

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin de cycle

En vu de l'obtention du diplôme de Master II en Electrotechnique

Option : - Energie renouvelable
-Automatisme industrielle

Thème

**Gestion d'énergie d'un système
photovoltaïque avec batteries**

Réalisé par :

M^{elle} : MOUASSANE Souhila M^{me}:S. BELAID

Mr : KICIRISofiane

Encadré par :

Promotion 2013/2014

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 promotrice

Mme. BELAID pour leur encadrement efficace, leur soutien et leur disponibilité. Qu'elle 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 on 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 Mr. RIKIOUA et Mr. ALKAMA qui nous feront l'honneur de juger ce travail.

MOUASSANE &KICIRI

Dédicaces

Avec ma profonde gratitude et grand amour, je dédie ce modeste travail :

A ceux que j'ai tant aimé et respecté, qui pendant mon enfance, m'ont entouré de leurs affections, leurs patience et amours grâce à eux que je suis aujourd'hui ici, vous mes chers parents.

A mes très chères frères et sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

S.MOUASSANE

DÉDICACES

Aux témoignages d'affection, d'amour et de Grande reconnaissance, aux êtres les plus chers que j'ai dans ma vie;

A la mémoire de ma grand-mère.

A mes très chers parents.

A mes frères et à toute ma famille.

A tous mes amis (es) qui ont participé de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail, et à tous ceux qui m'ont soutenu pendant cette période.

S.KECIRI

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque

Introduction	3
I.1. Généralités sur l'énergie photovoltaïque	3
I.2 .Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque	3
I.2.1. Mode autonome.....	4
a. Système autonome avec stockage	4
b. Système autonome sans stockage	4
I.2.2. Mode connecté aux réseaux.....	5
I.2.3. Mode hybride	6
I.3. L'effet photovoltaïque	7
I.4. La cellule photovoltaïque.....	7
a. Silicium mono cristallin.....	8
b. Silicium poly cristallin.....	8
c. Silicium amorphe	9
I.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.4.2 .Groupement des cellules photovoltaïques.....	10
a-Regroupement en série.....	10
b- Regroupement en parallèle	11
I.5. Le module photovoltaïque	12
I.5.1. Caractéristiques d'un module.....	13
I.6. Le panneau photovoltaïque	13
I.7. Le champ photovoltaïque.....	14
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	14
I.8.1 Les avantages	14
I.8.2. Les Inconvénients	15
I.9. Les convertisseurs statiques.....	15

I.9.1. L'onduleur	15
I.9.2 . Le hacheur	15
a. Hacheur dévolteur (ou série)	15
b. Hacheur survolteur (ou parallèle)	16
c. Hacheur série-parallèle.....	17
I.10. Principe de fonctionnement au point de puissance maximale	17
I.11. Les différents éléments de stockage d'énergie électrique.....	18
I.11. 1.Technique de stockage à court terme.....	18
I.11.1.1. Stockage sous forme d'énergie cinétique : Volant d'inertie.....	18
I.11.1.2. Stockage par condensateur à double couche : Super-condensateur.....	19
I.11.1.3. Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconductrice.....	19
I.11.2 . Stockage à long terme	19
I.11.2.1 . Stockage sous forme gravitaire.....	19
I.11.2.2. Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé	20
I.11.2.3. Stockage sous forme Thermique	21
I.11.2.4 .Stockage sous forme chimique	21
a. La pile combustible	21
b. Les batteries	21
I.11.3. Les Batteries en plomb.....	24
I.11.3.1. Historique	24
I.11.3.2. Constitution	24
I.11.3.3. Principe de fonctionnement	26
I.12 . La gestion d'énergie photovoltaïque.....	26
Conclusion.....	27

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

Introduction	28
II.1. Structure de la chaine de production d'énergie photovoltaïque	28
II.2. Modèle électrique du panneau photovoltaïque.....	29
II.2.1. Modèle d'un générateur photovoltaïque idéal	30
II.2.2. Modèle implicite du générateur photovoltaïque avec une diode	30
II.2.2.1. Simulation du générateur à une diode	32
II.3. Caractéristique I(V) et P(V)	34

II.4. Influence de l'éclairage et la température	35
II.4.1. Influence de la température.....	35
II.4.2. Influence de l'éclairage.....	36
II.5. Modèle du convertisseur dévolteur (buck)	37
II.6. Modèle du hacheur buck-boost (série-parallèle) [22].....	38
II.7. Le dispositif de stockage	39
II.7.1. Le modèle électrique de la batterie	39
II.8. Modélisation de l'onduleur (continu-alternative).....	40
II.9. Modèle d'un bus continu	40
II.10. Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC	41
II.10.1. Méthode de poursuite du point de puissance maximale	41
II.10.1.1. Méthode de la dérivée de la puissance	41
II.10.1.2. Méthodes à contre réaction de la tension	46
II.10.1.3. Méthode avec contre réaction du courant.....	47
Conclusion	48

Chapitre III : Dimensionnement et gestion d'énergie d'un système PV

Introduction	49
III.1. L'architecture du système	49
III.2. Dimensionnement du système PV	50
III.2.1. Choix de la méthode de dimensionnement	50
III.2.2. Evaluation de la consommation de la charge	51
III.2.3. Estimation de l'ensoleillement	51
III.2.4. Le dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	52
III.2.5. Dimensionnement du stockage	53
III.2.6. Le choix de l'onduleur	54
III.2.7. Dimensionnement des câbles électriques	55
III.3. Application pour une charge à usage d'habitation	55
III.3.1. Profil de consommation.....	56
III.3.2. Calcul de la demande journalière d'énergie	56
III.4. Gestion et conversion de l'énergie au sein du système	58
III.4.1. Extraction du maximum d'énergie	59
III.4.2. Gestion des batteries de stockages.....	60

III.4.3. Organigramme de la gestion des puissances :	62
Conclusion.....	63

Chapitre IV : Simulation du système globale

Introduction	64
IV.1.Simulation du système globale	64
IV.1.1. Résultats de simulation pour une journée d'été.....	66
IV.1.2. Résultats de simulation pour une journée d'hiver	74
Conclusion.....	82
Conclusion générale.....	83



Liste des Figure

Liste des figures

Figure I.1 : Présentation générale d'un système photovoltaïque autonome.....	5
Figure I.2 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	6
Figure I.3 : Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque	6
Figure I.4: Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.	10
Figure I.5 : Cellules identiques en série.	11
Figure I.6 : Cellules identiques en parallèles	11
Figure I.7: Module photovoltaïque.....	12
Figure I.8 : Panneau photovoltaïque.	14
Figure I.9 : Schéma hacheur série	16
Figure I.10 : Schéma hacheur parallèle.....	16
Figure I.11 : Schéma hacheur série parallèle	17
Figure I.12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	18
Figure I.13 : Stockage gravitaire hydraulique.....	20
Figure I.14 : Schéma de principe du stockage par air comprimé.....	20
Figure I.15: Schéma de principe d'une installation de stockage thermique.....	21
Figure I.16 : Les constitutions d'une batterie au plomb acide	25
Figure II.1 : structure de la chaîne de conversion photovoltaïque	28
Figure II.2: Schéma bloc d'une cellule PV	29
Figure II. 3: Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque idéal.....	30
Figure II.4: Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque.....	31
Figure II.5: Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour $G=1000W/m^2$, $T=25^{\circ}C$.	34
Figure II.6 : Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque pour $G=1000W/m^2$, $T=25^{\circ}C$	35
Figure II.7: Influence de la température sur la caractéristique courant/tension	35
Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique puissance/tension	36
Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant/tension	36
Figure II.10 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique puissance/tension.....	37

Figure II.11: Circuit électrique de base du hacheur dévolteur	37
Figure II.12: Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle (buck -boost)	38
Figure II.13: Modèle R-C de la batterie	39
Figure II.14 : Schéma d'un bus continu	40
Figure II.15 : Caractéristique du point de puissance maximale	42
Figure II.16: Schéma de convergence vers le PPM par la méthode P & O.	42
Figure II.17: Organigramme de l'algorithme MPPT (P&O).....	43
Figure II.18: Incrémentation de Conductance.....	45
Figure II.19: Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance	45
Figure II.20 : Méthode avec contre réaction de la tension	46
Figure III.1 : Schéma du raccordement des sources et consommateurs énergétiques.....	49
Figure III.2: profil de consommation	56
Figure III.3: La consommation journalière	57
Figure III.4 : Système de supervision proposé pour la gestion d'énergie dans le système PV.....	59
Figure III.5: plage de fonctionnement autorisé pour les batteries utilisées.....	60
Figure III.6 : Algorithmes de gestion d'énergie.....	62
Figure IV.1 : Schéma MATLAB/SIMULING du système global	64
Figure IV.2 : Tension du générateur photovoltaïque.	65
Figure IV.3 : Courant du générateur photovoltaïque.	65
Figure IV.4 : Puissance du générateur photovoltaïque.	65
Figure IV.5 : L'ensoleillement de deux journées d'été.....	66
Figure IV.6 : Puissance fournie par le générateur photovoltaïque.....	66
Figure IV.7 : Tension de bus continu.....	67
Figure IV.8 : Tension des batteries	67
Figure IV.9: Courant des batteries	67
Figure IV.10: Puissance des batteries	68
Figure IV.11 : Etat de charge des batteries (EDC).....	68
Figure IV.12 : Allure de la puissance disponible	68

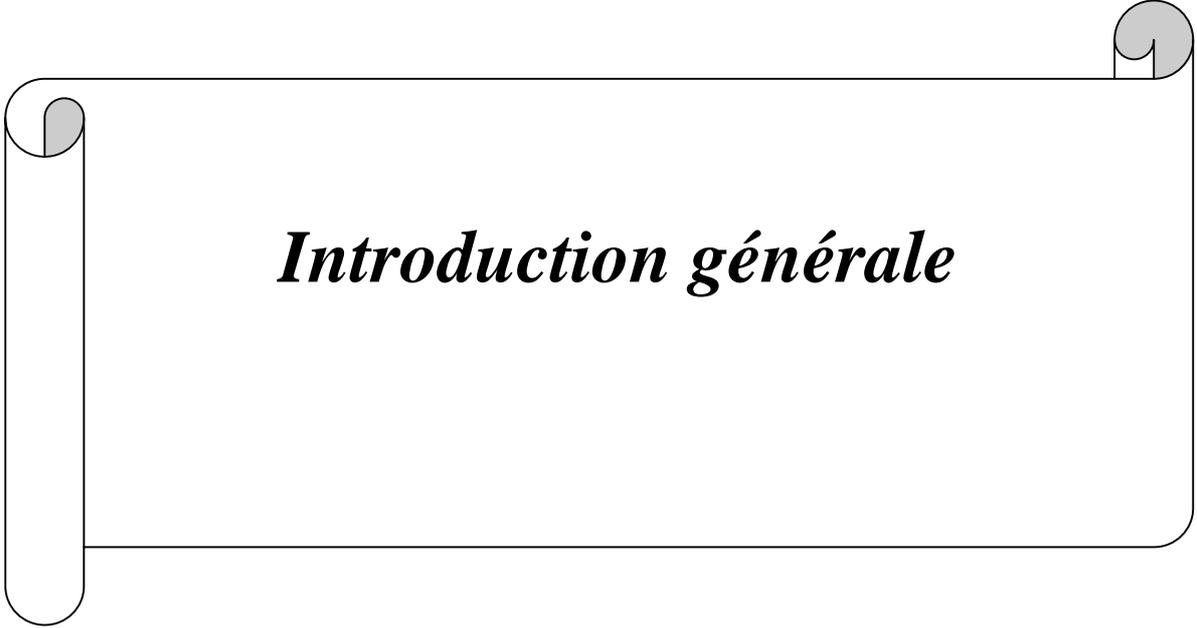
Figure IV.13 : Allure de la puissance de charge	69
Figure IV.14 : Puissance de délestage.....	69
Figure IV.15 : Zoom de la puissance de délestage.....	69
Figure IV.16 : Allures des puissances (photovoltaïque, charge, délestage, batteries)	70
Figure IV.17 : Zoom sur l'allure des puissances.....	70
Figure IV.18 : Les modes de fonctionnement.	70
Figure IV.19 : Zoom du mode 5.....	71
Figure IV.20 : Fonctionnement de l'interrupteur (S1)	71
Figure IV.21 : Fonctionnement de l'interrupteur (S2)	71
Figure IV.22 : Fonctionnement de l'interrupteur (S3)	72
Figure IV.23 : Fonctionnement de l'interrupteur (S4)	72
Figure IV.24:L'ensoleillement de deux journées d'hiver	74
Figure IV.25 : Puissance fournie par le générateur photovoltaïque.....	75
Figure IV.26 : La tension de la charge (tension de bus continu)	75
Figure IV.27 : tension des batteries.....	75
Figure IV.28 : courant des batteries	76
Figure IV.29: Puissance des batteries	76
Figure IV.30 : Etat de charge des batteries.....	76
Figure IV.31: Puissance disponible.....	77
Figure IV.32: Puissance de la charge	77
Figure IV.33 : L'allure des puissances (photovoltaïque, charge, disponible, batteries)	77
Figure IV.34:Zoom des puissances durant les modes 6 et 7	78
Figure IV.35: Les modes de fonctionnement	78
Figure IV.36: Zoom des modes 6 et 7	78
Figure IV.37: Fonctionnement de l'interrupteur (S1)	79
Figure IV.38 : Fonctionnement de l'interrupteur (S2)	79
Figure IV.39: Fonctionnement de l'interrupteur (S3)	79
Figure IV.40 : Fonctionnement de l'interrupteur (S4)	80



Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau(II.1) : Paramètres d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24	34
Tableau (III.1) : Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude [29]	52
Tableau(III.2) : les tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques en fonction de leurs puissances.	52
Tableau(III.3) : Consommation journalière de la maison.	56
Tableau(III.4) : Caractéristique du système PV autonome.	57
Tableau (III.5) : Résultats de calcul du dimensionnement de l'installation photovoltaïque....	58
Tableau(III.6) : Les différents modes de fonctionnement.....	60



Introduction générale

Introduction générale

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.[1]

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. [1]

A ce sujet, l'énergie photovoltaïque apparaît comme une énergie inépuisable et facilement exploitable. Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km², 4% de la surface des déserts arides de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux. [2]

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

On propose dans ce mémoire l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour la production de l'électricité pour un habitat alliant un algorithme MPPT. Pour ce système autonome, nous proposons d'ajouter un élément de stockage qui va apporter un degré de liberté au système et ainsi permettre de contrôler la production et la consommation. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, 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

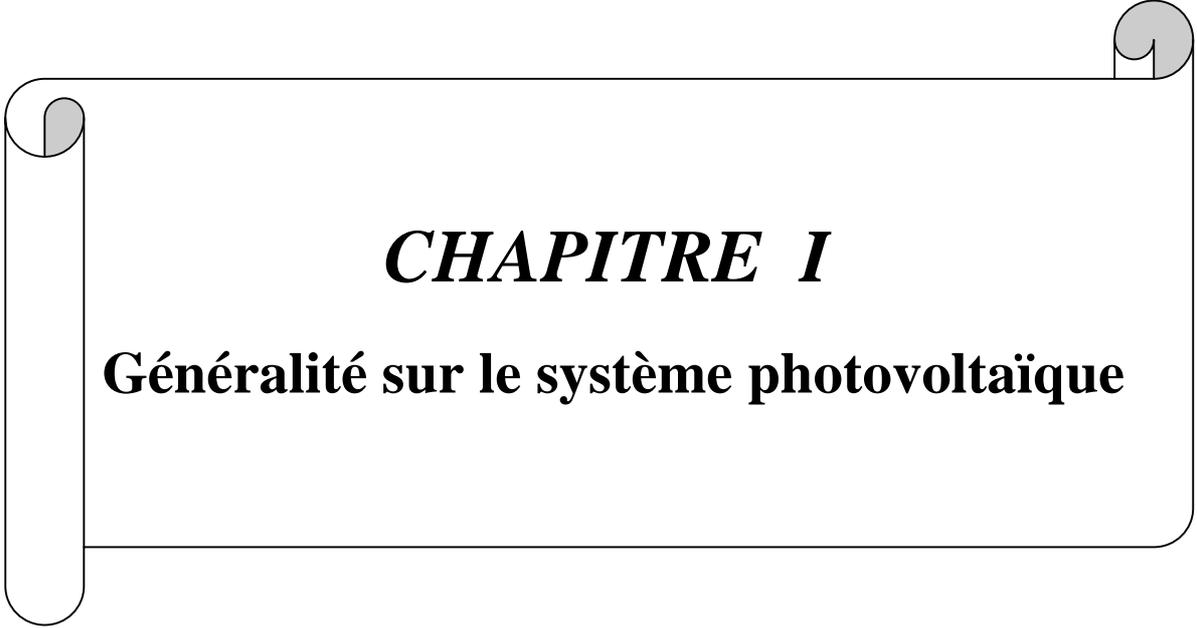
un thème de recherche très présent dans le domaine du photovoltaïque. Nous nous inspirerons de ces études pour notre application .

Dans le premier chapitre de notre travail, avant de détailler la production de l'énergie solaire photovoltaïque, il nous semble opportun de décrire le principe photovoltaïque permettant de transformer la lumière en électricité et les différents types des convertisseurs statiques utilisés dans le système photovoltaïque et leur principe de fonctionnement. Nous procéderons aussi à une étude des différents moyens de stockage d'énergie et une étude détaillée sera consacrée aux moyens de stockage choisis pour notre étude qui représente la batterie au plomb.

Le second chapitre présentera la modélisation de chaque élément de notre système ces modèles permettront dans le chapitre qui suit de valider la stratégie de gestion de l'énergie tout en utilisant au mieux les éléments. 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 a été effectué en fonction de la demande énergétique d'une maison située dans la région de Bejaia. 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 protéger la charge dans le cas où la demande n'est pas satisfaite.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons une simulation du système globale avec optimisation pour divers 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.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow, positioned horizontally across the middle of the page. The scroll is unrolled, with the top and bottom edges curving inward at the ends.

CHAPITRE I
Généralité sur le système photovoltaïque

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 ». [1]

I.1. Généralités sur l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou-bien artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. [3]

L'énergie photovoltaïque est exploitée dans une large gamme d'applications :

- électrification rurale (éclairage, ...),
- télécommunications (relais hertzien, relais T.V., relais radiotéléphone...),
- pompage,
- signalisation (routière, aérienne, maritime...),
- détection, protection (commandes de vannes de sécurité, système d'alarme...),
- stations de mesures (stations automatiques météorologiques, mesures de débit, de niveau, comptage de trafic). [4]

I.2. Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque

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

I.2.1. 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. [5]

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.1).

a. Système autonome avec stockage

Le système autonome exigera des batteries d'accumulations pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile. Ce type de système nécessite un dimensionnement en tenant compte de la localisation, du besoin et de l'autonomie des batteries. [6]

b. Système autonome sans stockage

L'énergie électrique produite par les modules solaires est directement utilisée par le récepteur. Il n'y a pas de stockages électrochimiques. Généralement les générateurs « au fil du soleil » sont destinés à alimenter des moteurs électriques en courant continu ou en alternatif : pompage d'eau et le stocké dans des bassins. [6]

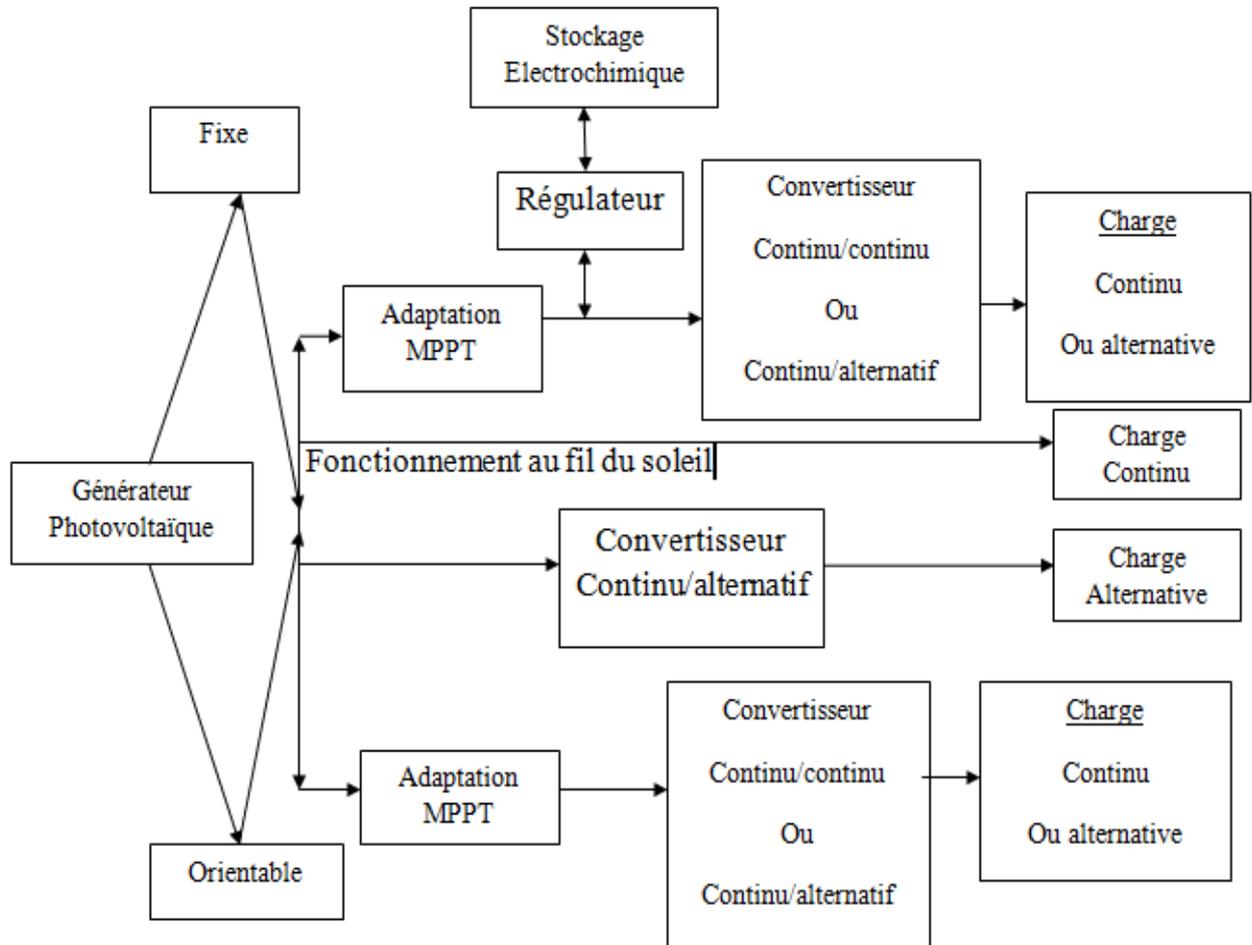


Figure I.1 : Présentation générale d'un système photovoltaïque autonome. [7]

I.2.2 .Mode connecté aux réseaux

Dans ce mode, le panneau PV est connecté au réseau électrique. Le système photovoltaïque est muni de convertisseurs de puissance pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV voir figure (I.2). Ces convertisseurs sont composés d'un hacheur muni d'un MPPT, d'un filtre, d'un onduleur et d'une électronique appropriée pour assurer l'adaptation en amplitude et en fréquence avec le réseau (accrochage au réseau). [4]

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil. Donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie. [8]

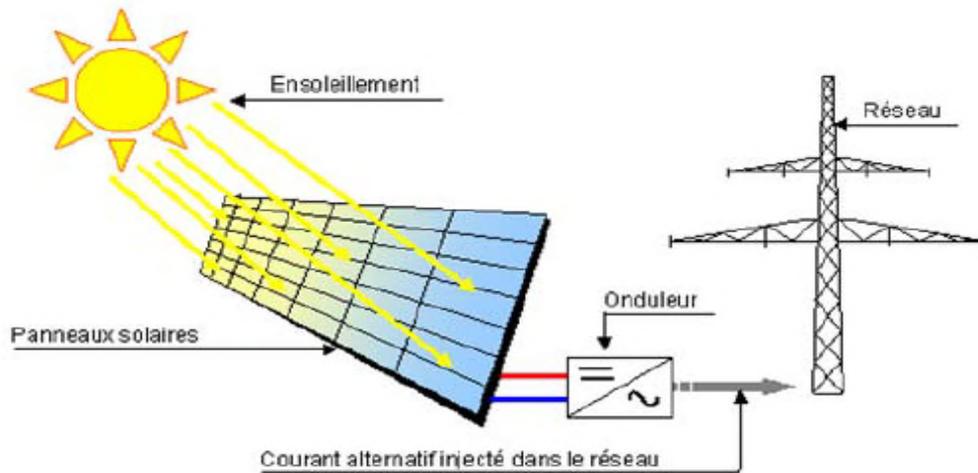


Figure I.2 : Système photovoltaïque raccordé au réseau.

I.2.3. 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.3). [4]

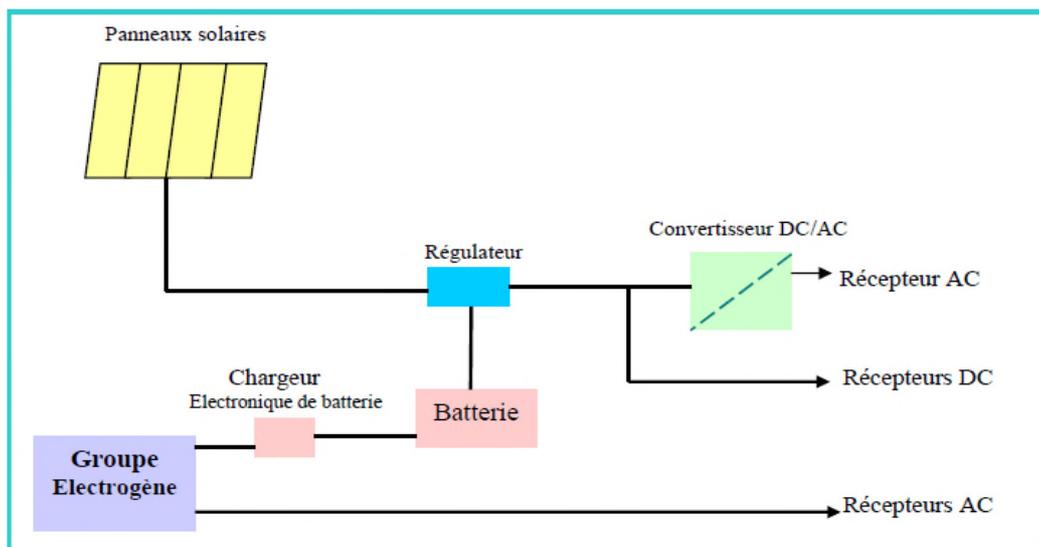


Figure I.3 : Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque (groupe électrogène). [4]

Dans notre étude, on s'intéresse au fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome avec stockage pour l'alimentation électrique d'une maison par ce que C'est le système le plus répandu vu leur capacité à couvrir la totalité de la demande énergétique. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit), et ainsi fournir une autonomie de fonctionnement. [21]

Dans la plus part des systèmes photovoltaïque le coût du seul générateur représente plus de 50% du coût de l'installation. Il est judicieux de définir des stratégies de fonctionnement qui minimisent la puissance crête installée pour satisfaire le service requis par l'application dans les conditions de gisement solaire offertes par le site et qui permettent d'absorber à chaque instant la puissance optimale disponible au niveau du générateur avec une batterie qui permet de stocker la production d'un surplus de puissance éventuelle Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome.[17]

I.3. L'effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. À l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du Soleil, l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité. [5]

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. [1]

I.4. La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. [9]

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de sulfure cadmium (Cds) ou de tellure de cadmium (CdTe). Le matériau le plus utilisé pour les cellules solaires dites photovoltaïques, jusqu'à présent, notamment pour le terrestre reste le silicium (Si) sous de nombreuses formes (cristallin, multi cristallin, amorphe, en couche mince,...etc.) en raison de son faible coût. [10]

a. Silicium monocristallin

Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 12 à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie. [8]

+ Avantages

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 16 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

- Inconvénients

- Première génération de photopiles.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Rendement faible sous un faible éclairement. [2]

b. Silicium poly cristallin

Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de 11 à 13 %, et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines. [8]

+ Avantages

- Rendement électrique des panneaux : 11-13 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m².
- Usage identique à celui du silicium cristallin.
- Adapté à la production à grande échelle.

