

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A.MIRA-BEJAIA**



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Electrique**  
**Spécialité Electromécanique**

# **Mémoire de fin d'étude**

**Pour l'obtention du diplôme de Master II Electromécanique**

## **Thème :**



**Réalisé et présenté par :**

- **CHERGUI Aghiles**
- **TALBI Nabil**

**Encadré par :**

**Mr K. Djermouni**

**Année Universitaire : 2019/2020.**

## REMERCIEMENT

AVANT TOUT, ON REMERCIE LE BON DIEU, LE TOUT  
PUISSANT DE NOUS AVOIR DONNÉ LA FORCE NÉCESSAIRE  
POUR MENER À TERME CE TRAVAIL.

ENSUITE, NOUS VOULONS EXPRIMER NOTRE  
RECONNAISSANCE À NOTRE PROMOTEUR MR. DJERMOUNI  
POUR SON ENCADREMENT EFFICACE, SON SOUTIEN ET SA  
DISPONIBILITÉ. QU'IL TROUVE ICI L'EXPRESSION DE NOTRE  
PROFONDE GRATITUDE. ON TIENT À REMERCIER VIVEMENT  
LES MEMBRES DE NOS FAMILLES QUI NOUS ONT TOUJOURS  
ENCOURAGÉE ET SOUTENUE. ON REMERCIE, TOUS CEUX QUI  
ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À L'ÉLABORATION DE CE  
MÉMOIRE, DE MÊME QUE CEUX QUI ONT PARTICIPÉ À NOTRE  
FORMATION, QU'ILS TROUVENT ICI L'EXPRESSION DE NOTRE  
PROFONDE GRATITUDE.

ENFIN, SANS OUBLIER, ON REMERCIE LES JURYS QUI NOUS  
FERONT L'HONNEUR DE JUGER CE TRAVAIL.

*C'est avec une grande émotion et immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :*  
*Mon cher papa Ahcene CHERGUI et à ma chère maman F.AMRIOUI, pour leurs sacrifices,*  
*leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*Mes chères sœurs Kahina, Sihem, Tiziri, Nadjetet Sabrina.*

*Mes chers frères Rachid, Farhet.*

*Mes chères amis.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

CHERGUI Agthiles

C'est avec une grande émotion et immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

A ma famille

TALBI Nabil

# Sommaire

Introduction général.....	1
Chapitre I.....	3
I. Généralité sur l'énergie photovoltaïque .....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralités sur l'énergie photovoltaïque .....	3
I.3 Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque .....	4
I.3.1 Mode autonome .....	4
I.3.1.1 Système autonome avec stockage (batterie) .....	5
I.3.1.2 Système autonome sans stockage .....	5
I.3.2 Mode connecté au réseaux.....	6
I.3.3 Mode connecté à un générateur électrogène.....	6
I.3.4 Mode hybride.....	7
I.4 Effet photovoltaïque .....	7
I.5 Cellule photovoltaïque .....	9
a) Cellule au silicium amorphe .....	9
b) Cellule au silicium monocristallin .....	10
c) Cellule au silicium poly cristallin.....	11
I.5.1 Groupement des cellules photovoltaïque.....	11
a) Groupement en série.....	11
b) Groupement en parallèle.....	12
I.6 Module photovoltaïque .....	13
I.6.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque .....	14
I.7 Panneau photovoltaïque .....	14
I.8 Champ photovoltaïque .....	15
I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	15
I.9.1 Avantages .....	15
I.9.2 Inconvénients.....	15
I.10 Les convertisseurs statiques.....	16
I.10.1 Onduleur .....	16
I.10.2 Hacheur.....	16
a) Hacheur dévolteur (série) .....	16
b) Hacheur survolteur (parallèle).....	17
c) Hacheur série-parallèle .....	18

I.11	Principe de fonctionnement au point de puissance maximale .....	19
I.12	Systèmes de stockage.....	19
I.12.1	Batteries d'accumulateurs.....	19
a)	Batteries au plomb .....	20
b)	Batteries au Cadmium-Nickel .....	20
c)	Batteries au Nickel-Zinc .....	20
d)	Batteries au Lithium .....	20
I.12.2	Caractéristiques principales d'un accumulateur .....	20
	Conclusion.....	21
	Chapitre II.....	22
II.	Modélisation du système photovoltaïque .....	22
II.1	Introduction.....	22
II.2	Modélisation du générateur photovoltaïque.....	22
II.2.1	Caractéristique courant-tension d'un module.....	23
II.2.2	Influence de l'irradiation .....	24
II.2.3	Influence de la température .....	25
II.3	Modélisation de l'hacheur survolteur .....	25
II.4	Modélisation de la batterie.....	26
II.5	Commande MPPT P&O .....	27
	Conclusion.....	28
	Chapitre III .....	29
III.	Dimensionnement et gestion d'énergie d'un système photovoltaïque .....	29
III.1	Introduction.....	29
III.2	Architecture du système.....	29
III.3	Dimensionnement du système PV .....	30
III.3.1	Choix de la méthode de dimensionnement .....	30
a)	Méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation .....	30
b)	Méthode de mois le plus défavorable .....	30
c)	Méthode de la moyenne annuelle .....	30
III.3.2	Evaluation de la consommation de la charge .....	31
III.3.3	Estimation de l'ensoleillement .....	31
a)	Orientation des panneaux .....	31
b)	Inclinaison des modules .....	31
III.3.4	Dimensionnement du générateur photovoltaïque .....	32
a)	Pour le branchement des modules en séries et en parallèles .....	32

b) Dimensionnement du stockage .....	33
III.3.5 Choix de l'onduleur .....	33
III.3.6 Dimensionnement des câbles électriques .....	34
III.4 Application pour une charge à usage d'habitation.....	34
III.4.1 Profil de consommation.....	35
III.4.2 Calcul de la demande journalière d'énergie .....	36
III.5 Organigramme de la gestion de notre système photovoltaïque .....	38
Conclusion.....	40
Chapitre IV .....	41
IV. Simulation du système photovoltaïque.....	41
IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Simulation du système globale .....	41
IV.2.1 Résultat de simulation pour une journée défavorable (une mauvaise journée d'hiver) 42	
IV.2.2 Résultat de simulation pour une journée favorable .....	45
IV.3 Conclusion .....	48
Conclusion générale .....	50
Bibliographie : .....	57
Annexes .....	60

# Listes des figures

<b>Figure I.1</b>	Système de conversion de l'énergie solaire en électricité .....	3
<b>Figure I.2</b>	Présentation générale d'un système photovoltaïque autonome .....	4
<b>Figure I.3</b>	Système autonome avec stockage (batterie) .....	5
<b>Figure I.4</b>	Système autonome sans stockage .....	5
<b>Figure I.5</b>	Système photovoltaïque raccordé au réseau .....	6
<b>Figure I.6</b>	Système photovoltaïque raccordé à un générateur électrogène .....	6
<b>Figure I.7</b>	Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque .....	7
<b>Figure I.8</b>	Cellule photovoltaïque montrant l'effet photovoltaïque [4] .....	8
<b>Figure I.9</b>	Types de cellules photovoltaïque .....	9
<b>Figure I.10</b>	Cellule au silicium amorphe .....	9
<b>Figure I.11</b>	Cellule au silicium monocristallin .....	10
<b>Figure I.12</b>	Cellule au silicium poly cristallin .....	11
<b>Figure I.13</b>	Cellules identiques en série [2] .....	12
<b>Figure I.14</b>	Cellules identiques en parallèles [2] .....	12
<b>Figure I.15</b>	Constitution d'un module photovoltaïque .....	13
<b>Figure I.16</b>	Panneau photovoltaïque .....	14
<b>Figure I.17</b>	Schéma hacheur série [12] .....	17
<b>Figure I.18</b>	Schéma hacheur parallèle .....	18
<b>Figure I.19</b>	Schéma hacheur série-parallèle [15] .....	18
<b>Figure I.20</b>	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT .....	19
<b>Figure II.1</b>	Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [20] ..	22
<b>Figure II.2</b>	Exemple de caractéristique courant-tension d'un module PV .....	23
<b>Figure II.3</b>	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) à T=25°C .....	24
<b>Figure II.4</b>	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) à T=25°C .....	24
<b>Figure II.5</b>	Influence de la température sur la caractéristique P(V) à E=1000 W/m <sup>2</sup> .....	25
<b>Figure II.6</b>	Influence de la température sur la caractéristique I(V) à E=1000 W/m <sup>2</sup> .....	25
<b>Figure II.7</b>	Schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster .....	26
<b>Figure II.8</b>	Schéma équivalent de <i>nb</i> élément en série .....	26
<b>Figure II.9</b>	Caractéristique P (V) d'un panneau solaire .....	27
<b>Figure II.10</b>	Organigramme de l'algorithme perturbation et observation [20] .....	28
<b>Figure III.1</b>	Schéma du raccordement des sources et consommateurs énergétiques .....	29
<b>Figure III.2</b>	Profil de consommation <i>Pch(t)</i> .....	36



<b>Figure III.3</b> Organigramme de gestion.....	39
<b>Figure IV.1</b> Puissance de charge pour une journée .....	42
<b>Figure IV.2</b> Profil de l'ensoleillement pour une journée défavorable.....	42
<b>Figure IV.3</b> Profil des températures pour une journée défavorable .....	43
<b>Figure IV.4</b> Puissance produite des panneaux photovoltaïques .....	43
<b>Figure IV.5</b> Puissance des batteries consommée par la charge (signe-) ou prise de réseau ou bien des GPVs (signe +) .....	43
<b>Figure IV.6</b> Puissance prise de réseau ou fourni par réseau.....	44
<b>Figure IV.7</b> Allures des puissances (photovoltaïque, charge, batterie et réseau).....	44
<b>Figure IV.8</b> Etat de charge de batterie.....	44
<b>Figure IV.9</b> Profil de l'ensoleillement pour une journée favorable.....	45
<b>Figure IV.10</b> Profil des températures pour une journée défavorable .....	46
<b>Figure IV.11</b> Puissance des panneaux photovoltaïques .....	46
<b>Figure IV.12</b> Puissance des batteries consommée par la charge (signe-) ou prise de réseau ou bien des GPVs (signe +) .....	46
<b>Figure IV.13</b> Puissance prise de réseau ou fourni par réseau.....	47
<b>Figure IV.14</b> Allures des puissances (photovoltaïque, charge, batterie et réseau).....	47
<b>Figure IV.15</b> Etat de charge de la batterie.....	47

## Listes des tableaux

<b>Tableau III-1</b> Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude .....	32
<b>Tableau III-2</b> Tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques en fonction de leurs puissances .....	32
<b>Tableau III-3</b> Consommation journalière pour un appartement .....	36
<b>Tableau III-4</b> Consommation journalière supplémentaire .....	37
<b>Tableau III-5</b> Totalité des puissance consommées .....	37
<b>Tableau III-6</b> Caractéristique du système PV autonome .....	37
<b>Tableau III-7</b> Résultats de calcul du dimensionnement de l'installation photovoltaïque.....	37

## Liste des symboles

- $V_{OC}$  : Tensions en circuit ouvert (Volts) ;
- $N_S$  : Nombre de cellules en série ;
- $I_{CC}$  : Courant de court-circuit (Ampère) ;
- $N_P$  : Nombre de cellules en parallèle ;
- $V_{pv}$  : Tension panneau photovoltaïque (Volts) ;
- $P_c$  : Puissance de crête ( $W/m^2$ ) ;
- $I$  et  $V$  : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque ;
- $I_{ph}$  : Photo-courant produit ;
- $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  : Courant de saturation diodes ;
- $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  : Respectivement les courants qui traversent la première et la deuxième diode ;
- $n_1$  et  $n_2$  : Facteurs de pureté de la diode ;
- $R_s$  et  $R_p$  : Respectivement la résistance série et la résistance parallèle ;
- $T$  : Température absolue en degré Kelvin ( $^{\circ}K$ ) ;
- $q$  : Charge élémentaire de l'électron ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C) ;
- $K$  : Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/ $^{\circ}K$ ) ;
- $E_g$  : Bande d'énergie du semi-conducteur (eV) ;
- $V_{bat}$  : Tension de batterie ;
- $I_{bat}$  : Courant de la batterie ;
- $E_b$  : Force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie ;
- $R_i$  : Résistance interne ;
- $Q_d$  : la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ .
- $E_{dc}$  : Etat de charge de la batterie ;
- $P_{ch}$  : Puissance de la charge (W) ;
- $T_{ch}$  : Durée de fonctionnement (h/j) ;
- $N_{eq}$  : nombre d'heure d'ensoleillement crête par jour (h/j).
- $E_j$  : Consommation ou le besoin journalier de la charge (Wh/j) ;
- $P_{pv}$  : Puissance du champ PV (W) ;
- $P_{pv, u}$  : Puissance unitaire d'un module photovoltaïque ;
- $N_{pv}$  : Nombre de panneau photovoltaïques ;
- $C_p$  : Coefficient correctif des panneaux photovoltaïques ;
- $V_c$  : Tension nominale d'un panneau en volt ;
- $C_{bat}$  : Capacité nominale des batteries [Ah] ;

$C_{bat, u}$  : Capacité de la batterie unitaire ;  
 $E_j$  : Besoins énergétiques journaliers (Wh) ;  
 $N_{ja}$  : Nombre de jour d'autonomie ;  
 $U_{bat}$  : Tension nominale des batteries (V) ;  
 $\eta_b$  : Rendement énergétique des batteries ;  
 $P_D$  : Profondeur de décharge des batteries (%) ;  
 $P_{ch,m}$  : Puissance maximale de la charge ;  
 $\eta_{ond}$  : Rendement de l'onduleur ;  
 $R$  : Résistance du câble (Ohm) ;  
 $\Delta U$  : Chute de tension ;  
 $\rho$  : Résistivité linéaire du conducteur constitutif du câble (Ohm  $\times$  m) ;  
 $I$  : Intensité de courant (Ampère) ;  
 $S$  : Section du câble (m<sup>2</sup>) ;  
 $L$  : Longueur du câble (m).  
 $T$  : Température (K) ;  
 $S$  : Ensoleillement (W/m<sup>2</sup>) ;  
 $P_r$  : Puissance de réseau électrique (W) ;  
 $P_b$  : Puissance des batteries (W).

# **Introduction général**

## **Introduction général**

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières, la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et de développement.

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. 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.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) de par ses caractéristiques de modularité qui permet de l'adapter à des besoins énergétiques divers, autonomie, fiabilité et viabilité sur le plan économique, permet d'apporter de réelles solutions telles que l'éclairage public et domestique, le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation, ...etc.

Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV) avec un système de stockage, qui est assuré par des batteries. Et aussi avec réseau électrique en cas de non satisfaction de notre charge par le système photovoltaïque.

Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raisons principales. L'utilisation de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Leur fonctionnement journalier (décharge et recharge complètes sur quelques jours) permet d'installer une faible capacité de stockage. Mais l'état de charge maximal des batteries est atteint d'autant plus

rapidement que cette capacité installée est faible. Afin de protéger les batteries contre une recharge excessive, on doit les déconnecter de l'installation. Il est alors impossible d'utiliser la totalité de la ressource renouvelable. Finalement, le dimensionnement du champ photovoltaïque est surestimé par rapport aux besoins réels de l'utilisateur final.

Des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement. La gestion de l'énergie dans les systèmes PV autonomes est encore un thème de recherche très présent dans le domaine du photovoltaïque. Nous nous inspirerons de ces études pour notre application.

Dans le premier chapitre, nous allons d'abord donner des généralités sur les systèmes photovoltaïques, donc nous allons non seulement les définir, mais aussi expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et les éléments dont nous aurons besoin dans l'installation globale, et aussi donner quelque avantages et inconvénients ce se types d'énergies.

Au second chapitres, nous allons présenter la modélisation de chaque élément de notre système. Cette modélisation nous permettra de poursuivre notre étude dans les chapitres qui vont suivre, et de trouver une meilleure stratégie pour pouvoir bien utiliser nos éléments du système. Pour une utilisation optimale de la source d'énergie photovoltaïque, différentes méthodes de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des panneaux photovoltaïques seront présentés.

Un dimensionnement du système photovoltaïque avec batterie sera présenté dans le troisième chapitre, et par conséquent la détermination de la taille des éléments le constituant.

Ce dimensionnement sera effectué en fonction de la demande énergétique d'une résidence de cinq étages (deux appartement similaire de 100 m<sup>2</sup> pour chaque étage). Pour une gestion rigoureuse de l'énergie une stratégie de contrôle sera établie. Nous allons présenter un organigramme de gestion qui va nous permettre de superviser les flux d'énergie et de protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes et également satisfaire la charge dans le cas où la demande n'est pas satisfaite par le système photovoltaïque (utilisation de réseau électrique).

Dans le dernier chapitre, nous présenterons une simulation du système globale avec optimisation pour diverses conditions de fonctionnement, pour ainsi montrer les différents modes de fonctionnement de l'algorithme de gestion. Nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

# Chapitre I

## Chapitre I

# I. Généralité sur l'énergie photovoltaïque

## I.1 Introduction

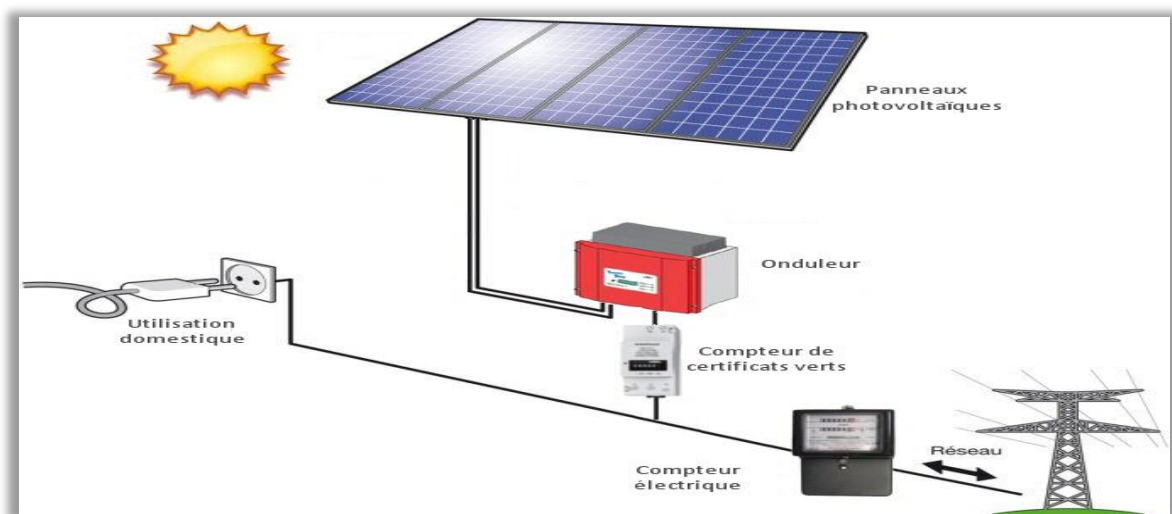
L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot photovoltaïque vient du grec « photo » qui signifie lumière et de « Voltaïque » qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

## I.2 Généralités sur l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur [1].

L'énergie produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [1].



