpp,max} = N_{max} [1.15 * U_c] \quad (III.31)$$

Avec :

$Ns1$  : Nombre maximale de modules en serie ;

$Ns2$  : Nombre maximal de modules en série,  $U_{mpp,min}$  : la tension minimale de l'onduleur [V] ;

$U_{ppm}$  : tension maximale du panneau [V] .

**3. La compatibilité en courant** Le nombre maximum de chaines photovoltaïques en parallèles se calcule par la formule simple suivante :

$$N_{ch} = ENT \left[ \frac{I_{max-ond}}{I_{mpp} \times 1.25} \right] \quad (III.32)$$

Avec :

- **Nch** : Nombre maximal de chaine en parallèle ;
- **S** : Section des câbles ;ssssss
- **ρ** : Résistivité à 20 °C=  $1.6 \times 10^{-2}$  (conducteur en cuivre).
- **L** : Langueur du câble,
- **I** : Courant qui traverse le câble,  $\Delta v$  = chute de tension= 0.02, **Icc** : Courant de court-

circuit de panneau.

a) **La section des câbles est la boîte de raccordement donnée par :**

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V} \quad (\text{III.33})$$

$$I = 1.25 \times I_{cc} \quad (\text{III.34})$$

b) **la section des câbles entre un panneau et la boîte de raccordement et la boîte de régulateur DC/DC**

$$I = I_{mpp} \times N_{pv}, s \quad (\text{III.35})$$

**Avec :**  $I_{mpp}$  : Courant maximale de panneau photovoltaïque,  $N_{pv}$  ; Nombre de panneaux

c) **la section des câbles entre DC-DC et les batterie et section des câbles entre les batterie et l'onduleur la boîte de raccordement**

➤ **Calcul de la tension des batteries**

$$V_{batt} = V_{batt, u} \times N_{batt}, s \quad (\text{III.36})$$

➤ **Calcul de 1-  $\alpha$  :**

$$1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}}$$

➤ **Calcul du courant de batterie**

$$I_{batt} = \frac{I}{1 - \alpha} \quad (\text{III.37})$$

**Avec :**

$I_{batt}$  : Courant de la batterie,

$$I = I_{mpp} \times N_{pv}, s \quad (\text{III.38})$$

➤ **La section de câble est :**

$$S = \frac{\rho \times L \times I_{batt}}{\Delta v \times V} \quad (\text{III.39})$$

**La section des câbles coté AC**

➤ **Calcul d courant :**

$$I = \frac{P_{ch}}{3V} \quad (\text{III.40})$$

**Avec :**  $P_{ch}$  : Puissance de charge,  $V$  :Tension.

➤ **Calcul de la section :**

$$S = \beta \times \rho_l \times I \times \frac{L}{\epsilon \times V_n} \cos(\delta) \tag{III.41}$$

Avec :

$\beta$  : Coefficient qui vaut '1' en triphasé et '2' en monophasé ;

$\rho_l$  : Résistivité du matériau conducteur à 20°C (cuivre ou aluminium) ( $\rho_l = 0.0225$  ;  $\rho_l = 0.036$ ) ;

$L$  : Longueur de la canalisation (m) ;

$\cos(\delta)$  : Facteur de puissance ;

$(\delta)$  : Déphasage entre le courant et la tension alternatif ;

$I$  : Courant maximal d'emploi .

### III.3. Application numérique :

➤ Notre travail est consacré de dimensionner le GPV selon la méthode de besoin journalier

$Bj = \sum_1^n Pch * \Delta T$	6338 Wh/j
$Ne = \frac{Gs}{1000}$	2300/1000=2.3
$Ppv/j = Pc \times Ne$	110 × 2.3=253W
$\frac{Ppv}{jr\acute{e}elle} = Pc \times Ne \times (1 - 0.2)$	$\frac{Ppv}{jr\acute{e}elle} = 253 \times 0.8 = 202.4W$
$Npv = \frac{Bj}{Ppv/jr\acute{e}elle}$ $N_{pv,s} = V_{dc} / V_{pv}$ $N_{pv,p} = N_{pv} / N_{pv,s}$	$Npv = 6338 / 202.4 = 32$ panneaux $N_{pv,s} = 8$ panneaux en serie $N_{pv,p} = 4$ panneaux en parallèle
$Scap = Sc, u \times Npv$	0.868 × 32 = 27.77 m <sup>2</sup>
$Cbatt = \frac{BJ \times Jaut}{Vbatt \times DOD \times \eta}$	Cbatt = 3235 Ah

$N_{bat} = \frac{C_{batt}}{C_{batt, u}}$	$N_{bat} = 28 \text{ batterie}$
$N_{batt, s} = V_f / V_{bt}$	$N_{batt, s} = 4 \text{ batteries en serie}$
$N_{batt, p} = N_{batt} / N_{batt, s}$	$N_{batt, p} = 7 \text{ batteries en parallèles}$

**Tableau III.4** Dimensionnement du système de stockages

« Dans notre application, nous avons basé sur le côté DC seulement »

Section des câbles coté DC		
Section des câbles entre le panneau et la boîte de raccordement (L=5m)	$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.6 * 10^{-2} \times 5 \times 4.567}{0.02 \times 35}$ $\Rightarrow S = 0.4929 \text{ mm}^2$ $S=1.5\text{mm}^2$
Section des câbles entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC (L=10m)	$I = I_{mpp} \times N_{pv, s}$ $S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$I = 3.15 \times 8 \Rightarrow I = 25.2 \text{ A}$ $S = \frac{1.6 * 10^{-2} \times 10 \times 25.2}{0.02 \times 35}$ $D'où : S = 5.76 \text{ mm}^2$ $S=6\text{mm}^2$
Section des câbles entre le DC/DC et Les batteries et section des câbles entre les batteries et l'onduleur (L= 3m)	Branchement des batteries	Branchement des batteries
	Calcul la tension de la batterie $V_{bat} = V_{bat. u} \times N_{bat s}$	Calcul la tension de la batterie $V_{bat} = 12 \times 4 \Rightarrow V_{bat} = 48$
	Calcul $1-\alpha$ : $1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}}$	Calcul $1-\alpha$ : $1 - \alpha = \frac{12}{35} = 0.342$
	Calcul du courant de batterie $I_{batt} = \frac{I}{1 - \alpha}$	Calcul du courant de batterie $I_{batt} = \frac{25.2}{0.342} = 73.68\text{A}$