- Inconvénient

- Rendement faible sous un faible éclairement, inférieur au monocristallin. [2]

c. Silicium amorphe

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. À l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10 %), mais la technologie évolue rapidement. Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificielle de 20 à 3000 lux). [8]

+Avantages

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi-jonctions»).
- Gamme d'éclairage : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).
- Usage: électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes.
- Un peu moins chère que les autres technologies.
- Fonctionnent avec un éclairage faible même avec un temps couvert.

- Inconvénients

- Rendement faible en plein soleil, de 5 % à 7%.
- Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin.
- Performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6mois), pour se stabiliser ensuite (10 à 20% selon la structure de la jonction). [2]

I.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les photopiles sont des composants électroniques à semi-conducteur qui, lorsqu'ils sont éclairés par le rayonnement solaire, développent une force électromotrice capable de débiter un courant dans un circuit extérieur. Le principe de fonctionnement est donné sur la figure (I.4).

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homo jonction p- n) ou entre deux matériaux différents (hétéro structures), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance. Le principe de fonctionnement peut être décomposé en deux parties : l'absorption de photons et la collecte des porteurs de charges créés. [9]

Ce matériau comporte 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. 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 PN a été formée. [11]

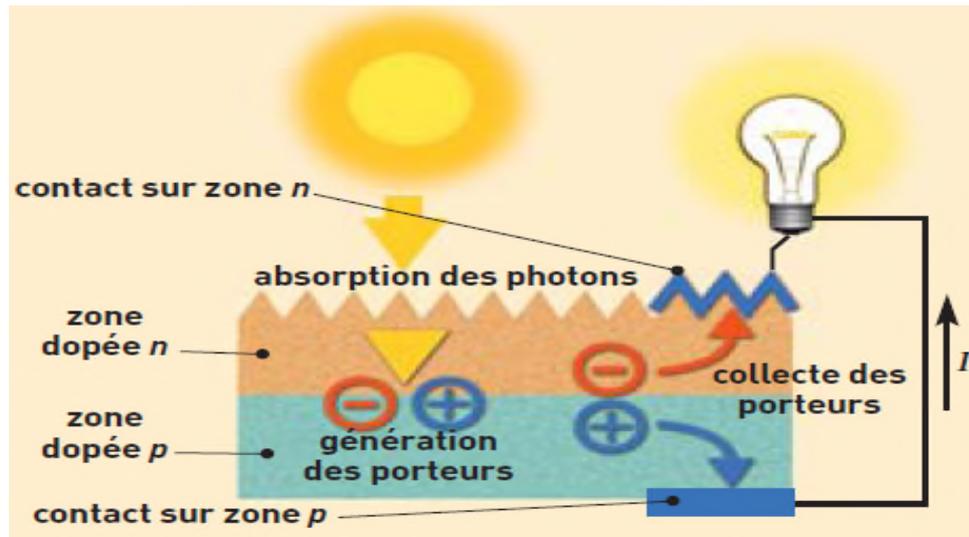


Figure I.4: Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

I.4.2. Groupement des cellules photovoltaïques

a. Regroupement 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. [12]

$V_{OC} N_S$: la somme des tensions en circuit ouvert de N_S cellules en série ;

I_{CC} : courant de court-circuit.

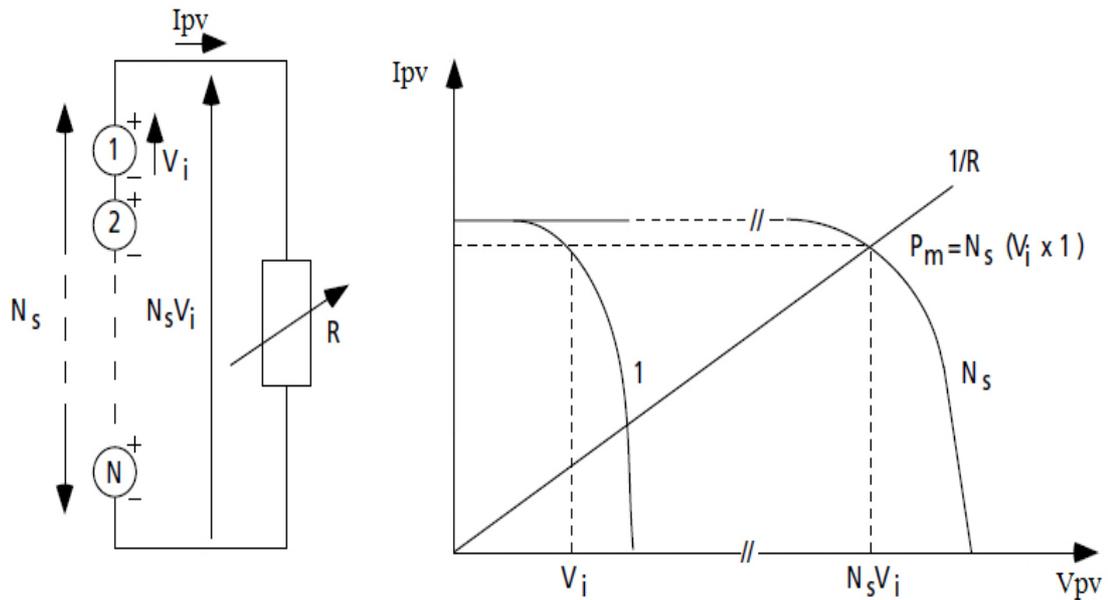


Figure I.5 : Cellules identiques en série. [5]

b.Regroupement 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. [12]

$I_{CC}N_P$: la somme des courants de court circuit de N_P cellule en parallèle ;

V_{OC} : tension du circuit ouvert.

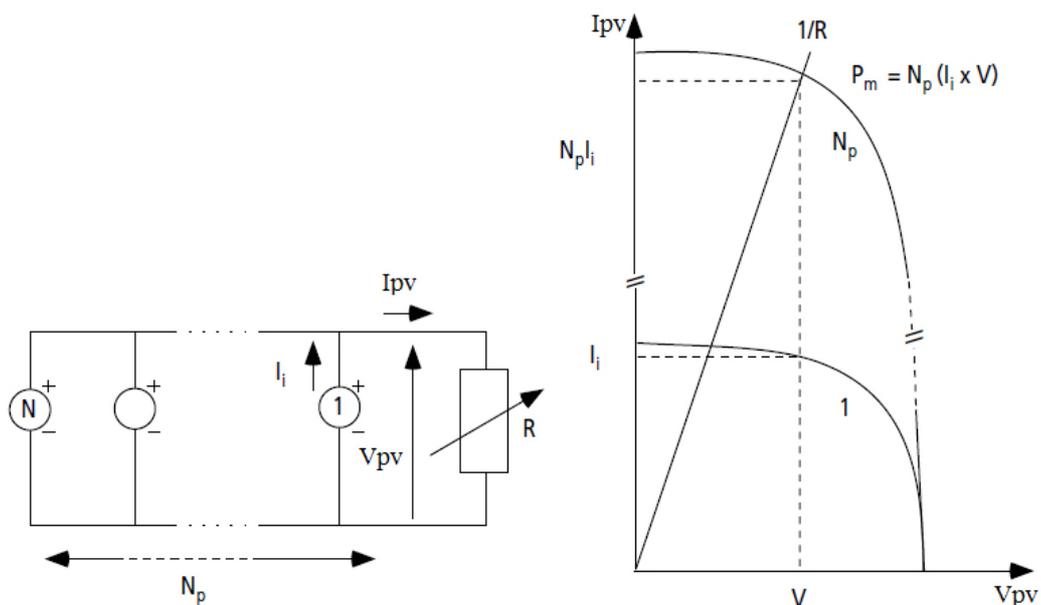


Figure I.6 : Cellules identiques en parallèles. [5]

❖ 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 fonctionnement. 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 direct puisqu'elle devient passante.[1]

I.5. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène ,vynil,acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. La figure (I.7) montre le schéma d'un module PV. [9]

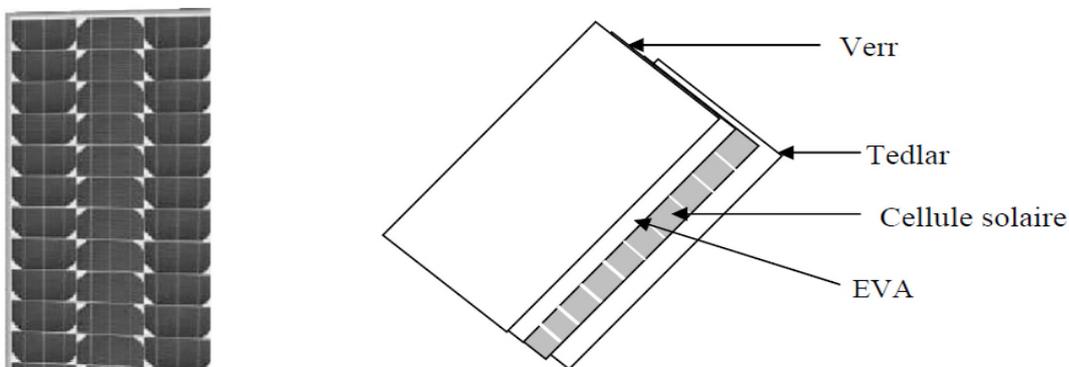


Figure I.7: Module photovoltaïque. [9]

I.5.1. Caractéristiques d'un module

- **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/m²).
- **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, $P_m = U_m * I_m$.
- **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 : $V_{oc} * I_{cc}$. [1]

I.6. Le panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque ou (champ solaire) 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. [7]

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.8). [2]

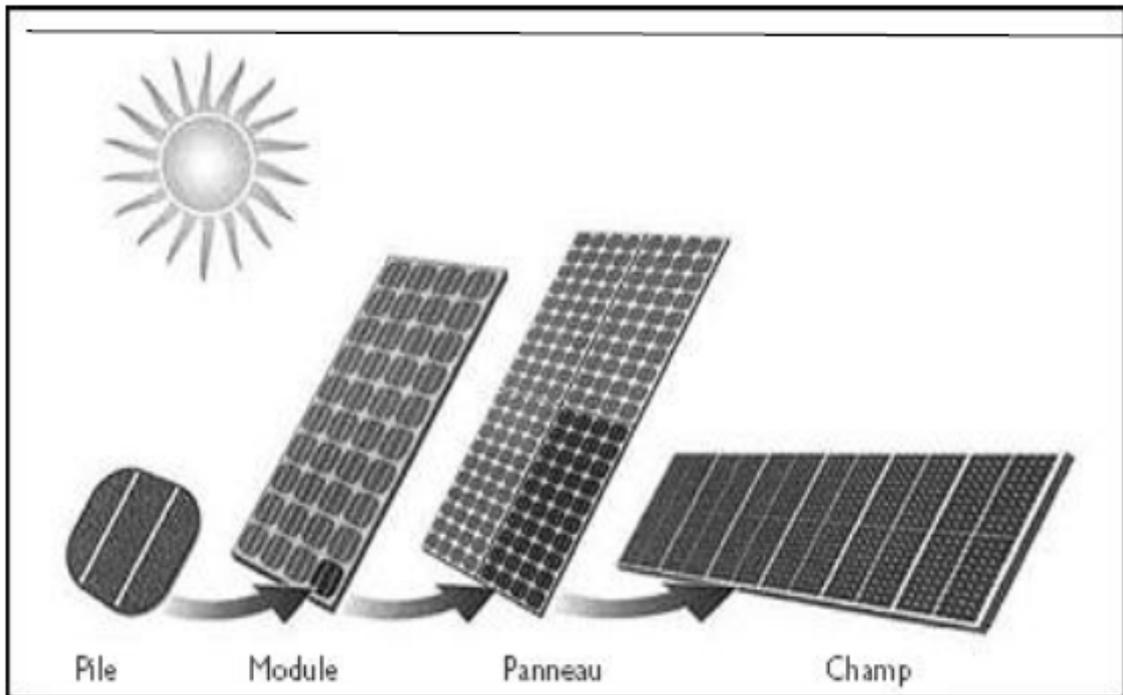


Figure I.8 : Panneau photovoltaïque. [2]

I.7. Le 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. [13]

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.8.1. Les avantages

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées ;
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de très grandes puissances ;
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [14]

I.8.2. Les inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%). Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée ;
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. [14]

I.9. Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des appareils 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.9.1 L'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. [5]

I.9.2. Le hacheur

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un panneau photovoltaïque ou une batterie d'accumulateurs.

On distingue deux types de convertisseurs continu-continu :

a. Hacheur dévolteur (ou série)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Le 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). [3]

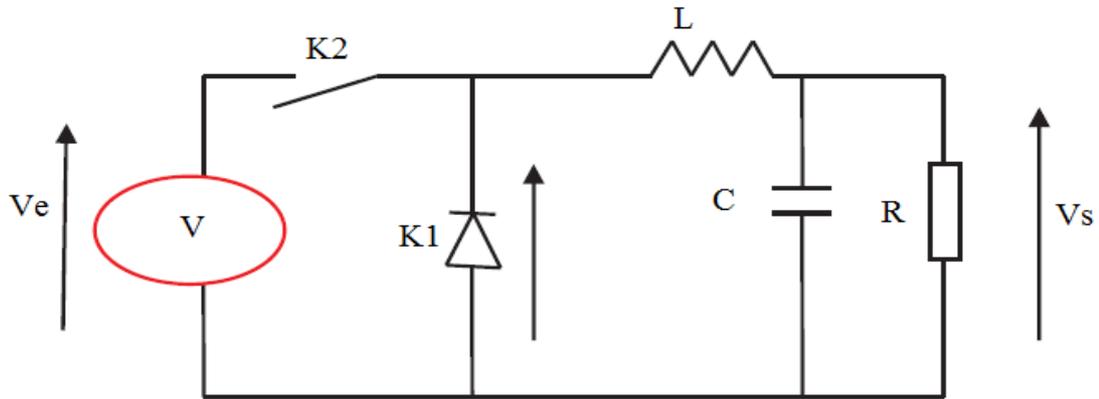


Figure I.9 : Schéma hacheur série. [3]

➤ 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 αT , avec α compris entre 0 et 1 . α est appelé rapport cyclique.
- Lors de la seconde étape, le transistor est bloqué. La diode devient passante. Cette phase dure de αT à T .

b. Hacheur survolteur (ou 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). [3]

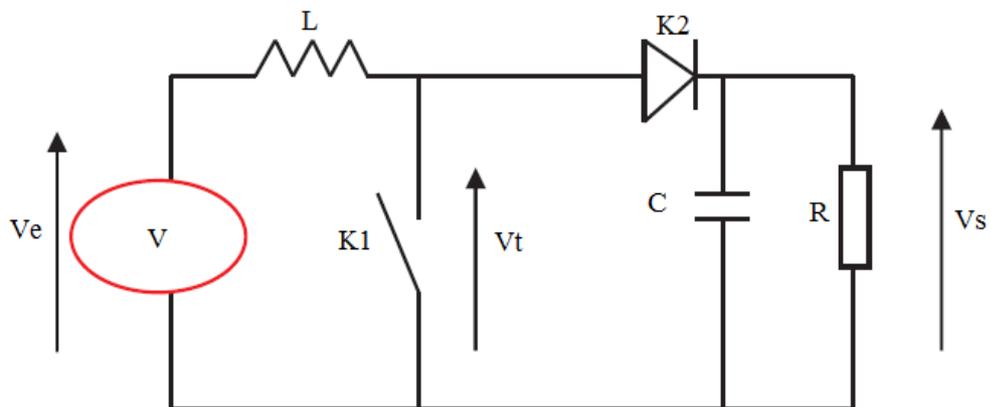


Figure I.10 : Schéma hacheur parallèle.

➤ **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. [3]

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]

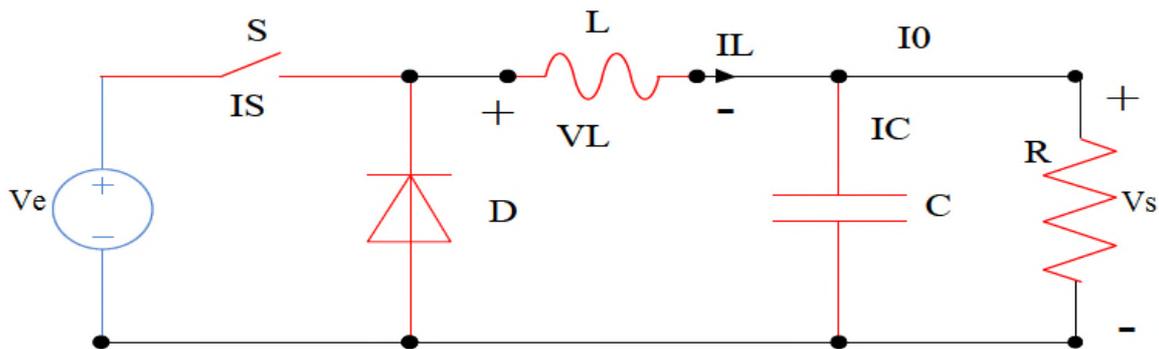


Figure I.11 : Schéma hacheur série parallèle [15].

I.10. Principe de fonctionnement au point de puissance maximale (maximum power point tracking (MPPT))

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. 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.12). [15]

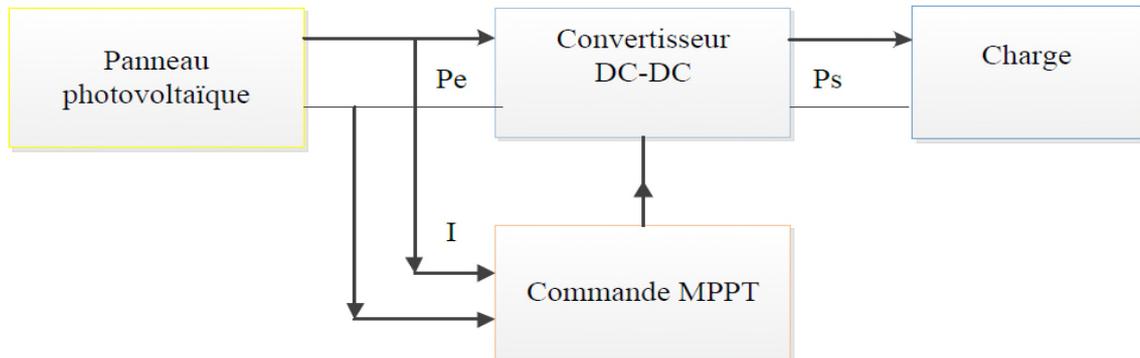


Figure I.12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

I.11. Les différents éléments de stockage d'énergie électrique

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Le stockage de l'énergie électrique passe le plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire (gravitaire, de compression, chimique, cinétique, thermique...) que l'on accumule, puis transforme à nouveau en électricité. Il ya deux types de stockage à envisager :

- **Stockage à court terme :** Le stockage court terme désigne des moyens de stockage dont la durée d'un cycle de stockage-déstockage est comprise entre quelques fractions de seconde et quelques heures.
- **Stockage à long terme :** Le stockage long terme désigne des moyens de stockage dont la durée d'un cycle de stockage-déstockage est comprise entre quelques heures à plusieurs jours voir quelque mois. [16]

I.11.1 .Techniques de stockage à court terme

I.11.1.1. Stockage sous forme d'énergie cinétique : Volant d'inertie

Un volant d'inertie est couplé mécaniquement à un convertisseur électromagnétique qui permet la transformation réversible d'énergie électrique en énergie mécanique.

Le moteur/générateur est l'interface électromécanique permettant la charge et la décharge. Les systèmes de stockage d'énergie par volant d'inertie sont constitués d'un cylindre rotatif massif, supporté par lévitation magnétique, couplé à un moteur/générateur. [16]

I.11.1.2. Stockage par condensateur à double couche : Super-condensateur

Il se présente sous la forme d'une cellule élémentaire dans laquelle le stockage est de type électrostatique. Cela permet d'obtenir des puissances massiques élevées de l'ordre de 10 kW/kg et supportant de 500 000 à 1 million de cycles de charge/décharge. La majorité des super-condensateurs commercialisés sont réalisés selon le procédé double couche électrochimique. Un dépôt de charbon actif sur un film en aluminium permet d'obtenir une surface importante et donc une forte capacité. Les électrodes baignent dans un électrolyte aqueux ou organique. Les charges électriques sont stockées à l'interface électrode-électrolyte. Le temps de réponse est de quelques dizaines de secondes. Le principe problème revient au coût et la limite de leur capacité. [16]

I.11.1.3. Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconductrice

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, il faut l'introduire dans un cryostat rempli d'hélium liquide, la bobine court-circuit permet de stocker l'énergie sous forme de $1/2.L.I_{SP}^2$; avec L : l'inductance de la bobine et I_{SP} : le courant la traversant.

Pour récupérer l'énergie il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur le récepteur et l'énergie stockée est transféré en un temps très court cependant, les coûts de fabrication et de la maintenance sont très élevés. [16]

I.11.2. Stockage à long terme

I.11.2.1. Stockage sous forme gravitaire

Cette technique est nommée aussi stockage par pompage hydraulique le schéma de principe est donné sur la figure (I.13). Elle consiste à utiliser l'énergie électrique pour pomper l'eau d'un bassin aval vers un bassin amont. Lorsque l'on veut récupérer l'énergie, l'eau en amont est déversée dans le bassin aval actionnant ainsi une turbine pour produire de l'électricité. Il permet de constituer des stockages à grande échelle, à des coûts

relativement faibles. Leur principal inconvénient est la nécessité de trouver un site géographique adapté. Le schéma de principe est donné sur la figure (I.13). [16]

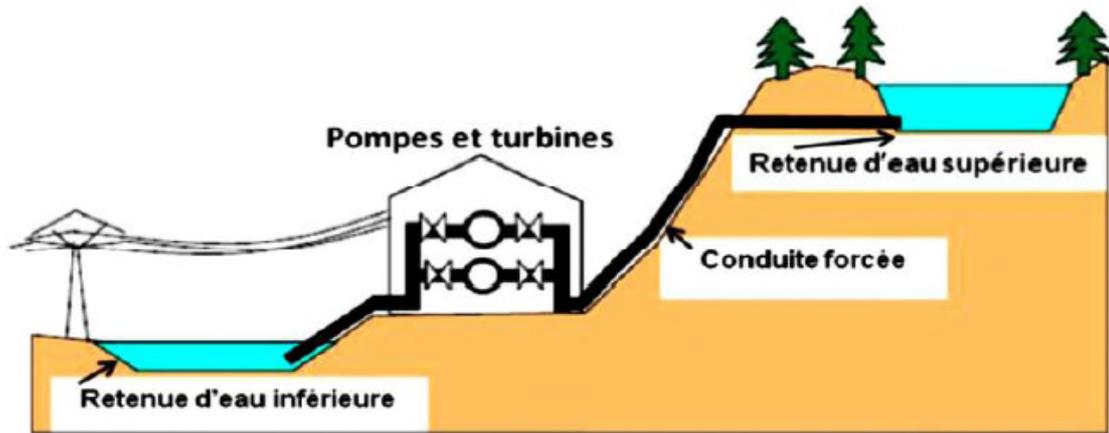


Figure I.13 : Stockage gravitaire hydraulique

I.11.2.2. Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé

Le principe de cette technologie est de convertir l'énergie électrique en air comprimé que l'on stocke. Le stockage se fait soit dans des cavernes souterraines soit dans des réservoirs en surface pour de petites installations. Pour restituer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel puis détendu dans la turbine. Le principal inconvénient de la technologie est la perte de chaleur liée à la compression. Le schéma de principe est donné sur la figure (I.14). [16]

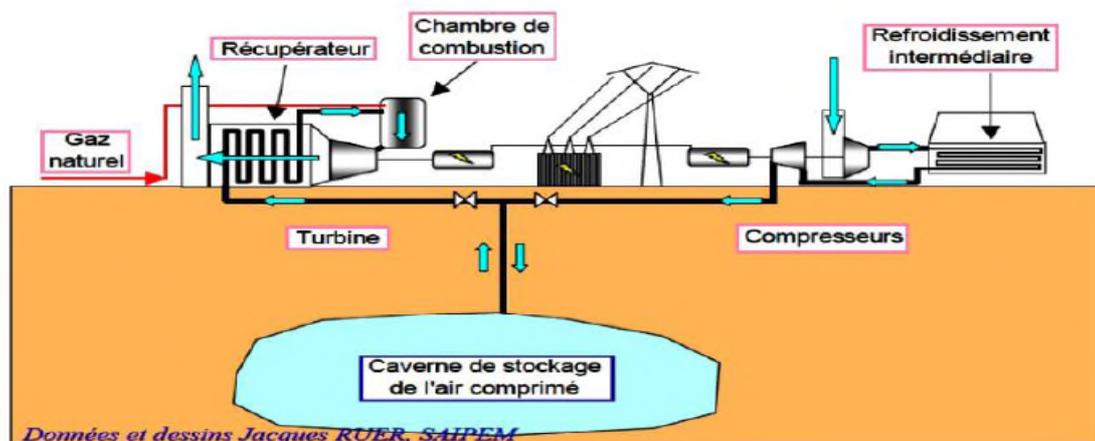


Figure I.14 : Schéma de principe du stockage par air comprimé

I.11.2.3. Stockage sous forme Thermique

Il est possible de stocker l'électricité sous forme thermique le principe est donné sur la figure(I.14). Pour cela, l'électricité est convertie en chaleur dans des résistances électriques. La chaleur produite est stockée dans un réservoir constitué de réfractaires. Pour récupérer l'énergie ainsi stockée, il suffit de transformer la chaleur en électricité par le biais d'une turbine à gaz. [16]

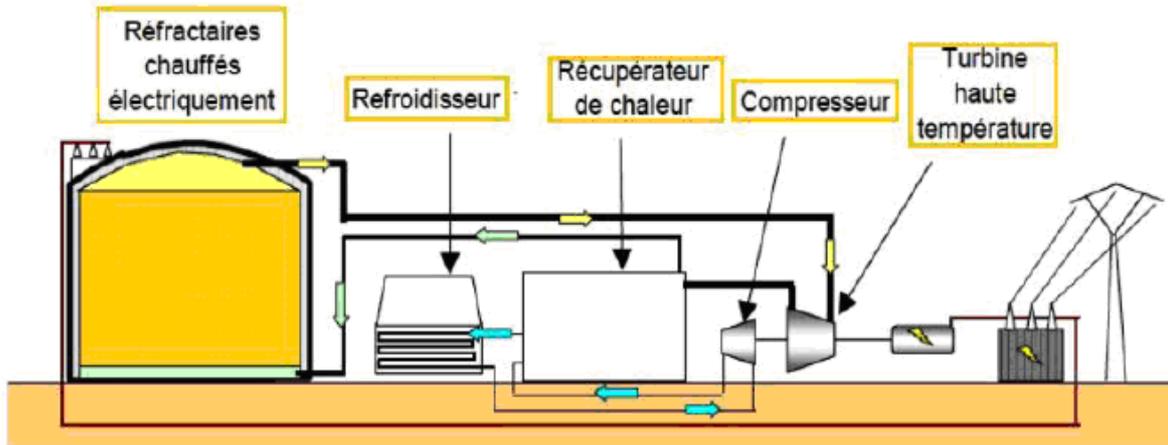


Figure I.15: Schéma de principe d'une installation de stockage thermique

I.11.2.4. Stockage sous forme chimique

a. La pile combustible

Ces systèmes génèrent du courant à partir de la conversion d'hydrogène stocké et d'oxygène de l'air en eau, cette réaction n'est pas réversible c'est-à-dire que l'injection du courant dans la pile après décharge ne peut pas la recharger. Les réactifs de la réaction exo énergétique sont stockés en dehors de la cellule ce qui rend la pile combustible encombrante. [17]

b. Les batteries

Les batteries sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ils restituent sous forme d'énergie électrique l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte lorsqu'une charge est branchée à ses bornes.

Le terme batterie est alors utilisé pour caractériser un ensemble de cellules élémentaires rechargeables.

Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet :

- la demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande ;
- l'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques).

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité. Le système utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques. [5]

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée. [5]

❖ Les différents types d'accumulateurs électrochimiques

L'électricité peut servir à la formation de composés chimiques par le biais de réactions électrochimiques. Ces réactions sont réversibles et peuvent également générer de l'électricité. C'est sur ce type de réactions que repose le principe des accumulateurs électrochimiques que l'on nomme batteries.

Parmi les technologies des accumulateurs on trouve :

➤ **Accumulateurs au Plomb** : La batterie au plomb acide est un système électrochimique capable de restituer sous forme électrique l'énergie chimique stockée. En plus, les réactions internes sont réversibles. Ce système se compose d'une électrode positive est en dioxyde de plomb PbO_2 , une électrode négative en plomb et un électrolyte est une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. Une batterie est constituée d'un ensemble d'éléments de 2 V

connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Le rendement du stockage est de l'ordre de 70%. [7]

➤ **Les accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd) :** sont conçus pour les cas où l'on a besoin d'un dispositif de stockage d'énergie robuste et de longue durée, exigeant peu d'entretien. Le matériau actif de l'électrode positive (cathode) est une plaque d'oxyhydroxyde de nickel (NiOOH). L'électrode négative (anode) est constituée d'une plaque de cadmium, et l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La tension de l'accumulateur est nominale de 1,2 volt. [10]

➤ **La batterie lithium-ion :** est basée sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithié (dioxyde de cobalt ou manganèse) et une électrode négative en graphite. L'emploi d'un électrolyte aprotique (un sel LiPF₆ dissous dans un mélange de carbonate d'éthylène, de carbonate de propylène ou de tétrahydrofurane) est obligatoire pour éviter de dégrader les électrodes très réactives. La tension nominale d'un élément Li-ion est de 3,6 ou 3,7 V. [18]

➤ **Un accumulateur nickel-hydrure métallique ou Ni-MH :** Dérivés des Ni-Cd, ces accumulateurs ont été développés avec 3 objectifs : augmenter la capacité par unité de volume, favoriser les charges rapides (pour le marché du téléphone portable notamment) et éliminer le cadmium, toxique pour l'environnement et déjà interdit dans certains pays. L'électrode de cadmium est remplacée par un alliage apte à stocker l'hydrogène d'où son nom NiMH. À part la première caractéristique (ils sont plus compacts), ces accumulateurs ne sont pas meilleurs que les NiCd pour le solaire. Il sont moins bon en ce qui concerne la tenue au froid. [18]

➤ **Accumulateur Nickel-Zinc :** Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du Cadmium par le zinc serait le bienvenu est ces batteries ont une densité d'énergie plus élevée (25% de plus que la batterie NiCd). La tension d'une cellule varie de 1.6V à 1.8V. la durée de vie reste le problème majeur à résoudre. [19]

➤ **Accumulateur Nickel-NaCl :** à une très forte capacité pouvant subir un très grand nombre de cycles extrêmement robustes. Ces accumulateurs fonctionnent malheureusement à 200°C et nécessitent qu'une partie de l'énergie soit utilisée pour les maintenir à cette température. Leur développement est provisionnement arrêtée pourrait bien reprendre. [19]

❖ Notre travail consiste à étudier un système PV autonome avec stockage. Nous avons optés pour les batteries au plomb acide et cela pour les avantages suivant : [6]

- ▶ Faible coût ;
- ▶ Un bon rendement ;
- ▶ Un Meilleur compromis en terme de coût / performance / entretien ;
- ▶ Sa durée de vie ;
- ▶ Caractéristique électrochimique favorable ;
- ▶ Une large disponibilité ;
- ▶ Entretien faible ou nul ;
- ▶ Bonne tenue aux températures extrêmes.

I.11.3. Batterie en plomb acide [8]

I.11.3.1 Historique

C'est en 1859 que Gaston Planté réalisa l'accumulateur au plomb par formation de feuilles de plomb pur, dans l'acide sulfurique et sous l'influence d'un courant électrique. Il fallut cependant attendre l'apparition en 1880 de la dynamo Gramme et la réalisation de l'accumulateur Faure à grilles et à oxyde rapporté pour que l'industrie de l'accumulateur commence à se développer.

I.11.3.2 .Constitution

La figure(I.16) montre la constitution de la batterie au plomb.

a. Électrode ou plaque

➤ L'électrode positive est cathode durant la décharge et anode lorsque le sens du courant s'inverse, c'est-à-dire durant la charge. Elle est constituée d'une couche poreuse de dioxyde de plomb (PbO_2) déposée sur un support en alliage de plomb qui assure à la fois la collection des charges et la tenue mécanique de la plaque.

➤ L'électrode négative, de façon complémentaire, est anode durant la décharge et cathode durant la charge. La matière active est en plomb spongieux. Comme pour l'électrode positive, elle est rapportée sur un support en alliage rigide de plomb.

b. Les grilles

Les grilles sont constituées d'alliages de plomb. Elles servent à la fois à la collecte du courant et à la tenue mécanique de la matière active. De nombreuses recherches leur sont

consacrées et beaucoup de soins sont apportés à leurs alliages, car c'est souvent la corrosion des grilles qui limite la durée de vie des batteries au plomb.

c. Le séparateur micro poreux

Pour isoler les plaques correctement, le séparateur (non conducteur électronique) doit avoir :

- une résistance mécanique appropriée, pour supporter les contraintes dues aux variations de volume des matières actives pendant les cycles de charge et décharge ;
- une résistance chimique suffisante pour sa tenue dans le temps (immergé dans une solution très corrosive) ;
- une structure micro poreuse (pores de la taille du nanomètre), pour permettre la diffusion des anions et cations de l'électrolyte, et éviter tout transport de matière d'une électrode sur l'autre.

d. L'électrolyte

Selon le type de batterie, l'électrolyte est liquide, gélifié ou absorbé. Au sein de l'accumulateur au plomb, l'électrolyte joue un double rôle : il assure le transport d'électricité par conduction ionique et participe, en tant que réactif, aux réactions de charge et décharge.

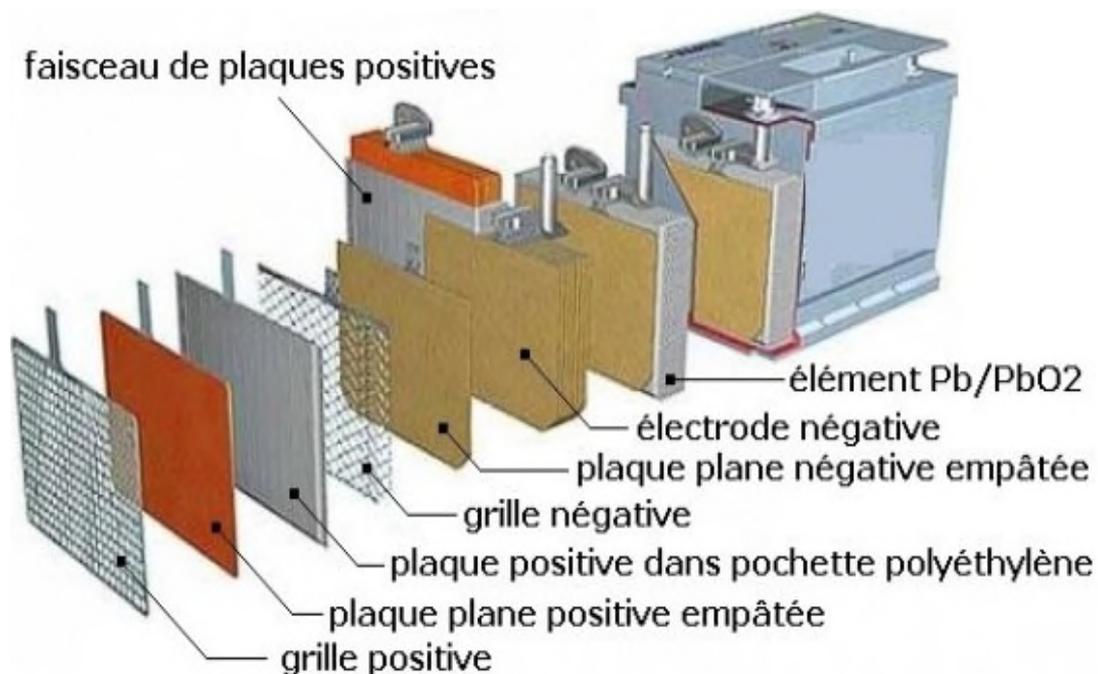


Figure I.16 : Les constitutions d'une batterie au plomb acide

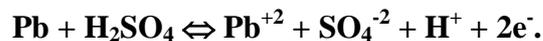
I.11.3.3. Principe de fonctionnement

En décharge, les matériaux actifs positif et négatif produisent, respectivement par réduction et par oxydation, des ions Pb^{2+} qui, en se combinant avec des ions sulfate contenus dans l'électrolyte, se fixent en cristaux sulfate de plomb. Cette transformation du dioxyde de plomb et du plomb spongieux porte le nom de "double sulfatation". L'électrode où a lieu l'**oxydation** est appelée **anode** et celle où a lieu la **réduction**, la **cathode**.

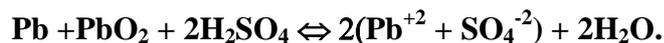
➤ L'électrode positive a un comportement de **cathode en décharge** car le PbO_2 est **réduit** en $PbSO_2$, et devient **anode en charge** puisque le $PbSO_4$ s'**oxyde** en PbO_2 :



➤ L'électrode négative est anode en décharge (oxydation du Pb en $PbSO_4$) et cathode en charge :



➤ Ces 2 réactions de charge et décharge peuvent se résumer en une seule réaction :



I.12. La gestion d'énergie 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]

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 et du stockage suivant la demande du consommateur. L'algorithme de supervision est basé sur trois scénarios :

- Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux PV si énergie photovoltaïque est suffisante ;

- Alimentation du consommateur par les panneaux PV et le stockage si énergie photovoltaïque est insuffisante ;
- Alimentation du consommateur uniquement par le stockage si énergie photovoltaïque est absente.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique par la cellule photovoltaïque. 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, chose qu'on va présenter dans le chapitre II. 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. Les différents éléments de stockage sont présentés. Dans notre travail nous avons opté pour l'utilisation de la batterie au plomb à cause des avantages qu'elle possède par rapport aux différents autres types. Pour une bonne utilisation de cette énergie un système de gestion d'énergie est nécessaire pour superviser de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants : générateur photovoltaïque, les batteries et la charge (consommateur).

Introduction

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, aussi l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système à étudier.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques du site, les données relatives aux utilisations, et les données relatives aux équipements. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système. [2]

L'objectif de cette modélisation consiste à obtenir par simulation, les caractéristiques dynamiques de la cellule photovoltaïque, l'hacheur et la batterie sous l'environnement Simulink/Matlab).

II.1. Structure de la chaîne de production d'énergie photovoltaïque

La figure ci-dessous montre le schéma général adéquat pour les systèmes photovoltaïques. Deux convertisseurs DC/DC sont utilisés. L'un pour un fonctionnement en MPPT, l'autre est utilisé lors du stockage de l'énergie de la batterie et de la compensation des fluctuations de puissance. La batterie absorbe l'excès de l'énergie produit par le générateur photovoltaïque. Quand l'énergie des panneaux est insuffisante pour satisfaire la demande de la charge, la batterie complète l'énergie exigée par la charge. L'onduleur est utilisé pour l'alimentation de la charge qui représente une maison d'habitation F3.

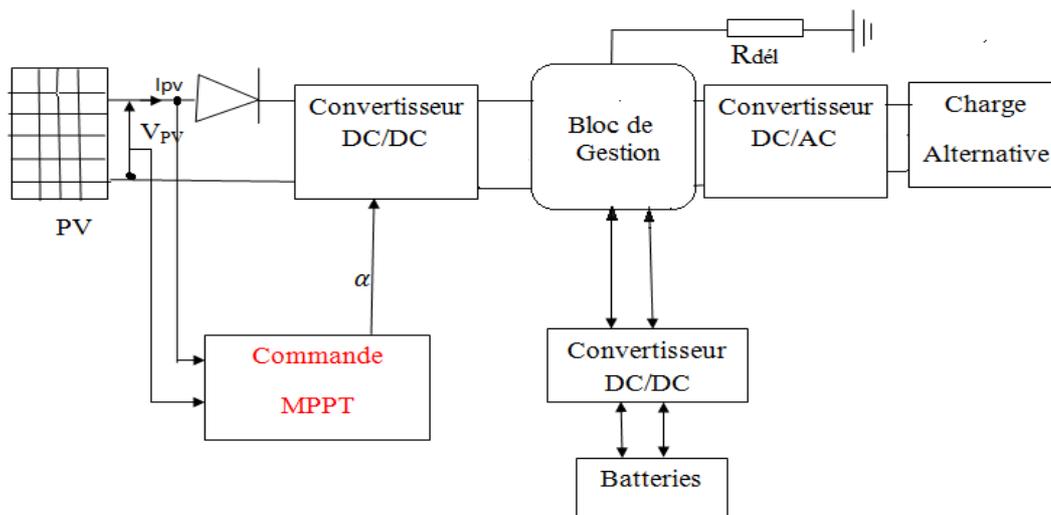


Figure II.1 : structure de la chaîne de conversion photovoltaïque

Le système PV que nous voulons modéliser, comprend trois convertisseurs :

- Un hacheur série dédiée à la conversion de l'énergie provenant des panneaux PV.
- Un onduleur permettant d'adapter la tension du bus continu a celle de l'utilisateur.
- Un hacheur série -parallèle pour la batterie.

Dans un souci de simplification, nous supposons que le convertisseur au niveau de l'utilisateur est parfait ; ceci nous permet de nous affranchir de ce convertisseur lors des simulations et d'appliquer ainsi directement une consigne en puissance au niveau du module de commande. Le convertisseur que nous allons décrire dans la suite est donc un hacheur abaisseur de tension (buck) ou et le hacheur série–parallèle (buck-boost).

D'après le cahier des charges, les panneaux PV fournissent une tension de 35V_au point de puissance maximale, le hacheur buck à donc pour rôle d'abaisser la tension des panneaux à la valeur de la tension du bus continu qui est de 24V dans notre cas. Dans cette partie, nous considérons qu'un dispositif MPPT est intégré à la commande du hacheur et permet de maintenir la tension des panneaux PV à la tension V_{mpp} (tension au point de puissance maximale).

II.2. Modèle électrique du panneau photovoltaïque

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'un panneau photovoltaïque en schéma bloc comportant quatre paramètres (figure II.2). [1]

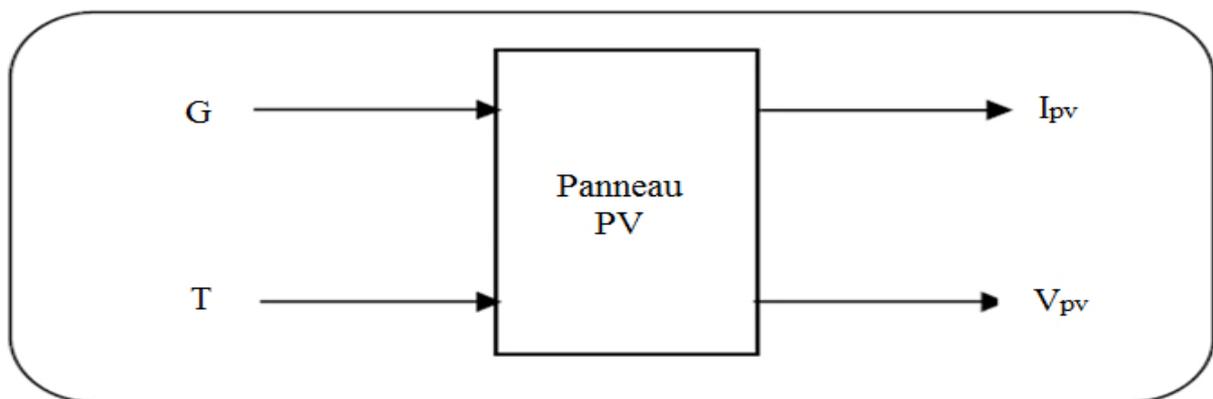


Figure II.2: Schéma bloc d'une cellule PV

Avec deux variables d'entrée :

G: ensoleillement dans le plan de panneau (W/m^2).

T : température du panneau C).

I_{pv} : intensité de courant fournie par le panneau (A).

V_{pv} : tension aux bornes d'un panneau photovoltaïque.

II.2.1. Modèle d'un générateur photovoltaïque idéal

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n). Le circuit électrique équivalent correspondant à un panneau photovoltaïque est représenté sur la figure (II.3). [2]

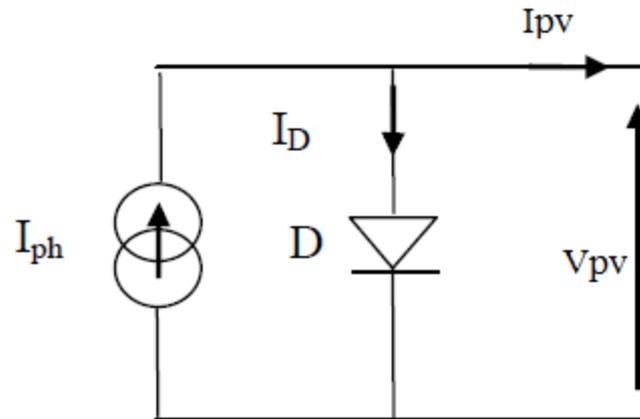


Figure II. 3: Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque idéal

L'équation caractéristique d'un panneau photovoltaïque idéale est de la forme suivante :

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- I_{ph} : photo courant.
- I_D : courant de diode.
- I_0 : courant inverse de saturation de la diode.
- A : facteur d'idéalité de la diode, $A=1 \dots 5$.
- $K=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K : constante de Boltzmann.
- T : température absolue, $[T]=K$ (kelvin).
- I : courant fournis par la cellule.
- V : tension fournis par la cellule.

II.2.2. Modèle implicite du générateur photovoltaïque avec une diode [2]

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

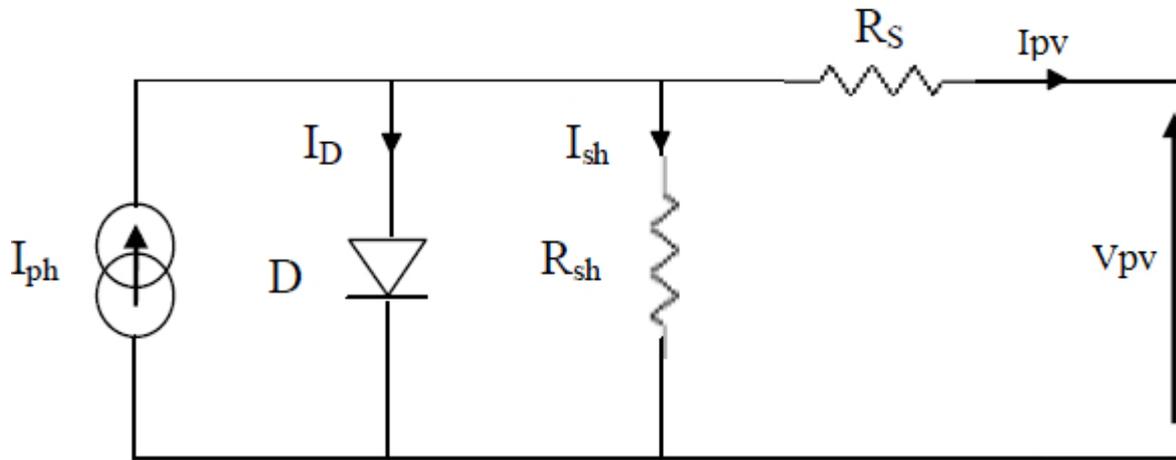


Figure II.4: Schéma équivalent d'un panneau photovoltaïque

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.4})$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.5})$$

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I - V de la photopile:

- résistance série est la résistance interne de la cellule; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt). Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante).

II.2.2.1. Simulation du générateur à une diode

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par le nombre de paramètres pris en compte. Nous avons choisis un modèle à cinq paramètres (I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} , V_{mpp} , R_s) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

L'expression du courant du module photovoltaïque est donné par : [7]

$$I_{pv} = I_{sc} \{ 1 - K_1 [\exp K_2 V_{pv}^m] \} \quad (\text{II.6})$$

Où les coefficients K_1 , K_2 , K_3 , K_4 et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.001175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad (\text{II.7})$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1+K_1)}{K_1} \right] \quad (\text{II.8})$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad (\text{II.9})$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad (\text{II.10})$$

Où:

I_{mpp} : courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}) ;

V_{mpp} : tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale (V_{opt}) ;

I_{sc} : courant en court-circuit ;

V_{oc} : tension en circuit ouvert.

Il est noté que l'équation (II.6) est applicable que pour un niveau d'insolation G et de température particulier ($G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{stc}=25^\circ\text{C}$), relatif aux conditions standard de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient, le courant I_{pv} et la tension V_{pv} changent suivant les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.11})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc,stc} \quad (\text{II.12})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc}\Delta T_c - R_s\Delta I_{pv} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques ;

T_{stc} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques ;

ΔT_c : Représente la variation de la température ;

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température ;

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température ;

α_{sc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de courant I_s quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement) ;

β_{oc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de la tension V_{oc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions standard de fonctionnement) ;

α_{sc} et β_{oc} Sont appelés coefficients de température.

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

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.14})$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.15})$$

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau (I_{sc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$, AM1.5) le tableau(II.1) montre les données d'un panneau solaire de type SIEMENS SM 110-24, qui sont utilisés pour la simulation du panneau photovoltaïque.

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35V
Courant de court-circuit I_{sc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5V
Coefficient d'incrémentatation du courant I_{sc} (α_{sc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension V_{oc}	-152mV/°C

Tableau(II.1) : Paramètres d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24

Pour valider ce modèle nous l'avons simulé en utilisant le modèle mathématique déjà décrit et les paramétrés du tableau(II.1). Nous avons déterminé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différents niveaux d'irradiation ($G=400, 600, 800, 1000\text{W/m}^2$) à température constante et pour différentes températures ($T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$) à irradiation constante.

II.3. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. Les figures (II.5), (II.6) montrent les courbes caractéristiques courant-tension et puissance –tension d'un panneau solaire dans les conditions standard de fonctionnement ($T=25^\circ\text{C}$ et $G = 1000\text{W/m}^2$).

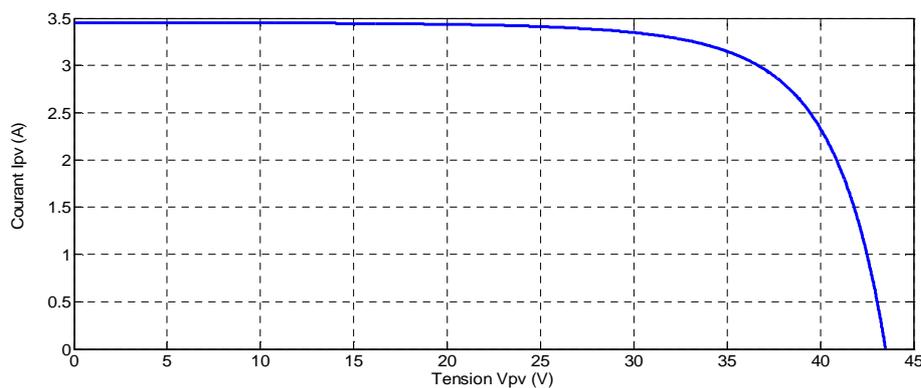


Figure II.5: Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

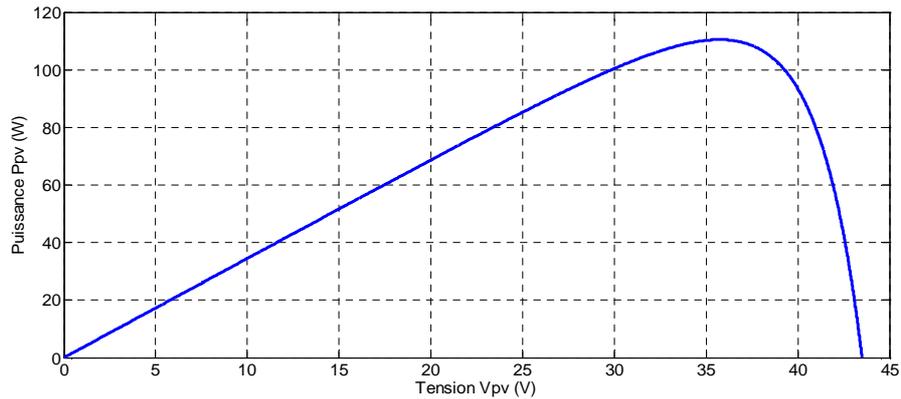


Figure II.6 : Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

II.4. Influence de l'éclairement et la température

II.4.1. Influence de la température

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant pour différentes températures les figures (II.7) et (II.8) présentent respectivement les caractéristiques courant/tension et puissance/tension d'un module photovoltaïque pour différentes températures et un éclairement fixe (1000W/m^2).

- Sur la figure (II.7) nous remarquons que la tension à vide V_{OC} décroît avec la température. Plus la température est élevée, plus V_{OC} est faible, tandis que le courant (I_{CC}) reste presque constant.
- Pour la figure (II.8) l'augmentation de la température a un effet sur la puissance, mais elle cause surtout une diminution apparente de la tension de circuit ouvert.