**Figure I.1** Système de conversion de l'énergie solaire en électricité





### I.3 Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque

On distingue trois modes d'exploitation d'un panneau PV : autonome, connecté au réseau et hybride.

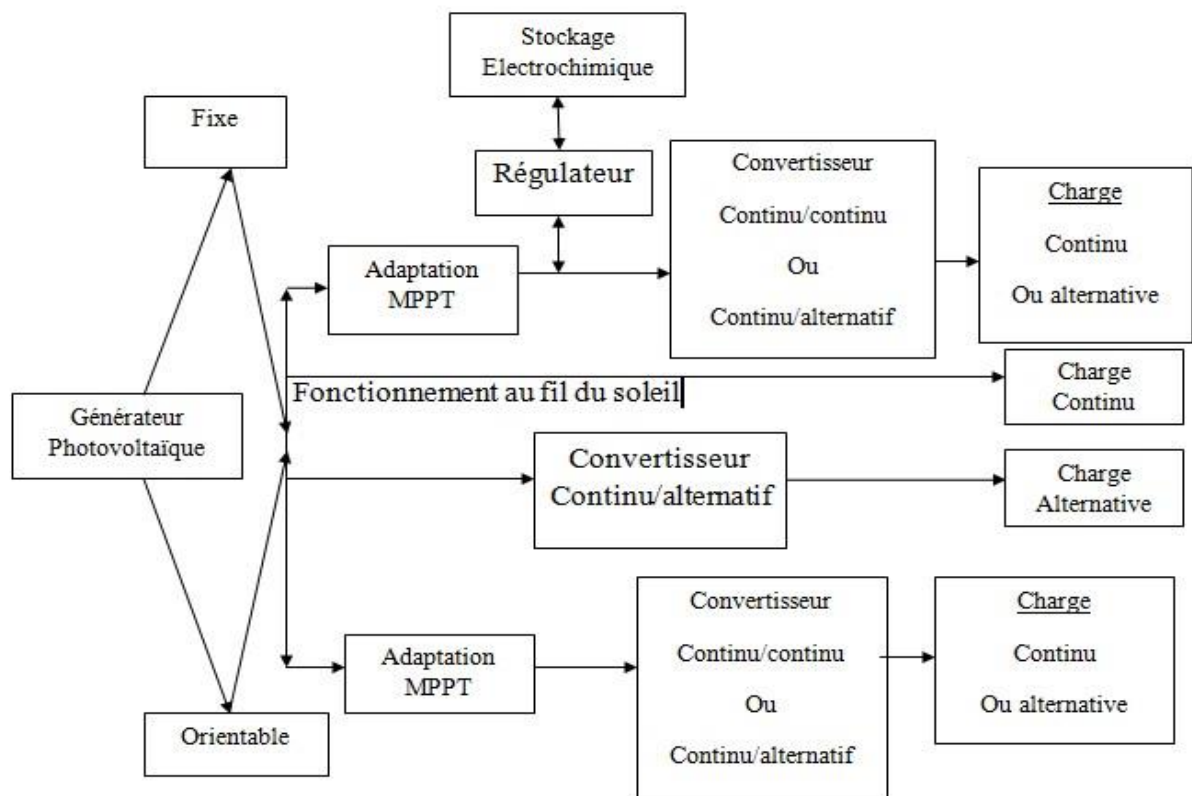
#### I.3.1 Mode autonome

En mode autonome, le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs comme les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance et le pompage d'eau.

En mode autonome, le système est constitué généralement des éléments suivants.

- Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement.
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- Le régulateur de charge protège la batterie contre la surcharge de l'énergie produite par le champ de modules PV et inclut habituellement une protection contre les décharges profondes de la batterie.
- Un convertisseur de charge permet l'utilisation d'appareil à courant continu ou à courant alternatif [2].

Il existe deux types de systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage et sans stockage, le schéma général d'un système PV autonome est représenté sur la figure (I.2).



**Figure I.2** Présentation générale d'un système photovoltaïque autonome

## I.3.1.1 Système autonome avec stockage (batterie)

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

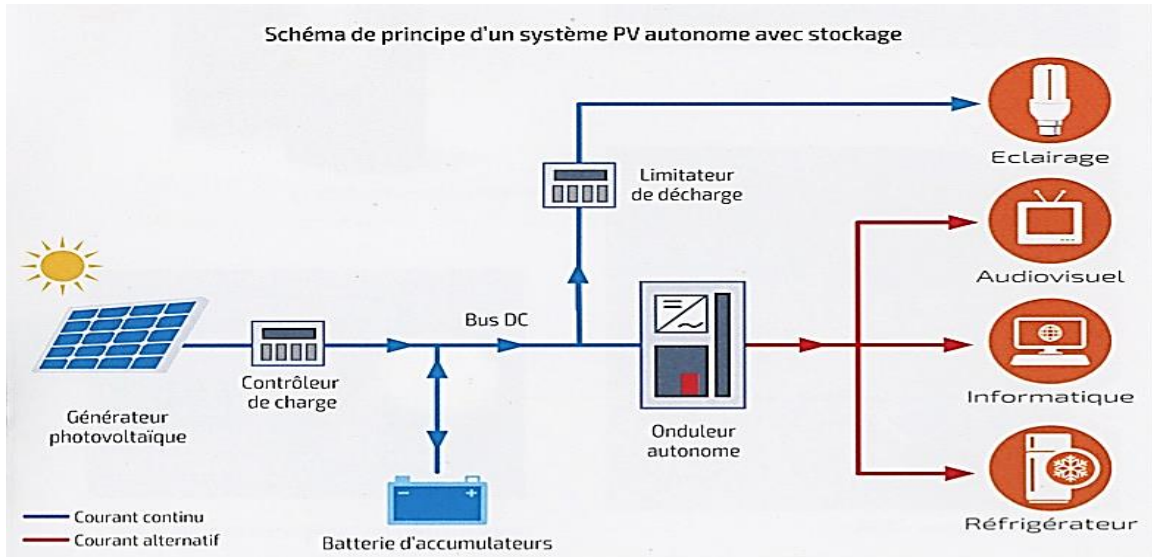


Figure I.3 Système autonome avec stockage (batterie)

## I.3.1.2 Système autonome sans stockage

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de charge n'est pas critique (ex : pompe à eau).

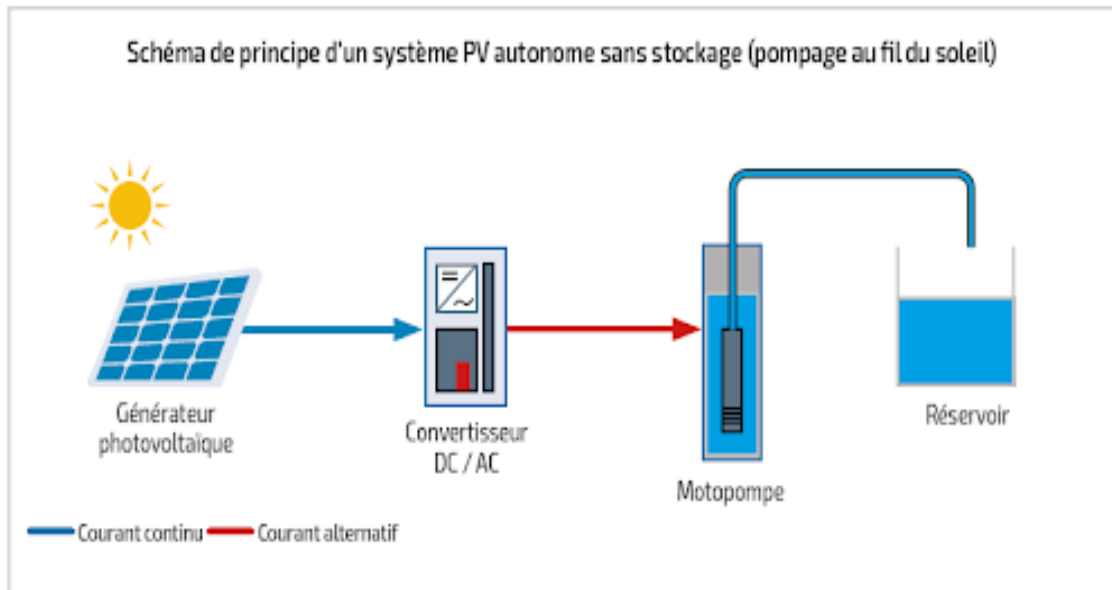
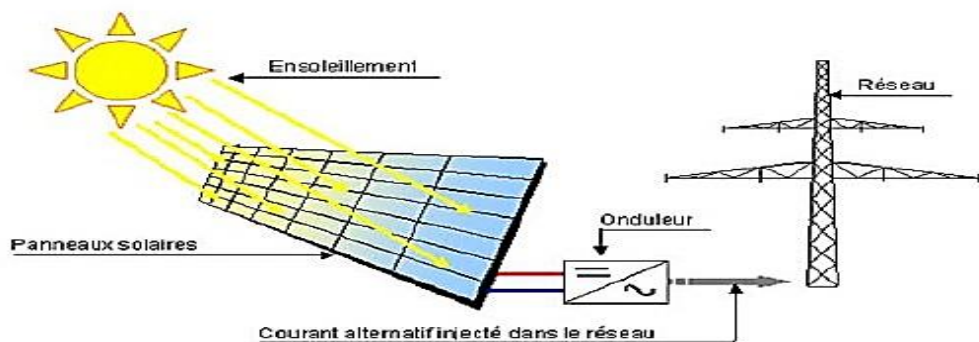


Figure I.4 Système autonome sans stockage

### I.3.2 Mode connecté au réseaux

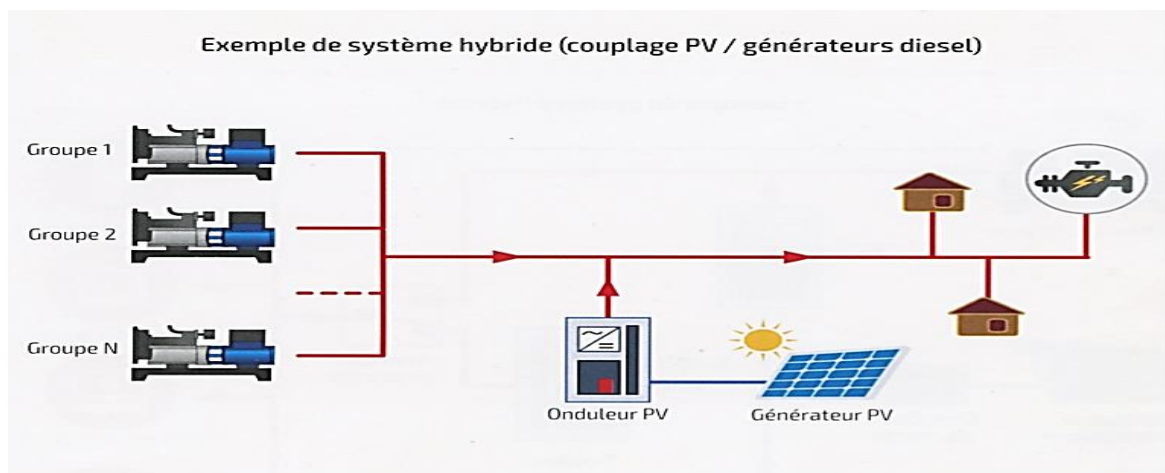
Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande (voir figure (I.5)). Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet d'éliminer les frais de stockage d'électricité, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande). Ce système permet aussi d'éviter le stockage classique sur batteries (d'où réduction du coût global).



**Figure I.5** Système photovoltaïque raccordé au réseau

### I.3.3 Mode connecté à un générateur électrogène

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.



**Figure I.6** Système photovoltaïque raccordé à un générateur électrogène

### I.3.4 Mode hybride

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité tel que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc. Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/thermique, PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation. Un exemple d'un système hybride est représenté sur la figure (I.7) [3].

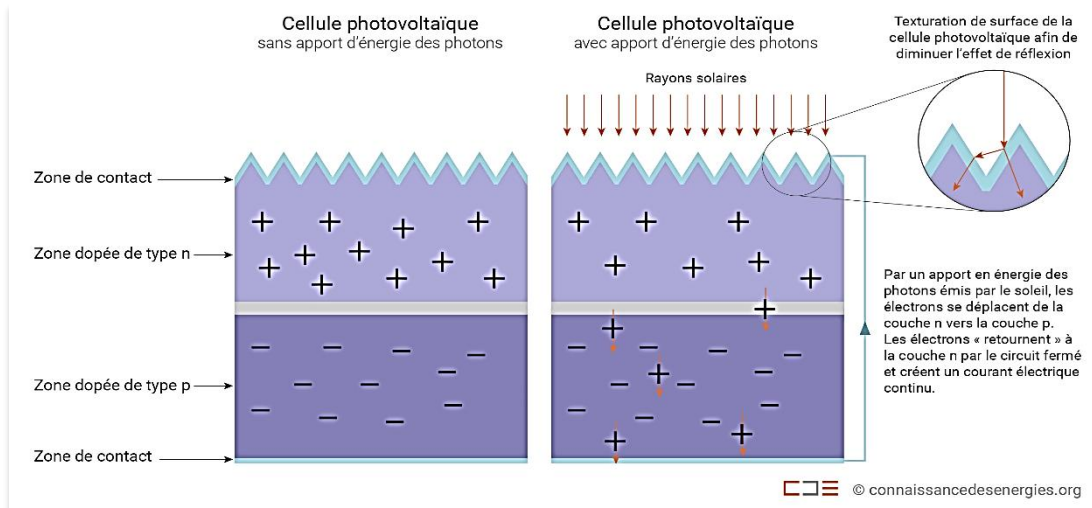


Figure I.7 Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque

### I.4 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière

Les semi-conducteurs comportent deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement [4].



**Figure I.8** Cellule photovoltaïque montrant l'effet photovoltaïque [4]

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou [4].

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure (I.8)). L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité [4].

Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev). Dans le silicium solide, chaque atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons [4].

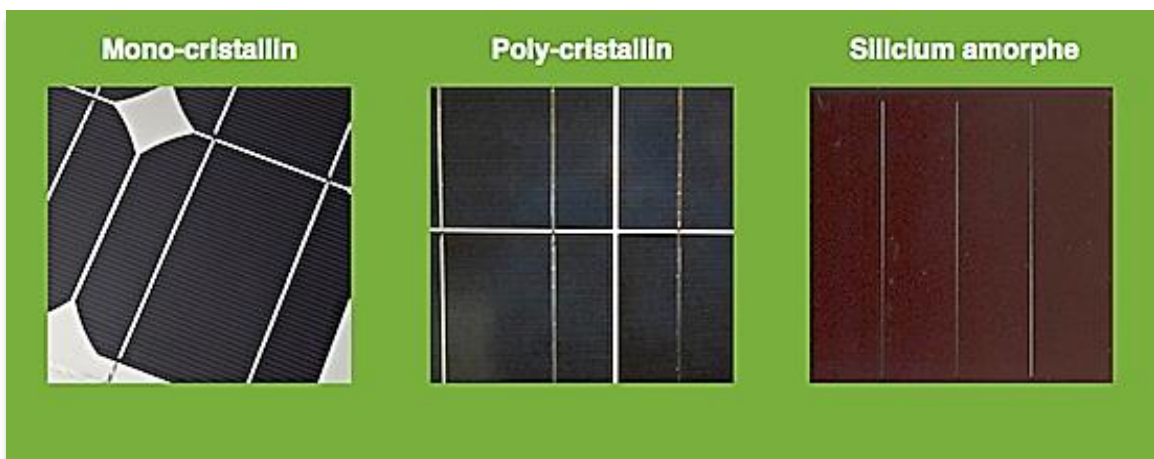
Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons ; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit dopé de type N. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper

l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit dopé de type P. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des panneaux photovoltaïques [4].

### **I.5 Cellule photovoltaïque**

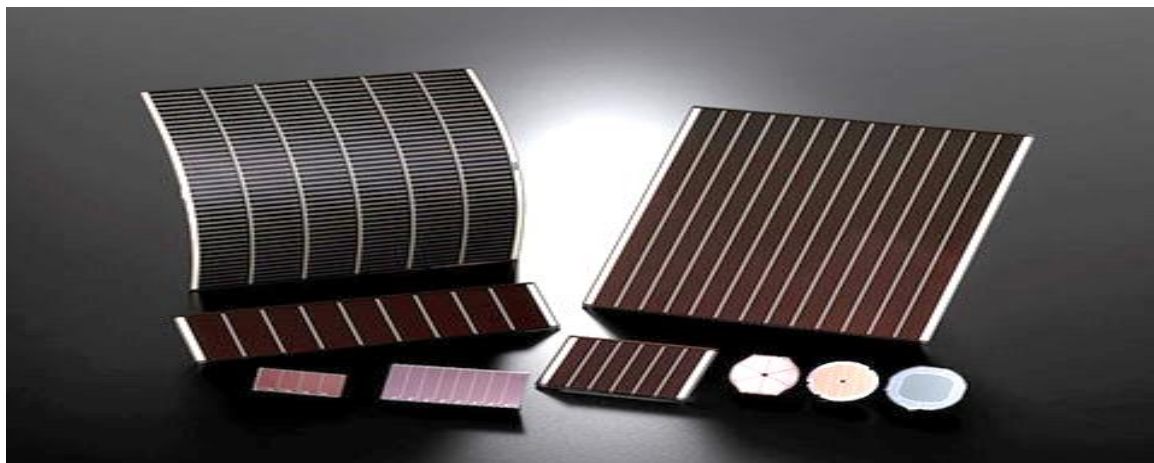
Il existe différents types de cellules et de procédés de fabrication. Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium. La performance se mesure d'abord par le rendement : pourcentage de l'énergie lumineuse effectivement transformée en électricité. Dans les panneaux vendus dans le commerce, on trouve, du moins cher au plus cher :

- La cellule au silicium amorphe (rendement : 6 à 10%).
- La cellule au silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%).
- La cellule au silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%).



**Figure I.9** Types de cellules photovoltaïques

#### **a) Cellule au silicium amorphe**



**Figure I.10** Cellule au silicium amorphe

Les panneaux photovoltaïques en Silicium Amorphe sont bien adaptés pour l'alimentation électrique des équipements de faibles puissances installées dans des zones à faible éclairage (à l'intérieur, sous éclairage artificiel) et sous ensoleillement diffus (à l'extérieur, soumis à un ombrage important).

Le panneau solaire amorphe présente un rendement plus faible, en revanche le silicium amorphe est l'une des technologies photovoltaïques couches minces les plus respectueuses de l'environnement, puisqu'elle n'utilise pas de métaux toxiques.

La sensibilité spectrale des cellules solaires de silicium amorphe aux spectres de lumière des éclairages fluorescents et des LED blanches, en fait un matériau attrayant pour les applications intérieures.

Contrairement au panneau cristallin traditionnel, le panneau solaire amorphe continu à fournir de l'énergie même si une partie du panneau est ombragée.

### **b) Cellule au silicium monocristallin**



**Figure I.11** Cellule au silicium monocristallin

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m<sup>2</sup> pour obtenir 1 kilowatt Crête (kWc) [6].

Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).

Ces cellules sont les plus performantes, elles permettent donc de constituer des panneaux qui sont très performants : ceux qui produisent le plus d'énergie avec le moins de surface.

### c) Cellule au silicium poly cristallin



**Figure I.12** Cellule au silicium poly cristallin

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets.

#### **I.5.1 Groupement des cellules photovoltaïque**

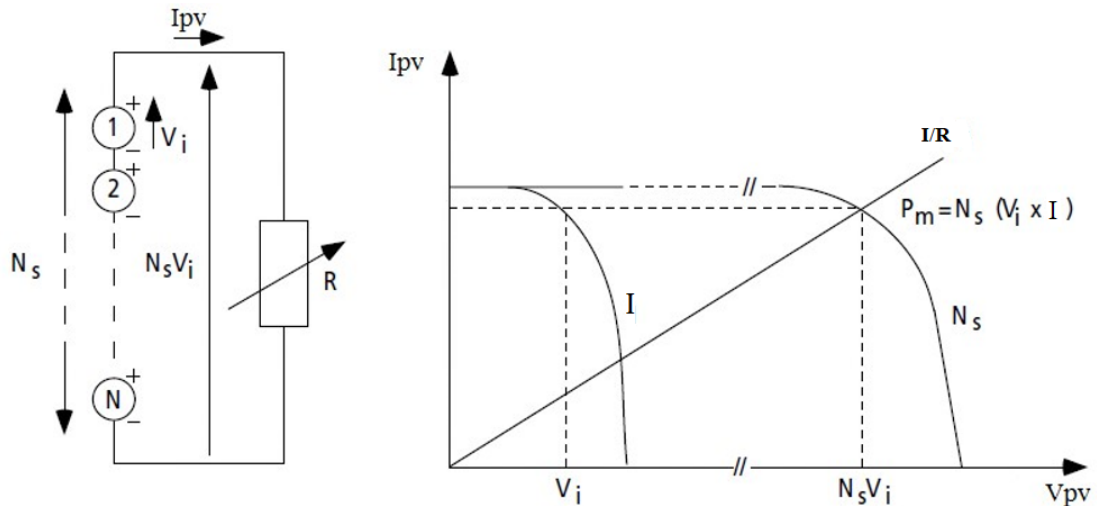
##### **a) Groupement en série**

Une association de  $N_s$  cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule [7].

$V_{OC} N_s$  : Somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série ;

$I_{CC}$  : Courant de court-circuit.





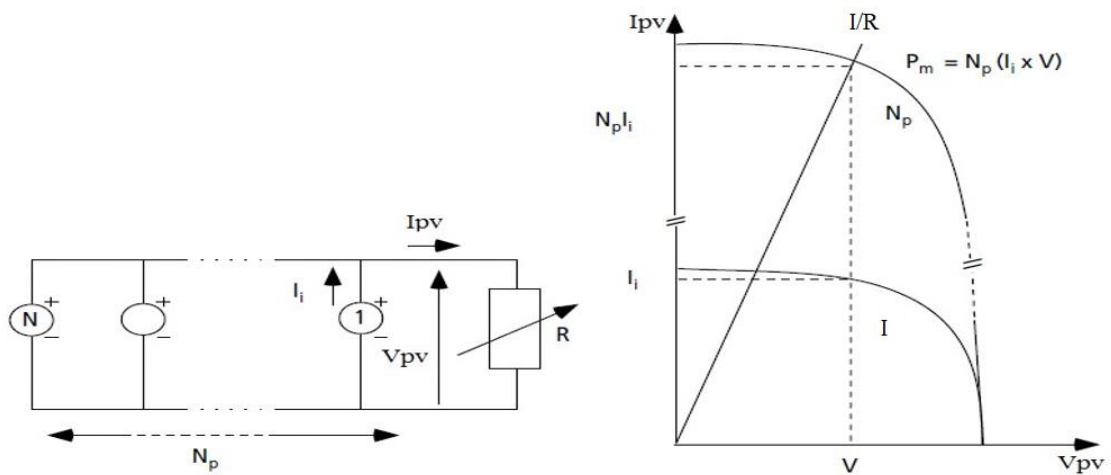
**Figure I.13** Cellules identiques en série [2]

**b) Groupement en parallèle**

Une association parallèle de  $N_p$  cellule est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [7].

$I_{CC} N_p$ : Somme des courants de court-circuit de  $N_p$  cellule en parallèle ;

$V_{OC}$  : Tension du circuit ouvert.



**Figure I.14** Cellules identiques en parallèles [2]

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des

pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

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

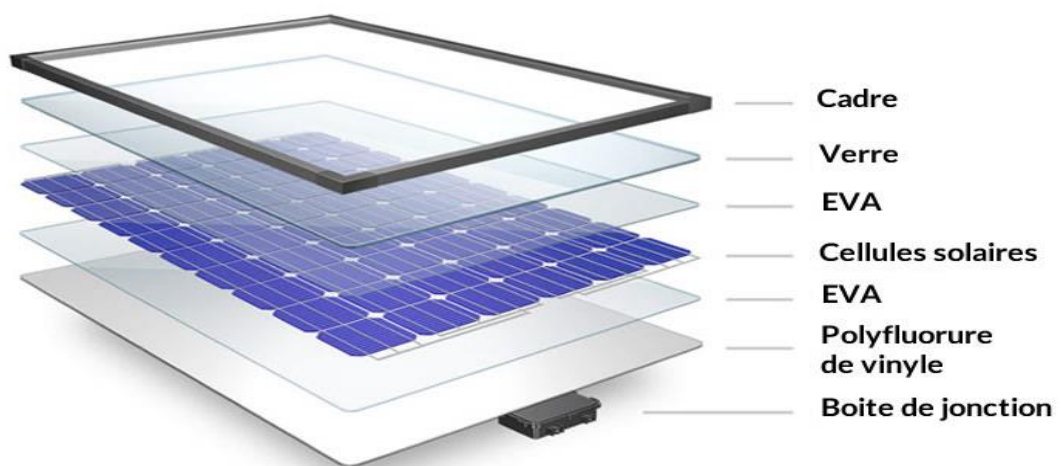
Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante [8].

### **I.6 Module photovoltaïque**

Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un module. Ce raccordement permet d'augmenter la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en gardant la même tension.

L'association des cellules en modules permet :

- D'obtenir une tension suffisante ;
- De protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité...);
- De protéger mécaniquement les cellules (chocs...).



**Figure I.15** Constitution d'un module photovoltaïque

### I.6.1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

- **La puissance de crête  $P_C$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>) ;
- **Tension à vide  $V_{OC}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil " ;
- **Courant de court-circuit  $I_{CC}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ". C'est la plus grande valeur de courant généré par un module pour une tension nulle  $V_{pv} = 0$  ;
- **Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$  ;
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente ;
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{OC} \cdot I_{CC}$  [8].

### I.7 Panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure (I.17) [9].

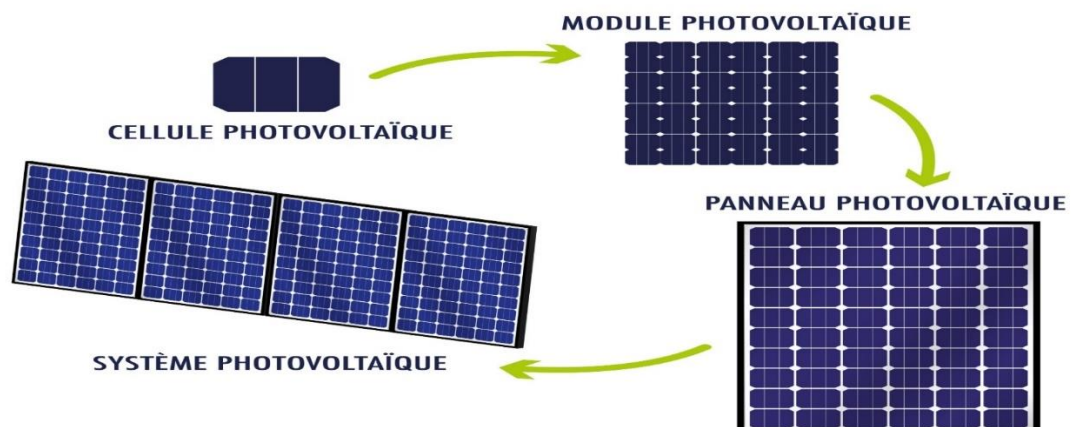


Figure I.16 Panneau photovoltaïque

### **I.8 Champ photovoltaïque**

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Pour déterminer le nombre de panneaux à utiliser en série et en parallèle, on part de la tension nominale à atteindre que l'on divise par la tension au point de puissance maximale d'un panneau [11].

### **I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque**

En général, l'énergie solaire photovoltaïque est très bien acceptée dans la société. Cependant, le mieux est de connaître les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire pour renforcer ou contraster notre opinion.

#### **I.9.1 Avantages**

Les avantages de l'énergie solaire dépendent de différents facteurs. Selon les caractéristiques de l'installation solaire, certains avantages seront observés par rapport à d'autres sources d'énergie.

- L'énergie solaire est une énergie renouvelable et, par conséquent, elle est inépuisable ;
- Faible pollution et respect l'environnement ;
- Installation et maintenance avec un cout réduit ;
- Favorable pour les sites isolés ;
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire ;
- Dans les cas de l'énergie solaire photovoltaïque connectée au réseau, la surproduction de panneaux solaires peut être vendue à des moments où il n'est pas nécessaire de consommer toute l'énergie produite.

#### **I.9.2 Inconvénients**

Selon les caractéristiques de l'installation solaire, les inconvénients de l'énergie solaire seront plus ou moins important. Malgré tous les avantages, les inconvénients doivent être soigneusement analysés. Certains inconvénients de l'énergie solaire peuvent rendre une installation solaire irréalisable. Les aspects à considérer seront les suivants :

- L'efficacité énergétique est médiocre par rapport à d'autres sources d'énergie. Le rapport entre la qualité d'énergie reçue dans un panneau solaire et la quantité d'énergie produite est faible par rapport à d'autre sources d'énergie telle que l'énergie nucléaire ;
- Le cout économique par rapport aux autres options et surtout dans les grandes centrales solaires. Surtout dans l'énergie solaire thermique, profitant des propriétés de température et

de thermodynamique, les performances sont supérieures à l'énergie photovoltaïque. Dans certains cas, l'investissement initial peut également être important ;

- La performance dépend de la météo. La dépendance à la météo fait de cette source d'énergie une option peu probable dans les zones où le ciel est principalement nuageux ;
- La limitation du temps solaire. Gardez à l'esprit que dans certaines régions, le temps solaire est plus court. Les pays nordiques, par exemple, pendant les jours d'hiver, les heures solaires pendant lesquelles l'énergie peut être utilisée sont très rares. De plus, l'inclinaison du soleil par rapport à la surface varie au cours des différents jours de l'année. La variation de l'inclinaison du rayonnement influence à elle seule les performances des panneaux solaires ;
- Limites de stockage de l'énergie générée. Parce que les heures où l'énergie électrique peut être obtenue ne coïncident pas toujours avec les heures où elle est nécessaire, il est pratique de stocker l'énergie. Pour cela, il existe des batteries solaires et des réservoirs d'eau chaude, mais le rendement est encore très faible ;
- Impact environnemental. Bien que l'énergie solaire soit considérée comme une énergie propre, elle contient également des éléments nocifs pour l'environnement.

### **I.10 Les convertisseurs statiques**

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

#### **I.10.1 Onduleur**

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en général ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire.

#### **I.10.2 Hacheur**

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu, permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source continue fixe, qui peut être un panneau photovoltaïque ou une batterie.

On distingue trois types de convertisseur continu-continu :

##### **a) Hacheur dévolteur (série)**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC, La source d'entrée est de type tension

continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [12].

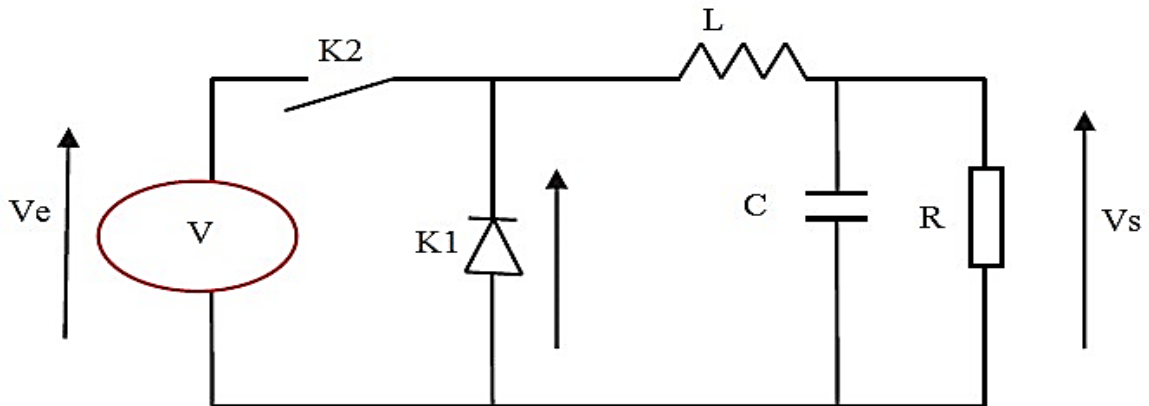


Figure I.17 Schéma hacheur série [12]

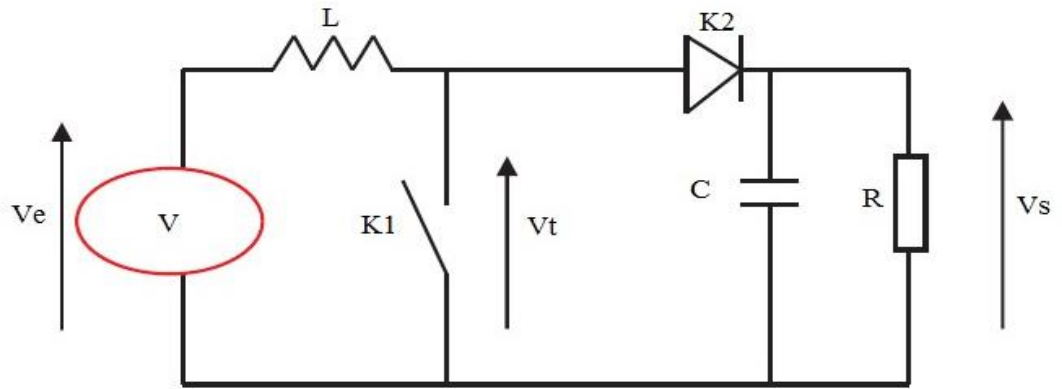
### ➤ Fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$  ( $T=1/f$ ), comporte deux étapes :

- Lors de la première étape, le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha T$ , avec  $\alpha$  compris entre  $0$  et  $1$ .  $\alpha$  est appelé rapport cyclique.
- Lors de la seconde étape, le transistor est bloqué. La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha T$  à  $T$  [12].

### b) Hacheur survolteur (parallèle)

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, d'où son nom. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [12].



**Figure I.18** Schéma hacheur parallèle

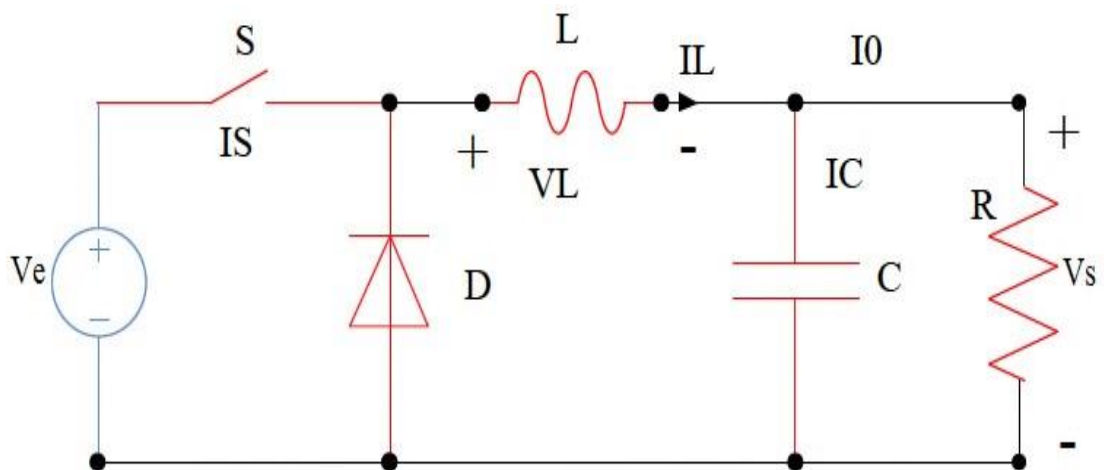
➤ **Fonctionnement**

- Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à  $\alpha.T$ , l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée.
- Lors de la seconde partie du cycle, de  $\alpha.T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées [12].

**c) Hacheur série-parallèle**

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode [15].



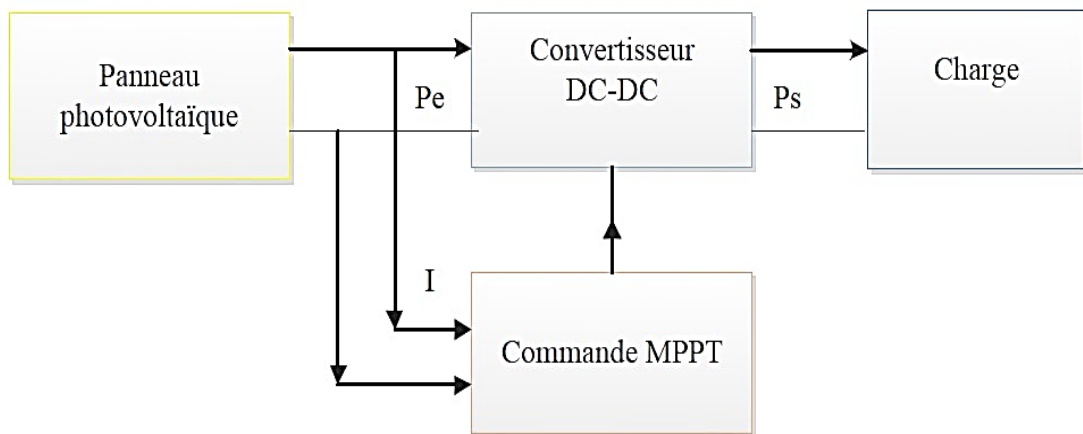
**Figure I.19** Schéma hacheur série-parallèle [15]

### I.11 Principe de fonctionnement au point de puissance maximale

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application.

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (I.20) [13].



**Figure I.20** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

### I.12 Systèmes de stockage

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi, il faudra penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours sans soleil et pour mieux adapter le générateur PV en fixant la tension du système [14].

#### I.12.1 Batteries d'accumulateurs

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV, elle est nécessaire pour faire face aux heures de non production.