	$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.6 \times 10^{-2} \times 3 \times 73.68}{0.02 \times 35} = 5 \text{ mm}^2$
--	--	--

Tableau III.5 calcule des sections des câbles entre les différentes composantes de système global

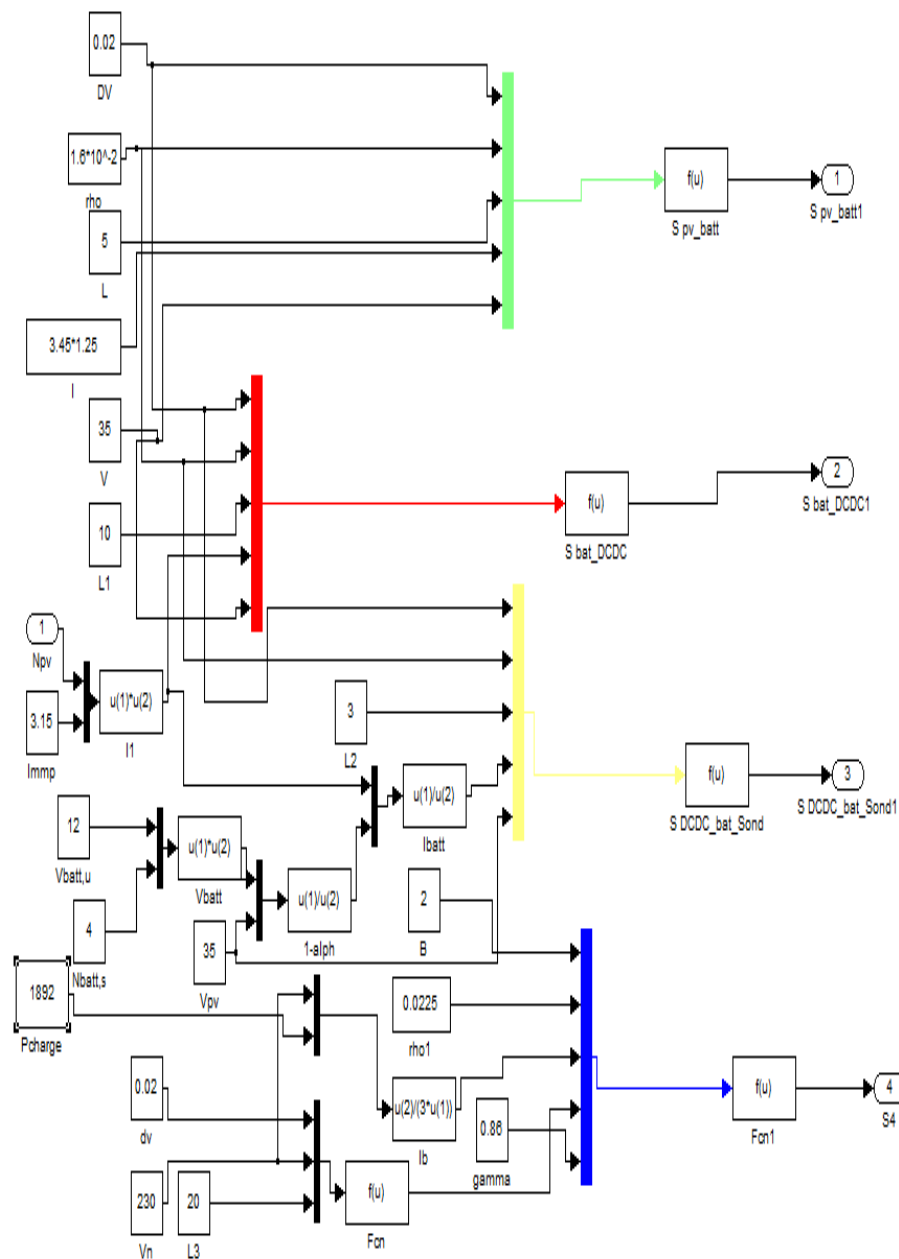


Fig. III.1 Schéma bloc de dimensionnement des sections des câbles des sections des câbles

III.4. Supervision du système de production d'énergie

Dans les systèmes réels, la gestion de l'énergie produite et consommée par les différents composants au cours de leurs fonctionnements est généralement assurée par un composant central, auquel les appareils sont connectés via divers convertisseurs. Des algorithmes de gestion de l'énergie sont implémentés permettant d'assurer l'autonomie du système[34]. La figure ci-dessous montre le schéma synoptique pour le système de supervision l'énergie photovoltaïque.