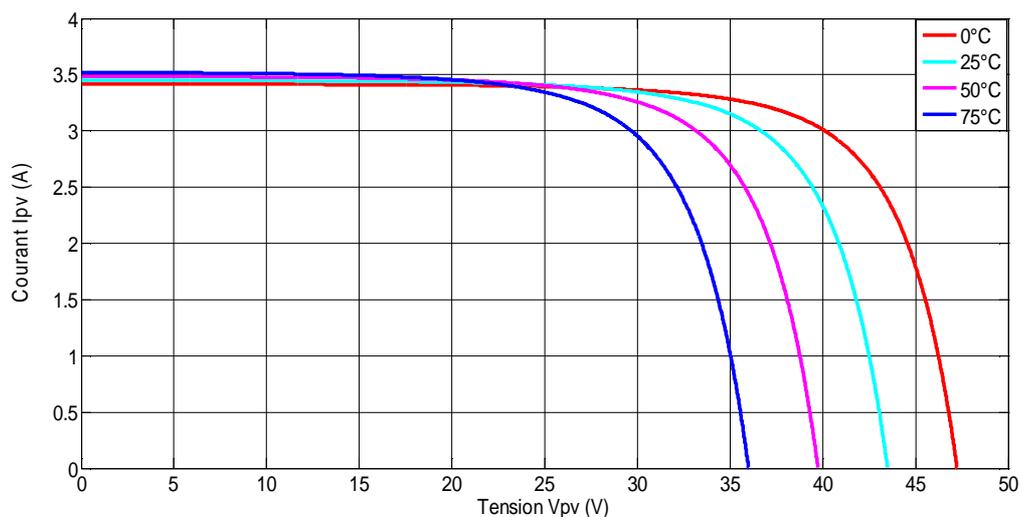


Figure II.7: Influence de la température sur la caractéristique courant/tension

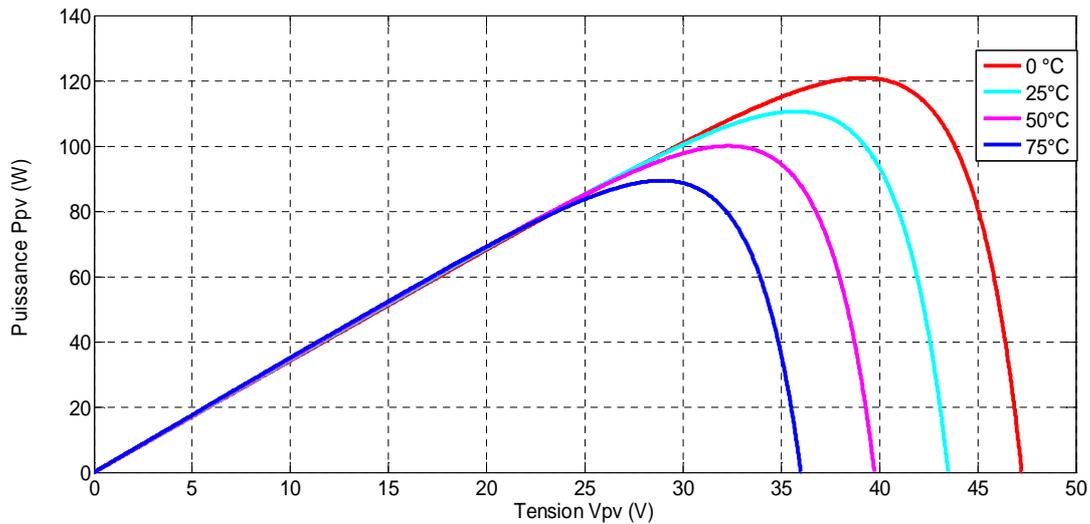


Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique puissance/tension

II.4.2. Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 400 w/m^2 et 1000 w/m^2 , les figures (II.9) et (II.10) présentent respectivement les caractéristiques courant/tension et puissance/tension d'un module photovoltaïque pour différents éclairements. Nous remarquons que, à température donnée (typiquement 25°C , température normalisée pour les fabricants) :

- Le courant de court-circuit I_{CC} et la puissance varie proportionnellement à l'éclairement G ,
- La tension à vide V_{OC} varie peu avec l'éclairement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

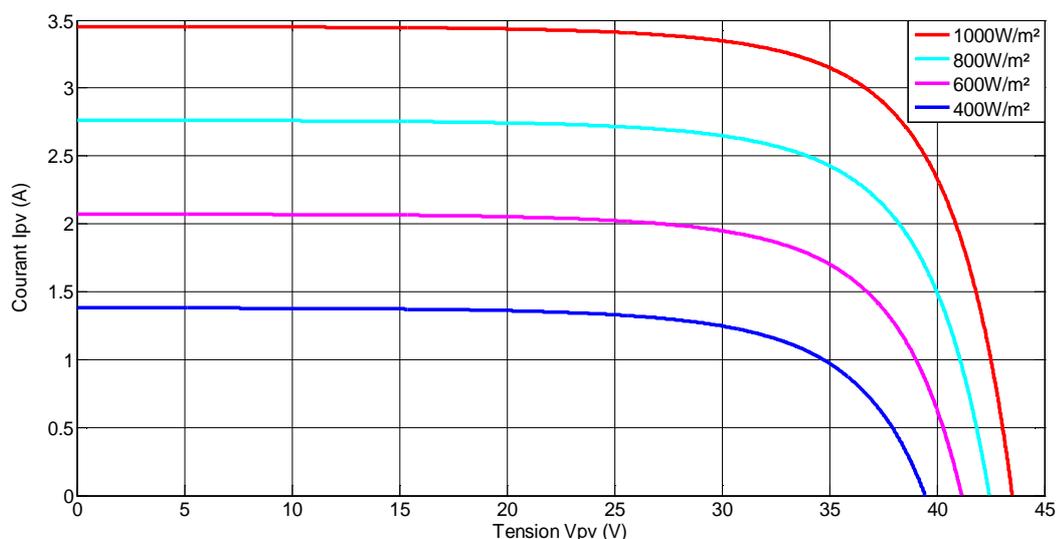


Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant/tension

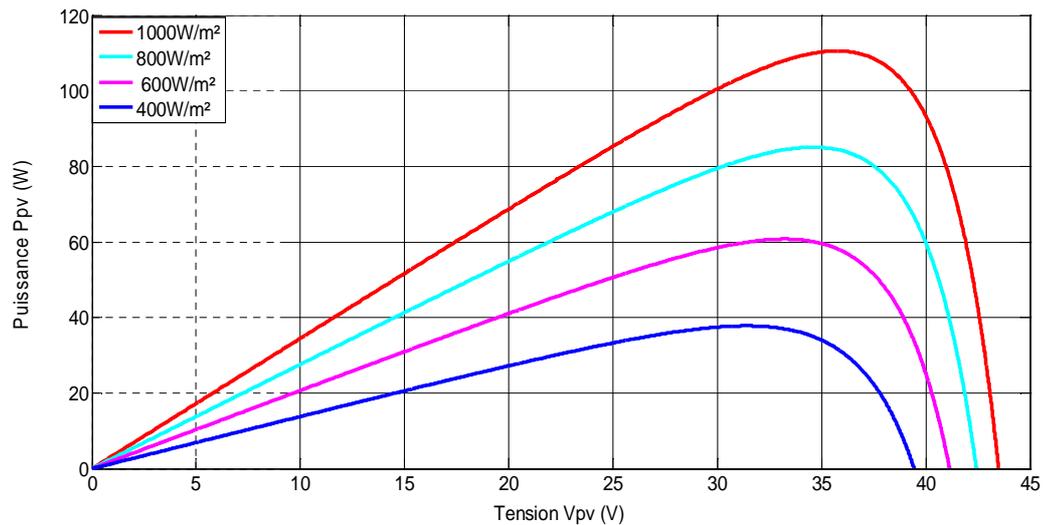


Figure II.10 : Influence de l'insolation sur la caractéristique puissance/tension

II.5. Modèle du convertisseur dévolteur (buck)

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure (II.11). Les composantes clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement. [21][47]

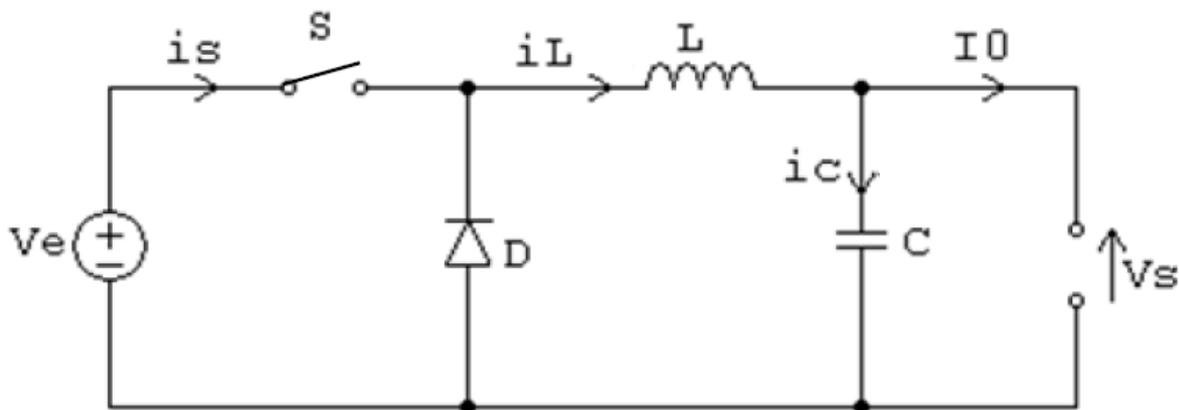


Figure II.11: Circuit électrique de base du hacheur dévolteur

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge. L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par l'équation suivante.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (\text{II.16})$$

I_L : Le courant dans l'inductance

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur (S). Dans le premier laps de temps (αT) le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance (L) se charge d'énergie avec augmentation du courant i_L . Dans le deuxième laps de temps $(\alpha-1) T$, l'inductance (L) libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant i_L .

En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement du courant est donné par :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_s}{L} \quad (\text{II.17})$$

Lorsque le courant de l'inductance ne se décroît pas à zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, comme illustré sur la figure (3.10), et dans ce cas, si la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$, la tension aux bornes de la charge :

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

II.6. Modèle du hacheur buck-boost (série-parallèle) [22]

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée V_e . Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.19})$$

Si $0 < \alpha < 0.5$ L'hacheur est abaisseur (Buck)

Si $\alpha \approx 0.5$ La tension d'entrée égale à la tension de sortie

Si $0.5 < \alpha < 1$ L'hacheur est élévateur (Boost)

Ce convertisseur est inséré entre le bus continu et la batterie de stockage Le hacheur est considéré parfait sans pertes de puissance.

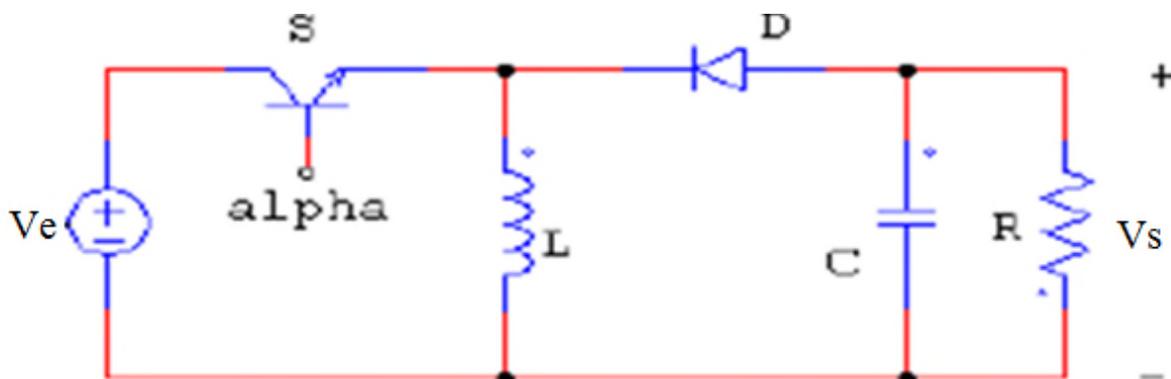


Figure II.12: Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle (buck -boost)

La simulation de ce convertisseur permet de mettre en évidence «l'auto-équilibrage» des éléments de stockage lors de l'application d'un courant de charge ou de décharge. Le courant de charge et décharge pourra être contrôlé en fonction de l'écart des puissances entre les éléments. [18]

II.7. Le dispositif de stockage

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

Pour ne pas tomber dans un excès de complexité nous utiliseront pour notre étude, le modèle R-C qui ne nécessite pas d'identification expérimentale d paramètre empirique nécessaire à l'emploi des autres modèles couramment utilisés. [7]

II.7.1. Le modèle électrique de la batterie

Ce modèle comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_{bat}) et une résistance interne (R_s). [7]

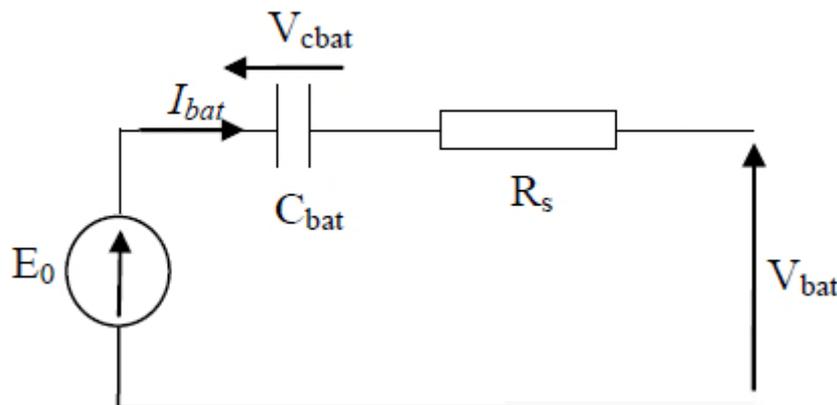


Figure II.13: Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s * i - V_{cbat} \quad (\text{II.20})$$

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

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II.21})$$

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

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

Q_{bat} : la quantité de charge électrique en Coulomb.

$$Q_{bat} = I \cdot t_{bat} \quad (II.22)$$

II.8. Modélisation de l'onduleur (continu-alternative)

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge. Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée.

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de champ PV. De tels dispositifs devraient délivrer une tension alternative à fréquence déterminée c'est-à-dire le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible.

Ces onduleurs sont largement utilisés, mais les appareils existant ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes, à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge.

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisation. [9]

II.9. Modèle d'un bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité qui a pour but de filtrer la tension et de produire de l'énergie réactif

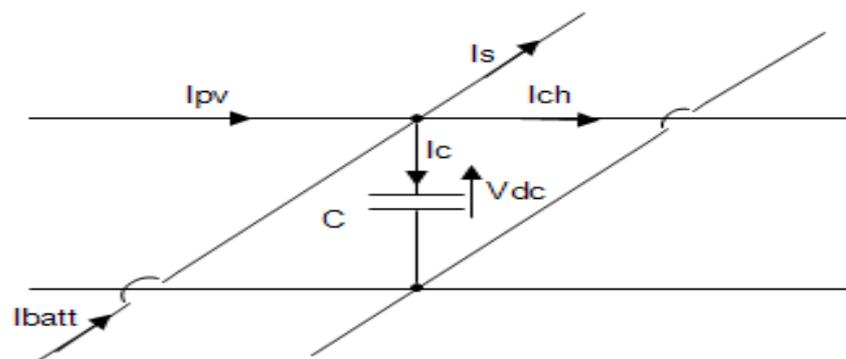


Figure II.14 : Schéma d'un bus continu

$$I_{ch} = I_{pv} - I_c - I_s \pm I_{bat} \quad (II.23)$$

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (II.24)$$

I_{pv} : Courant générés par le panneau photovoltaïque [A]

I_c : Courant qui traverse la capacité [A]

I_s : Courant de délestage [A]

I_{bat} : Courant de la batterie [A]

II.10. Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (MPPT) correspondent à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée. [23]

II.10.1. Méthode de poursuite du point de puissance maximale

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance. [24]

Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance sont :

- Méthodes de la dérivée de la puissance
- Méthodes à contre réaction de la tension
- Méthodes à contre réaction de courant

II.10.1.1. Méthode de la dérivée de la puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance P_{PV} obtenue directement de la caractéristique du (GPV). Le (MPP) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$

Le point de puissance maximale (MPP) est donné par la Figure suivante. [24]

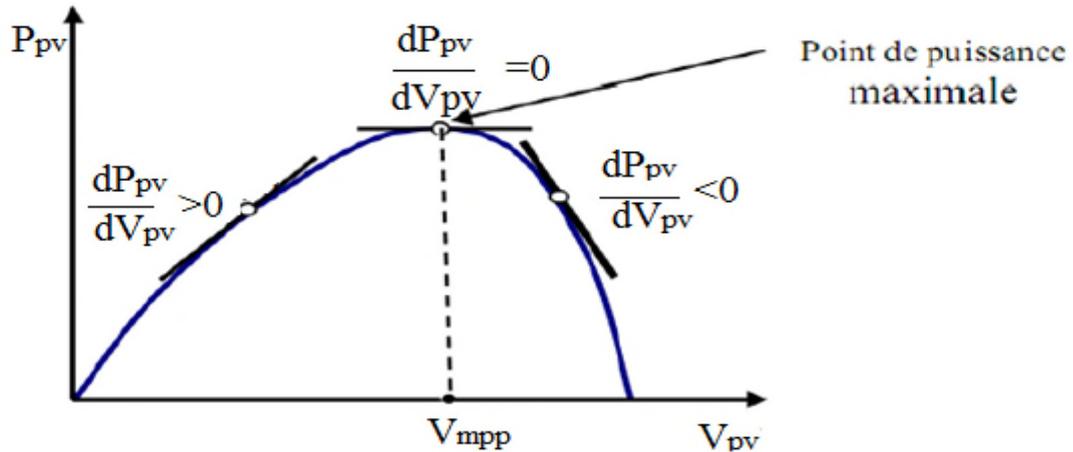


Figure II.15 : Caractéristique du point de puissance maximale

- **Méthode de la perturbation et l'observation (P&O)**

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.16), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , 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. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande. [25]

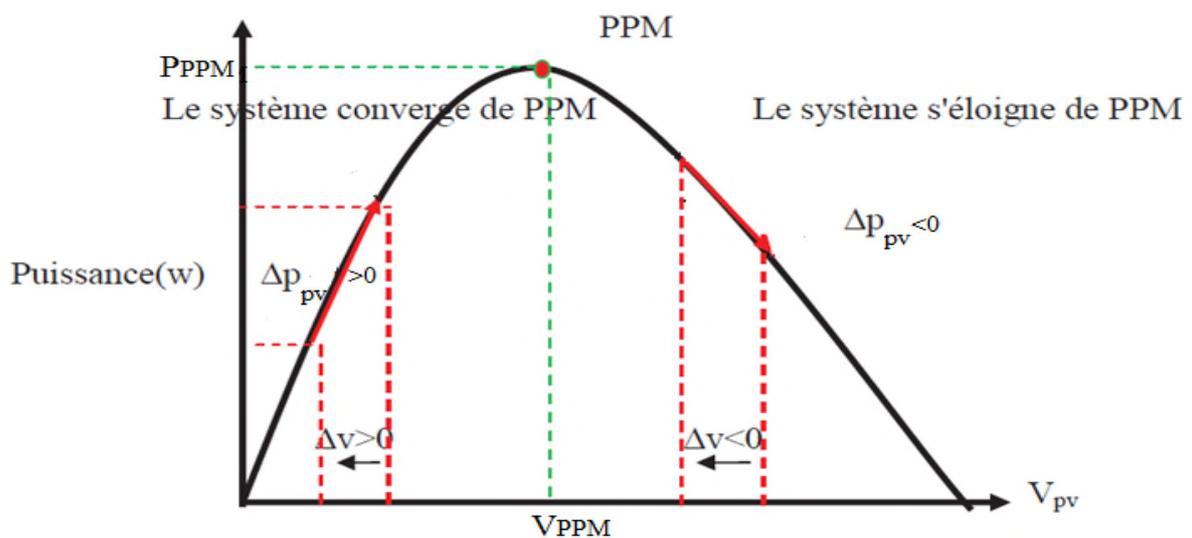


Figure II.16: Schéma de convergence vers le PPM par la méthode P & O.

La figure (II.17) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

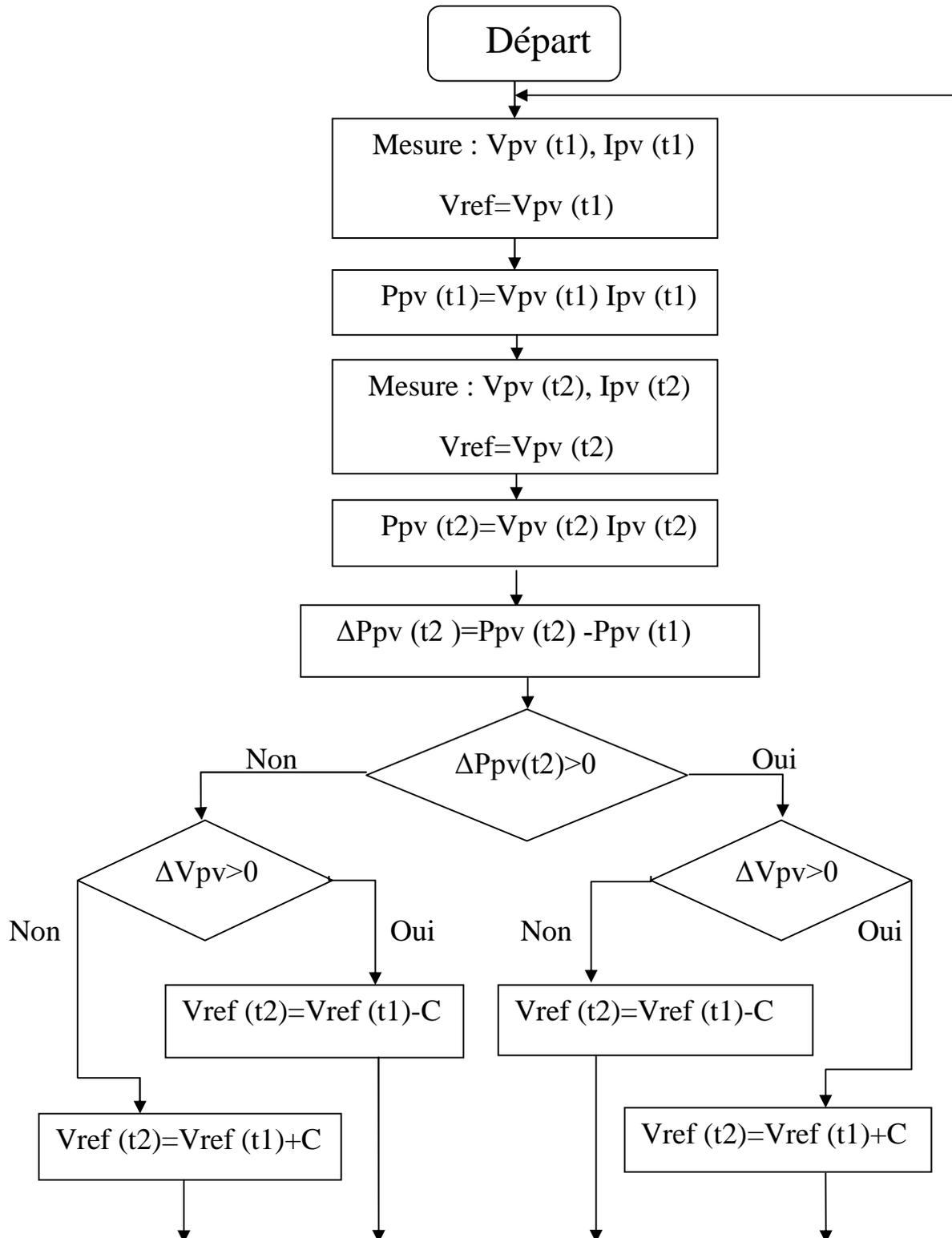


Figure II.17: Organigramme de l'algorithme MPPT (P&O). [3]

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. [25]

- Méthode par incrémentation de conductance

L'avantage de cet algorithme est la vitesse de recherche du point de puissance maximale quand les conditions atmosphériques changent rapidement ; la description de l'algorithme sera présentée par la suite.

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension.

L'algorithme par incrémentation de conductance (figure II.22) se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (\text{II.25})$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (\text{II.26})$$

Alors :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.27})$$

$\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$: représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque.

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$: représente le terme d'incrément de conductance. Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation(II.3) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM).la figure (II.19) montre le fonctionnement de la méthode par incrémentation de conductance

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0, \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM.} \quad (\text{II.28})$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.} \quad (II.29)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0, \text{ le point de fonctionnement est à droite du PPM.} \quad (II.30)$$

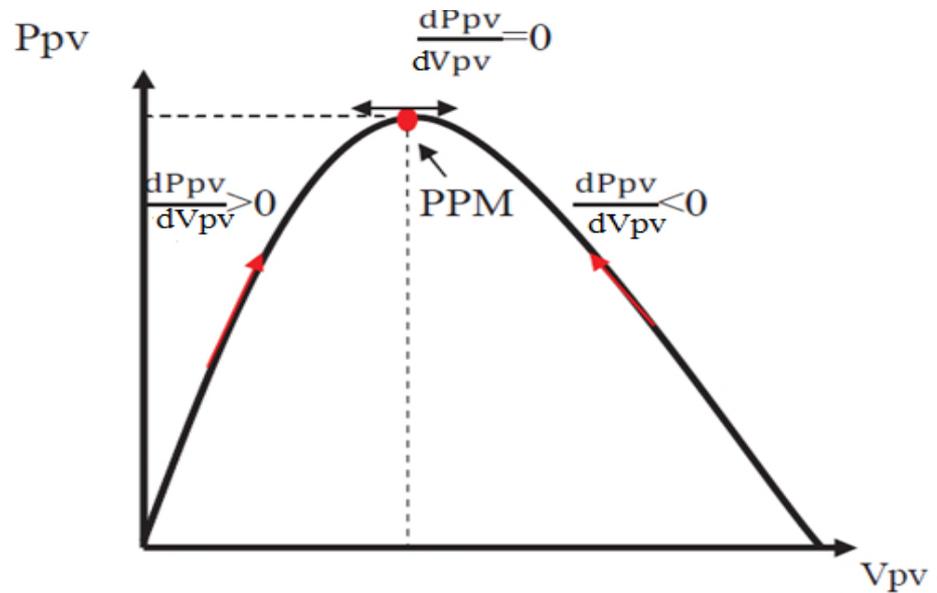


Figure. II.18: Incrémentation de Conductance

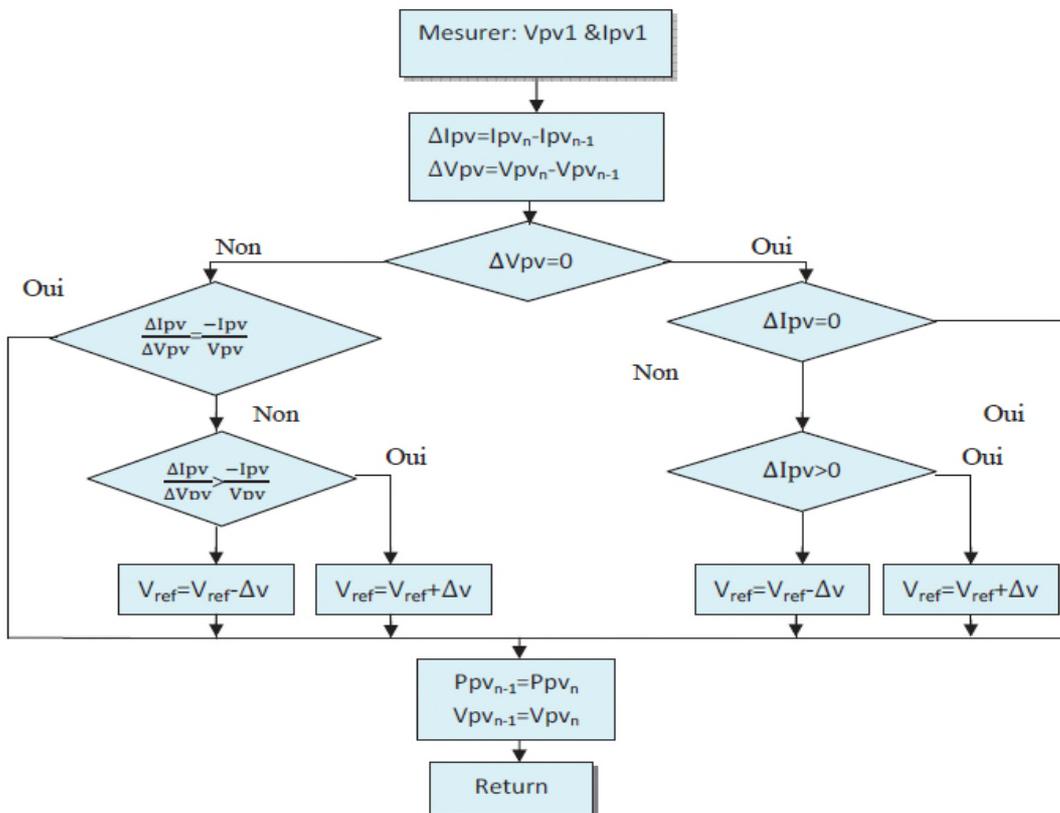


Figure II.19: Organigramme de l’algorithme incrémentation de conductance [26]

II.10.1.2. Méthodes à contre réaction de la tension

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure suivante.

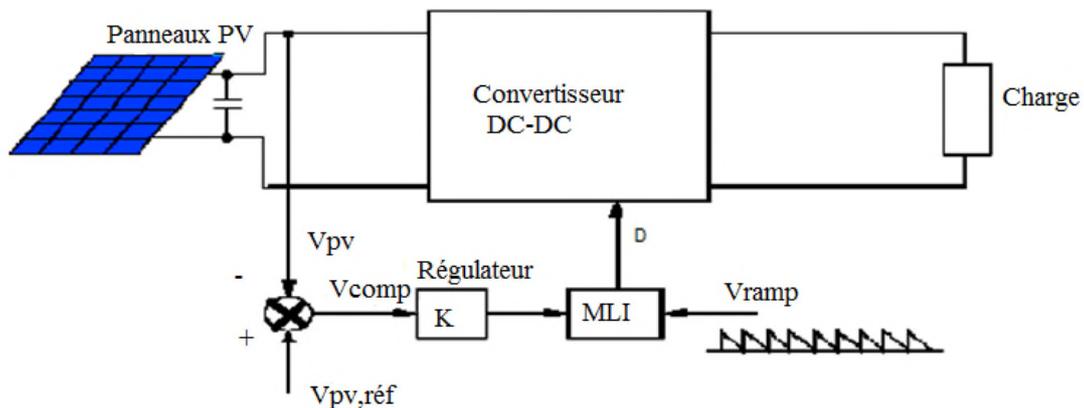


Figure II.20 : Méthode avec contre réaction de la tension [15]

Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

- Tension de référence fixe

Cette méthode est basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique du Convertisseur (DC-DC). Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales (figure II.20), relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température. A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est dérivée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures le long des périodes de l'année. [21]

Les inconvénients de cette configuration sont les mêmes que pour la méthode de connexion directe (générateur PV + charge de profil). C'est-à-dire, le système ne peut pas s'adapter aux conditions variables d'environnement, telles que l'irradiance et la température. Les avantages de cette technique c'est une technique simple, économique.