Le fait que l'énergie solaire ne soit pas disponible sur l'ensemble d'une période de fonctionnement du système alimenté, impose l'utilisation de batteries dans les installations autonomes pour stocker l'énergie [14].



Dans les systèmes solaires autonomes, on utilise principalement :

### **a) Batteries au plomb**

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matières actives, bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative, ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

La tension varie entre 1.7 Volts et 2.4 Volts par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement. Ces accumulateurs ont un rendement énergétique de l'ordre 70 à 85 %.

En raison de leur maintenance nécessaire, ils sont réservés aux systèmes photovoltaïques de puissance [14].

### **b) Batteries au Cadmium-Nickel**

La tension de ce type d'accumulateurs varie entre 1.15 et 1.45 Volts par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70% [15].

En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique ;
- Possibilité de supporter des décharges profondes ;
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte ;
- Ne craint pas de gel.

### **c) Batteries au Nickel-Zinc**

Ces accumulateurs sont encore dans le domaine de la recherche mais ils ont l'intérêt d'utiliser des matériaux moins coûteux est moins toxiques, leur tension varie entre 1.6 et 1.8 volts et leur inconvénient principal lié à la durée de vie qui reste limitée par un nombre de cycles [14].

### **d) Batteries au Lithium**

Ces nouveaux accumulateurs utilisent un électrolyte liquide organique, leur intérêt réside dans une forte capacité par unité de masse, une très bonne étanchéité et une stabilité importante vis-à-vis de la température. Leur développement est subordonné à une augmentation du nombre de cycles qu'ils peuvent accepter. [14]

## **I.12.2 Caractéristiques principales d'un accumulateur**

Les caractéristiques principal d'un accumulateur sont comme suit [16] :

- **Une batterie** : Est constituée d'un certain nombre d'éléments (cellules) connectés en série le plus souvent et parfois en parallèle ;
- **Tension nominale** :  $U$  (unité : le volt, V) : tension moyenne d'une batterie observée sur la plus grande partie de sa courbe de décharge ;
- **Tension à vide** : Tension mesurée aux bornes d'une batterie non connectée à une charge ;
- **Tension en charge** : Tension mesurée aux bornes d'une batterie connectée à sa charge (Récepteur, déchargeur, résistance...). C'est-à-dire délivrant un courant ;
- **Courant** :  $I$  (Unité l'ampère, A ou le mA) : Courant circulant dans les câbles et résultant de la connexion d'une charge à une batterie ;
- **Capacité** :  $C$  (Unité l'ampère-heure, Ah ou le mAh) Capacité énergétique d'une batterie à délivrer un certain courant pendant un certain temps, (Des ampères fois des heures  $A \times h$ ) ;
- **Energie massique ou densité énergétique** :  $D$  (Unité le wattheure par kilogramme, Wh/kg) C'est le rapport entre la capacité d'une batterie à délivrer une certaine puissance pendant un certain temps et son poids.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les éléments existants dans le système photovoltaïque dont on va utiliser. Nous avons présenté les différents types de système photovoltaïque et le principe de fonctionnement de chaque élément ce qui permet d'introduire la modélisation et l'analyse de ce système. Nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension d'un générateur photovoltaïque et on a cité les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

L'énergie produite est continue et pour son utilisation il faut des convertisseurs. Alors nous avons présenté les types existant pour notre système photovoltaïque, ainsi les différents types de batteries, vu que notre système de stockage est basé sur les batteries.

Pour un bon fonctionnement de notre système, on a défini un système de gestion d'énergie photovoltaïque nécessaire pour superviser de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants générateurs photovoltaïque, les batteries, réseau électrique et la charge (consommateur) .

# Chapitre II

## Chapitre II

### II. Modélisation du système photovoltaïque

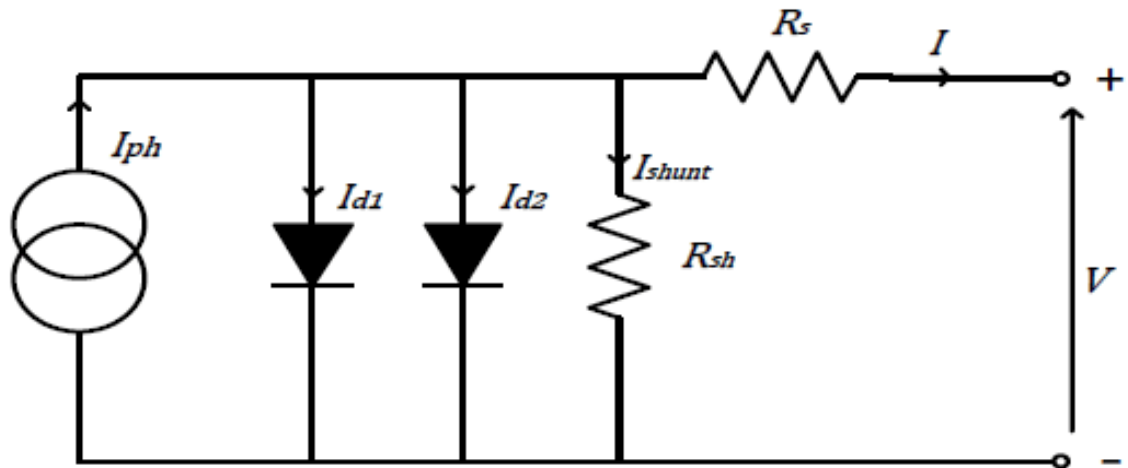
#### II.1 Introduction

Après avoir généralement définir et citer les différentes composantes du système photovoltaïque, nous allons concentrer sur la partie modélisation du système à étudier.

Dans ce chapitre, nous présenterons le nécessaire pour une meilleure modélisation. On va présenter les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques bien détaillés qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système, afin de prévoir son comportement. En commençant par les modèles électrique d'un générateur photovoltaïque et les équations qui régissant son fonctionnement, le modèle de l'hacheur et de l'onduleur, le modèle de la batterie et aussi, présenter la commande MPPT.

#### II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Une cellule solaire est représentée par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique (analytique) en fonction des paramètres technologiques de la cellule tels que le courant et la tension. Le schéma qui est largement utilisé pour la représentation d'un circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque, est représenté sur la figure (II.1) [20].



**Figure II.1** Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [20]

Comme le montre le schéma de la figure (II.1), une photopile comporte une résistance série  $R_s$  et une résistance en dérivation ou shunt  $R_p$ . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I-V) de la photopile. D'après la figure (II.1), le modèle mathématique pour la caractéristique courant –tension est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left( e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_1.K.T}} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left( e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_2.K.T}} - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (II.1)$$

Où :

- **I** et **V** : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque ;
- **I<sub>ph</sub>** : Photo-courant produit ;
- **I<sub>s1</sub>** et **I<sub>s2</sub>** : Courant de saturation diodes ;
- **I<sub>d1</sub>** et **I<sub>d2</sub>** : Respectivement les courants qui traversent la première et la deuxième diode ;
- **n<sub>1</sub>** et **n<sub>2</sub>** : Facteurs de pureté de la diode ;
- **R<sub>s</sub>** et **R<sub>p</sub>** : Respectivement la résistance série et la résistance parallèle ;
- **T** : Température absolue en degré Kelvin (°K) ;
- **q** : Charge élémentaire de l'électron ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C) ;
- **K** : Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/°K) ;
- Le photo-courant **I<sub>phmax</sub>** est atteint à une insolation maximum, souvent on a (**I<sub>ph</sub> = s · I<sub>phmax</sub>**), avec **s** : pourcentage d'insolation.

L'équation (II.1), montre que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant et les courant de saturation inverse des diodes qui sont donnés par :

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T = 298) \cdot (1 + (T - k) \cdot K) \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \tag{II.2}$$

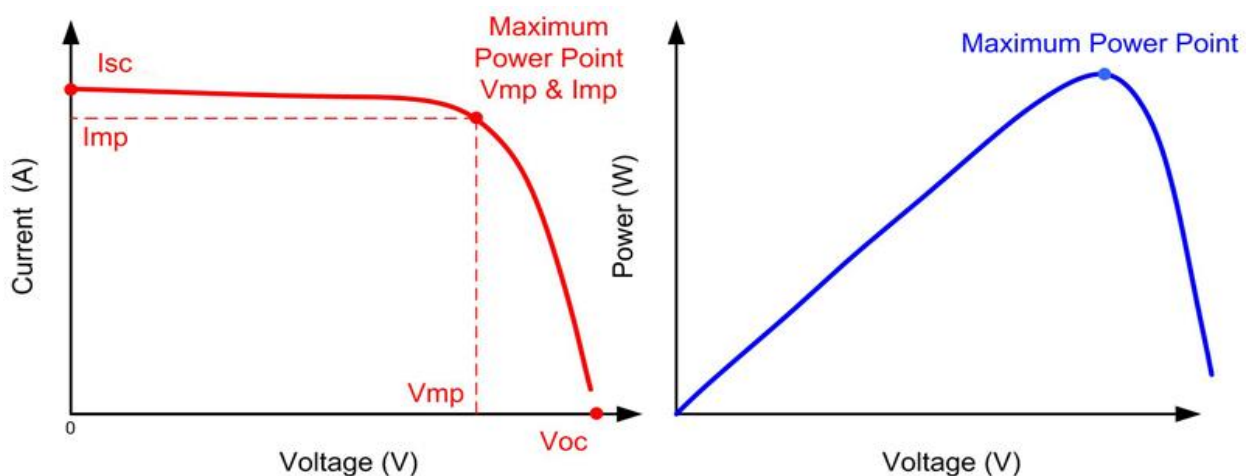
$$I_{s1} = K1 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{KT}} \tag{II.3}$$

$$I_{s2} = K2 \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot e^{\frac{-E_g}{KT}} \tag{II.4}$$

Où

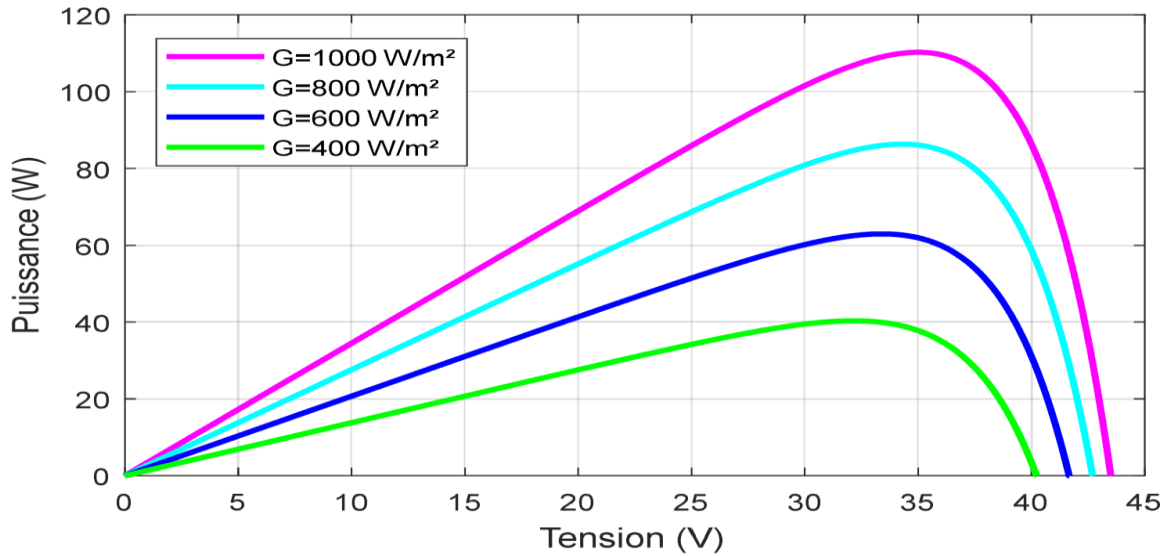
**E<sub>g</sub>** : Bande d'énergie du semi-conducteur, **K<sub>1</sub>**=1,2 A/°K<sup>3</sup>, **K<sub>2</sub>**=2,9.10<sup>5</sup> A/°K<sup>5/2</sup> et **k**=298 °K/J.

### II.2.1 Caractéristique courant-tension d'un module

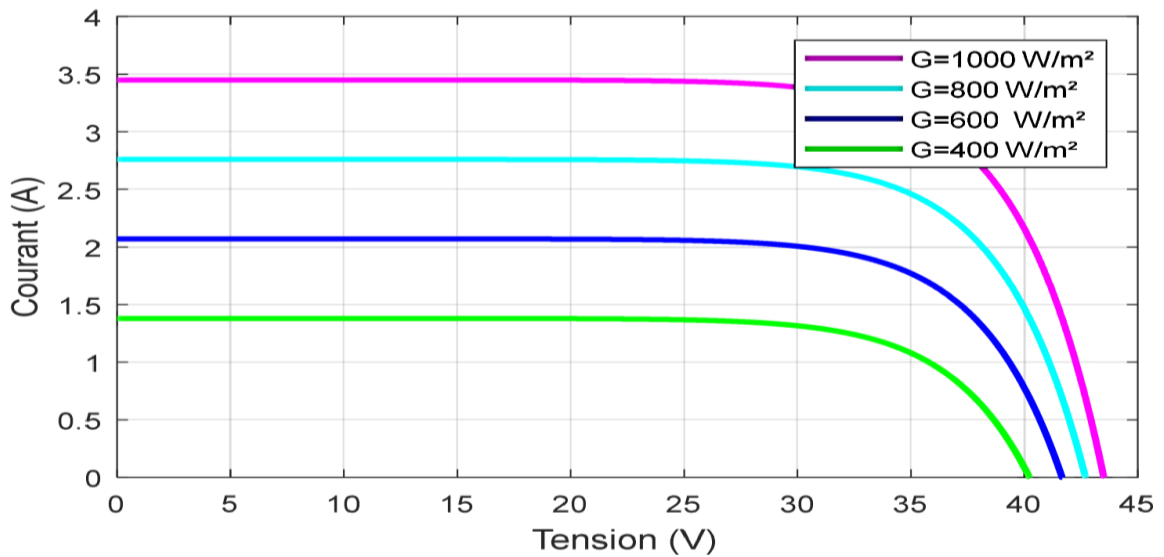


**Figure II.2** Exemple de caractéristique courant-tension d'un module PV

**II.2.2 Influence de l'irradiation**



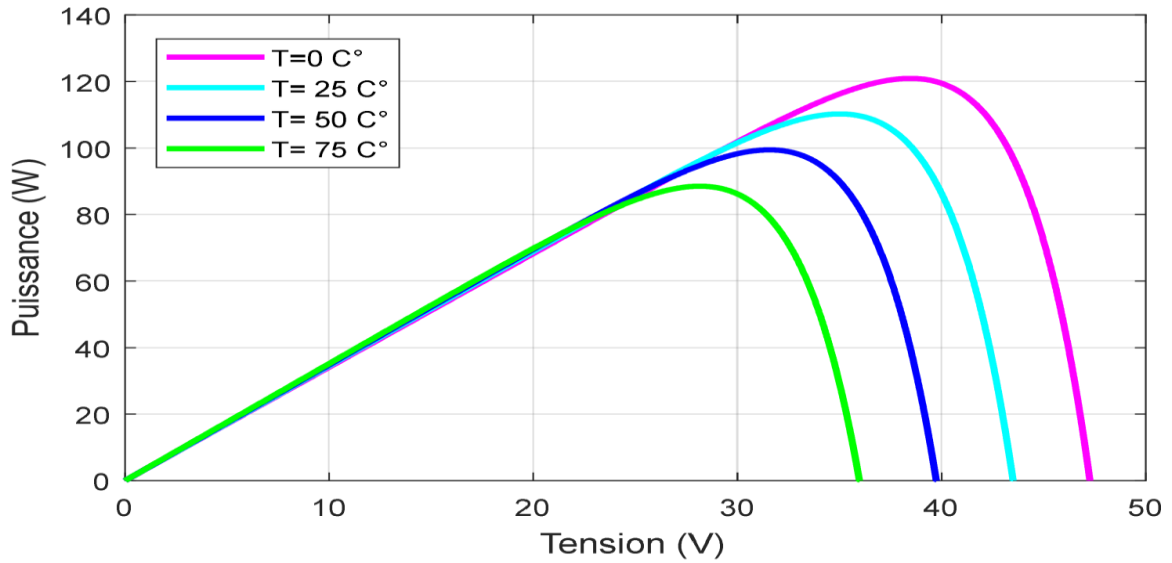
**Figure II.3** Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) à T=25°C



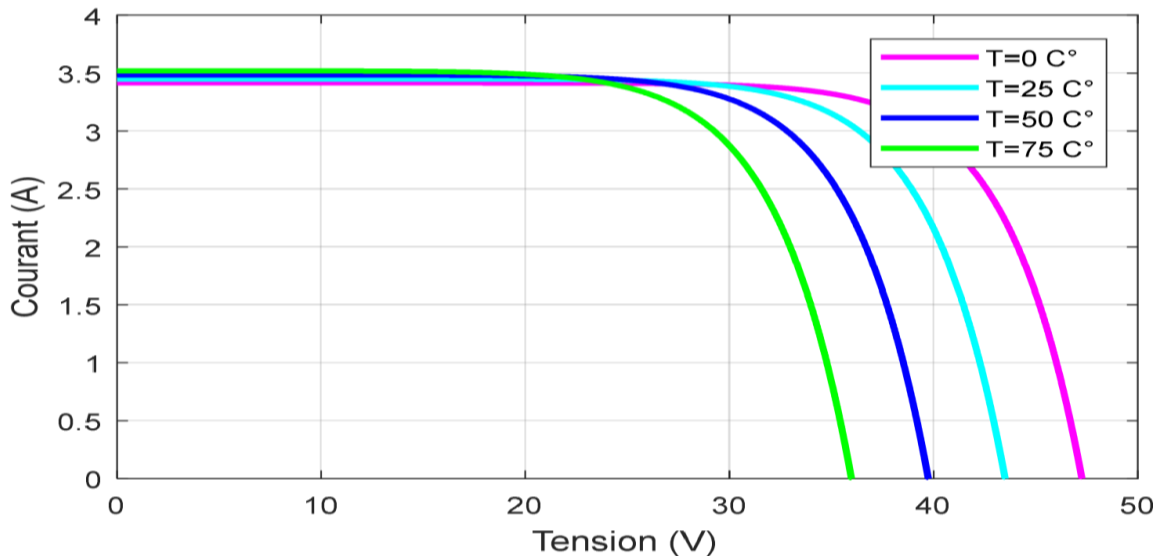
**Figure II.4** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) à T=25°C

Les figures (II.3) et (II.4) montrent la variation du courant et de la puissance en fonction de la tension du module photovoltaïque pour les différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur les graphs, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit  $I_{sc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (à vide) varie très peu.

**II.2.3 Influence de la température**



**Figure II.5** Influence de la température sur la caractéristique P(V) à E=1000 W/m<sup>2</sup>



**Figure II.6** Influence de la température sur la caractéristique I(V) à E=1000 W/m<sup>2</sup>

Les figures (II.5) et (II.6) montrent que de l'augmentation la température à irradiation constante fait décroître la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  fortement, et le courant de court-circuit  $I_{sc}$  augmente légèrement.