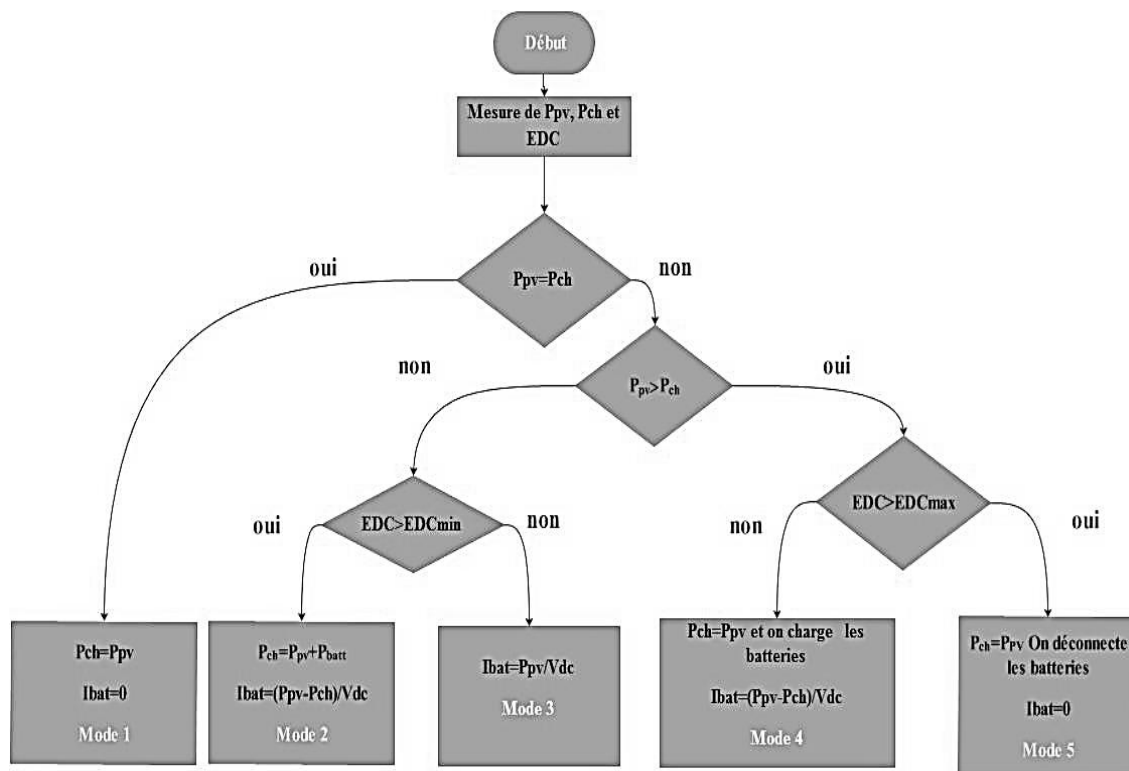


Fig. III.2 Diagramme de gestion d'un système PV avec batteries[35]

L'objectif de cette gestion est d'extraire l'énergie demandée tout en optimisant le transfert d'énergie vers la charge, en tenant compte du profil de charge, de l'état de charge et de décharge des batteries à chaque instant et de la disponibilité de l'énergie PV.

III.4.1. Extraction du maximum d'énergie

Nous avons observé que la méthode MPPT mise en œuvre permet de récupérer le maximum d'énergie quel que soit l'irradiation. On peut donc l'utiliser pour l'optimisation du notre système autonome. La méthode du MPPT permet ainsi d'extraire le maximum de puissance du



générateur photovoltaïque.

### III.4.2. Gestion des batteries de stockages

Les batteries sont sollicitées dans une plage bornée d'états de charge (EDC) par rapport à toute l'énergie emmagasinée. En effet, on doit assurer leurs protections en évitant d'atteindre trop fréquemment des états de charge extrêmes, en partie responsables du vieillissement prématuré des batteries. Dans le cas d'un système réel la protection des batteries est généralement assurée par un contrôle de leur tension. Elles sont déconnectées si leurs tensions excèdent les bornes  $EDC_{min}$  et  $EDC_{max}$  fixées préalablement. Cette démarche nécessite un suivi de leur tension en chaque instant.

Nous contrôlons donc la bonne marche des batteries en imposant des seuils d'état de charge à ne pas dépasser aussi un état de charge minimal  $EDC_{min}$  a été fixé à 30% de la capacité totale de batterie ,et même un état de charge maximal  $EDC_{max}$  a été fixé à 90%. [36]



Fig. III.3 Plage de fonctionnement autorisé pour les batteries

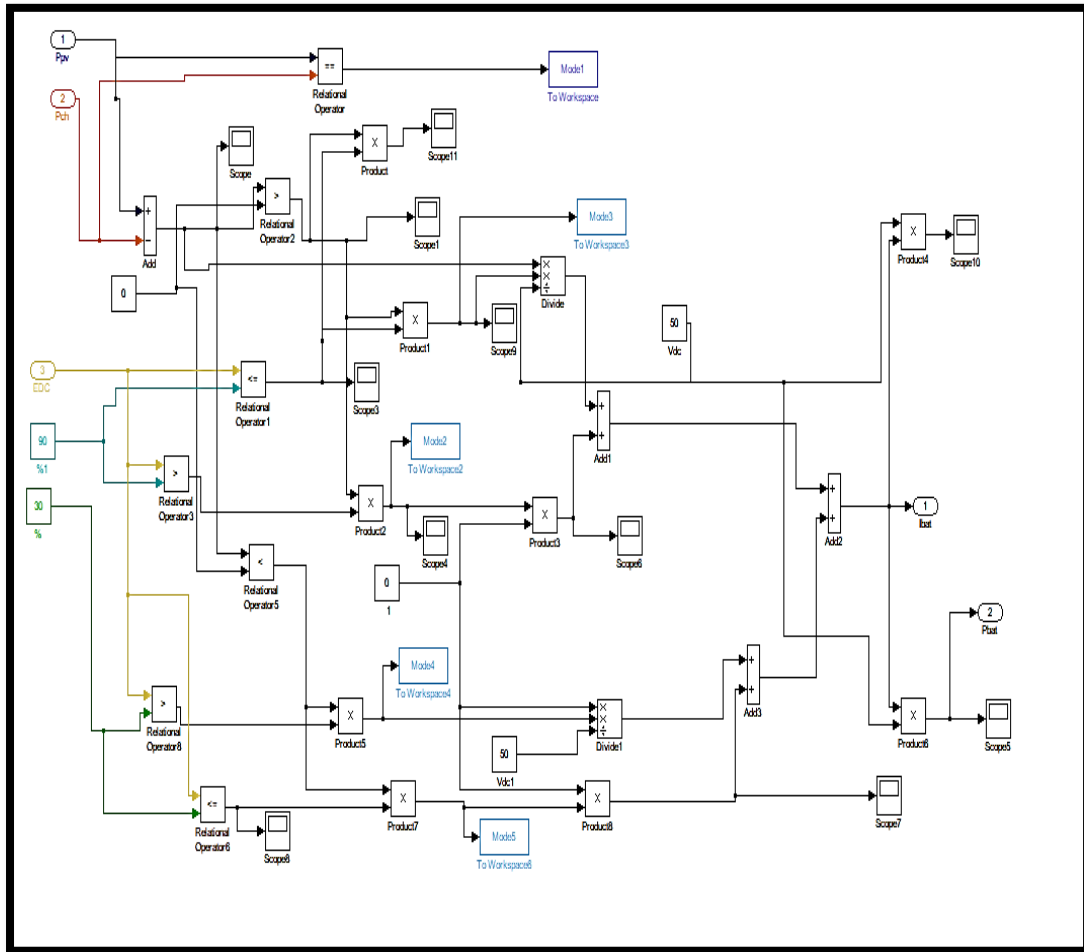


Fig. III.4 Schéma bloc de la gestion de puissances

- **Présentation des différents modes :**

- **Mode 1 :** Quand la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.
- **Mode 2 :** Dans ce cas, la puissance PV 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 EDCmin
- **Mode 3 :** Ce cas représente la situation où la puissance PV est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à EDCmin, 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.
- **Mode 4:** Quand la puissance PV est supérieur à la puissance demandée par la charge, et

que l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{max}$ , on alimente la charge et on charge la batterie