- Méthode MPPT avec mesure de la tension à vide du panneau

La tension à vide du panneau (V_{oc}) est mesurée en interrompant le fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence, en mémorisant la valeur mesurée, et puis

ajustant la tension de référence (V_{ref}) sur une certaine fonction de la tension du circuit ouvert qui a été expérimentalement déterminé pour être 76% de (V_{oc}).

Cette tension de référence est comparée à la tension de fonctionnement du panneau (V_{pv}) et le signal d'erreur résultant (V_{comp}) est employé comme entrée dans la commande MLI du convertisseur (DC-DC) (figure II.22).

Cette augmentation permet la commande de la tension de fonctionnement du fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la considération de facteurs importants comme l'ensoleillement et la température. En plus, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules sont aussi pris en compte. [21]

- **Méthode MPPT à tension de référence externe avec cellule pilote**

Pour éviter les inconvénients liés à l'interruption fréquente de l'exploitation du système, on propose l'utilisation d'une cellule pilote. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée photovoltaïques tension (V_{oc}) est constamment mesurée, elle fournit donc l'information implicite du reste des conditions de fonctionnement courantes du panneau. La tension (V_{oc}) de la cellule pilote est multipliée par un certain facteur constant pour être Comparée à la tension de référence de la boucle de contre réaction.

Puisque cette méthode emploie toujours un facteur fixe pour estimer la tension optimale (V_{mpp}) d'une valeur mesurée de (V_{oc}), Cette technique est fondée sur la connaissance des caractéristiques de la rangée photovoltaïque pour estimer le lieu du point de puissance maximale. [15]

II.10.1.3. Méthode avec contre réaction du courant

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de (I_{pv}) et (V_{pv}) a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment. [27]

-Référence en fonction du courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit du panneau solaire permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau. Le courant optimal est proportionnel au

courant de court circuit, cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.

La fonction $I_{mpp}=f(I_{cc})$ est pratiquement linéaire et elle est de forme $I_{mpp} = K \times I_{cc}$.

Mais généralement cette méthode à tension de référence fixe n'est pas applicable dans le cas de la contre réaction de courant à cause de la grande déviation du courant optimal pour différents ensoleillements et températures. [27]

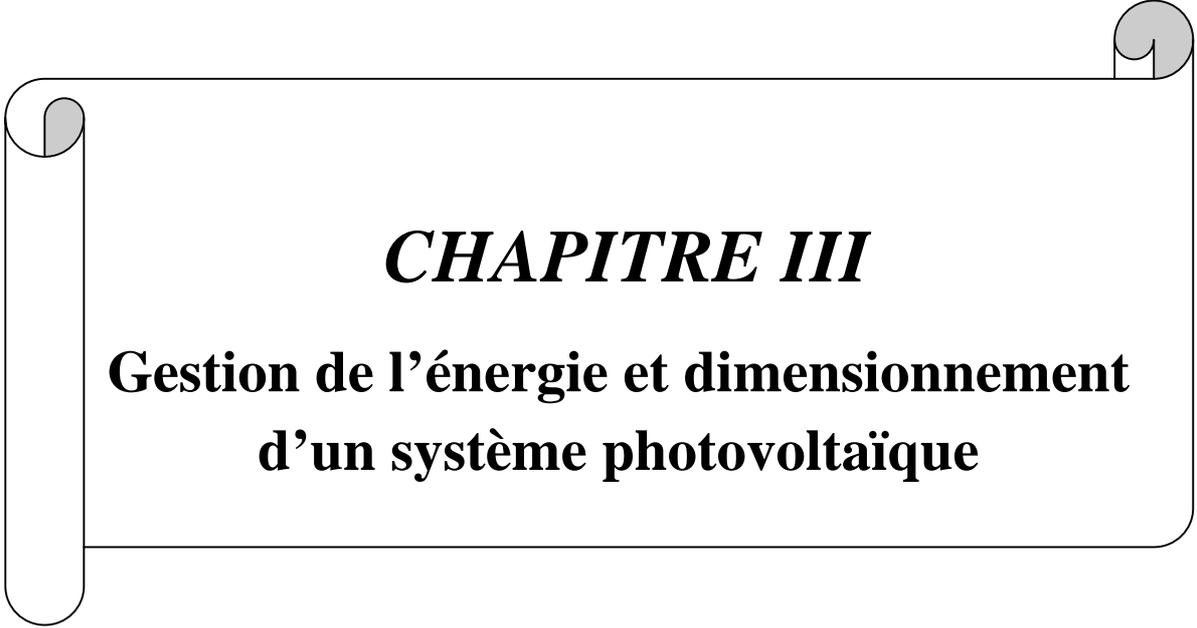
- Référence externe (Cellule pilote)

Dans cette méthode l'utilisation d'une cellule pilote comme source d'information de courant de court-circuit de l'ensemble des panneaux est impossible par le fait que court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire qui va fausser l'information générée par cette cellule et emmenés sa destruction rapide. [27]

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, des algorithmes de recherche de puissance maximum (MPPT pour Maximum Power Point Tracking) ont été décrit, puis un choix c'est porté sur la méthode perturbation et Observation.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the rolled-up ends, containing the chapter title and subtitle.

CHAPITRE III

**Gestion de l'énergie et dimensionnement
d'un système photovoltaïque**

Introduction

Le dimensionnement consiste à déterminer la taille et les caractéristiques des sous ensembles suivants: le panneau solaire approprié, les batteries appropriées, les systèmes d'adaptation de l'énergie à placer entre les étages de production, stockage et de consommation. 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.

III.1. L'architecture du système

Dans tout système électrique, les divers appareils qui le composent sont généralement raccordés à un réseau. Le type de réseau (continu ou alternatif) dépend de sa taille et de l'application choisie.

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 [28].

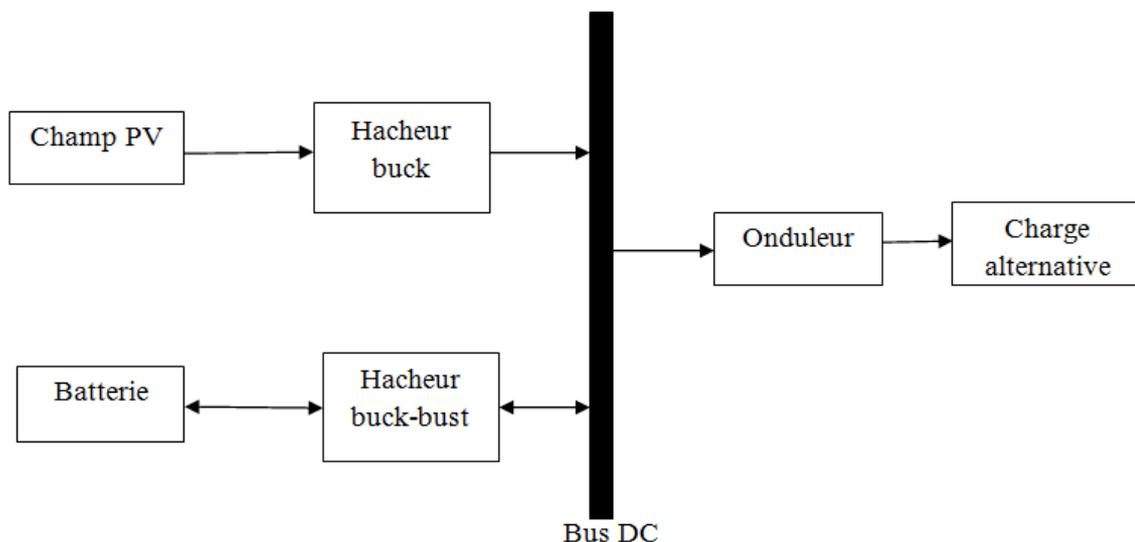


Figure III.1 : Schéma du raccordement des sources et consommateurs énergétiques.

III.2. Dimensionnement du système PV [29]

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. Il dépend :

- 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 :

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

III.2.1. Choix de la méthode de dimensionnement [29]

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système PV.

❖ La 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). [29]

❖ La 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 choisit en Algérie). [29]

❖ La méthode de la moyenne annuelle

Cette méthode est très proche de celle du mois le plus défavorable. Elle utilise elle aussi l'irradiation journalière [KWh/m².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. [29]

🚩 Remarque :

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

III.2.2. Evaluation de la consommation de la charge [29]

Pour évaluer l'énergie consommée par une charge il faut connaître deux choses essentielles :

- 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 :

$$E_{ch} = P_{ch} \times T_{ch} \quad [\text{Wh/j}] \quad (\text{III.1})$$

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

$$E_j = \sum(P_i \times T_i) [\text{Wh/j}] \quad (\text{III.2})$$

III.2.3. 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/m².j] ou en heures de plein ensoleillement (heures \times 1000W/m²). [29]

$$E_{sol} = N_{eq} \times 1000 \quad (\text{III.3})$$

N_{eq} : nombre d'heure [h/j]

❖ L'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. [29]

❖ L'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.

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

Tableau (III.1) : Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude [29]

Rappelons que la latitude de notre site est de : 36° d'après le tableau (III.2) l'inclinaison des panneaux est :

$$\alpha = \varphi + 10^\circ \quad \text{D'où} \quad \alpha = 46^\circ$$

III.2.4 Le 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) et de l'extension géographique du système. Le tableau suivant indique la tension adaptée au générateur PV. [29]

Puissance du champ PV	0-500 W _c	500 W _c -2 KW _c	2-10 KW _c	>10 KW _c
Puissance recommandée	12 VDC	24 VDC	48 VDC	>48VDC

Tableau(III.2) : les tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques en fonction de leurs puissances.

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

$$P_{PV} = \frac{E_j(wh/j)}{N_{eq}(h/j) \times C_p} \quad \text{(III.4)}$$

Le nombre de panneau photovoltaïque:

$$N_{pv} = \frac{P_{pv}}{P_{pv,u}} \quad (III.5)$$

Avec :

E_j : la 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 de perte des panneaux photovoltaïques.

❖ **Pour le branchement des modules en séries et en parallèles :**

On a:

$$N_s = \frac{V}{V_c} \quad (III.6)$$

$$N_p = \frac{N_{pv}}{N_s} \quad (III.7)$$

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.

III.2.5. Dimensionnement du stockage [4]

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 de quatre jours avec une profondeur de décharge de 60% pour des besoins journaliers de 2kWh. La capacité nominale des batteries est donnée par la relation suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_j [Wh/j] \times N_{ja} [j]}{P_D \times n_b \times U_{bat} [V]} \quad (III.8)$$

$$N_{bat} = \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \quad (III.9)$$

Avec :

C_{bat} : La capacité nominale des batteries [Ah] ;

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

E_j : Les besoins énergétiques journaliers [Wh] ;

N_{ja} : le nombre de jour d'autonomie ;

U_{bat} : la tension nominale des batteries [V] ;

n_b : le rendement énergétique des batteries ;

P_D : la profondeur de décharge des batteries.

III.2.6. Le choix de l'onduleur [5]

Le signal généré est une onde carrée, ou sinusoïdale. Le dimensionnement d'un onduleur ses puissances maximales de chaque équipement à connecter au courant alternatif. 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.

- **Tension d'entrée** : elle est égale à celle du bus continu ;
- **Puissance conseillée** : c'est la puissance nominale de l'onduleur (VA) définit 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 380Vsi 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.

$$P_n = \frac{P_{ch,m}}{n_{ond}} \quad (III.10)$$

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

III.2.7. 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. [30]

La chute de tension est donnée par la formule :

$$\Delta U = R \times I \quad (\text{III.11})$$

Et R est donné par la relation suivante :

$$R = \rho \times \frac{L}{S} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

- R : résistance du câble (Ohm)
- ΔU : chute de tension
- ρ : résistivité linéaire du conducteur constitutif du câble (Ohm $\times m$)
- I : intensité de courant (Ampère)
- S : section du câble (m²)
- L : longueur du câble (m)

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

III.3. 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, évaluée à 1966Wh et comprenant l'éclairage, les appareils électroménagers de faible consommation (réfrigérateur, TV et l'audiovisuel) pour une habitation d'un foyer F3 d'une famille de 4 personnes. Les composants du système et l'évaluation de leur consommation énergétique sont les suivants :

❖ 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

- Réfrigérateur (+2°C) armoire de 229l classe A : 70W, 10h/jour.

❖ Audio visuel

- Chaîne stéréo : 50W, 2h/jour.

- TV 42cm: 50W, 8h/jour.

❖ **Informatique**

- Pc portable : 30W, 3h/jour.

❖ **Autres**

-séchoir, fer à repasser, téléphone portable,...etc : 220W, 1h/j.

III.3.1. Profil de consommation

Pour rendre compte de l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil base 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 (III.2).

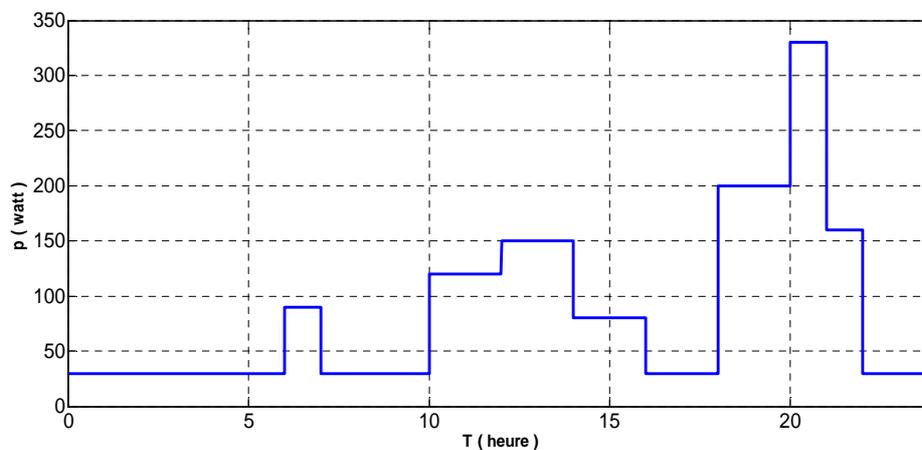


Figure III.2: profil de consommation

III.3.2. Calcul de la demande journalière d'énergie

Appareil à brancher	Nombre	Puissance (W)	Durée (h)	Demande énergétique
lampes fluorescente	04	15	4	240Wh/j
Lampes fluorescente	04	18	3	216Wh/j
Réfrigérateur	01	70	10	700 Wh/j
Chaine stéréo	01	50	2	100Wh/j
Pc portable	01	30	3	90Wh/j
Téléviseur	01	50	8	400Wh/j
Autres	1	220	1	220Wh/j
Total				1966Wh/j

Tableau(III.3) : Consommation journalière de la maison.

La consommation journalière de la charge en continu $(1966/0.95)=2070$ Wh/j

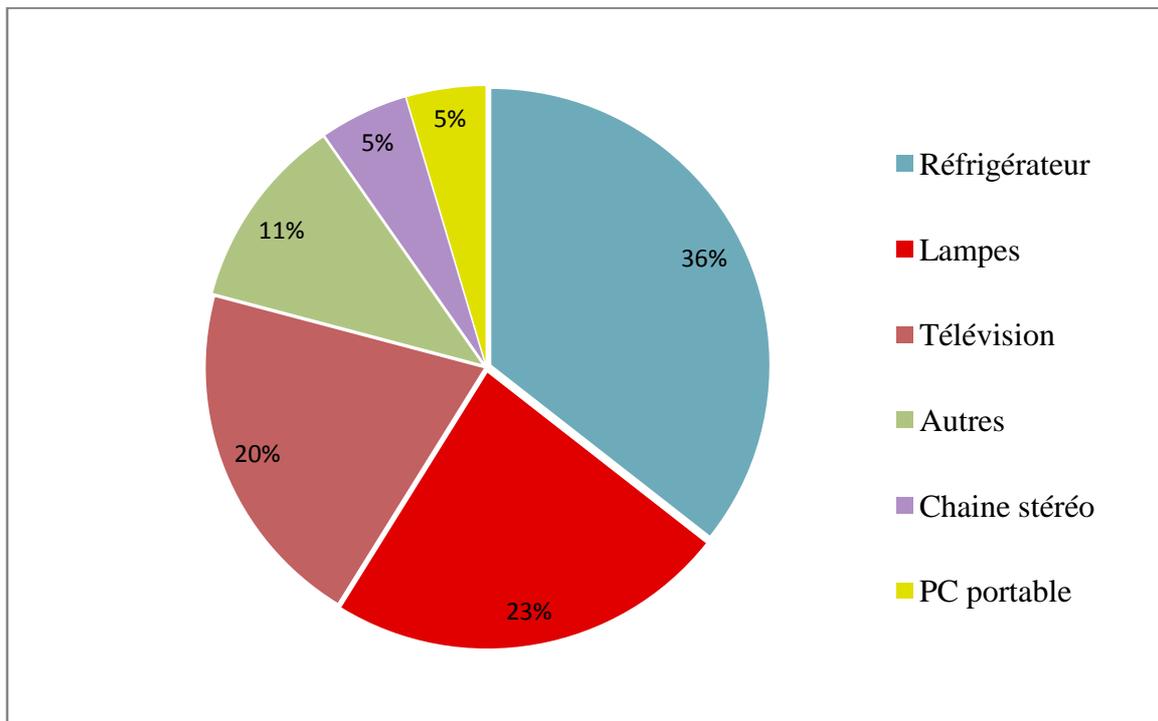


Figure III.3: La consommation journalière

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

Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable : E_{sol} [Wh/m ² .j]	2.2
Tension de la batterie : U_{bat} [V]	24V
nombre de jours d'autonomie : N_a [j]	4
Rendement électrique des batteries : n_b [%]	75
Rendement électrique de l'onduleur : n_{ond} [%]	95
Coefficient des pertes : C_p [%]	72
Profondeur de décharge des batteries : P_D	60
Puissance d'un module photovoltaïque : $P_{pv, u}$ [W]	110
Tension nominal d'un panneau photovoltaïque : V_c [V]	24

Tableau(III.4) : Caractéristique du système PV autonome.

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

Consommation journalière : E_j [Wh/j]	1966
Puissance du champ photovoltaïque : P_{pv} [W]	1306.82
Nombre des panneaux PV : N_{pv}	12
Nombre des panneaux en série : N_s	1
Nombre des panneaux en parallèles : N_p	12
Capacité de la batterie : C_{bat} [Ah]	766.66
Nombre des batteries : N_{bat}	3
Nombre des batteries en parallèles	3
Puissance maximale quand tous les récepteurs fonctionnent simultanément : $P_{ch, m}$ [W]	552
Puissance de l'onduleur : P_n [VA]	581.05

Tableau (III.5) : Résultats de calcul du dimensionnement de l'installation photovoltaïque.

Pour assurer la fourniture d'énergie électrique au système, les panneaux PV devront avoir une puissance crête de 1307W et des batteries de stockages de 24V (deux batteries en série de 12V d'une capacité de 260 Ah) d'une capacité de 780 Ah.

III.4. Gestion et conversion de l'énergie au sein du système

Dans les systèmes réels, la gestion de l'énergie produite et consommée par les différents composants au cours de leurs fonctionnements est généralement assurée par un composant central, auquel les appareils sont connectés via divers convertisseurs. Des algorithmes de gestion de l'énergie y sont implémentés permettant d'assurer l'autonomie du système.

La figure ci dessous montre le schéma synoptique pour le système de supervision de l'énergie photovoltaïque. En utilisant :

- Hacheur série contrôlé pour un fonctionnement à puissance maximale.
- Hacheur série-parallèle (buck-boost) pour contrôler l'énergie stocker ou extraite dans les batteries.
- Un onduleur pour alimenter la charge.
- Un superviseur qui permet d'actionner les interrupteurs S_1 , S_2 , S_3 et S_4 en fonction de la puissance produite et consommée.

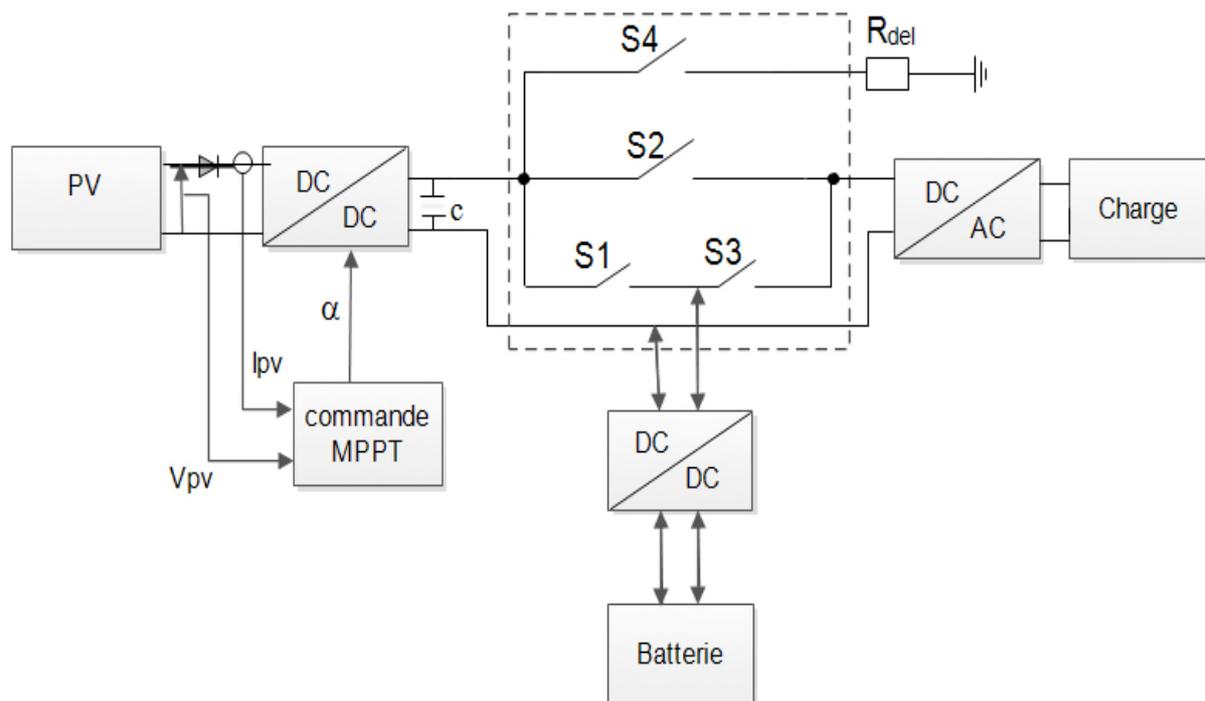


Figure III.4 : Système de supervision proposé pour la gestion d'énergie dans le système PV.

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

La puissance disponible P_{disp} est calculée selon l'équation (III.13). On compare entre la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques (P_{pv}) et la puissance consommée par la charge (P_{ch}). Si la puissance disponible est positive, notre charge est alimentée et les batteries sont mises en état de charge jusqu'à ce qu'elles atteignent un état de charge maximal (EDC_{max}) puis elles se déconnectent. En cas de surplus d'énergie, elle se dissipe à travers une charge de délestage (R_{del}). Si P_{disp} est négative, alors la charge est compensée par l'énergie de décharge des batteries jusqu'à ce qu'elles atteignent un état de charge minimal (EDC_{min}) puis elles se déconnectent. Dans le cas P_{disp} est nulle, alors la charge est alimentée directement par les PV.

$$P_{dis} = P_{PV} - P_{ch} \quad (III.13)$$

III.4.1. Extraction du maximum d'énergie

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

III.4.2. Gestion des batteries de stockages

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

Aussi un état de charge minimal EDC_{min} a été fixé à 30% de la capacité totale des batteries. La tension correspondante est d'environ 9.9V. De même un état de charge maximal EDC_{max} a été fixé à 90%. La tension correspondante est alors d'environ 14.1V.

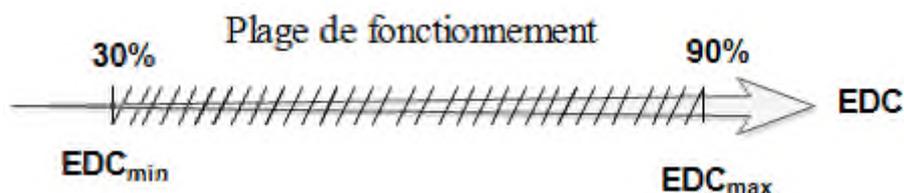


Figure III.5: plage de fonctionnement autorisé pour les batteries utilisées.

Nous présentons un tableau qui nous permet d'analyser et d'étudier les différents modes qu'on puisse distinguer lors du fonctionnement du système présenté sur la figure (III.4).

Inter / Mode	S1	S2	S3	S4
M1	On	On	off	Off
M2	Off	On	on	Off
M3	Off	Off	on	Off
M4	Off	On	off	Off
M5	Off	On	off	On
M6	On	Off	off	Off
M7	Off	Off	off	Off
M8	Off	Off	off	On

Tableau(III.6) : Les différents modes de fonctionnement.

➤ **Présentation des différents modes :**

- **Mode1(M1) :** Dans ce mode, la puissance photovoltaïque produite est supérieure par rapport à la puissance de charge ($P_{pv} > P_{ch}$), le surplus d'énergie est stocké dans les batteries. Cette situation se produit généralement quand l'ensoleillement est élevé et la charge est faible.
- **Mode2(M2) :** dans ce mode, la puissance photovoltaïque est insuffisante par rapport à la puissance de charge, d'où on fait appel à la compensation par batterie ($P_{ch} = P_{pv} + P_{batt}$).
- **Mode3(M3) :** La puissance photovoltaïque est nulle ($P_{pv} = 0$), alors la charge est alimentée par les batteries.
- **Mode4(M4) :** Ici nous avons la puissance photovoltaïque est égale à la puissance de la charge ($P_{pv} = P_{ch}$), donc la charge est alimentée par la puissance PV et les batteries sont déconnectées.
- **Mode5(M5) :** Dans ce mode, la puissance photovoltaïque produite est supérieure par rapport à la puissance de charge et les batteries sont pleinement chargées, le surplus d'énergie est dissipée dans la résistance de délestage ($P_{dél} > 0$).
- **Mode6(M6) :** la puissance produite par les panneaux photovoltaïque est insuffisante pour l'alimentation de la charge et les batteries sont déchargées alors on recharge les batteries.
- **Mode7(M7) :** la puissance photovoltaïque est nulle ($P_{pv} = 0$), les batteries sont déchargées donc il n'y a pas d'énergie alors la charge est déconnectée ($P_{ch} = 0$).
- **Mode8(M8) :** la charge est déconnectée ($P_{ch} = 0$), les batteries sont pleinement chargées donc la puissance produite par les PV est parcourue dans la résistance de délestage ($P_{dél} > 0$).