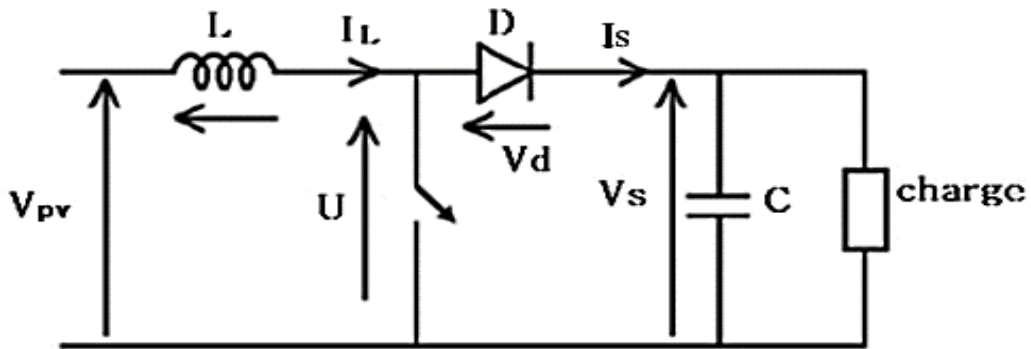
**II.3 Modélisation de l'hacheur survolteur**

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de BOOST ou hacheur parallèle ; Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée.

Son circuit de base est celui de la figure si dessous.

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot V \tag{II.5}$$

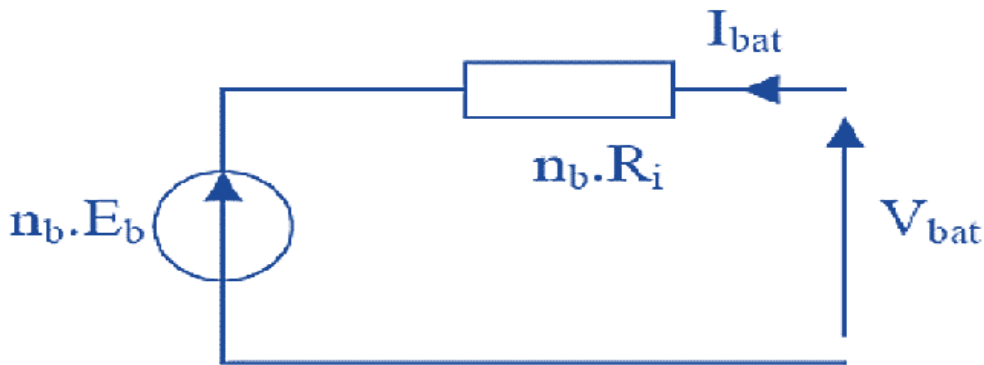
$$I_s = (1 - \alpha) \cdot I_L \tag{II.6}$$



**Figure II.7** Schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster

### II.4 Modélisation de la batterie

La modélisation de l'élément de stockage de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est importante dans la simulation des systèmes photovoltaïques. Dans notre cas, l'accent est misé sur la technologie de stockage qui est sauvant utilisée actuellement, c'est à dire la technologie électrochimique Plomb-Acide. Nous avons opté pour un stockage par batterie au plomb. Notre choix s'est porté sur le modèle dit « CIEMAT » qui est basé sur le schéma suivant (Figure II.8) où la batterie est décrite par une source de tension  $E_b$  et la résistance interne  $R_i$  dépendant de la température et l'état de charge de la batterie.



**Figure II.8** Schéma équivalent de  $n_b$  élément en série

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

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b \mp n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \tag{II.7}$$

$V_{bat}$ : Tension de batterie ;

$I_{bat}$ : Courant de la batterie ;

$E_b$ : Force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie ;

$R_i$ : Résistance interne.



L'expression de l'état de charge :

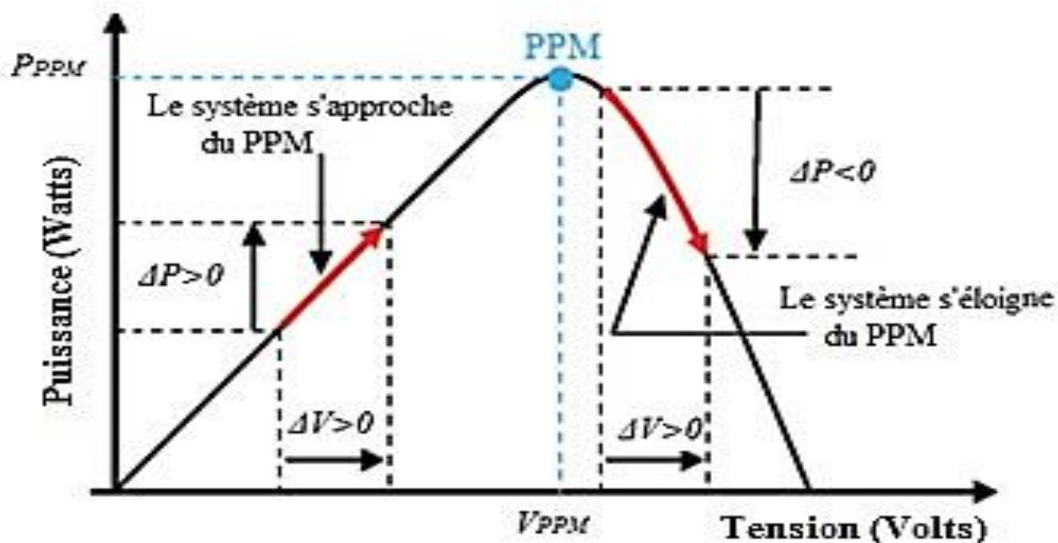
$$E_{dc} = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \tag{II.8}$$

$C_{bat}$  : la capacité nominale de la batterie (Ah) ;

$Q_d$  : la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

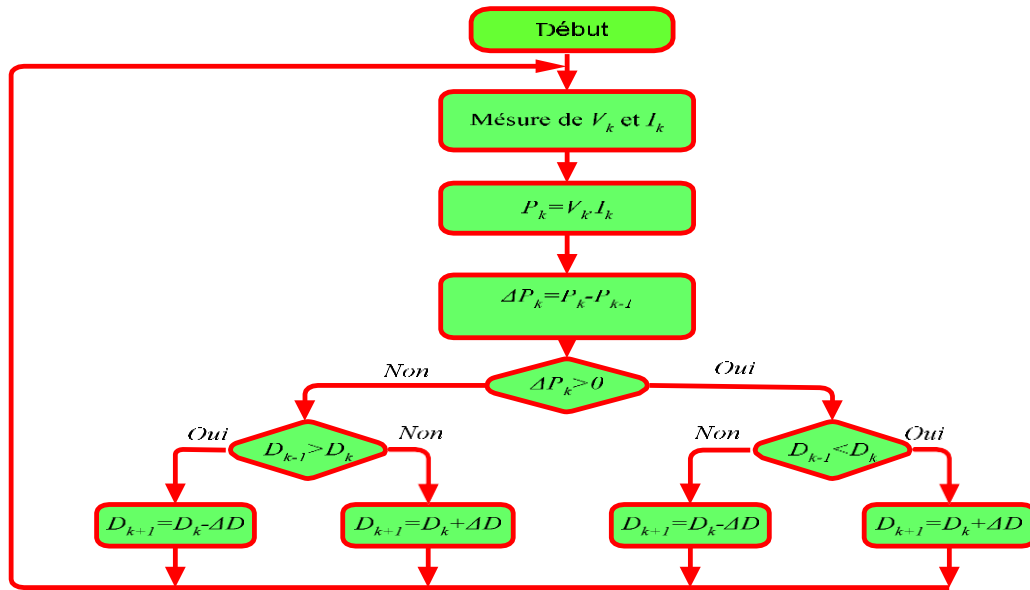
### II.5 Commande MPPT P&O

L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale par la méthode *P&O* (perturbation and observe) est le plus utilisé, car il est relativement simple à implémenter et généralement nécessite deux capteurs pour mesurer la tension et le courant à partir desquels la puissance est calculée. Parfois, le courant est estimé à partir de la tension mesurée, éliminant ainsi le besoin du capteur de courant. Son principe consiste à perturber la tension  $V$  ou le courant  $I$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P$  qui en résulte. Cependant, la variable idéale qui caractérise le PPM est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. Et d'après ce qu'on a remarqué dans le début de chapitre II, la variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.9), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V$  engendre un accroissement de la puissance  $P$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît [20].



**Figure II.9** Caractéristique P (V) d'un panneau solaire

La figure (II.10) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.



**Figure II.10** Organigramme de l'algorithme perturbation et observation [20]

L'inconvénient de la méthode de P&O est que, si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale. Cela se traduit par une gigue autour du PPM ce qui diminue légèrement la puissance moyenne de quelques %, suivant la valeur de la perturbation. Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. Certains algorithmes procèdent aussi à des incréments variables permettant d'accélérer la recherche dans certaines parties de la courbe. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser [20].

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents modèles utilisés pour la modélisation du système photovoltaïque, celui des panneaux PV, des batteries et des convertisseurs. Nous avons défini, les caractéristiques du générateur PV avec ses performances, ainsi que l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques. En outre, pour un fonctionnement dans des conditions optimales, un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT P&O pour Maximum Power Point Tracking Perturbation and Observe) a été décrit.

# Chapitre III

## Chapitre III

### III. Dimensionnement et gestion d'énergie d'un système photovoltaïque

#### III.1 Introduction

Pour la réalisation d'une installation photovoltaïque, le dimensionnement reste une étape indispensable car il y a des nombreux paramètres à prendre en considération.

Le dimensionnement des systèmes photovoltaïque exige une analyse totale des besoins électriques de l'utilisateur (profil de charge), l'ensemble des éléments de la chaîne PV, à savoir, la taille du générateur, la capacité de stockage, le cas échéant la puissance d'un convertisseur, voir l'inclinaison des modules et la tension d'utilisation et des différents facteurs pouvant influencer leurs rendements, données météorologie, et environnement d'installation.

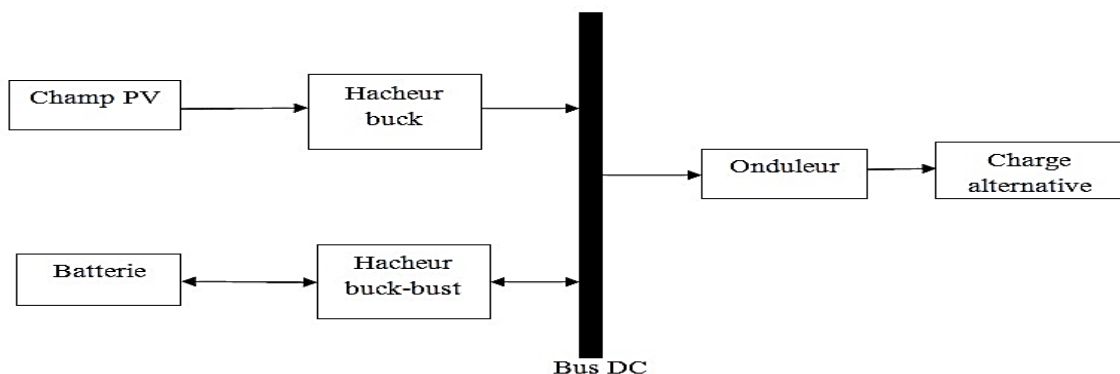
Une bonne gestion dans le système permet l'équilibre entre la puissance fournie et la puissance consommée. Nous devons donc chercher le meilleur compromis entre la production et la consommation.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de calcul optimal et précise de dimensionnement de l'installation PV ainsi la méthode choisi pour la gestion de son énergie.

#### III.2 Architecture du système

Le système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans le cas du système isolé de petite taille, l'architecture avec réseau ou 'bus' continu DC peut être utilisée. Tous les composants y sont connectés selon la figure (III.1). Les pertes dans le bus continu sont limitées du fait même de sa taille. De plus, ce type d'architecture permet de limiter les pertes dues aux onduleurs, dont la présence est inévitable dans le cas de charge alternatif. Ici, seul l'utilisateur est relié au bus via un onduleur. Les composants du stockage ainsi que le champ PV sont connectés au bus via des convertisseurs DC/DC [17].



**Figure III.1** Schéma du raccordement des sources et consommateurs énergétiques

### III.3 Dimensionnement du système PV

Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système PV en site isolé, il constitue donc une étape cruciale lors de la mise en place du système [18].

Il dépend [18] :

- De l'ensoleillement sur le site au cours de l'année ;
- De l'énergie requise par chaque récepteur à alimenter ;
- Du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage ;
- Il est alors évident qu'une demande importante en énergie augmentera la taille et le coût du système tandis que le choix de composants à haut rendement énergétique permettra de les réduire.

D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes [18] :

- Evaluation des besoins énergétiques ;
- Estimation de l'ensoleillement ;
- Dimensionnement des panneaux PV ;
- Dimensionnement du stockage ;
- Dimensionnement des convertisseurs.

#### III.3.1 Choix de la méthode de dimensionnement

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système PV [18] :

##### a) Méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation

Cette méthode permet d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des conditions complexes (fluctuation saisonnières de l'irradiation, ciel nuageux pour plusieurs jours...etc.) grâce à un logiciel adapté. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut connaître l'irradiation qui correspond aux données horaires sur le site d'installation pour un nombre d'années trop grand (10 à 20ans) [18].

##### b) Méthode de mois le plus défavorable

Dans cette méthode, 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 ou dans certains pays la période d'hivers est rude (le mois de décembre est choisi en Algérie) [18].

##### c) Méthode de la moyenne annuelle

Cette méthode est très proche de celle du mois le plus défavorable. Elle utilise elle aussi l'irradiation journalière [ $\text{KWh/m}^2.\text{j}$ ]. Mais pour une moyenne qui s'étend pour toute une année au lieu d'un seul mois. Donc on calcule la moyenne mensuelle de l'énergie (irradiation)

récupérable sur un site pour les 12 mois de l'année et on effectue la moyenne annuelle de celle-ci [18].

- **Remarque**

La méthode du mois le plus défavorable présentée est celle qu'on va utiliser dans notre travail.

### **III.3.2 Evaluation de la consommation de la charge**

Pour évaluer l'énergie consommée par une charge il faut connaître deux choses Essentielles [18] :

- Puissance de la charge  $P_{ch}$  [W] ;
- Durée de fonctionnement  $T_{ch}$  [h/j].

Ainsi l'énergie consommée par une charge durant la journée s'écrit :

$$E_{ch} = P_{ch} \cdot T_{ch} \text{ [Wh/j]} \quad (\text{II.9})$$

L'énergie moyenne consommée par jour sera la somme de toutes les énergies de chaque appareil.

$$E_j = \sum (P_i \cdot T_i) \text{ [Wh/j]} \quad (\text{II.10})$$

### **III.3.3 Estimation de l'ensoleillement**

Il faut consulter la carte d'ensoleillement de la région destinée à l'installation PV. Toujours choisir la période de l'année la moins ensoleillée afin d'obtenir la production d'électricité requise durant cette période. L'ensoleillement est habituellement exprimé en [kWh/m<sup>2</sup>. j] ou en heures de plein ensoleillement (heures × 1000W/m<sup>2</sup>) [18].

$$E_{sol} = N_{eq} \cdot 1000 \quad (\text{II.11})$$

Avec  $N_{eq}$  : nombre d'heure d'ensoleillement crête par jour [h/j].

#### **a) Orientation des panneaux**

On appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest, ...). L'orientation idéale d'un module photovoltaïque obéit à la règle vers l'équateur. Ce qui donne une orientation vers le Sud dans l'hémisphère Nord et une orientation Nord dans l'hémisphère Sud [18].

#### **b) Inclinaison des modules**

Elle indique l'angle que fait le panneau avec l'horizontale, elle se compte en degrés. Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leurs surfaces soient perpendiculaires aux rayons solaires. Or le soleil d'une saison à l'autre n'a pas la même inclinaison ; selon les saisons, à midi, il est plus ou moins haut dans le ciel. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. Comme il est difficile de modifier plusieurs fois dans l'année qui est définissent par la latitude du lieu.

**Tableau III-1** Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude

Latitude $\varphi$	Inclinaison $\alpha$
$\varphi < 10^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\alpha = \varphi$
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 15^\circ$

**III.3.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque**

La tension du champ photovoltaïque dépend du type d'application ; de la puissance photovoltaïque du système, de la disponibilité des matériels (modules et récepteurs). Le tableau suivant indique la tension adaptée au générateur PV [18].

**Tableau III-2** Tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques en fonction de leurs puissances

<b>Puissance du champ PV</b>	0-500 W <sub>c</sub>	500 W <sub>c</sub> -2 KW <sub>c</sub>	2-10 KW <sub>c</sub>	>10 KW <sub>c</sub>
<b>Puissance du champ PV</b>	12 VDC	24 VDC	48 VDC	>48VDC

Le dimensionnement des panneaux PV se fait suivant la formule suivante :

$$P_{pv} = \frac{E_j \text{ (Wh/j)}}{N_{eq} \text{ (h/j)} \cdot C_p} \tag{II.12}$$

Le nombre de panneau photovoltaïque :

$$N_{pv} = \frac{P_{pv}}{P_{pv,u}} \tag{II.13}$$

Avec :

$E_j$  : Consommation ou le besoin journalier de la charge ;

$P_{pv}$  : Puissance du champ PV [W] ;

$P_{pv,u}$  : Puissance unitaire d'un module photovoltaïque ;

$N_{pv}$  : Nombre de panneau photovoltaïques ;

$C_p$  : Coefficient correctif des panneaux photovoltaïques.

**a) Pour le branchement des modules en séries et en parallèles**

On a :

$$N_s = \frac{V}{V_c} \tag{II.14}$$

$$N_p = \frac{N_{pv}}{N_s} \tag{II.15}$$

$N_s$  : Nombre de panneau en série ;

$N_p$  : Nombre de panneau en parallèle ;

$V$  : Tension du système photovoltaïque en volt (la tension de bus continu) ;

$V_c$  : Tension nominale d'un panneau en volt.

### b) Dimensionnement du stockage

Le dimensionnement des batteries requiert donc une attention particulière afin de diminuer le coût global du système. Dans notre cas et afin de ne pas avoir un investissement trop coûteux en stockage, nous souhaitons obtenir une autonomie d'un jour avec une profondeur de décharge de 80% pour des besoins journaliers de 66KWh. La capacité nominale des batteries est donnée par la relation suivante [3] :

$$C_{bat} = \frac{E_j [\text{Wh/j}] \cdot N_{ja} [\text{j}]}{P_D \cdot \eta_b \cdot U_{bat} [\text{V}]} \quad (\text{II.16})$$

$$N_{bat} = \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$C_{bat}$  : Capacité nominale des batteries [Ah] ;

$C_{bat,u}$  : Capacité de la batterie unitaire ;

$E_j$  : Besoins énergétiques journaliers [Wh] ;

$N_{ja}$  : Nombre de jour d'autonomie ;

$U_{bat}$  : Tension nominale des batteries [V] ;

$\eta_b$  : Rendement énergétique des batteries ;

$P_D$  : Profondeur de décharge des batteries.