- **Mode 5** : Quand la puissance PV est supérieur à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{max}$ , on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par le générateur PV, et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage

### III.5. Protection de l'installation

La protection est obligatoire pour assurer un bon fonctionnement de l'installation et garantir une continuité de service afin d'éviter toute défaillance technique, cela il nécessaire d'opter pour les protections suivantes [37] :

#### 1. Les parafoudres

Pour chaque cas d'utilisation, le parafoudre est choisi principalement en fonction des paramètres suivants :

Tension de seuil · Surtension admissible par les appareils à protéger · Intensité du courant que le parafoudre devra supporter pendant la durée de surtension.

#### 2. Barre de terre

La barre (tige) à la terre adéquate d'une installation photovoltaïque en site isolé remplit fonctions :

- La protection des appareils contre les surtensions dues à la foudre ;
- La protection des personnes contre les décharges statiques ou d'éventuels courants de fuite ou de défaut.

### III.6. Simulation du système photovoltaïque avec stockage

Nous avons simulé le système de PV avec batterie pour une variation de l'éclairement pour une journée.

Le système comporte un générateur photovoltaïque optimisé par MPPT (P&O) avec l'application d'une gestion des puissances avec des régulateurs et un banc de batteries.

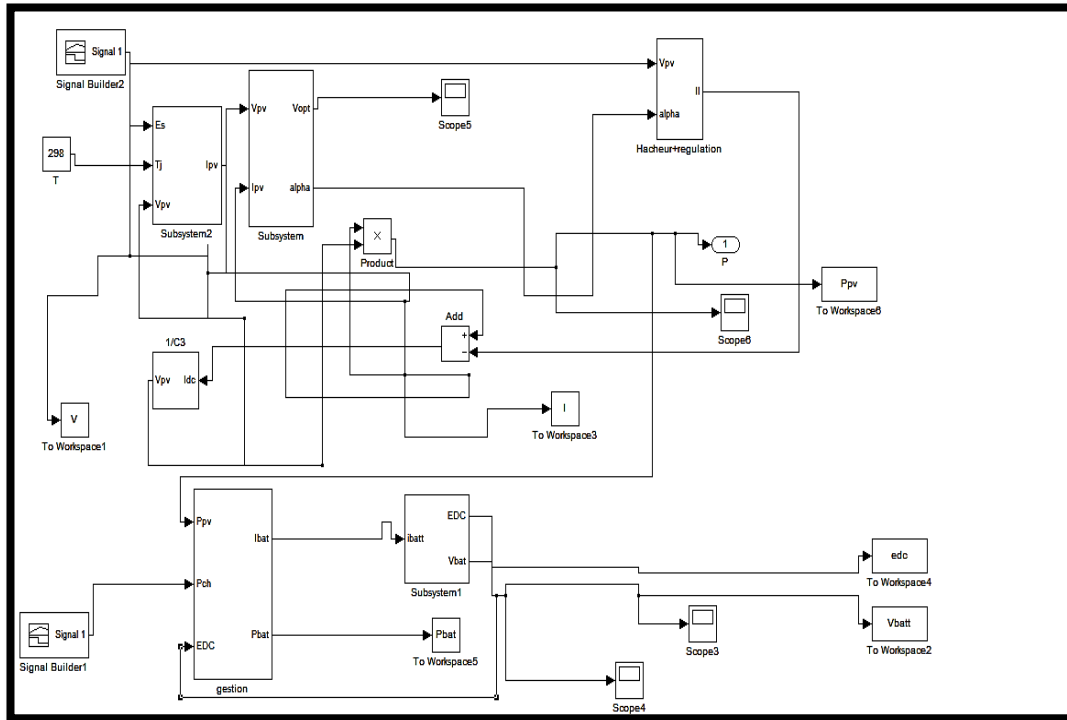


Fig.III.5 Schéma Bloc système globale

### III.6.1. Les résultats de simulation du système globale :

- (Fonctionnement sous les conditions variables)

Pour comprendre le comportement du système face aux changements d'éclairement on va effectuer une diminution rapide de l'ensoleillement à température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