A partir du modèle de gestion d'énergie présenté sur la figure (III.4). On peut déterminer les équations logiques de: charge / décharge de la batterie, délestage et l'équation de la charge en fonction des interrupteurs de commande :

❖ **Puissance de charge de la batterie :**

$$P'_{batt,ch} = S_1 \cdot S_2 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4 + S_1 \cdot \bar{S}_2 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4 = S_1 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4 \cdot (S_2 + \bar{S}_2) = S_1 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4$$

❖ Puissance de décharge de la batterie :

$$\begin{aligned}
 p'_{\text{batt,déch}} &= \bar{S}_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4 + \bar{S}_1 \cdot \bar{S}_2 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4 \\
 &= \bar{S}_1 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4 \cdot (S_2 + \bar{S}_2) = \bar{S}_1 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4
 \end{aligned}$$

❖ Puissance de charge et décharge de la batterie :

$$p'_{\text{batt}} = S_1 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4 + \bar{S}_1 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4 = \bar{S}_4 (S_1 \cdot \bar{S}_3 + \bar{S}_1 \cdot S_3) = \bar{S}_4 (S_1 \oplus S_3)$$

❖ Puissance de la charge de délestage :

$$p_{\text{dél}} = \bar{S}_1 \cdot \bar{S}_3 \cdot S_4$$

❖ Puissance de la charge :

$$\begin{aligned}
 p_{\text{charge}} &= S_1 \cdot S_2 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4 + \bar{S}_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4 + \bar{S}_1 \cdot \bar{S}_2 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4 + \bar{S}_1 \cdot S_2 \cdot \bar{S}_3 \cdot S_4 + \bar{S}_1 \cdot S_2 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4 \\
 p_{\text{ch}} &= \bar{S}_1 \cdot S_3 \cdot \bar{S}_4 + S_2 \cdot \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_4 + \bar{S}_1 \cdot S_2 \cdot \bar{S}_3 \cdot S_4
 \end{aligned}$$

Voilà le circuit logique qui représente les équations de puissance.

III.4.3. Organigramme de la gestion des puissances :

Nous présentons ici l'algorithme du système complet.

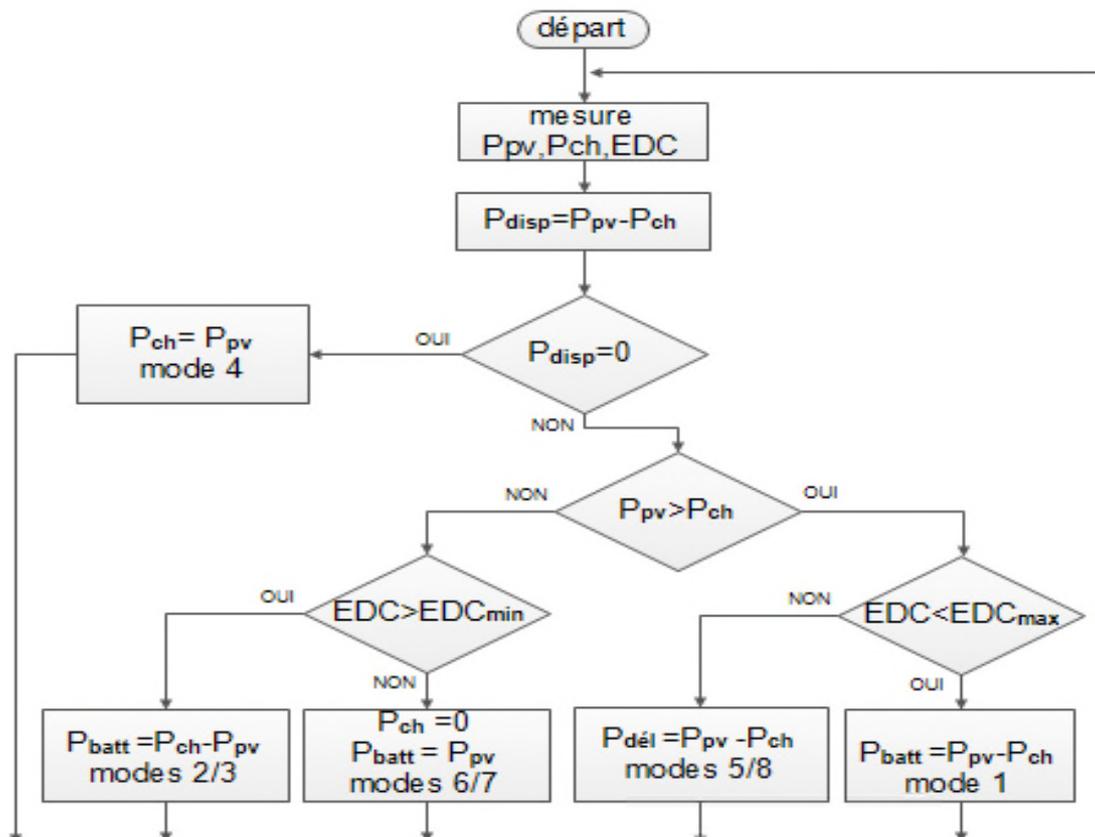


Figure III.6 : Algorithmes de gestion d'énergie.

Conclusion

Dans ce chapitre, le dimensionnement de l'installation photovoltaïque à été présenté, il constitue une étape cruciale lors de la mise en place d'un tel système. Pour assurer la fourniture d'énergie électrique suivant notre profil de charge, les panneaux PV devront avoir une puissance crête de 1307 W et les batteries de stockages de tension 24V et de capacité 780Ah.

Nous avons ensuite développé un algorithme de gestion d'énergie qui permet de vérifier à chaque instant l'état de charge et de décharge des batteries, la puissance produite et la puissance consommée afin de contrôler cette énergie par un ensemble d'interrupteurs qui gère l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques.



CHAPITRE IV
Simulation et résultat

Introduction

Les différents composants de l'installation photovoltaïque ont été déjà modélisés dans les chapitres précédant. Le panneau photovoltaïque sera simulé avec un algorithme d'optimisation (PO) pour l'extraction du point de puissance maximale (MPPT). Ensuite, il sera intégrer afin d'obtenir le système complet de l'installation.

Après avoir présenté l'algorithme de gestion du système photovoltaïque, nous l'avons implanté ce dernier dans le système globale puis nous l'avons simulé sous l'environnement Matlab/Simulink. Différentes conditions ont été simulées pour permettre de retrouver les différents modes de fonctionnement possible auxquelles nous pouvant être confrontés.

IV.1.Simulation du système globale

Le système photovoltaïque autonome est composé de 12 panneaux photovoltaïques de 110W, de 6 batteries de stockage de 12V, 260Ah et d'une charge représentant une maison de consommation journalière de 2070Wh/j. Différentes simulations sont effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC, les batteries et la charge) sont modélisées par des blocs séparés puis reliées entre eux d'une manière cohérente. Le point de puissance maximale est contrôlé par la méthode PO. La tension aux bornes du bus continu est maintenue constante avec un régulateur PI à une valeur de référence de 24V.

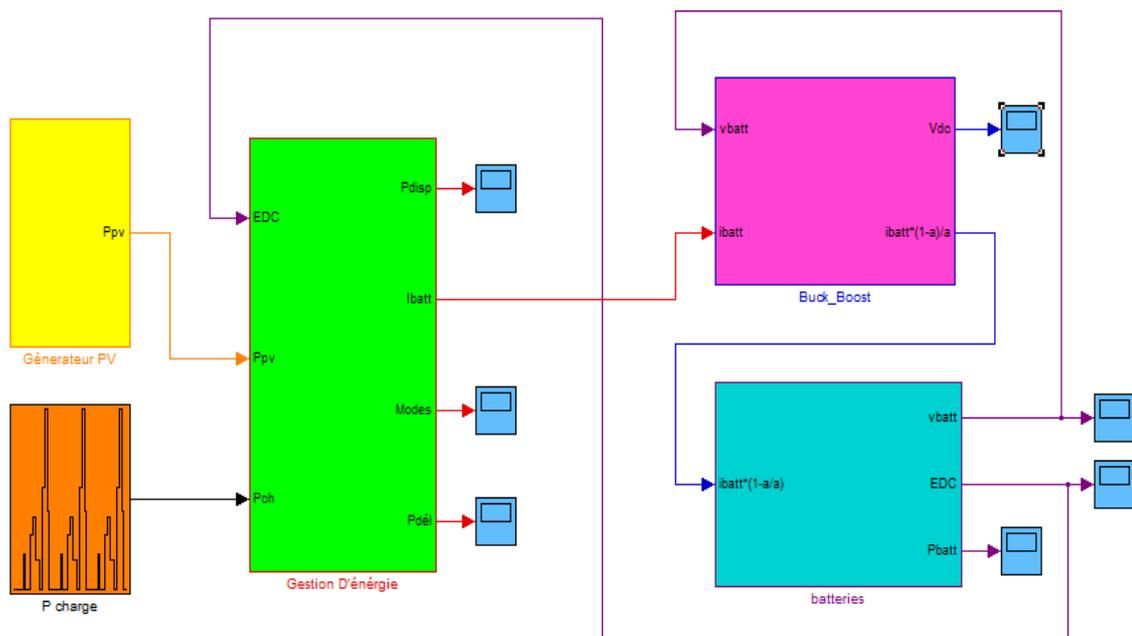


Figure IV.1 : Schéma MATLAB/SIMULINK du système global

Les figures (IV.2-IV.4) présentent le courant et la tension photovoltaïque (V_{pv}) et la puissance du générateur photovoltaïque (P_{pv}) avec la méthode de control MPPT (perturbation et observation (P&O) pour un fonctionnement dans les conditions STC. On peut voir que la tension et le courant correspondent à leurs valeurs optimales respectivement de 35V et 37.8A donc la puissance est maximale et égale à 1320W.

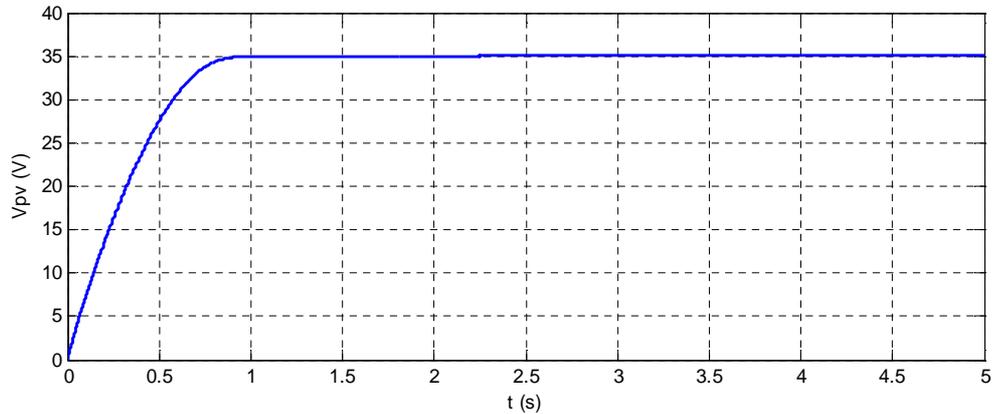


Figure IV.2 : Tension du générateur photovoltaïque.

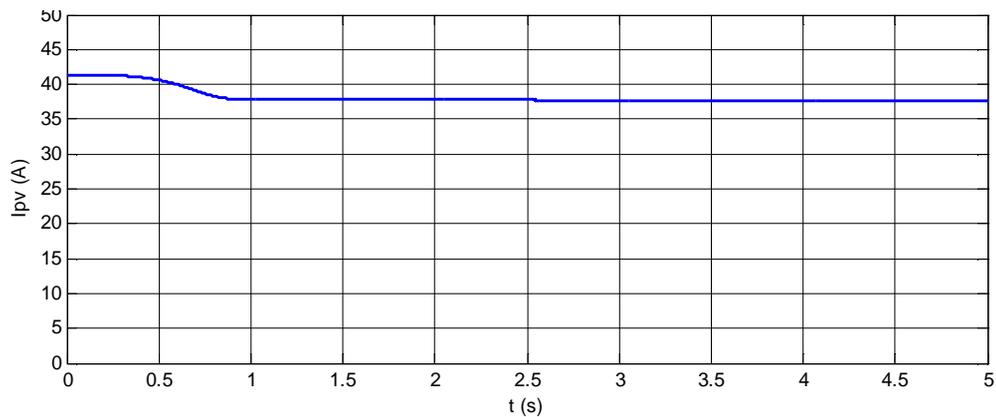


Figure IV.3 : Courant du générateur photovoltaïque.

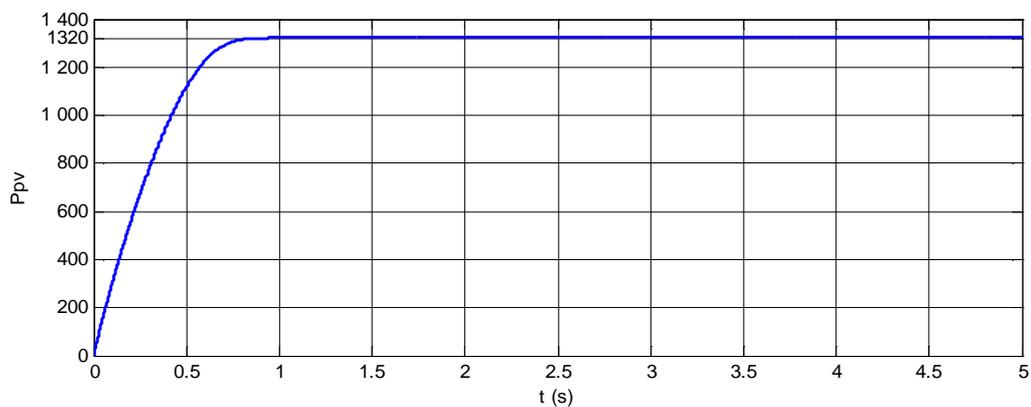


Figure IV.4 : Puissance du générateur photovoltaïque.

Nous avons procédé à la simulation du système globale pendant 48s qui correspond réellement à 48h. 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 (d'été et d'hiver). Le générateur photovoltaïque a été optimisé suivant l'algorithme MPPT de type PO.

IV.1.1. Résultats de simulation pour deux journées d'été

Afin de visualiser les différents modes qui peuvent apparaître pendant l'été, on fixe les paramètres suivants :

- L'ensoleillement G (750W/m^2 et 740W/m^2).
- L'état de charge initial des batteries 50%.

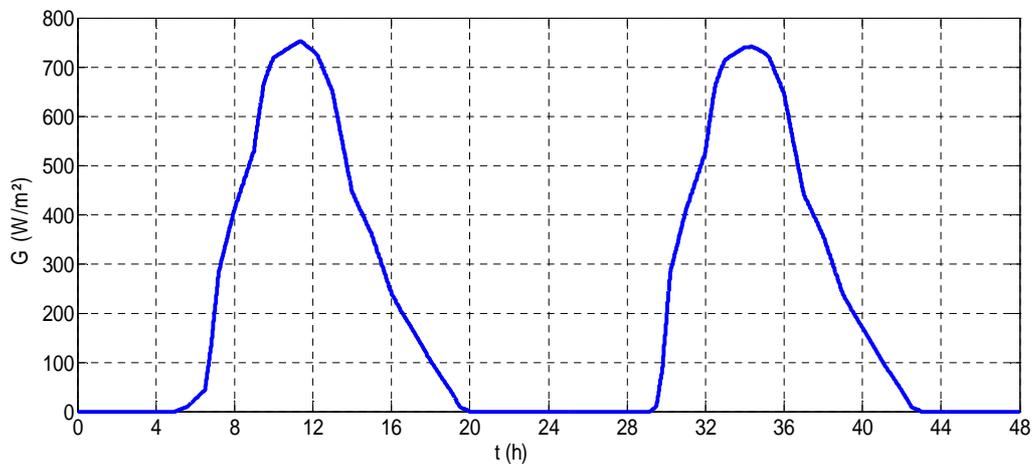


Figure IV.5 : L'ensoleillement de deux journées d'été.

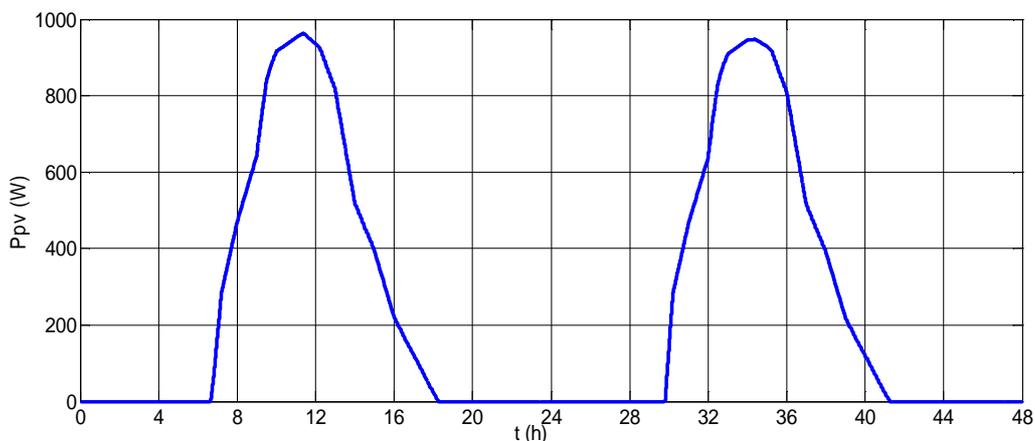


Figure IV.6 : Puissance fournie par le générateur photovoltaïque

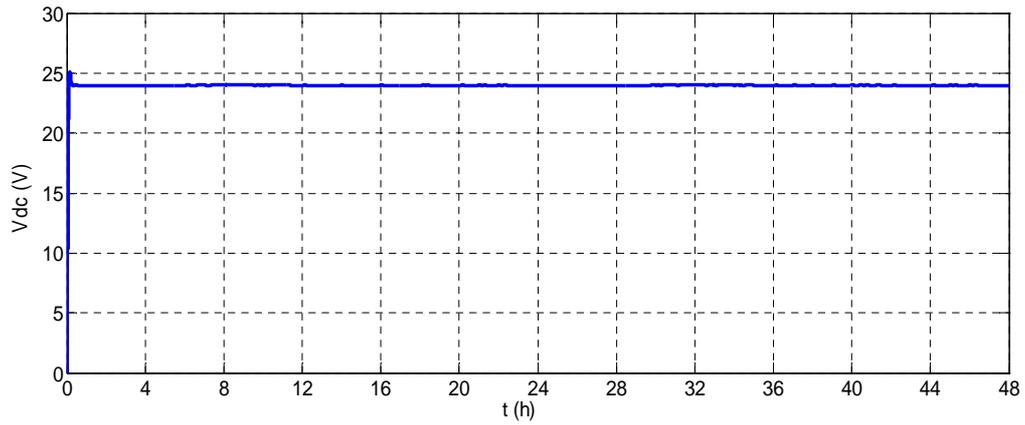


Figure IV.7 : Tension de bus continu.

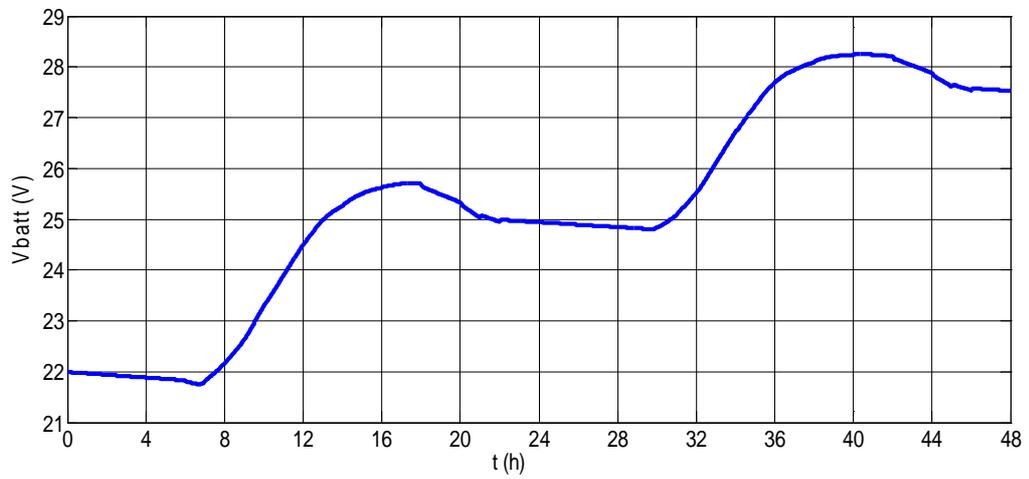


Figure IV.8 : Tension des batteries

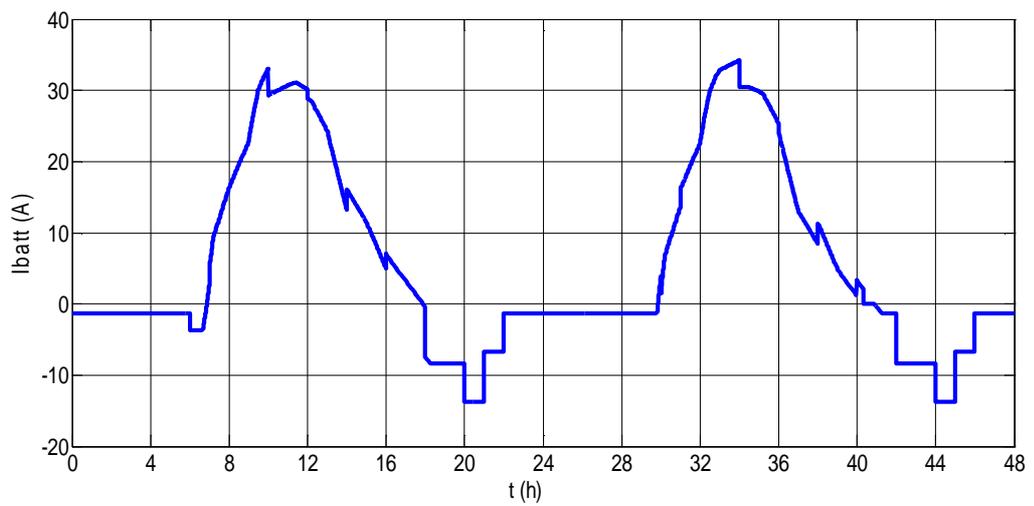


Figure IV.9: Courant des batteries

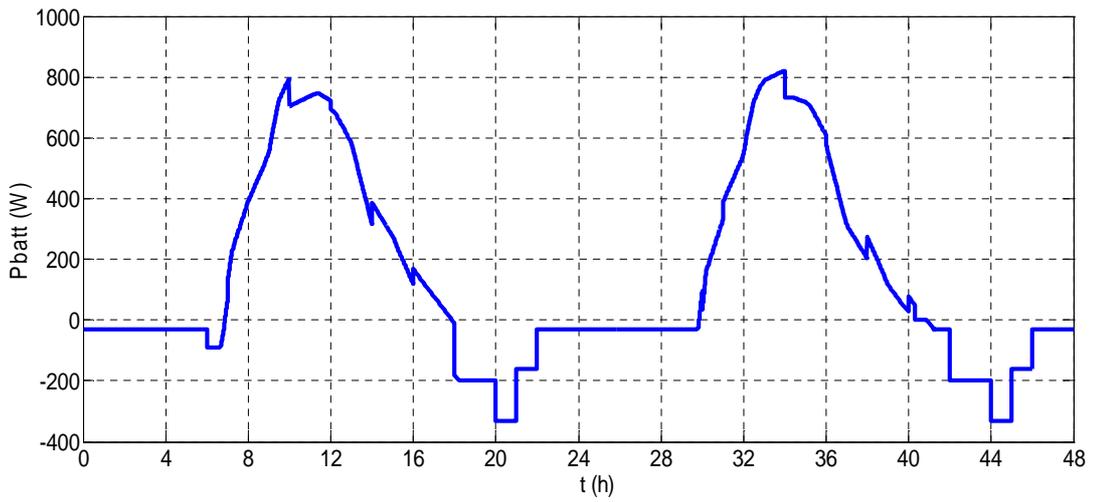


Figure IV.10: Puissance des batteries

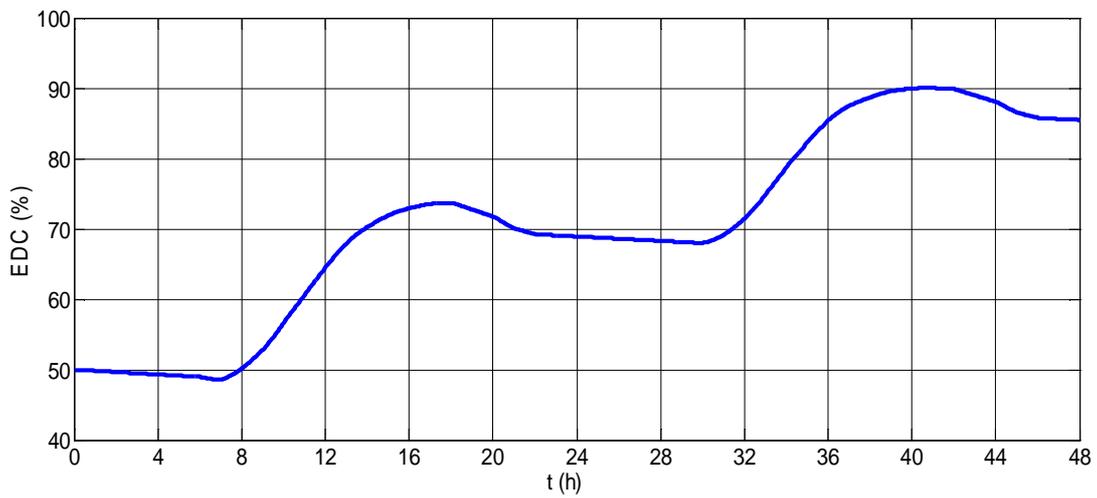


Figure IV.11 : Etat de charge de la batterie (EDC)

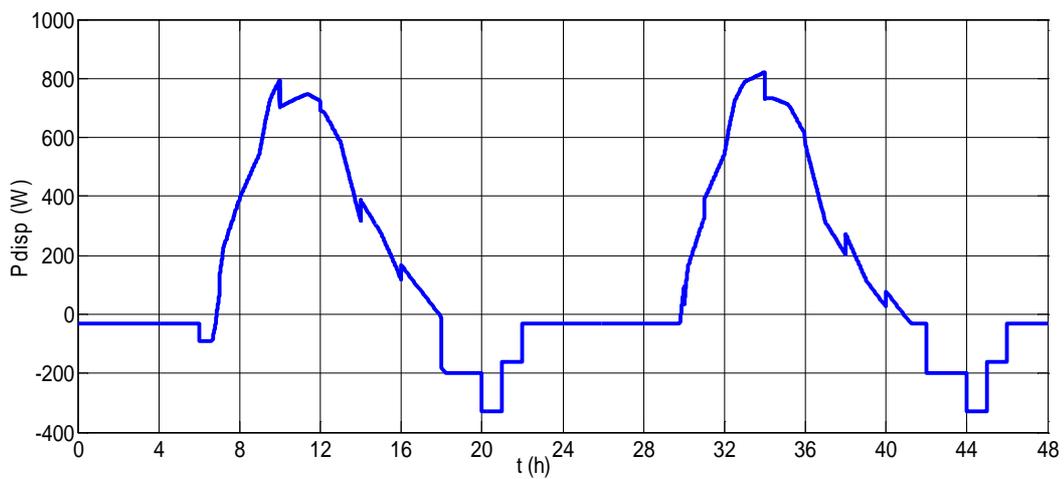


Figure IV.12 : Allure de la puissance disponible

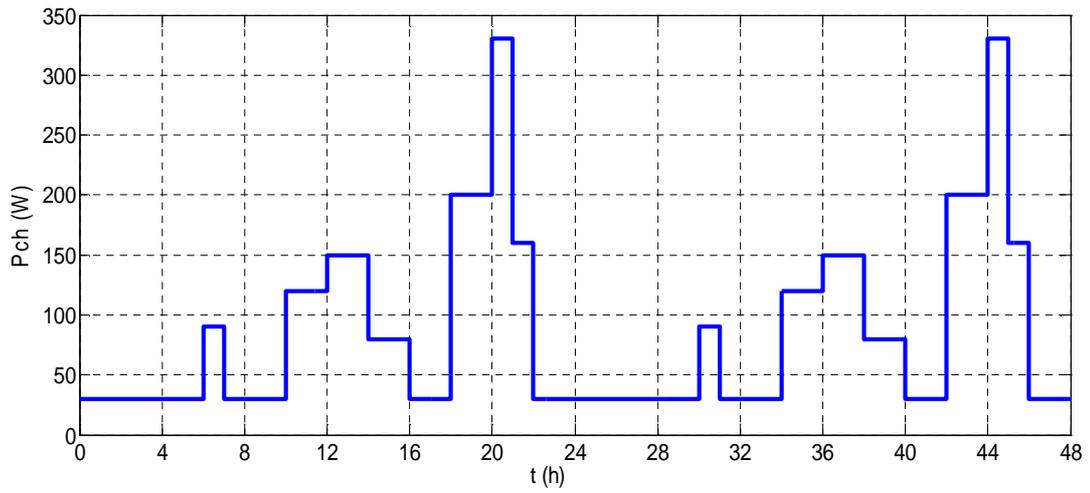


Figure IV.13 : Allure de la puissance de charge

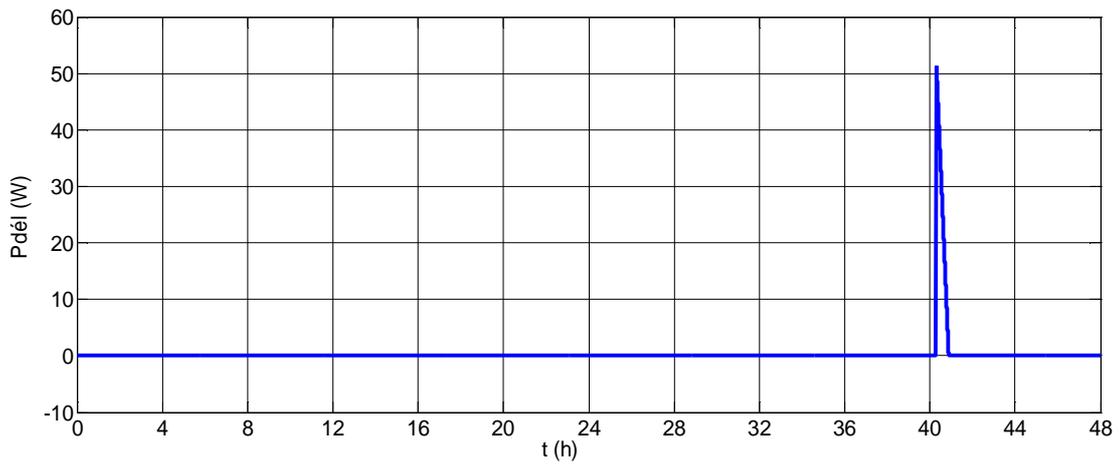
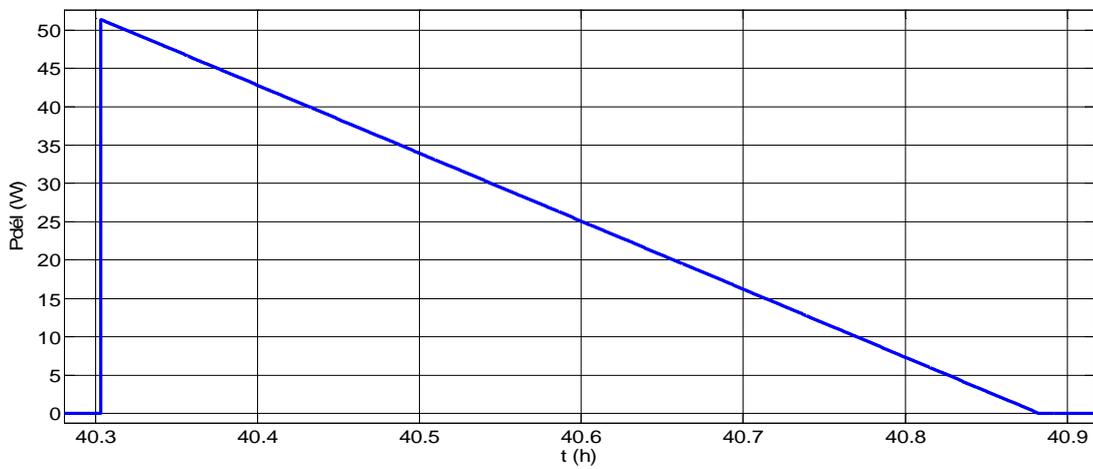


Figure IV.14 : Puissance de délestage.