### III.3.5 Choix de l'onduleur

La puissance apparente de l'onduleur s'exprime en voltampère (VA) et sera supérieur à cette somme pour tenir compte des éventuels courants de pointe élevés (moteur de frigo, TV...) et de facteur de puissance des appareils. Il est important de connaître les pertes à vide d'un onduleur. Un bon onduleur aura un rendement élevé (supérieur à 90° /°), le rendement de l'onduleur sera meilleur que la tension continue à l'entrée est élevée. Les pertes à vide correspondent à la puissance dissipée par l'électronique de l'onduleur lorsqu'aucune puissance n'est consommée [2].

- **Tension d'entrée** : Elle est égale à celle du bus continu.
- **Puissance conseillée** : C'est la puissance nominale de l'onduleur (VA) défini d'après les besoins exprimés. Elle tient compte du nombre d'équipements, de leur puissance ainsi que de leur nature ;



- **Tension de distribution** : Elle est généralement de 220V alternatif si l'onduleur est monophasé et de 380V si l'onduleur est triphasé ;
- **Le rendement** : C'est le rendement de la conversion DC/AC qui atteint des valeurs assez élevées en fonctionnement nominal.

Pour notre installation, nous choisissons un onduleur monophasé de caractéristiques suivant :

- La tension d'entrée : 24V ;
- La tension de distribution : 220V-50HZ.

Puissance conseillée (puissance nominale) est donnée par cette l'équation :

$$P_n = \frac{P_{ch,m}}{\eta_{ond}} \quad (\text{II.18})$$

$P_{ch,m}$  : Puissance maximale quand tous les récepteurs fonctionnent simultanément et  $\eta_{ond}$  le rendement de l'onduleur.

### III.3.6 Dimensionnement des câbles électriques

Il est nécessaire de limiter la longueur des liaisons entre le champ photovoltaïque et les récepteurs. Pour limiter les pertes en lignes sous forme thermique dues à l'effet joule qui va causer des chutes de tension [19].

La chute de tension est donnée par la formule :

$$\Delta U = R \cdot I \quad (\text{II.19})$$

Et R est donné par la relation suivante :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

- R : Résistance du câble (Ohm) ;
- $\Delta U$  : Chute de tension ;
- $\rho$  : Résistivité linéaire du conducteur constitutif du câble (Ohm  $\times$  m) ;
- I : Intensité de courant (Ampère) ;
- S : Section du câble (m<sup>2</sup>) ;
- L : Longueur du câble (m).

Pour le cuivre  $\rho = 1,6 \times 10^{-8}$  Ohm  $\times$  m ; pour l'aluminium  $\rho = 2,5 \times 10^{-8}$  Ohm  $\times$  m.

### III.4 Application pour une charge à usage d'habitation

Avant de dimensionner un tel système photovoltaïque, nous avons pris en compte une liste d'appareil indispensable à utiliser et qu'on peut trouver en général dans chaque habitation.

Le système a été dimensionné pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation pour une résidence qui dispose de 10 appartement similaire de F3, sachant que chaque étage

comporte 2 appartement , évalue à 7216 Wh/jour pour chaque appartement qui comprenant l'éclairage, les appareils électroménagers de faible consommation (réfrigérateur, TV et l'audiovisuel) pour une habitation d'un foyer F3 d'une famille avec une moyenne de 4 personnes, les charges supplémentaires qui sont pas à l'intérieure des appartements comme l'éclairage extérieur et les lampes d'escaliers. Les composants du système et l'évaluation de leur consommation énergétique sont les suivants :

### **Consommation d'un appartement de F3**

#### ➤ **Eclairage basse consommation**

- 4 lampes fluorescentes de 15W, 4h/jour (deux chambres et les sanitaires) ;
- 4 lampes fluorescentes de 18W, 3h/jour (salon, cuisine et couloir).

#### ➤ **Electroménager**

- Petit réfrigérateur : 70W, 24h/jour ;
- Four micro-onde : 500w, 30 min/jour ;
- Mixeur : 200w, 30min/jour ;
- Machine à laver : 330w, 1h.

#### ➤ **Audio-visuel**

- Chaîne stéréo : 50W, 2h/jour ;
- 2 TV 42cm : 50W, 8h/jour.

#### ➤ **Informatique**

- 2 Pc portable : 30W, 4h/jour.

#### ➤ **Autres**

- Pompe à eau : 600w, 3h/jour ;
- Modem wifi : 5w, 24h/jour ;
- Séchoir : 1200w, 30min/jour ;
- Fer à repasser : 700w, 1h/jour ;
- 4 chargeurs téléphones portable : 5w, 2h/jour.

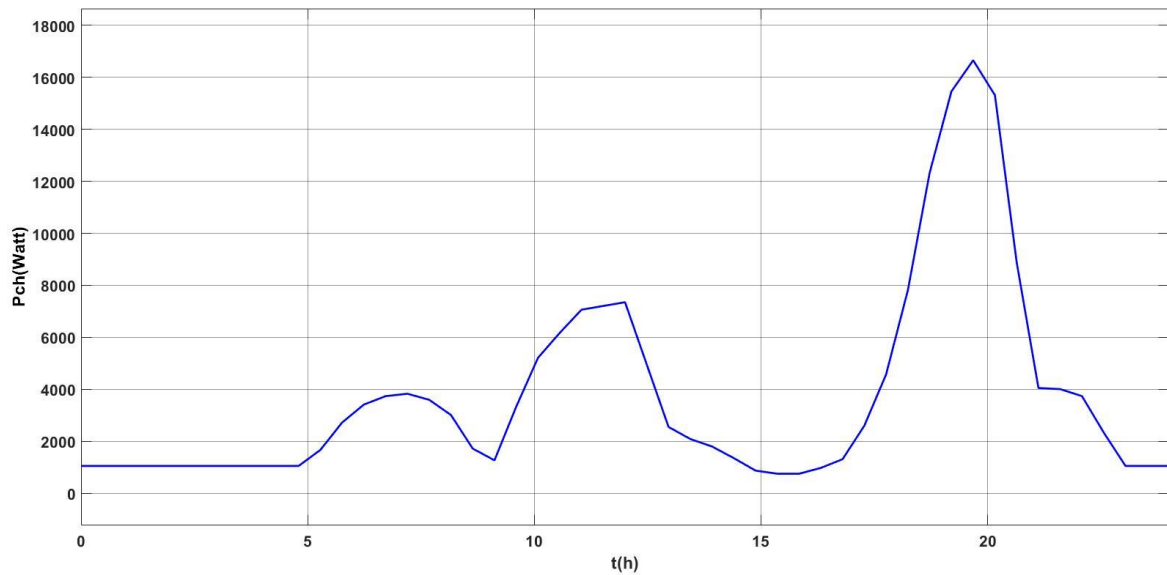
### **Charge supplémentaire**

- 6 Eclairages extérieur : 50w, 12h/jour ;
- 10 Lampes économique d'énergie pour escaliers : 9w, 4h/jour.

#### **III.4.1 Profil de consommation**

Pour rendre compte de l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil basé sur les habitudes de consommation d'une famille. Ce profil tient compte des périodes

d'utilisation au cours de la journée des appareils comme le réfrigérateur basse consommation, la télévision...etc. Le profil de notre charge est représenté dans la figure suivante :



**Figure III.2** Profil de consommation  $P_{ch}(t)$

**III.4.2 Calcul de la demande journalière d'énergie**

**Tableau III-3** Consommation journalière pour un appartement

Appareil à brancher	Nombre	Puissance (W)	Durée (h)	Demande énergétique
lampes fluorescentes de 15W	4	15	4	240 Wh/jour
lampes fluorescentes de 18W	4	18	3	216 Wh/jour
Réfrigérateur	1	70	24	1680 Wh/jour
Four micro-onde	1	500	0.5	250 Wh/jour
Mixeur	1	200	0.5	100 Wh/jour
Machine à laver	1	330	1	330 Wh/jour
Chaine stéréo	1	50	2	100 Wh/jour
TV 42cm	2	50	8	800 Wh/jour
Pc portable	2	30	4	240 Wh/jour
Modem wifi	1	5	24	120 Wh/jour
Séchoir	1	1200	0.5	600 Wh/jour
Fer à repasser	1	700	1	700 Wh/jour
chargeurs téléphones portable	4	5	2	40 Wh/jour

			Total	5416 Wh/jour
--	--	--	-------	--------------

**Tableau III-4** Consommation journalière supplémentaire

Charge supplémentaire	Nombre	Puissance (W)	Durée(h)	Demande énergétique
Pompe à eau	1	2000	4	8000 Wh/jour
Eclairages extérieur	6	50	12	3600 Wh/jour
Lampes économique d'énergie pour escaliers	10	9	4	360 Wh/jour
			Total	11960 Wh/jour

Si on calcule la totalité des puissances consommées par rapport à toute la résidence, on aura les résultats suivants : [résidence de 5 étage (2 appartement chaque étage)].

**Tableau III-5** Totalité des puissances consommées

	Nombre	Puissance (W)	Demande énergétique
Appartement	10	5416	54160 Wh/jour
Consommation supplémentaire	1	11960	11960 Wh/jour
		total	66120 Wh/jour

Caractéristiques du système PV autonome sont mentionnées dans le tableau suivant :

**Tableau III-6** Caractéristique du système PV autonome

Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable $E_{sol}$ [Wh/m <sup>2</sup> .j]	2.2
Tension de la batterie $U_{bat}$ [V]	24
nombre de jours d'autonomie $N_a$ [j]	1
Rendement électrique des batteries $\eta_b$ [%]	75
Rendement électrique de l'onduleur $\eta_{ond}$ [%]	95
Coefficient des pertes $C_p$ [%]	75
Profondeur de décharge des batteries $P_D$ %	80
Puissance d'un module photovoltaïque $P_{pv,u}$ [W]	217
Tension nominal d'un panneau photovoltaïque $V_c$ [V]	24

Pour les différents calculs de notre installation PV, on les représente dans le tableau suivant :

**Tableau III-7** Résultats de calcul du dimensionnement de l'installation photovoltaïque

Consommation journalière $E_j$ [Wh/j]	66120
Puissance maximal du champ photovoltaïque $P_{pv}$ [W]	15624

Nombre des panneaux PV $N_{pv}$	72
Nombre des panneaux en série $N_s$	8
Nombre des panneaux en parallèles $N_p$	9
Capacité de la batterie $C_{bat}$ [Ah]	4750
Nombre des batteries $N_{bat}$	19
Nombre des batteries en parallèles	19
Puissance maximale quand tous les récepteurs fonctionnent simultanément $P_{ch}$ [W]	77940
Puissance de l'onduleur $P_n$ [VA]	82042.11

### III.5 Organigramme de la gestion de notre système photovoltaïque

Dans un système photovoltaïque il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part. Son choix est guidé par un cahier de charges qui tient compte du prix, de la consommation d'énergie, de la fiabilité et de l'intégration au système photovoltaïque. La complexité du système de supervision dépend aussi du fait que l'on ait ou pas un système de stockage et de la composition de ce dernier ; on peut ainsi passer d'une simple diode anti-retour évitant le retour d'énergie vers les modules PV à des algorithmes complexes incluant des convertisseurs avec recherche du point maximum [7].

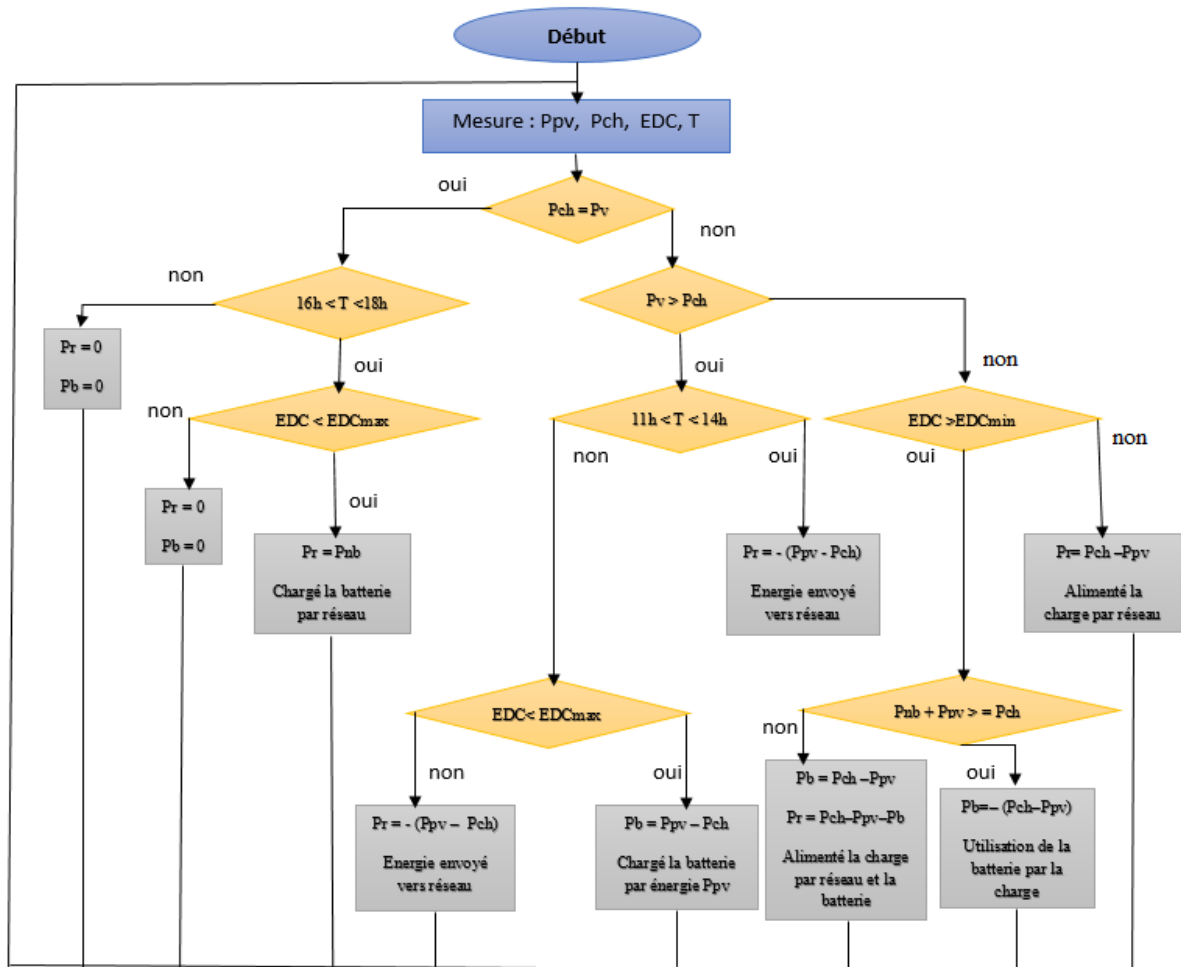


Figure III.3 Organigramme de gestion

Dans ce chapitre, nous décrivons un système photovoltaïque dont le stockage d'énergie est assuré par des batteries au plomb. A cet effet, le module de supervision sera chargé de réguler l'énergie provenant des panneaux PV, du stockage et même du réseau en cas de manque de source d'énergie suivant la demande du consommateur. L'algorithme de supervision est basé sur trois scénarios :

- $P_{ch} = P_{pv}$  On a proposé l'horaire suivant qui dure entre 16h et 18h, on vérifie l'état de charge de la batterie si elle est inférieure à  $Edc_{max}$ , la batterie va être chargée par le réseau. Nous avons choisi cette heure à porter de 18h, la journée commence à s'achever  $P_{pv} = 0$ , autrement dit la maison va être alimenté par la batterie qui a été chargée par le réseau.
- $P_{ch} < P_{pv}$  :
  - Au premier lieu, on a choisi l'horaire qui dure entre 11h et 14h, le surplus de la puissance produit pour les panneaux photovoltaïques est transféré directement au réseau ;

- Deuxièmement, on a proposé l'horaire qui diffère celles-ci-dessus on vérifie l'état de charge de la batterie :
  - Si  $E_{dc} < E_{dcmax}$  la batterie va être chargée par les panneaux photovoltaïques ;
  - Si non le surplus de la puissance va être transféré directement au réseau.
- $P_{ch} > P_{pv}$ , vérification de l'état de charge de la batterie :
  - Si  $E_{dc} > E_{dcmin}$  on constat deux possibilité :
    - $P_b + P_{pv} \geq P_{ch}$  → L'utilisation de la batterie or :  $P_b = (P_{ch} - P_{pv})$
    - $P_b + P_{pv} < P_{ch}$  → L'utilisation du réseau et la batterie :  
$$P_r = (P_{ch} - P_{pv} - P_{nb})$$
  - Si non l'alimentation va être via le réseau.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le dimensionnement de l'installation photovoltaïque, qui inclus le générateur photovoltaïque, le stockage et les convertisseurs statique dont on a besoin.

Pour assurer la fourniture d'énergie électrique suivant notre profil de charge, les panneaux PV devront avoir une puissance crête de 15624 W et les batteries de stockages de tension 24V et de capacité total de 4750Ah.

Nous avons ensuite développé un algorithme de gestion d'énergie qui permet de nous donner la puissance consommée ou donner à chaque instant des batteries, et aussi de nous calculé la puissance produite et la puissance consommée dans notre système, afin de satisfaire les demandes de puissance de la charge, même si on doit utiliser le réseau électrique.

# Chapitre IV



## **Chapitre IV**

### **IV. Simulation du système photovoltaïque**

#### **IV.1 Introduction**

Dans les chapitres précédents, Nous avons modélisé l'installation de système photovoltaïque. Pour cela, nous allons opter pour une simulation qui sera faite avec un algorithme d'optimisation PO pour l'extraction du point de puissance maximale (MPPT). Il sera intégré afin d'obtenir le système complet de l'installation.

Nous avons présenté l'algorithme de gestion sous forme d'organigramme bien détailler dans le chapitre précédant. Puis, nous allons l'implanté dans le système global que nous avons simulé sous Matlab/Simulink.

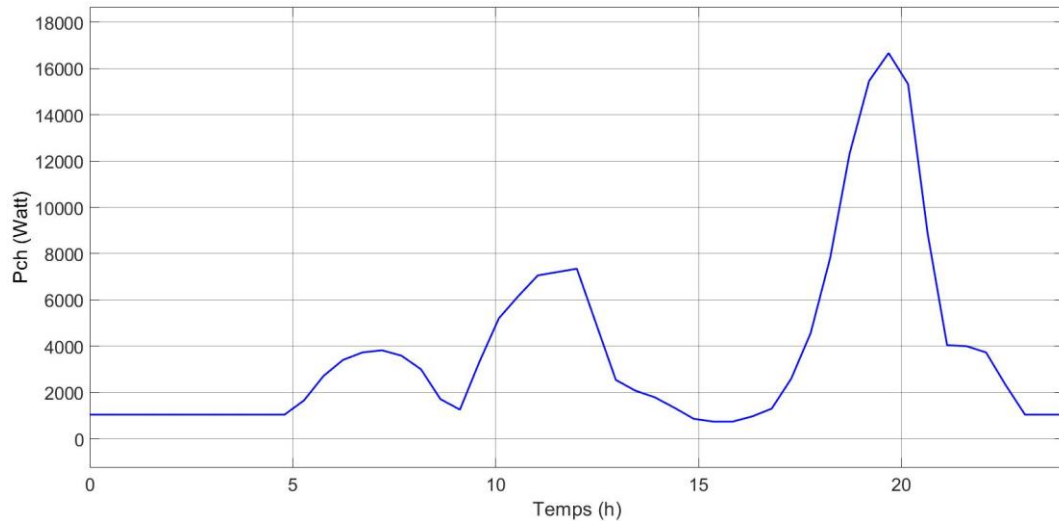
Différentes conditions ont été simulées pour permettre de retrouver les différents modes de fonctionnement possible auxquelles nous pouvant être confrontés.