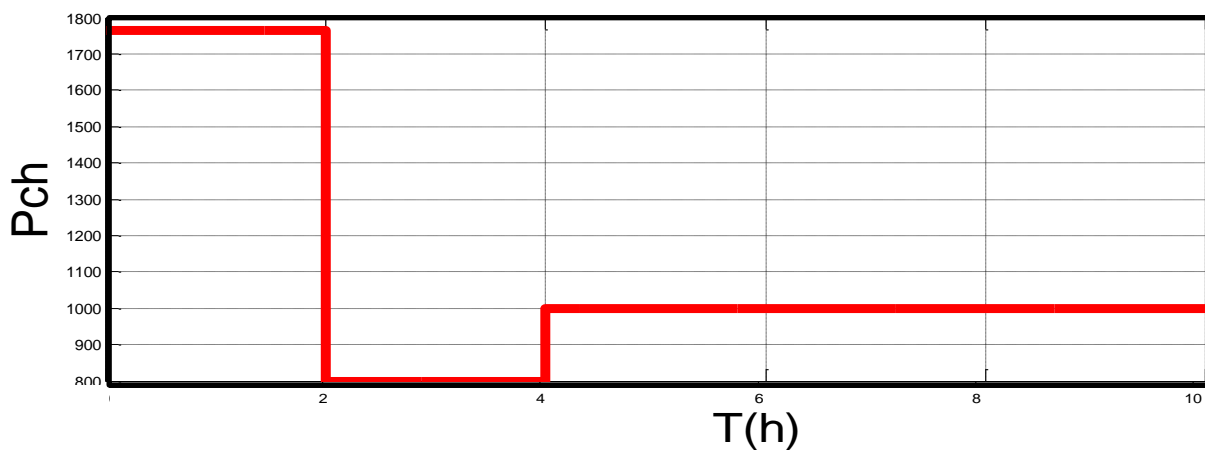


Fig.III.6 allure de la puissance de charge

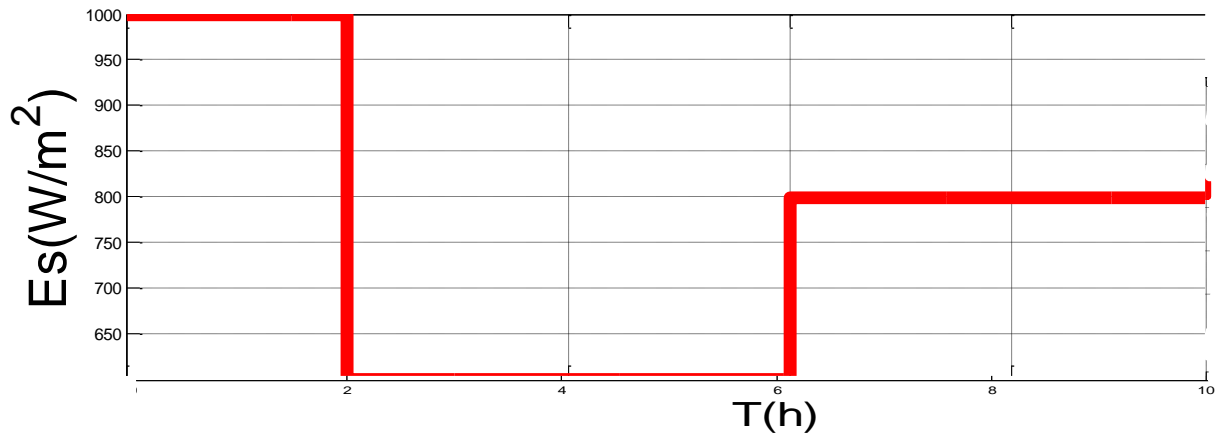


Fig. III.7 profil du l'ensoleillement variable

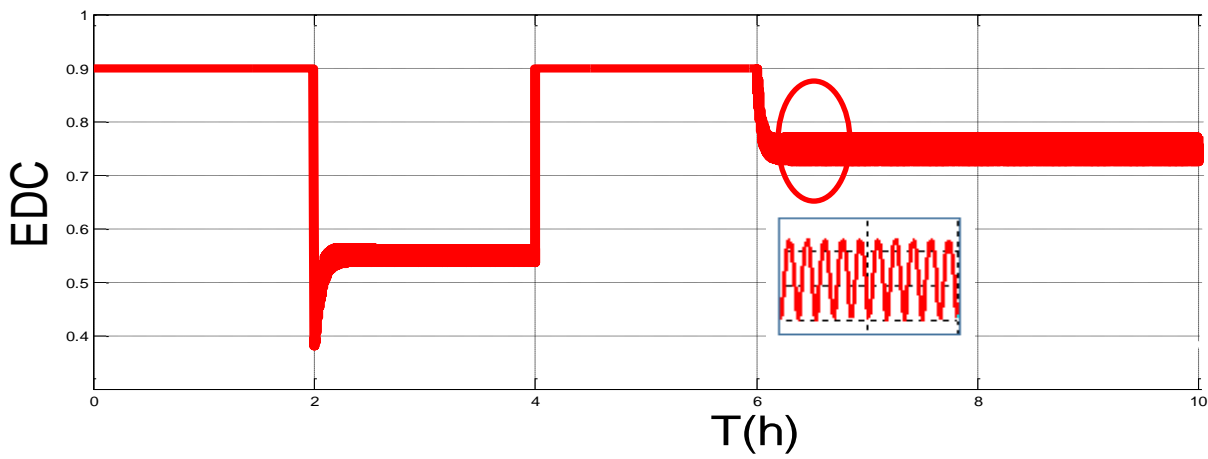


Fig .III.8 Allure de l'état de charge de la batterie

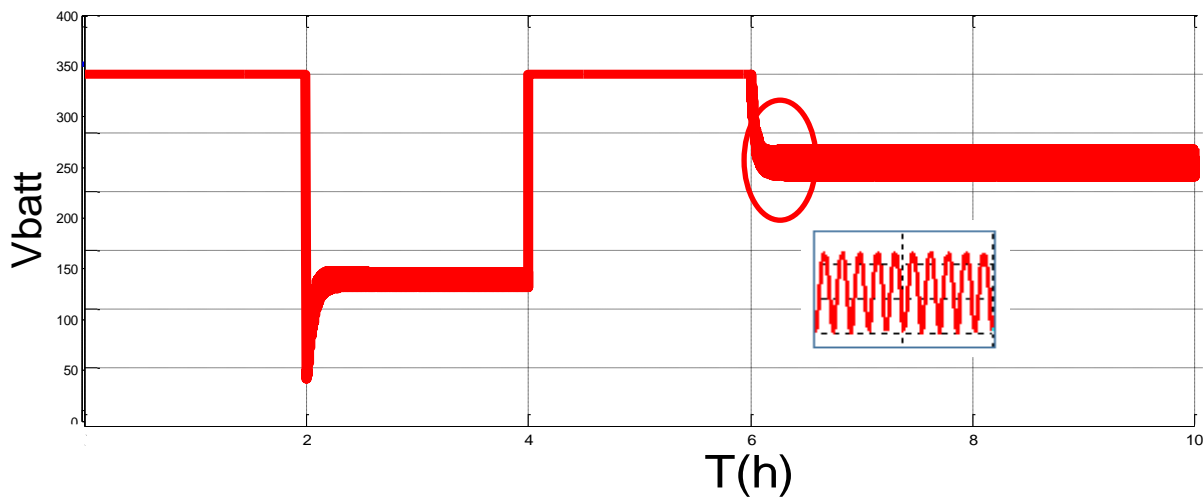
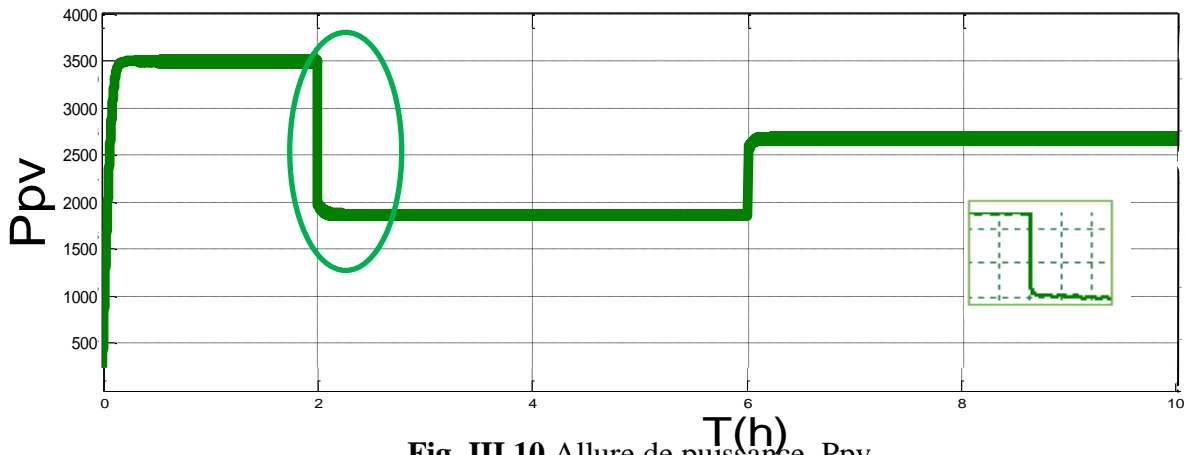