. Figure IV.15 : Zoom de la puissance de délestage

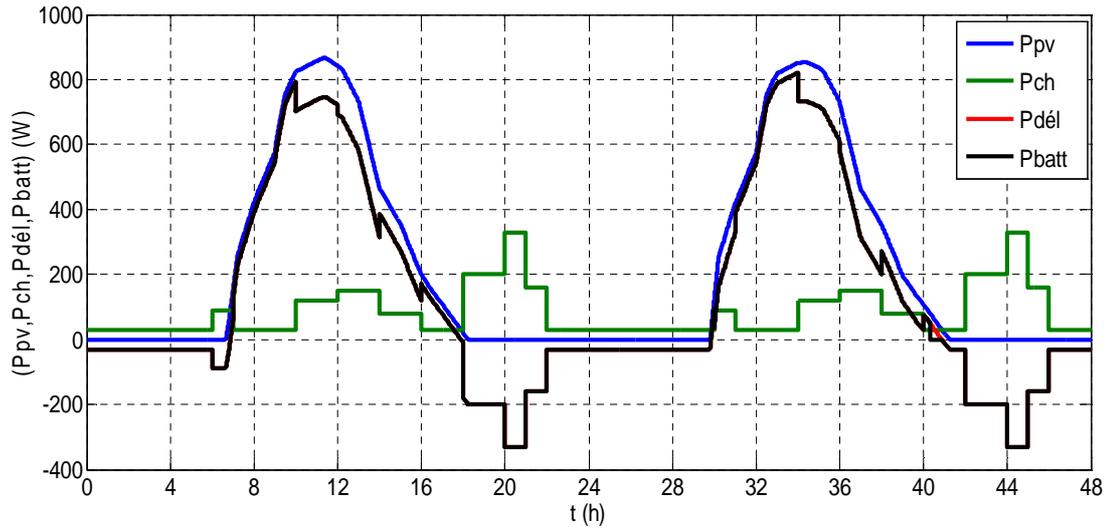


Figure IV.16 : Allures des puissances (photovoltaïque, charge, délestage, batteries)

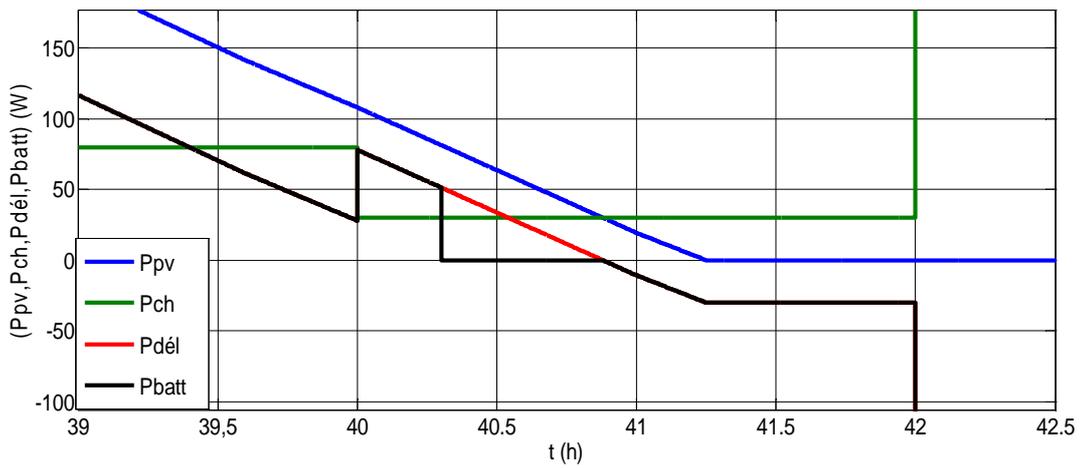


Figure IV.17 : Zoom sur l'allure des puissances

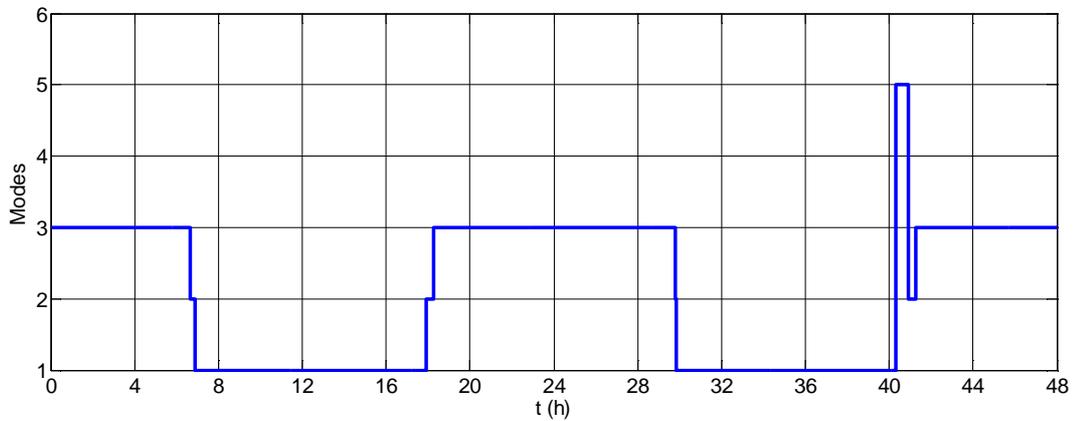


Figure IV.18 : Les modes de fonctionnement.

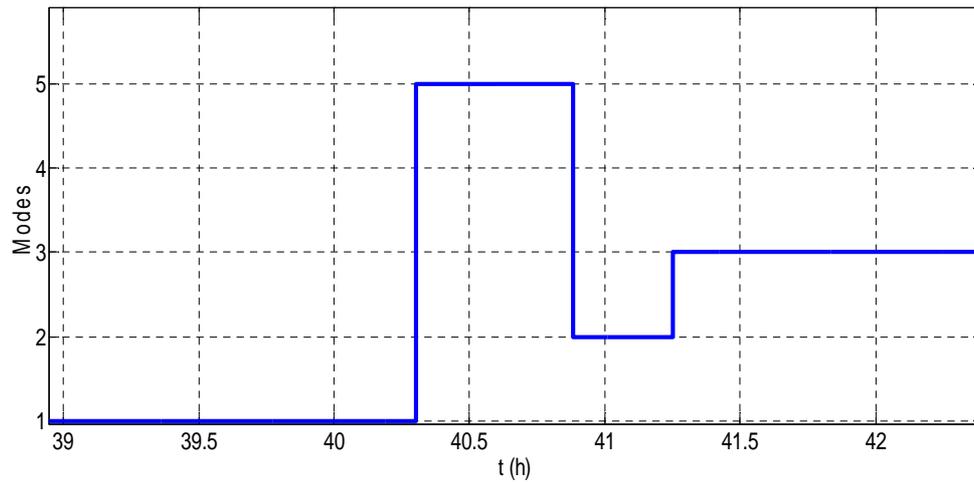


Figure IV.19 : Zoom du mode 5

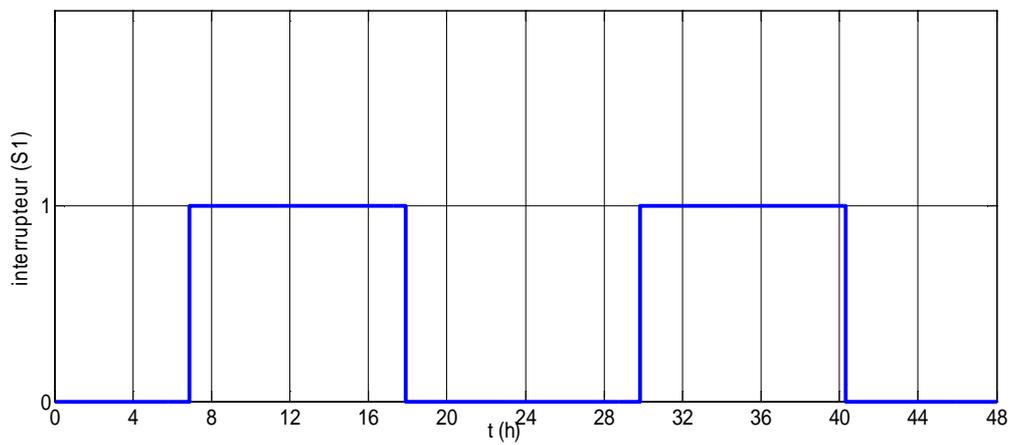


Figure IV.20 : Fonctionnement de l'interrupteur (S1)

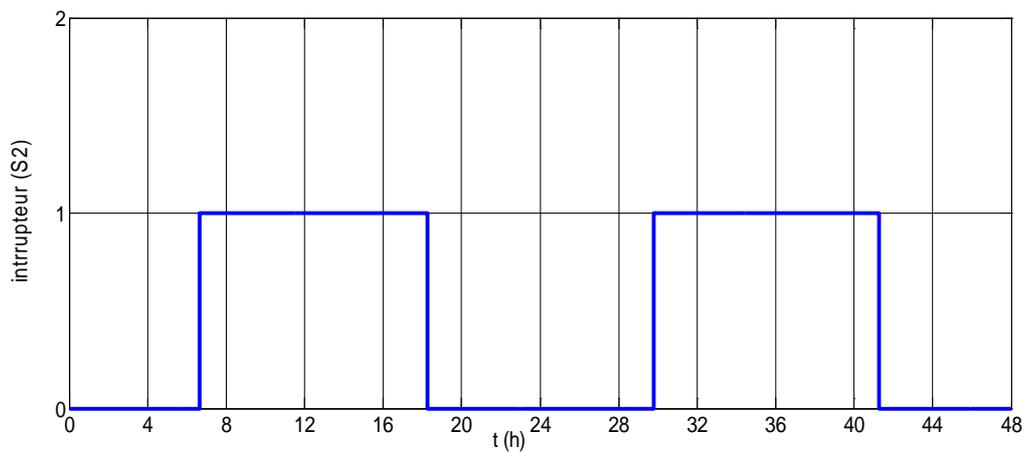


Figure IV.21 : Fonctionnement de l'interrupteur (S2)

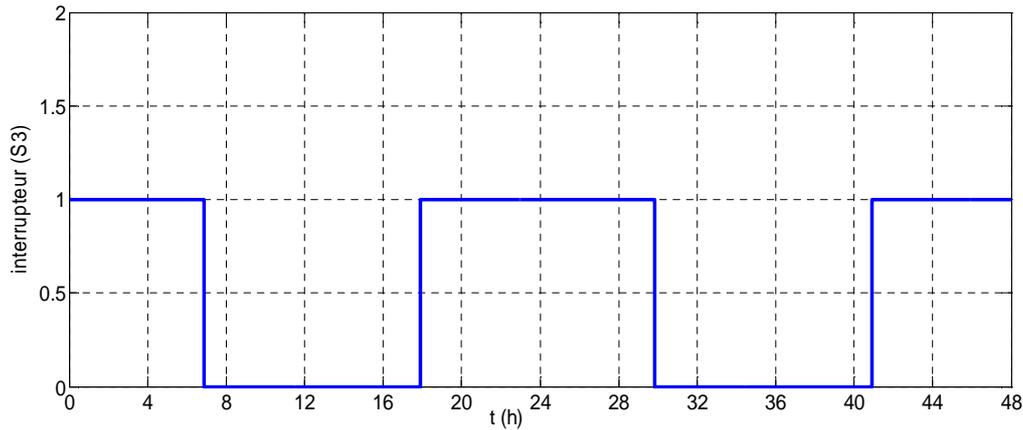


Figure IV.22 : Fonctionnement de l'interrupteur (S3)

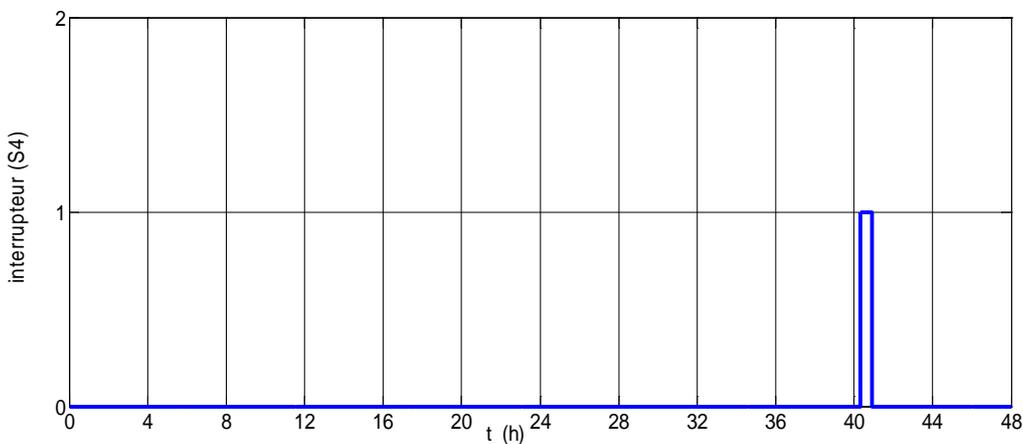


Figure IV.23 : Fonctionnement de l'interrupteur (S4)

Les figures(IV.5), (IV.6) et (IV.7) représentent respectivement l'ensoleillement, l'allure de la puissance maximale extraite des panneaux photovoltaïques, et la tension de la tension du bus continu.

Les figures (IV.8-9-10-11), montrent l'évolution de la tension, du courant et de la puissance de batterie ainsi que son état de charge. Les batteries ont un état de charge initial de 50%. Pendant la nuit les batteries se décharge et elles se chargent le jour, l'état de charge de la batterie varie entre 48.5% et 90% ou les batteries sont complètement chargées, de $t=40h18mn$ à $t=40h52mn$ elles se déconnectent. La tension de la batterie varie entre 21.75V et 28.25V.

Lorsque la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque est supérieure à la puissance de charge, les batteries se chargent. Durant les périodes de production insuffisante, les batteries interrompent leurs cycles de charge et fournissent le supplément

d'énergie, elles complètent l'énergie exigée par la charge. La tension du bus continu est montrée sur la figure(IV.7), elle est bien régulée à sa valeur de référence qui est de 24V même lors de variation des conditions environnementales et de la charge.

La figure (IV.12) représente la puissance disponible qui correspond à la différence entre la puissance photovoltaïque et celle de la charge. La figure (IV.13) représente la puissance de charge et la figure (IV.14) correspond à l'allure de la puissance de délestage qui existe seulement si la puissance générée par le système photovoltaïque est supérieure à celle demandée par la charge et l'état de charge des batteries est maximal.

Les figures (IV.16), (IV.18) et (IV.20-21-22-23) présentent respectivement, la superposition des différentes puissances (P_{pv} , P_{ch} , P_{dis} , P_{batt}), les différents modes qui interviennent durant les journées d'été et les instants de fonctionnement des différents interrupteurs (S1, S2, S3, S4).

➤ **Synthèse sur le fonctionnement par phase du système photovoltaïque avec l'algorithme de gestion**

D'après la figure (IV.16) des puissances représentées on déduit les différentes phases :

- **Phase1 : $t \in ([00h,6h39mn],[18h15mn,29h48mn],[41h15mn,48h])$**

La puissance produite par les panneaux photovoltaïque est nulle et $EDC > EDC_{min}$ alors la charge est alimentée par les batteries (fonctionnement du mode 3).

- **Phase2 : $t \in ([6h39mn,6h52mn],[17h54mn,18h15mn],[29h48mn,29h51mn],[40h53mn, 41h15mn])$**

La puissance photovoltaïque est insuffisante pour l'alimentation de la charge et $EDC > EDC_{min}$, dans ce cas les batteries vont se décharger afin de satisfaire la charge (compensation, mode 2).

- **Phase3 : $t \in ([6h52mn,17h54mn],[29h51mn,40h30mn])$:**

Cette situation présente le cas où la puissance PV est supérieure à la puissance demandée et $EDC < EDC_{max}$ alors les batteries se chargent (mode1).

- **Phase4 : $t \in [40h18mn,40h52mn]$:**

Les batteries sont pleinement chargées ($EDC = EDC_{max}$), la puissance PV est supérieure à la demande de la charge, donc le surplus d'énergie est dirigée vers une charge dérivative (délestage, mode5).

Les figures(IV.20), (IV.21), (IV.22) et (IV.23) montrent les différents instants de fonctionnements (ouvert (0) ou fermé (1)) des interrupteurs, on peut remarquer que les quatre interrupteurs fonctionnent à des instant différents.

- **Interrupteur (S1) :** se ferme dans l'intervalle du temps $t \in ([6h52mn, 17h54], [29h48mn, 40h18mn])$.
- **Interrupteur (S2) :** se ferme dans l'intervalle du temps $t \in ([6h39mn, 18h15mn], [29h48mn, 41h15mn])$.
- **Interrupteur (S3) :** se ferme dans l'intervalle $t \in ([00h, 6h52mn], [17h54mn, 29h51mn], [40h53mn, 48h])$.
- **Interrupteur (S4) :** se ferme dans l'intervalle $t \in [40h18mn, 40h52mn]$.

IV.1.2. Résultats de simulation pour deux journées d'hiver :

Afin de visualiser les différents modes qui peuvent apparaître pendant l'été, on fixe les paramètres suivants :

- L'ensoleillement G ($160W/m^2$ et $425W/m^2$).
- L'état de charge initial des batteries 43%.

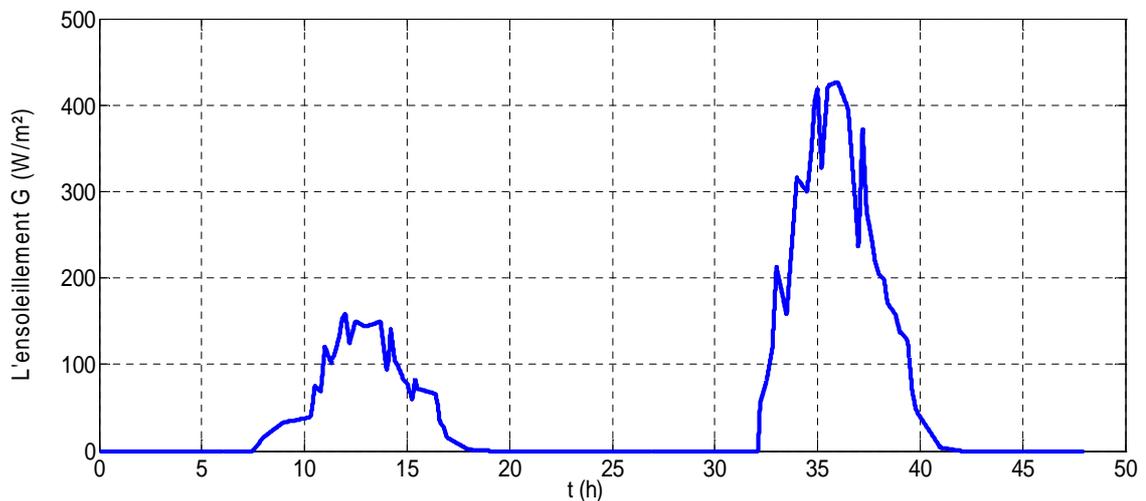


Figure IV.24:L'ensoleillement de deux journées d'hiver

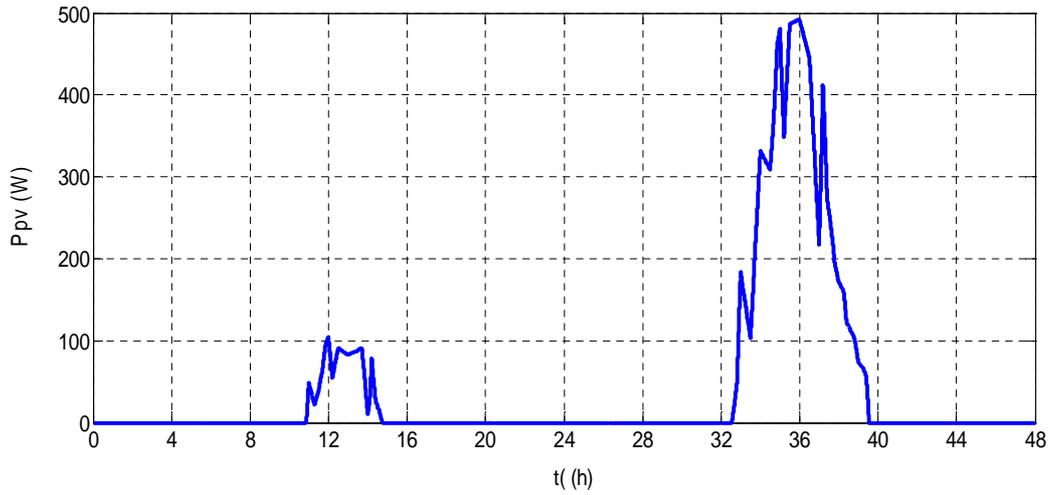


Figure IV.25 : Puissance fournie par le générateur photovoltaïque

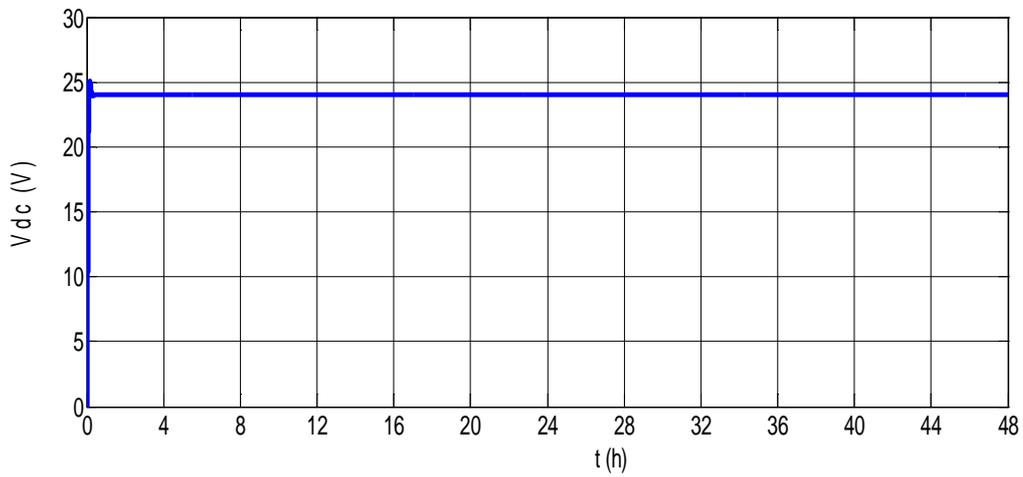


Figure IV.26 : La tension de la charge (tension de bus continu)