#### **IV.2 Simulation du système globale**

Le système photovoltaïque est composé de 72 panneaux photovoltaïque de 217W crête, de 19 batteries de 24v et 250Ah et d'une charge représentant une résidence de 10 appartements et quelques charge supplémentaire (éclairage extérieurs, éclairage d'escaliers), dont la consommation journalière est de 66120Wh/j.

Les différentes parties du système (panneaux photovoltaïque, MPPT P&O, convertisseurs statiques, les batteries et la charge) sont modélisées sous scripts et relier entre eux d'une manière cohérente.

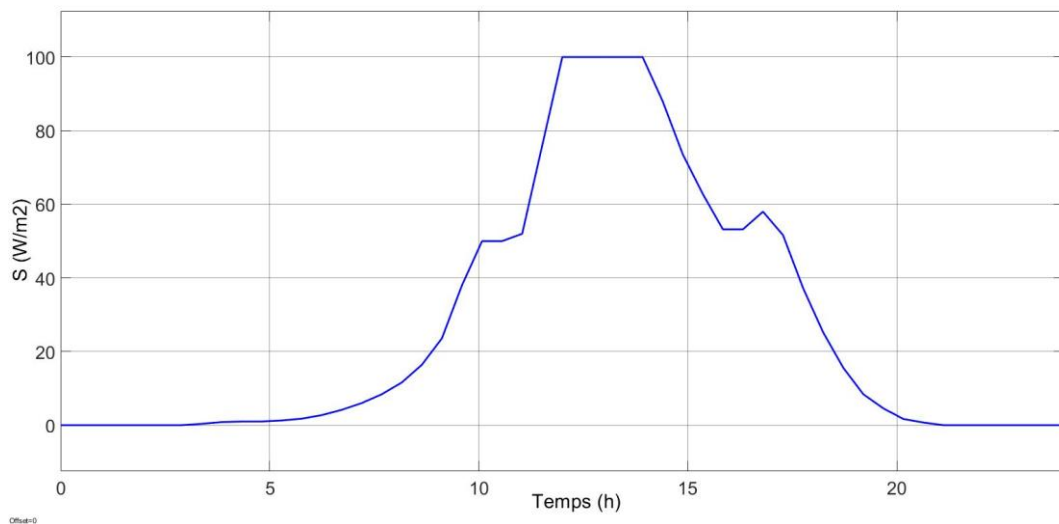
Nous allons procéder à la simulation du système pendant qui correspond réellement à 24h, afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents cas possibles. Nous avons fixé le même profil de charge pendant toute l'année. La simulation sera effectuée pour une variation de l'ensoleillement relatif à deux journées (bonne journée d'hiver et mauvaise journée d'hiver).



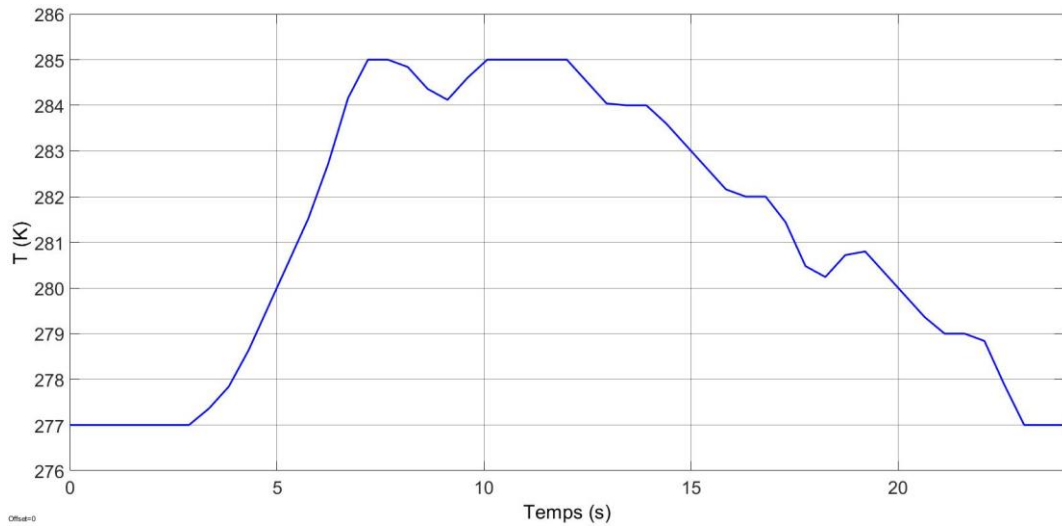
**Figure IV.1** Puissance de charge pour une journée

### IV.2.1 Résultat de simulation pour une journée défavorable (une mauvaise journée d'hiver)

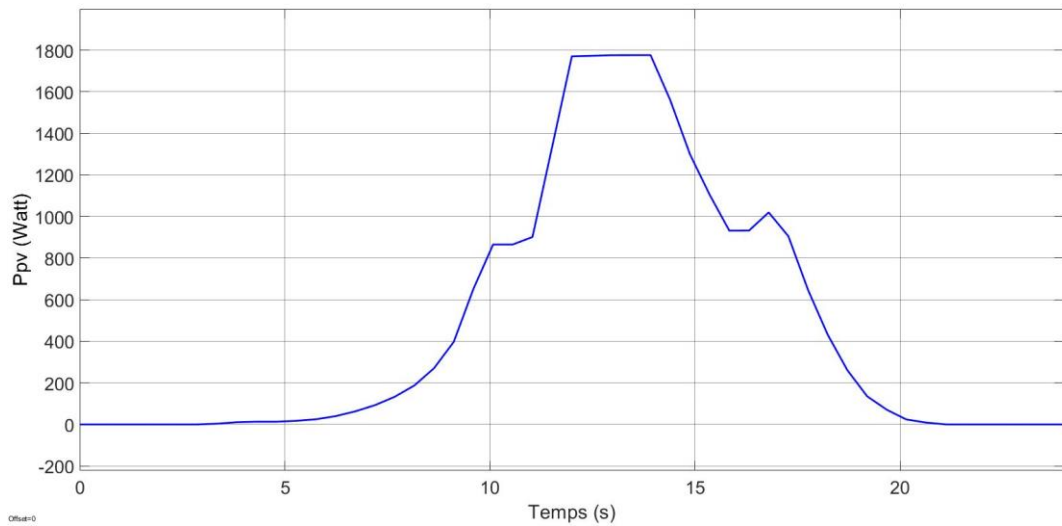
Afin de visualiser les différents modes qui peuvent apparaître, nous avons choisi une journée défavorable de l'année 2013. Pour cela, nous avons utilisé les profils de l'ensoleillement et de température qui la correspondent. Et aussi supposé que la batterie est à 50% pour sa valeur initiale.



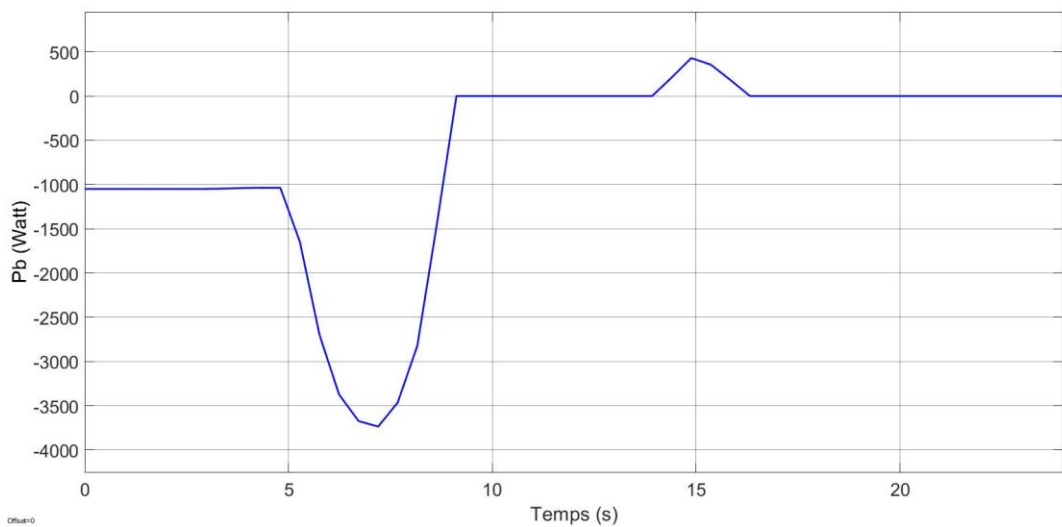
**Figure IV.2** Profil de l'ensoleillement pour une journée défavorable



**Figure IV.3** Profil des températures pour une journée défavorable



**Figure IV.4** Puissance produite des panneaux photovoltaïques



**Figure IV.5** Puissance des batteries consommée par la charge (signe-) ou prise de réseau ou bien des GPVs (signe +)

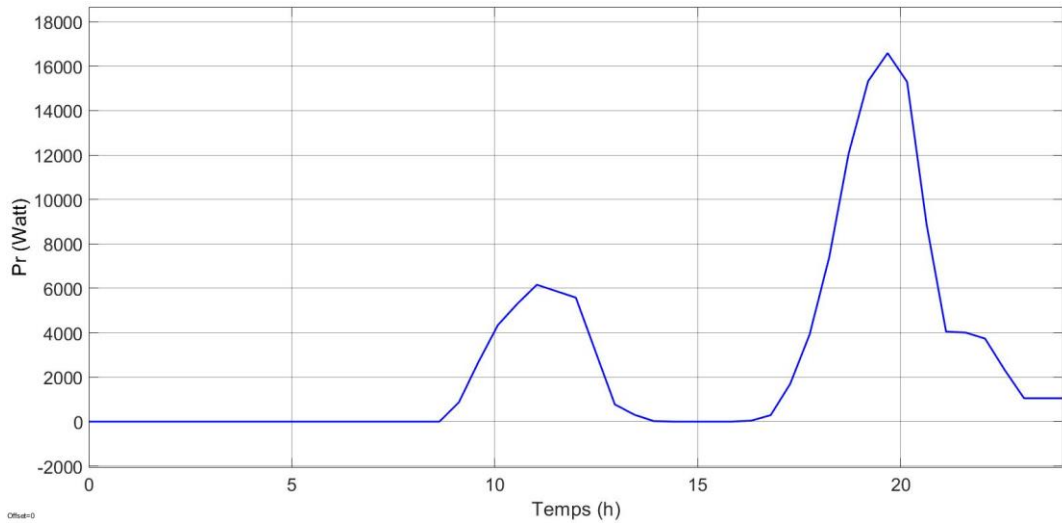


Figure IV.6 Puissance prise de réseau ou fournie par réseau

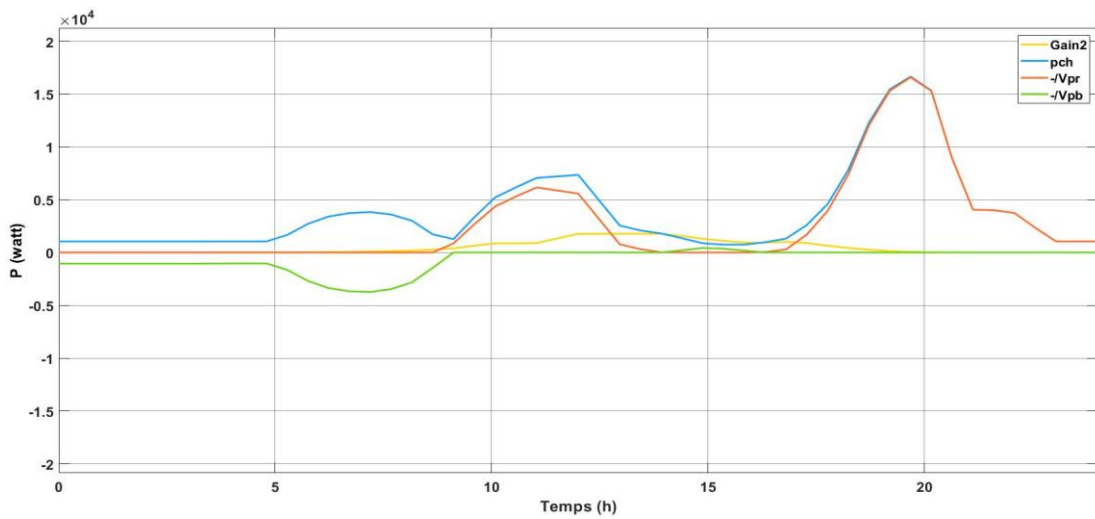


Figure IV.7 Allures des puissances (photovoltaïque, charge, batterie et réseau)

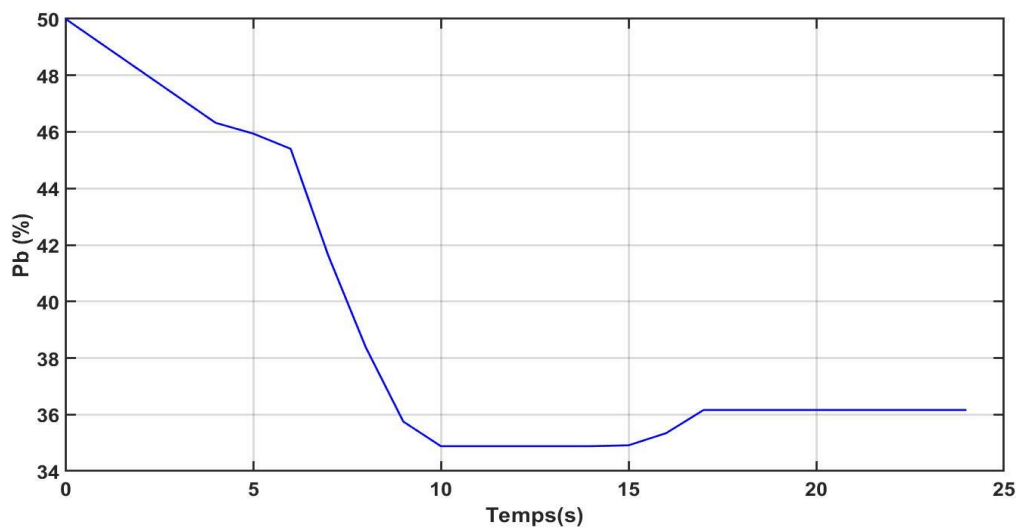


Figure IV.8 Etat de charge de batterie

Les figures (IV.2), (IV.3), (IV.4), (IV.5), (IV.6), (IV.7) et (IV.8) représentent respectivement les allures de l'ensoleillement, les températures, puissance photovoltaïque, puissance des batteries consommée par la charge (signe-) ou prise de réseau ou bien des GPVs (signe +), puissance prise de réseau ou fourni au réseau, les allures des puissances (photovoltaïque, charge, batterie et réseau), Etat de charge de batterie.

### ➤ Interprétation des résultats

D'après les profils de l'ensoleillement et de températures, nous avons constaté que la puissance photovoltaïque est insuffisante comparé à celle demander par la charge.

Ainsi nous avons remarqué que la consommation de la batterie se départage en plusieurs parties :

- Si  $P_{pv}=0$ , la puissance consommée par la charge est égale à celle donnée par les batteries (alimentation total de la charge par les batteries).
- Si  $P_{ch}>P_{pv}$ , la puissance des batteries consommée égale à la différence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demander par la charge (déchargement des batteries).

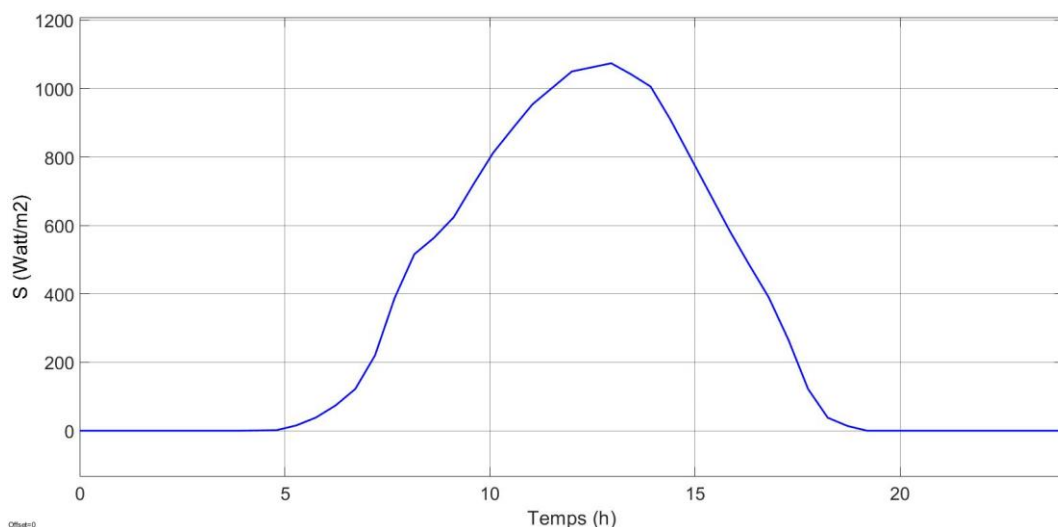
$$P_b = P_{ch} - P_{pv} \quad (II.21)$$

- Si  $P_{pv}>P_{ch}$ , les batteries seront en état de chargement, et la puissance utilisé pour charger les batteries est égale à la différence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demander par la charge.