Fig .III.9 Tension aux bornes des batteries

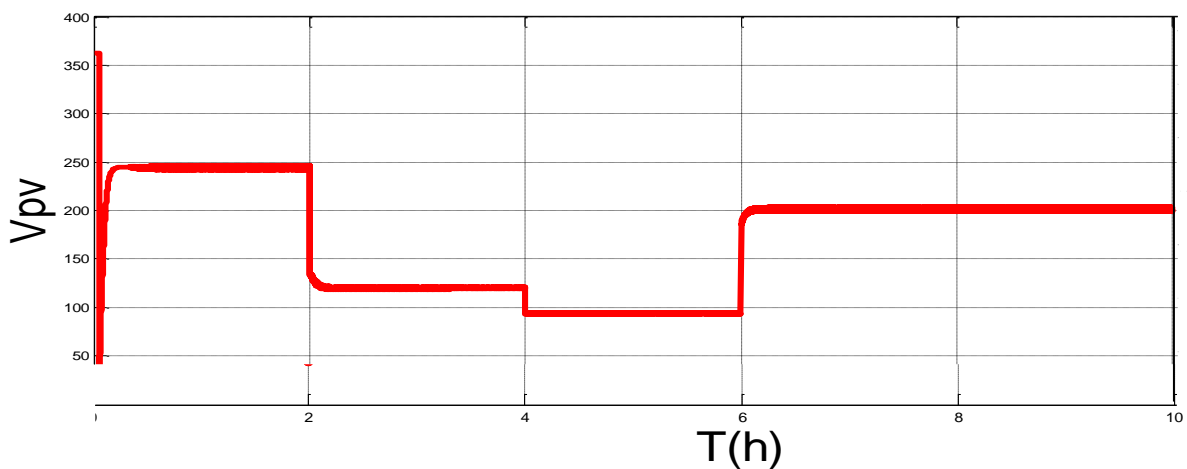
**Remarque :**

On remarque que l'allure de la tension aux bornes de la batterie (figure III.9), ainsi que celle de l'état de charge figure (III.8), évoluent de la même manière, donc l'EDC est l'image de la tension



**Fig. III.10** Allure de puissance Ppv

La figure (III.10) présente la puissance photovoltaïque, on remarque que cette puissance est bien régulée à sa valeur de consigne .



**Fig. III.11** Allure de tension Vpv

La figure (III.11) présente la tension photovoltaïque, on remarque que cette tension est bien régulée à sa valeur de consigne.

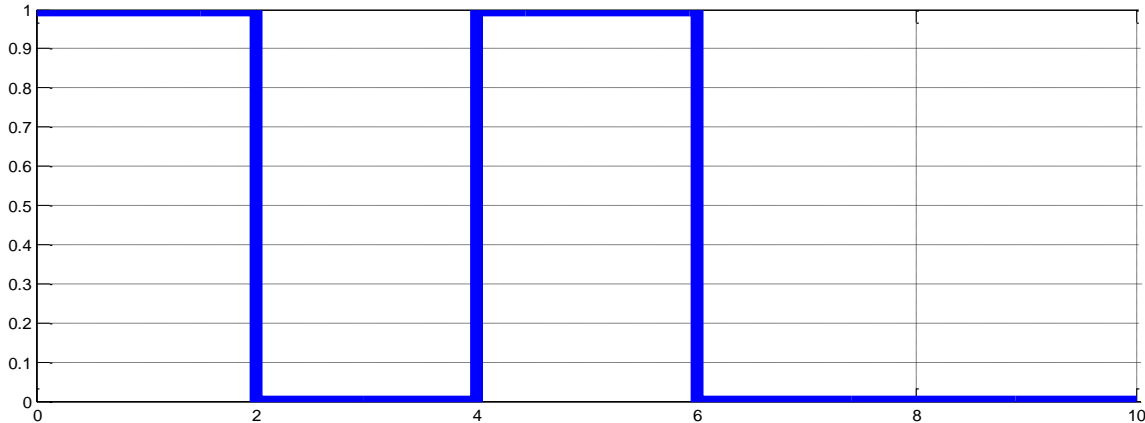
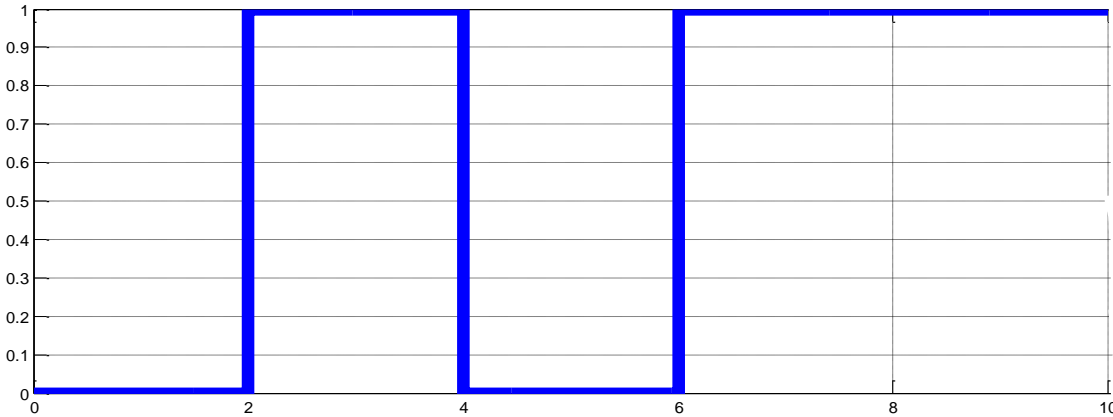


Fig.III.12 allure de mode 1



FigII.13 allure de mode2

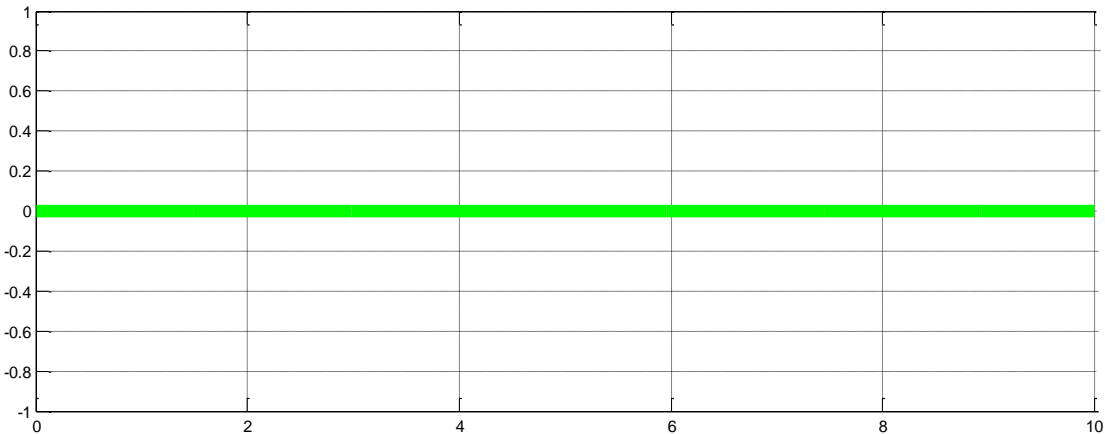
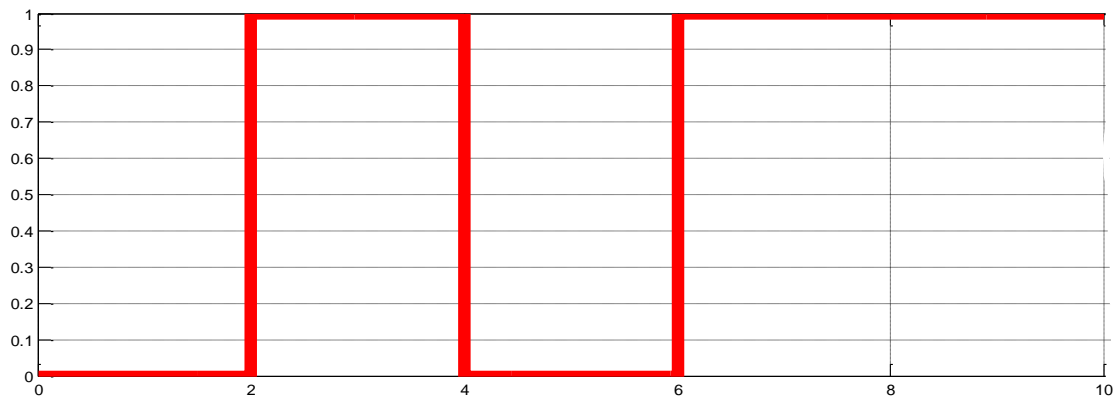
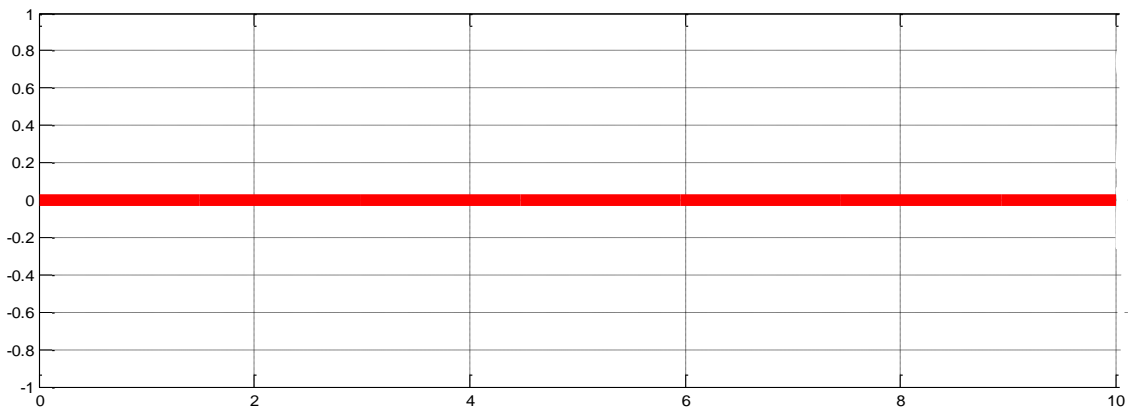


Fig.III.14 allure de mode3

**FigII.15** allure de mode 4**Fig .III.16** allure mode 5

Les allures des figures (III.12-16) représentent les modes de fonctionnement de la gestion appliqué pour le système (PV) avec stockage.