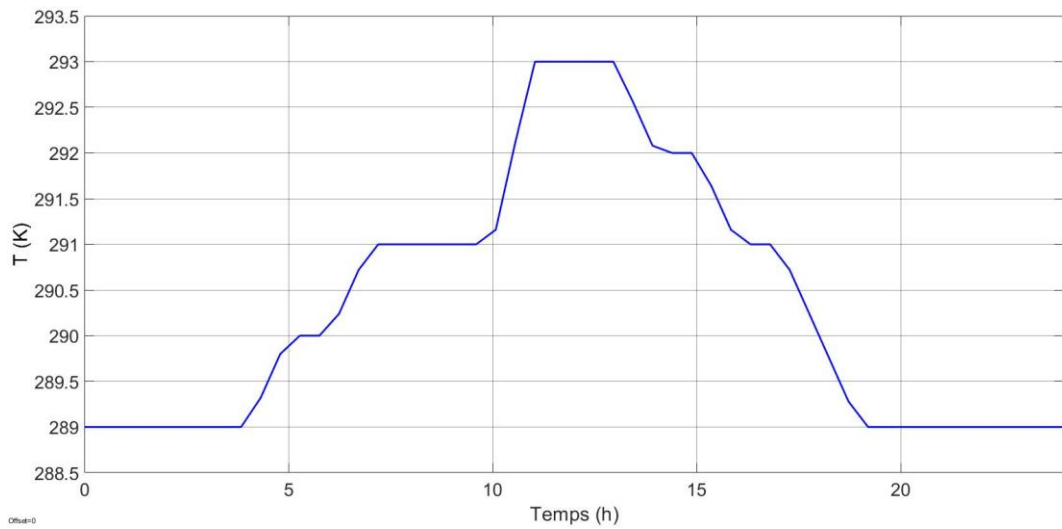
$$P_b = P_{pv} - P_{ch} \quad (II.22)$$

### IV.2.2 Résultat de simulation pour une journée favorable

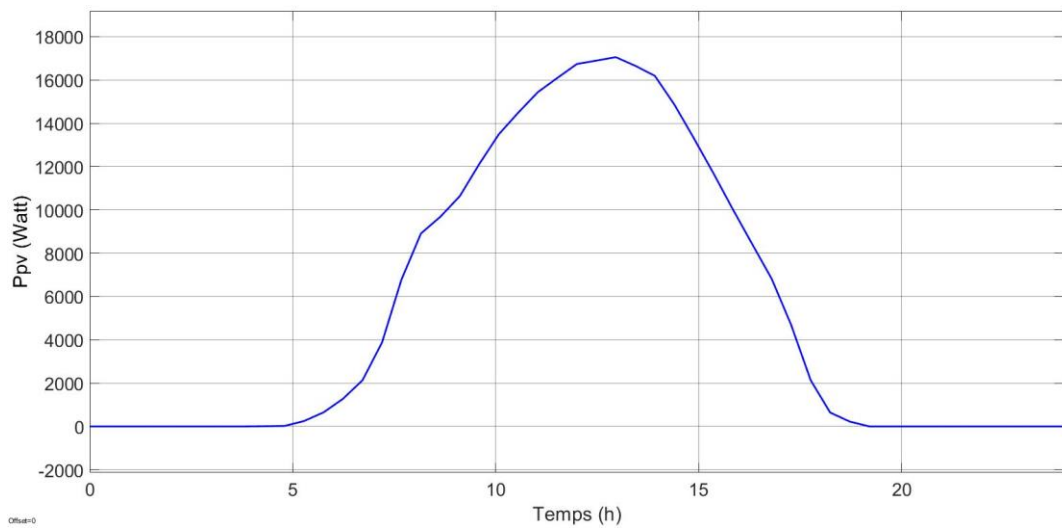
Afin de visualiser les différents modes qui peuvent apparaitre, nous avons choisi une bonne journée d'hiver. Pour cela, nous avons les profils de l'ensoleillement et de température. Et aussi supposé que la batterie est à 50% pour sa valeur initiale.



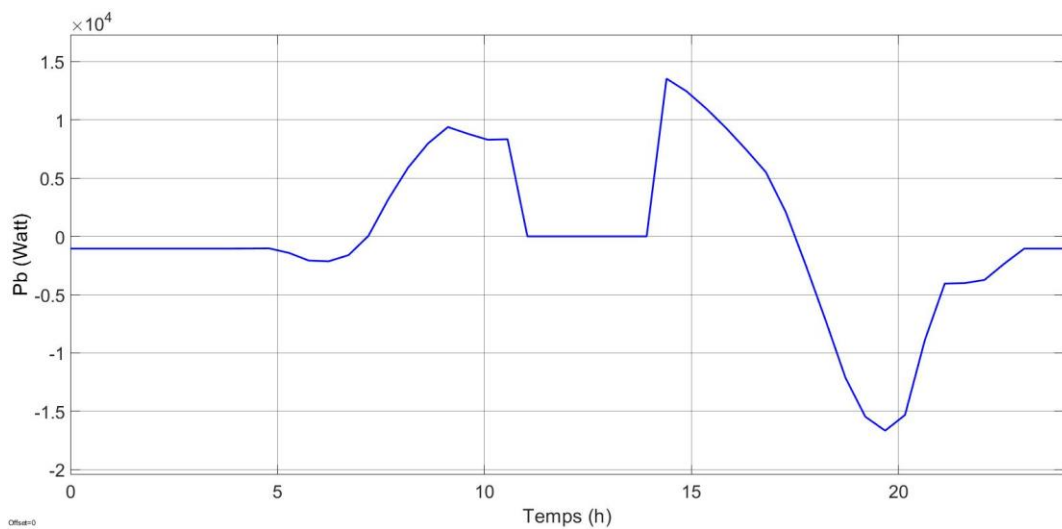
**Figure IV.9** Profil de l'ensoleillement pour une journée favorable



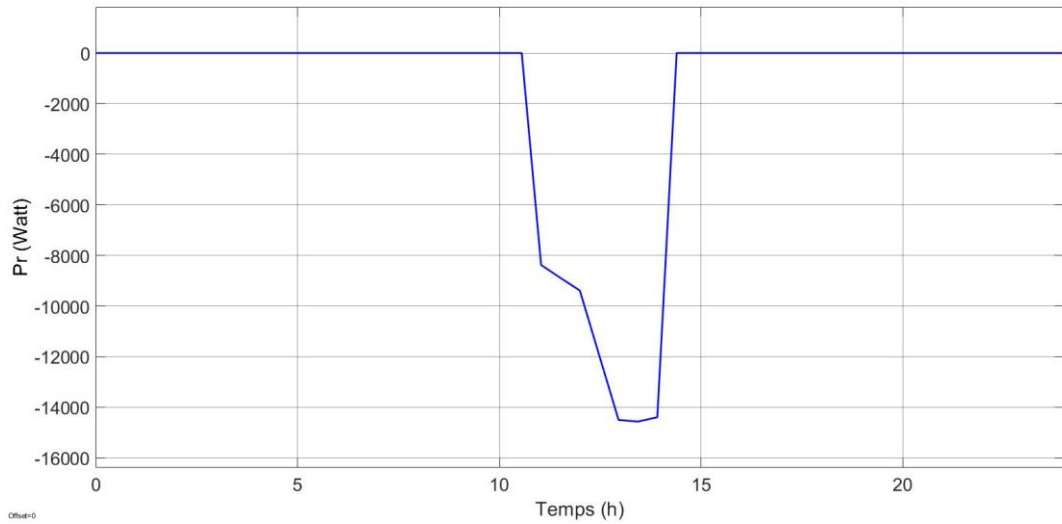
**Figure IV.10** Profil des températures pour une journée défavorable



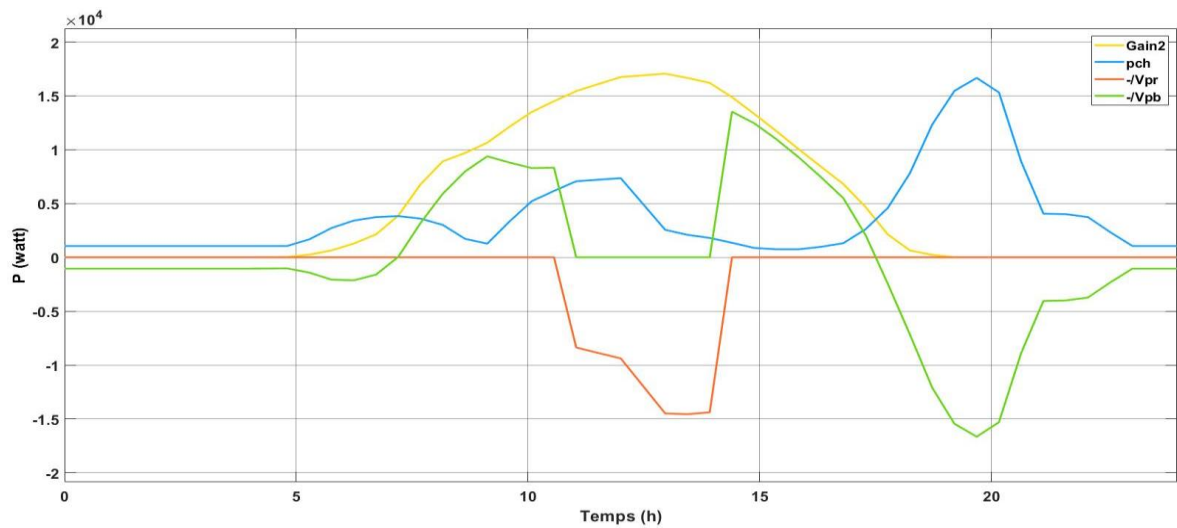
**Figure IV.11** Puissance des panneaux photovoltaïques



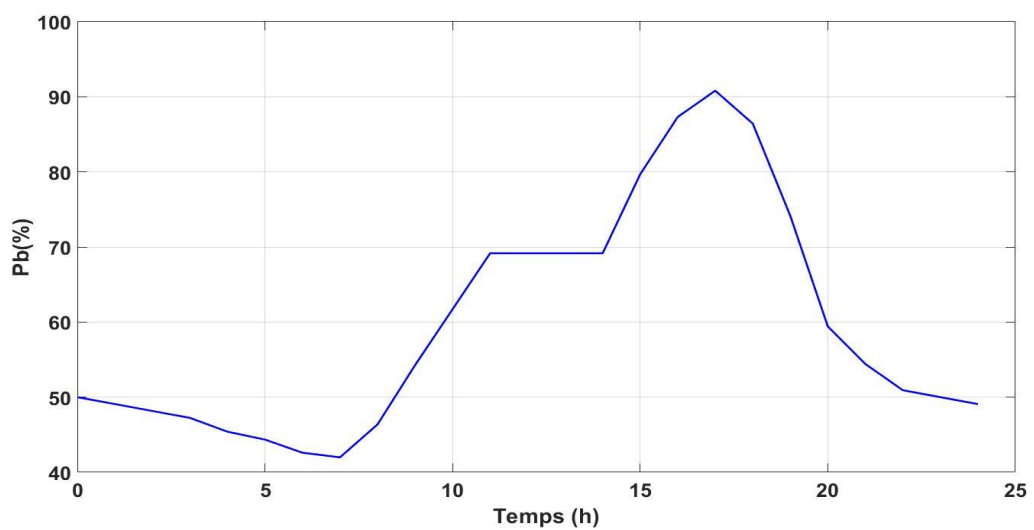
**Figure IV.12** Puissance des batteries consommée par la charge (signe-) ou prise de réseau ou bien des GPVs (signe +)



**Figure IV.13** Puissance prise de réseau ou fourni par réseau



**Figure IV.14** Allures des puissances (photovoltaïque, charge, batterie et réseau)



**Figure IV.15** Etat de charge de la batterie

Les figures (IV.9), (IV.10), (IV.11), (IV.12), (IV.13) (IV.14) et (IV.15) représentent respectivement les allures de profil de l'ensoleillement, profil des températures, puissance photovoltaïque, Puissance des batteries consommée par la charge (signe-) ou prise de réseau ou bien des GPVs (signe +), puissance prise de réseau ou fourni au réseau, les allures des puissances (photovoltaïque, charge, batterie et réseau) et état de charge de la batterie.

### ➤ **Interprétation des résultats**

D'après les profils de l'ensoleillement et de températures, la puissance photovoltaïque est vraiment bonne, et suffisante non seulement pour satisfaire les besoins de la charge, mais aussi pour charger bien nos batteries et fourni les surplus de la puissance au réseau.

On voit qu'à  $t = [11h, 14h]$ , la puissance photovoltaïque est supérieure à celle demandé par la charge, ce qui veut dire que la différence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demandée par charge, est transmise directement au réseau même si les batteries sont pas complètement chargées, pour cause de la condition de gestion que nous avons exigée (si,  $t = [11h, 14h]$ , ne jamais mettre en charge la batterie).

Nous avons remarqué aussi, que la consommation des batteries se partage en plusieurs parties :

- Si  $P_{pv} = 0$ , la puissance demander par la charge est égale à celle fournie par les batteries (alimentation total de la charge par les batteries) ;
- Si  $P_{ch} > P_{pv}$ , la puissance fournie par les batteries égale à la déférence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demander par la charge (déchargement des batteries).

$$P_b = P_{ch} - P_{pv} \quad (\text{II.23})$$

- Si  $P_{pv} > P_{ch}$  les batteries seront en état de chargement, et la puissance absorbée par les batteries est égale à la déférence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demander par la charge.

$$P_b = P_{pv} - P_{ch} \quad (\text{II.24})$$

- Si  $P_{pv} > P_{ch}$  et  $t = [11h, 14h]$ , blocage de chargement des batteries, et la différence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demander de la charge est transmise directement au réseau.

### **IV.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation du système de simulation du système photovoltaïque avec batterie de stockage et alimenté par le réseau en cas de non satisfaction des demandes de la charge, si y'as absence des batteries ou/et de puissance photovoltaïque. Une méthode MPPT a été utilisée en vue d'extraire le maximum de puissance



du générateur photovoltaïque pour ainsi améliorer d'une manière considérable le rendement de l'installation.

Pour une gestion rigoureuse de cette énergie, une stratégie de contrôle a été établie. Le gestionnaire d'énergie détermine la puissance disponible à partir de la puissance demandée par la charge, la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, le stockage disponible dans les batteries et la puissance prise ou envoyée au réseau.

On voit d'après les résultats obtenus dans les deux différents cas (journée défavorable et journée favorable), que notre algorithme de gestion contribue parfaitement à notre but au départ, qui était d'avoir un système photovoltaïque raisonnable et efficace pour combler toutes les charges de notre résidence.

Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la maîtrise de ce type d'installation. Ainsi une gestion énergétique dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser.

# **Conclusion général**

## Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons contribué à l'étude d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage et utilisation de réseau électrique en cas de non satisfaction des demandes de la charge, auquel nous avons implanté un algorithme de gestion.

Au début de notre recherche, nous avons étudié et expliqué les différents types de système photovoltaïque, ainsi leurs principes de fonctionnement, les avantages et inconvénients de ce types d'énergie et l'influence de chaque composant existant dans le système photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation des composants nécessaire pour notre étude, tel que le panneau photovoltaïque, la batterie et les convertisseurs statiques. Nous sommes intéressés à l'extraction de la puissance maximale d'un panneau photovoltaïque. Alors, nous avons opté pour la commande MPPT P&O (perturbation et observation).

Au troisième chapitre, nous avons dimensionné le système photovoltaïque. Cela nous a permis de calculer le nombre des batteries qui seront associées avec un certain nombre de panneaux, pour couvrir les besoins de la charge. Notre charge est une résidence de cinq étages dont chacun dispose de deux appartements similaires de 100 m<sup>2</sup>. Nous lui avons choisi un profil de charge identique pour toutes les journées de l'année.

Le système photovoltaïque est composé de 72 panneaux photovoltaïques de 217W chaque un, de 19 batteries de stockage de 24V, 250Ah et d'une charge de besoin journalier de 66120 Wh/j. Nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie qui est basé sur la comparaison entre la puissance produite par les panneaux photovoltaïques, la puissance demandée par la charge, la puissance absorbé ou fournie par les batteries et la puissance consommée ou envoyée sur le réseau électrique.

Et pour finir, nous avons procédé à la simulation du système complet dans le dernier chapitre. Nous avons aussi montré l'efficacité de l'algorithme de gestion d'énergie face aux variations climatiques pendant une journée favorable et défavorable d'hiver. On a pu voir dans les résultats de simulations, l'influence de l'ensoleillement et des températures sur le fonctionnement de notre système.

Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la maîtrise de ce type d'installation. Ainsi une gestion énergétique dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser.

Comme perspectives, il serait intéressant d'utiliser d'autres méthodes d'optimisation pour l'extraction du maximum de puissance puis faire une comparaison. Aussi faire des essais sur une installation réelle afin de valider l'algorithme de gestion d'énergie proposé.

# **Références**

# **Bibliographie**

## **Bibliographie :**

- [1] « [http://www.energies-renouvelables.org/solaire\\_photovoltaique.asp](http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp) », 08/2020.
- [2] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. S. Sy, « Le pompage photovoltaïque manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », université d'Ottawa, 1998.
- [3] M. Chaabene, « Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques », mémoire de magister, université de Sfax, 2008.
- [4] « <https://photovoltaique-energie.fr/l-effet-photovoltaique.html> », 08/2020.
- [5] « <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique> », 08/2020.
- [6] « <http://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.html> », 08/2020.
- [7] Alain Ricaud, « Les convertisseurs photovoltaïques, Gisement solaire, cellules, modules et champs de module », European Master in Renewable Energy, Valbonne, 2011.
- [8] D. Bouchers, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au Pompage », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, 2007.
- [9] A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [10] Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.
- [11] M Merad-Boudia « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique », mémoire de magister, université de Tlemcen, 2010.
- [12] Otman Benseddik, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de master2, université Kasdi Merbah- Ouargla, 2012.
- [13] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister, université Ferhat Abbas – Setif, 2011.
- [14] B. Mohamed, A. Taha Yacine, « étude technico-économique d'une installation photovoltaïque autonome », mémoire de master, université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017.
- [15] Samia, B., « contribution à l'étude d'un générateur photovoltaïque dote de système de suivi du soleil comparaison et application au site de Tlemcen » Thèse de Magister, Université Tlemcen, Mai 2004.
- [16] « Les photopiles solaires, du matériau au dispositif, du dispositif aux applications ».

- [17] Julien LABBÉ « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », thèse de doctorat, l'école des mines de paris, 2006.
- [18] Anne Labouret – Michel Villoz « énergie solaire photovoltaïque le manuel du professionnel » édition dunod, PARIS 2003.
- [19] Halilou Kane Amadou– Ousmane Mahamadou « Etude du Dimensionnement d'un système photovoltaïque Autonome », mémoire d'ingénieur d'état, université de Bejaia ,2008.
- [20] K. Djermouni « Application des techniques d'intelligence artificielle pour la gestion optimale de l'énergie des sources photovoltaïques », thèse doctorat, université de Bejaia, 2015.
- [21] « <https://www.ecologie-shop.com/panneau-solaire-photovoltaïque-34/panneau-solaire-210-wc-monocristallin-3817> », 10/2020.

# **Annexes**

## **Annexes**

### **Paramètre des batteries**

- La tension des batteries : 24V ;
- La capacité de la batterie : 250Ah ;
- Poids : 70 kg ;
- Dimensions : 520\*268\*220/240mm.

### **Caractéristique mécaniques des panneaux photovoltaïques [21]**

- Poids : 16 kg ;
- Dimensions : 1580\*808\*35 mm.

### **Paramètres d'un panneau solaire Jiawei (RPC) JWG2100 : [21]**

- Puissance Max. (Pm) : 210W ;
- Tension à puissance Max. (Vmp) : 37.2V ;
- Intensité à puissance Max. (Imp) : 5.65A ;
- Tension à circuit ouvert (Voc) : 45.9V ;
- Courant de court-circuit (Isc) : 6A ;
- Rendement du module : 16.50% ;
- Tolérance de puissance max : +/-3% ;
- Tension maximale du système : 1000V ;
- Boîte de jonction IP-65 rated, PV-RH 701 ;
- Câbles 12 AWG / 900mm.