### III.7. Conclusion

On a entamé ce chapitre par une description générale d'une méthode de dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome avec stockage.

Ensuite on est passé au calcul et simulation du système globale a été effectuée dans des conditions météorologique.

Enfin nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie qui permet de vérifier à chaque instant l'état de charge et de décharge des batteries et l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques.



# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Notre travail c'est porté sur un système photovoltaïque autonome avec stockage, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, de convertisseur d'énergie (DC/DC), ainsi un système de stockage (la batterie).

Plusieurs points ont été abordés sur l'optimisation de la conversion d'énergie et plusieurs solutions qui permettent d'augmenter le rendement global électrique d'un système photovoltaïque ont été proposées.

La première partie de notre travail a visé des généralités sur les différents composants de système photovoltaïque avec stockage, à la fin de ce chapitre, nous avons choisi les différents éléments du système à étudier.

En seconde lieu nous avons modélisé ces différents composant de notre système et optimisé de la puissance délivrée par le GPV en utilisant la commande d'MPPT, et pour cela grâce à la simplicité et le coût on a choisi la méthode perturbation et observation P&O pour maintenir la tension de bus continue à une valeur fixe à chaque fois que l'ensoleillement change après nous avons simulé puis tracer les différents courbes et voir l'influence des conditions métrologique sur la production énergétique.

Le troisième chapitre est consacré au dimensionnement les composants de système photovoltaïque avec stockage, en suite on a appliqué un algorithme de gestion nécessaire pour protégé la batterie contre les surcharges et les décharges profondes et aussi pour garder l'autonomie énergétique du système globale, à la fin de ce chapitre nous avons simulé pour tracer les différents courbes et voir l'influence des conditions métrologique et (pch) sur la production énergétique de système globale.

Cette expérience nous a permis d'acquérir des compétences et d'enrichir nos connaissances dans le domaine du développement. Ceci nous a permis de mettre en œuvre une application assurant les fonctionnalités attendues, donc nous pouvons affirmer l'atteinte des objectifs visés par ce travail.

# **Références Bibliographiques**

## Bibliographié

---

- [1] – N.Touil Nacer Eddine - S.Ghenbazi, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque, Mémoire de master .univ el oued, 2015.
- [2] - (2010) <http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [3] – B.DENDIB, « Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative." Université Ferhat Abbas-Sétif, mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [4] - S. NAOUAL, « Modélisation et extraction automatique des Paramètres d'un générateur," université Ferhat Abbas de Sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique 2010.
- [5] - Baroud kendo li, « Etat de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de Constantine 2007.
- [6] - B .Flèche, D. Delagnes, « énergie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2014.
- [7] - <Http://www.scribd.com/doc/46661921/Les-energies-renouvelables>, consulté le 12/06/2013.
- [8] - Anne, Labouret, Michel, Viloz., Energie photovoltaïque. (Dunod 3eme édition 2006). Bernard Eque, Energie solaire photovoltaïque (Ellipses 2004).
- [9] - De Soto, W. 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance by solar energy, 80, 78-88.
- [10] - Olivier Giraud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [11] - PIETRUSCHKA D.,EICKR U., HUBER M., SCHUMACHER J., experimental performance analysis and modeling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings, international journal of refrigeration,2006.
- [12] – J.BERNARD, « Energie solaire: calculs et optimisation. Ed ellipses », 2004.
- [13] – B.GIVONI, « L’homme, l’architecture et le climat » .Edition du Moniteur, Paris.
- [14] - <Https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-13785/>. 2019.
- [15] - F. HEROGUEL, « les cellules photovoltaïques, » Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.

## Bibliographié

---

- [16] - ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER et B. SADASY « Le pompage photovoltaïque» manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA.ISBN 2-89481-006-7, 1998.
- [17] - A.Belhoucine et S.Zaidi. <<Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome>>. Mémoire de master II. Université de Bejaia 2012.
- [18] - S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France 2009.
- [19] - <https://as-p.ch/le-solaire-photovoltaïque>.
- [20] - Cours alkama système de stockage.
- [21] - A. Singo. <<Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Energétiquement Autonome >>. Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I France; 3 Février 2010.
- [22] - Corinne Alonso Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.
- [23] - Ch.Serir, « OPTIMISATION DES SYSTÈMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE », Mémoire de Magister université de Bejaia , 2012.
- [24] - 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, DenmarkDdfvgv.
- [25] - Convertisseurs photovoltaïques” Ludovic Protin, Stéphane Astier, Traité Génie Electrique D 3360, Techniques de l'ingénieur.
- [26] - A. LOUADAH « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » ; Mémoire de master en électromécanique ; université Abderrahmane mira. Bejaia, 2009.
- [27] - D. Boukhers « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » magister en électrotechnique, Option modélisation et commande des machine électrique, Université Mentouri de Constantine, Algeria, 2007.
- [28] - A. Boussekine, N. Guermouche « contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Bejaïa, 2010.
- [29] - S. Bensmail « contribution à la modélisation et a l'optimisation des systèmes photovoltaïques. Mémoire de magistère. Université A. Mira- Bejaia 2011/2012
- [30] - Cours pr D.Rekioua master 1 «Etude d'une technique d'optimisation ».

## Bibliographié

---

- [31] - Anne Labouret-Michel Villos, «Energie solaire photovoltaïque le manelle professionnelle», édition dunot, Paris2003.
- [32] - Tp UEF2311.P pr D. Rekioua master 2«application et dimensionnement des systèmes a énergie renouvelables 2018/2019.
- [33] - w.Younsioui,M.Mazouz, « projet d'installation photovoltaïque » Mémoire master 2.univ Bejaia 2019.
- [34] -F. Benjoudi-F.Lakhedari « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batterie » mémoire de master .univ de Bejaia 2014.
- [35] -S. Hamitouche, « Alimentation d'une structure par une conversion d'énergie autonome (Eircet-bouira) »Mémoire de master,univ de bejaia2019.
- [36] - M. Boudehouche –M.OuennoughI « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage », mémoire master. univ de bejaia 2016.
- [37] – [Https://www.protection des instalation pv .com](https://www.protection des instalation pv .com), 2020.