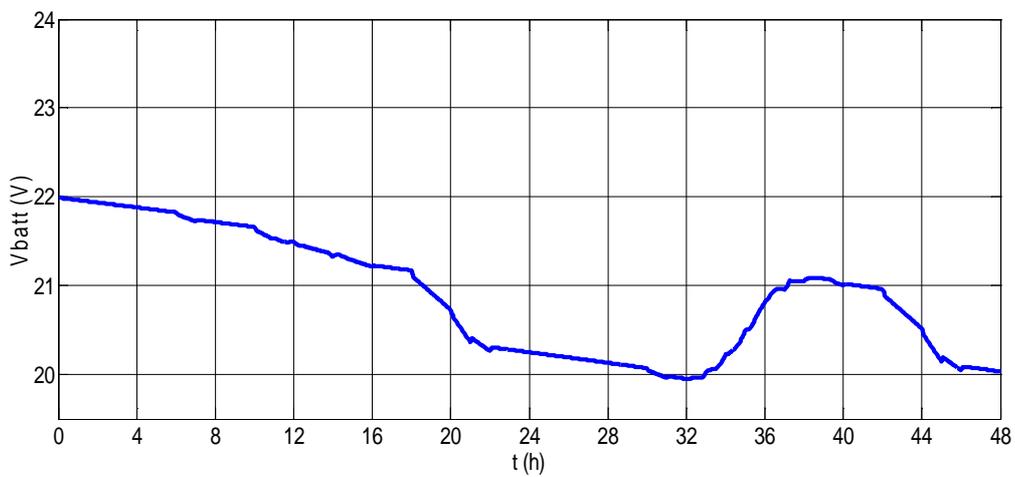


Figure IV.27 : Tension des batteries

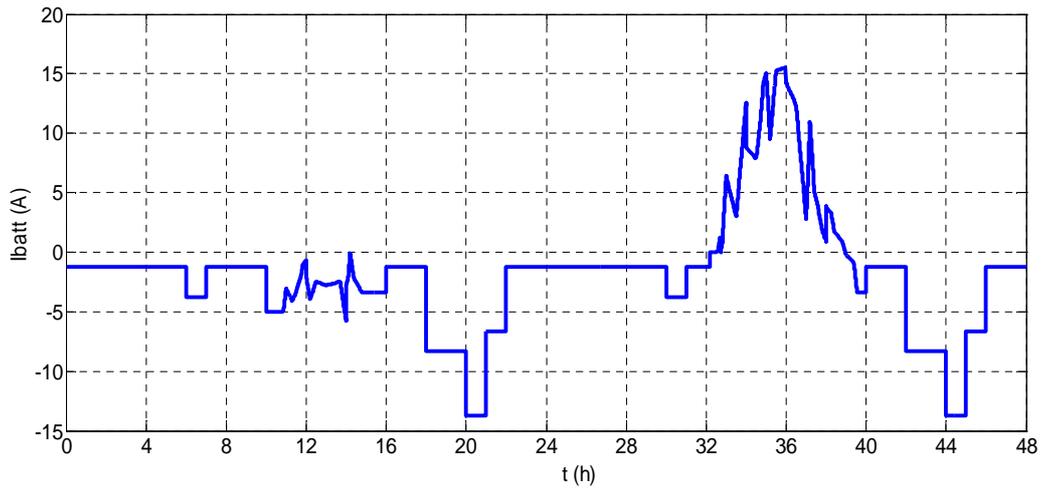


Figure IV.28 : Courant des batteries

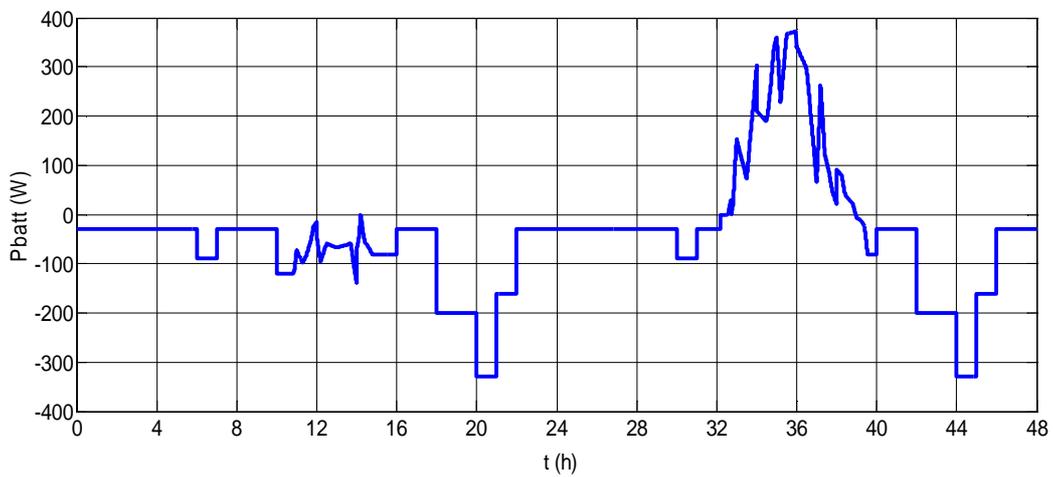


Figure IV.29: Puissance des batteries

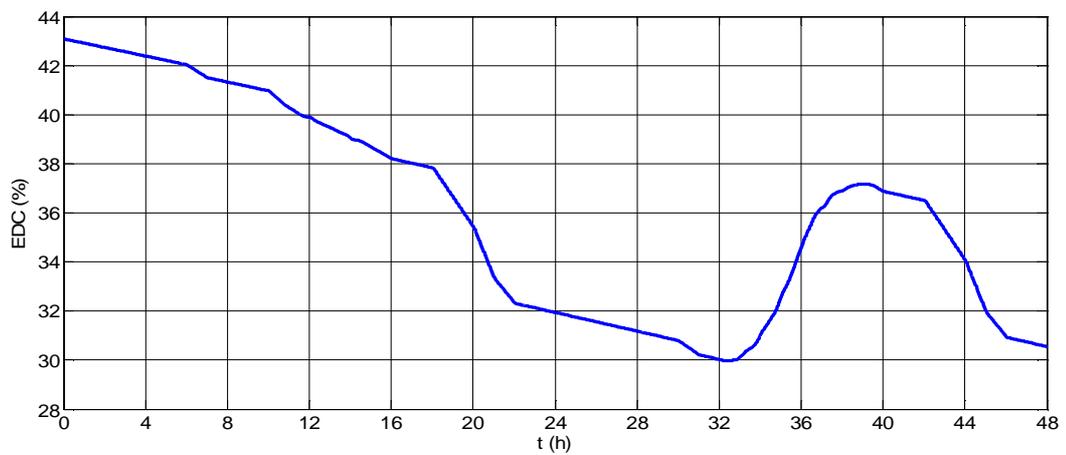


Figure IV.30: Etat de charge des batteries

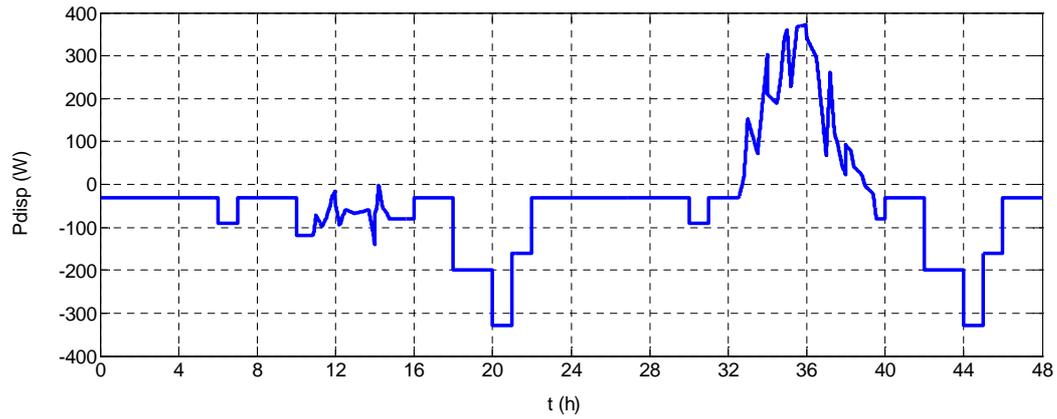


Figure IV.31: Puissance disponible

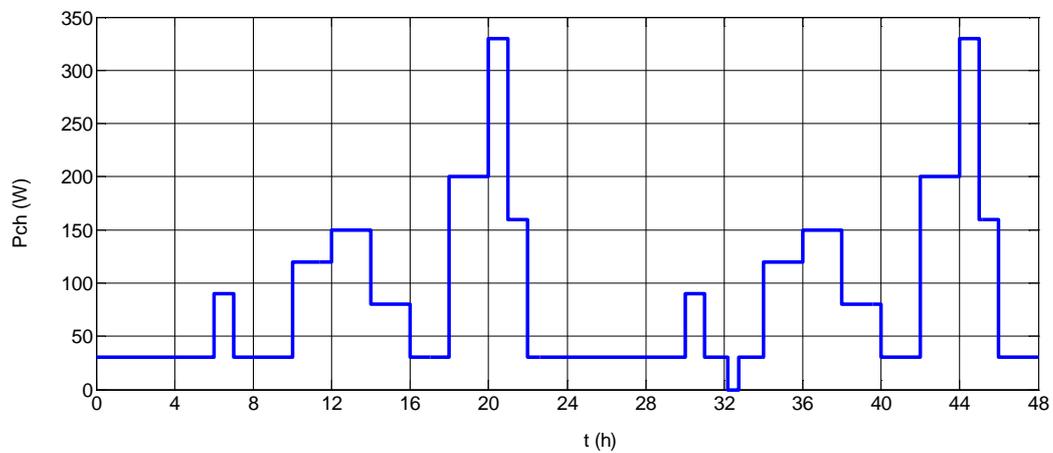


Figure IV.32: Puissance de la charge

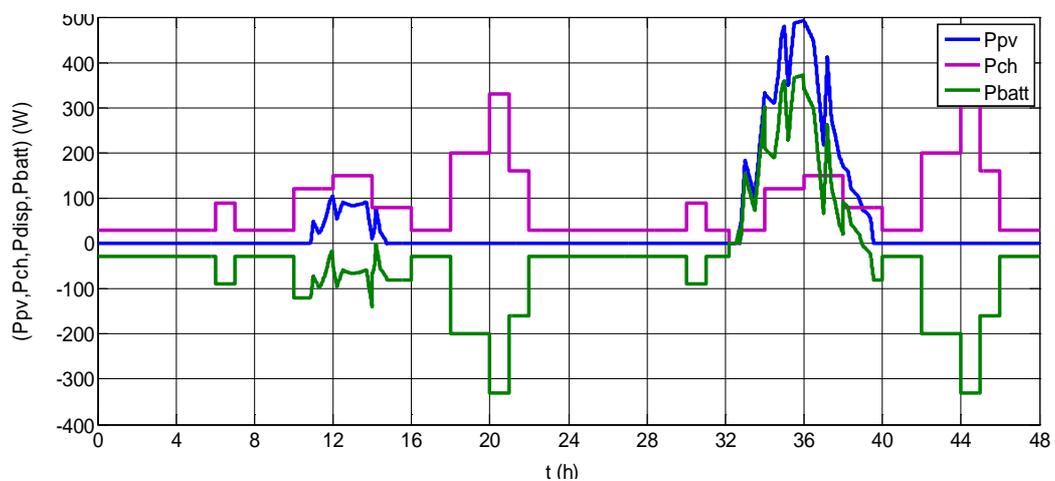


Figure IV.33 : L'allure des puissances (photovoltaïque, charge, disponible, batteries)

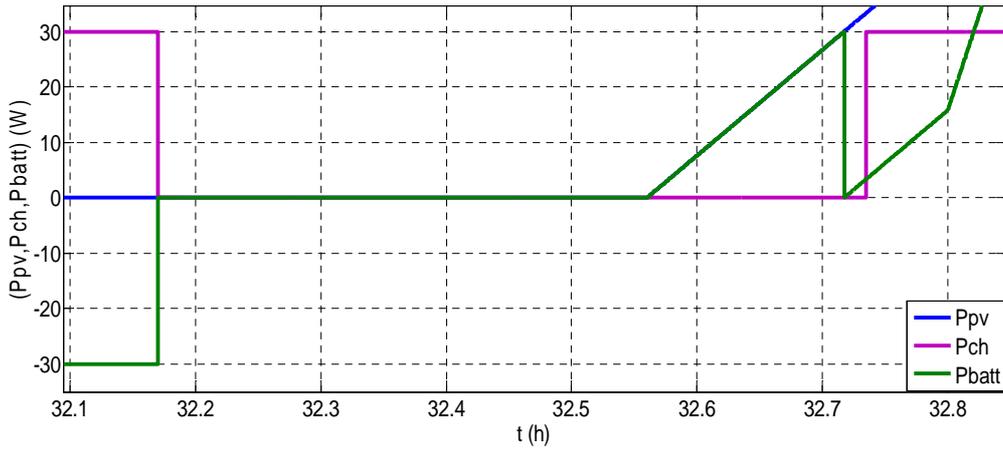


Figure IV.34: Zoom des puissances durant les modes 6 et 7

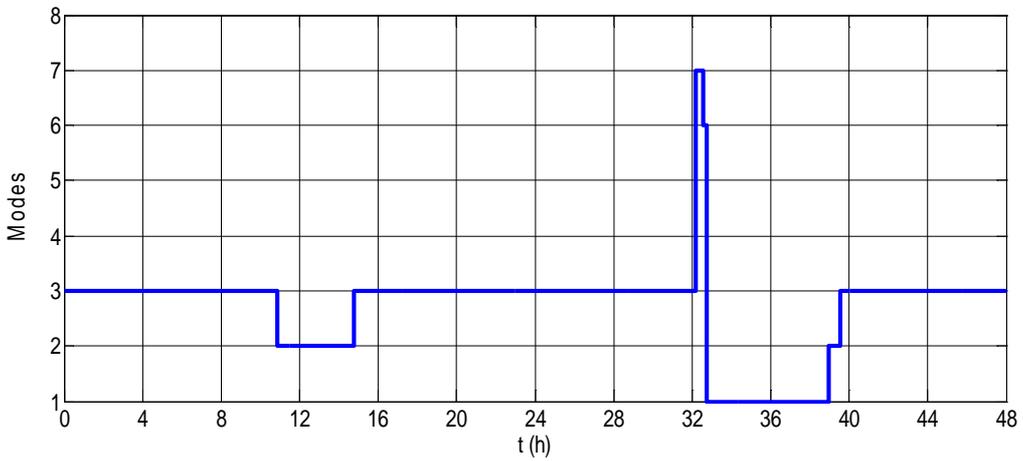


Figure IV.35: Les modes de fonctionnement

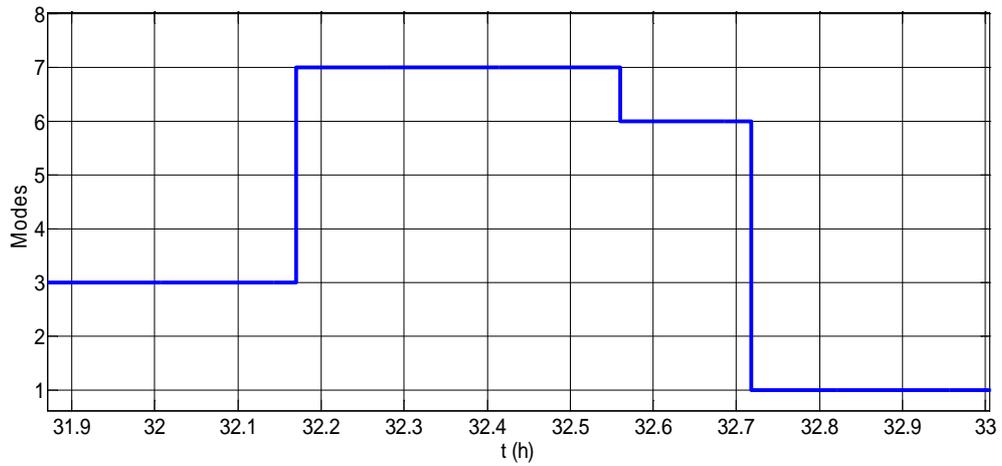


Figure IV.36: Zoom des modes 6 et 7

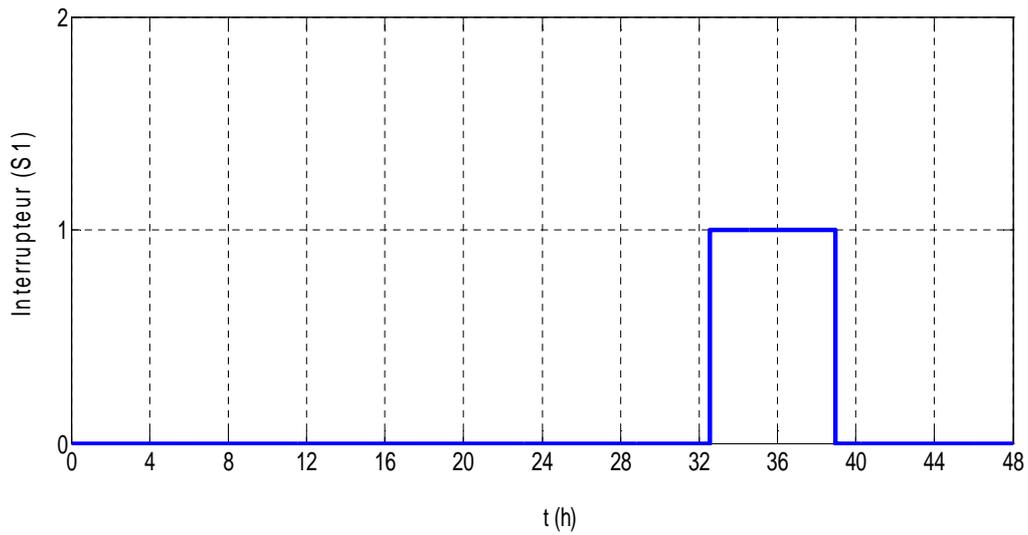


Figure IV.37: Fonctionnement de l'interrupteur (S1)

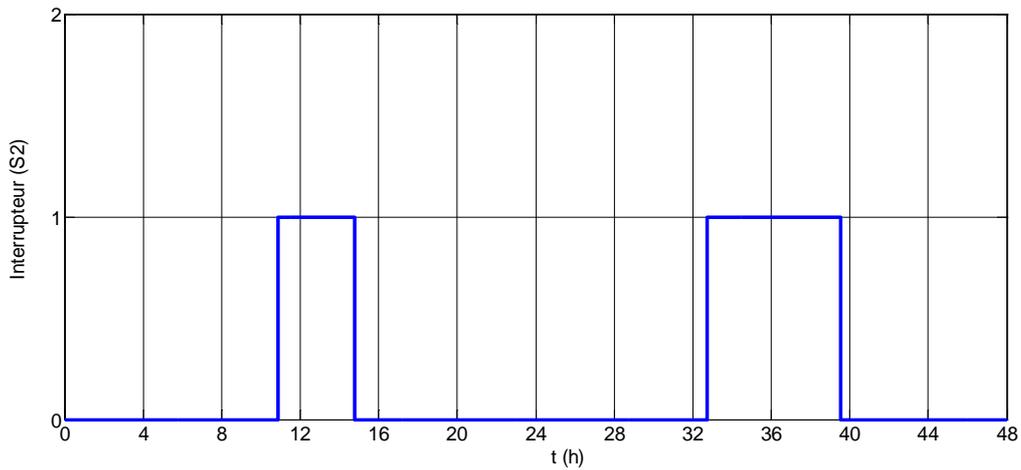


Figure IV.38 : Fonctionnement de l'interrupteur (S2)

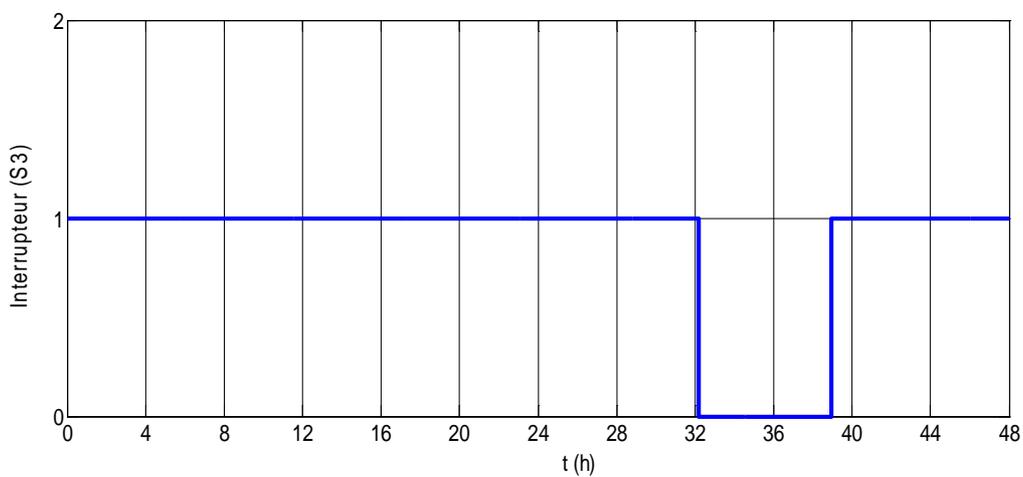


Figure IV.39: Fonctionnement de l'interrupteur (S3)

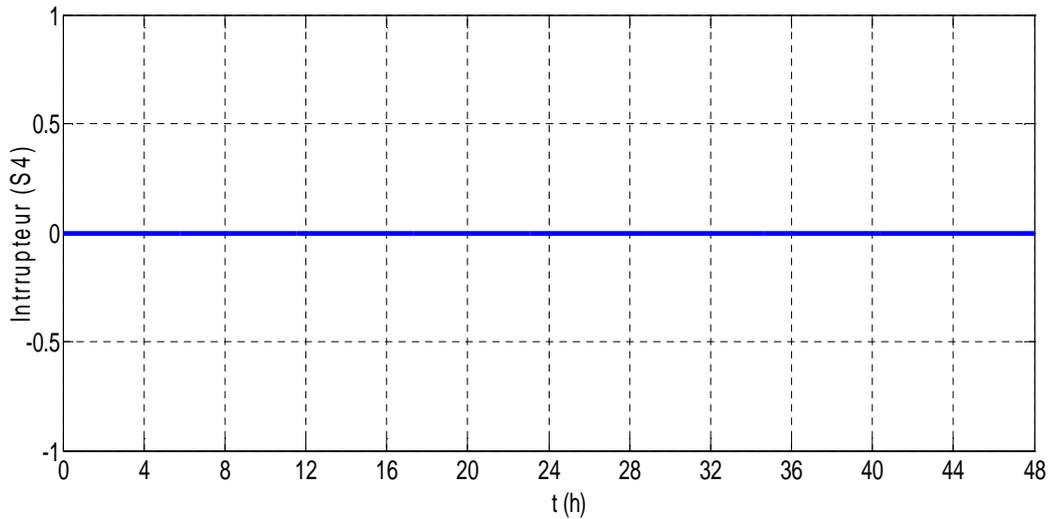


Figure IV.40 : Fonctionnement de l'interrupteur (S4)

Les figures (IV.24) , (IV.25) et (IV.26) représentent respectivement l'ensoleillement pour deux journées d'hiver, la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque et la tension du bus continu.

Dans les figures (IV.27), (IV.28), (IV.29) et (IV.30) nous représentons l'évolution de la tension, courant, puissance et l'évolution de l'état de charge des batteries. Les batteries ont un état de charge initial de 43%. L'état de charge de la batterie varie entre 30% et 43%, à l'instant $t=32h10mn$ à $t=32h42mn$ les batteries vont se déconnecter (pendant 32mn), à $t=32h42mn$ les batteries se rechargent. La tension de la batterie varie entre 22V et 19.9V.

Les figures (IV.31) et (IV.32) représentent respectivement la puissance disponible et la puissance de charge.

Les figures (IV.33), (IV.35) et (IV.37-38-39-40) présentent les différentes puissances (P_{pv} , P_{ch} , P_{dis} , P_{batt}), les différents modes qui fonctionnent et les instants de fonctionnement des interrupteurs (S1 ,S2 ,S3,S4). Nous pouvons distinguer cinq différents modes de fonctionnement durant les journées hiver, à savoir Mode1, 2, 3, 6, 7.

➤ **Synthèse sur le fonctionnement par phase du système photovoltaïque avec l'algorithme de gestion**

D'après la figure (IV. 26) des puissances représentées on déduit les différentes phases :

Phase1: $t \in ([00h,10h52mn],[14h45mn,32h10mn],[39h32mn,48h])$

La puissance produite par les panneaux photovoltaïque est nulle et $EDC > EDC_{min}$ alors la charge est alimentée par les batteries (fonctionnement du mode 3).

• **Phase2 : $t \in ([10h52mn,14h45mn],[38h57mn,39h32mn])$**

La puissance photovoltaïque est insuffisante pour l'alimentation de la charge et $EDC > EDC_{min}$, dans ce cas les batteries vont se déchargé afin de satisfaire la charge (compensation, mode 2).

• **Phase3 : $t \in [32h10mn,32h33mn]$**

Dans cette phase la production de l'énergie photovoltaïque est nulle ($P_{pv}=0$) et les batteries atteint l'état de charge minimal ($EDC=EDC_{min}$) donc la charge sera déconnecté ($P_{ch}=0$) (mode 7).

• **Phase4 : $t \in ([32h33mn,32h42mn])$**

La puissance photovoltaïque ne peut pas satisfaire la demande de la charge, les batteries sont complètement déchargées dans ce cas la charge est déconnectée. Alors on charge les batteries ($P_{pv}=P_{batt}$). (mode6)

• **Phase5 : $t \in ([32h42mn,38h57mn])$**

Cette situation présente le cas où la puissance PV est supérieure à la puissance demandée et $EDC < EDC_{max}$ alors les batteries se chargent (mode1).

Les figures (IV.37), (IV.38), (IV.39) et (IV.40) montrent les différents instants de fonctionnements des interrupteurs (ouvert (0) ou fermé (1)), on peut remarquer que seulement trois interrupteurs fonctionnent et l'interrupteur S4 reste toujours ouvert.

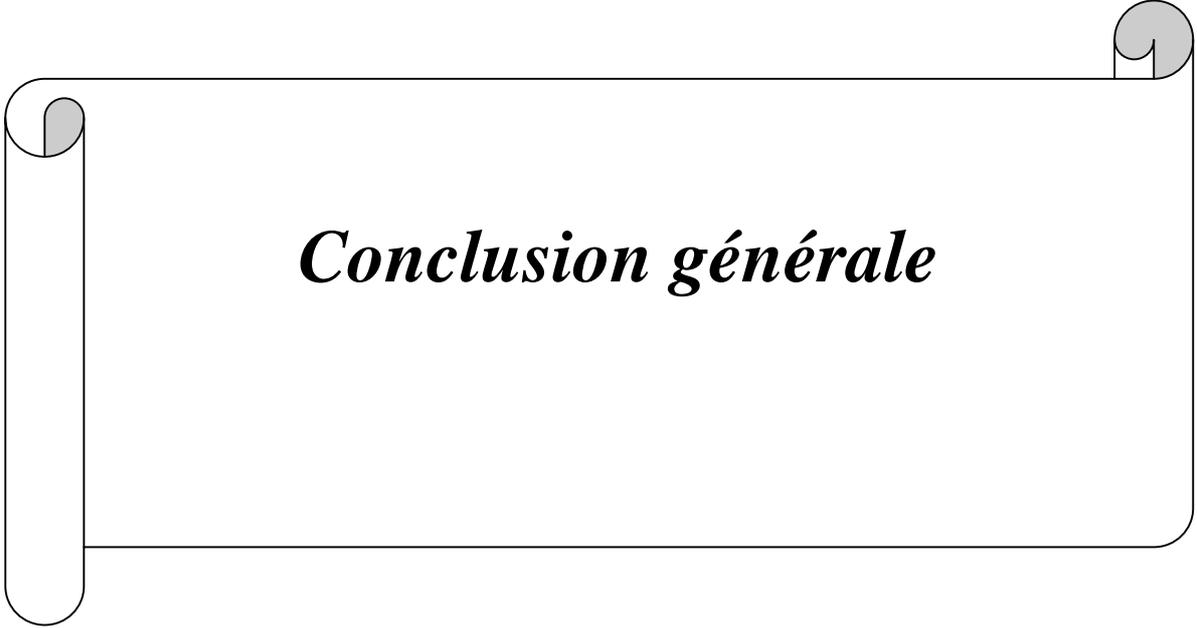
- **Interrupteur (S1) :** se ferme durant l'intervalle de temps $t \in [32h33mn,38h57mn]$.
- **Interrupteur(S2) :** se ferme durant l'intervalle de temps $t \in ([10h52mn,14h45mn] , [32h42mn,39h32mn])$.
- **Interrupteur (S3) :** se ferme durant l'intervalle $t \in ([00h, 32h10mn], [38h57mn, 48h])$.
- **Interrupteur (S4) :** est toujours ouvert.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation du système PV avec batteries de stockage. Une méthode MPPT à été utilisée en vu 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 charge demandée et de la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque.

Comme on peut le voir à partir des résultats de simulation, la diversification des modes de fonctionnement, décrits par l'algorithme de gestion. Durant les journées d'été, on retrouve durant un laps de temps le mode (5) où les batteries sont pleinement chargées et le supplément d'énergie est dissipé dans une résistance de délestage. Par contre les résultats de simulation de la journée d'hiver, montrent le cas particulier des modes 6 et 7, ou les batteries sont déchargées avec l'absence de puissance photovoltaïque.

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



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons contribué à l'étude d'un système photovoltaïque autonome avec batteries de stockage, auquel nous avons implanté un algorithme de gestion.

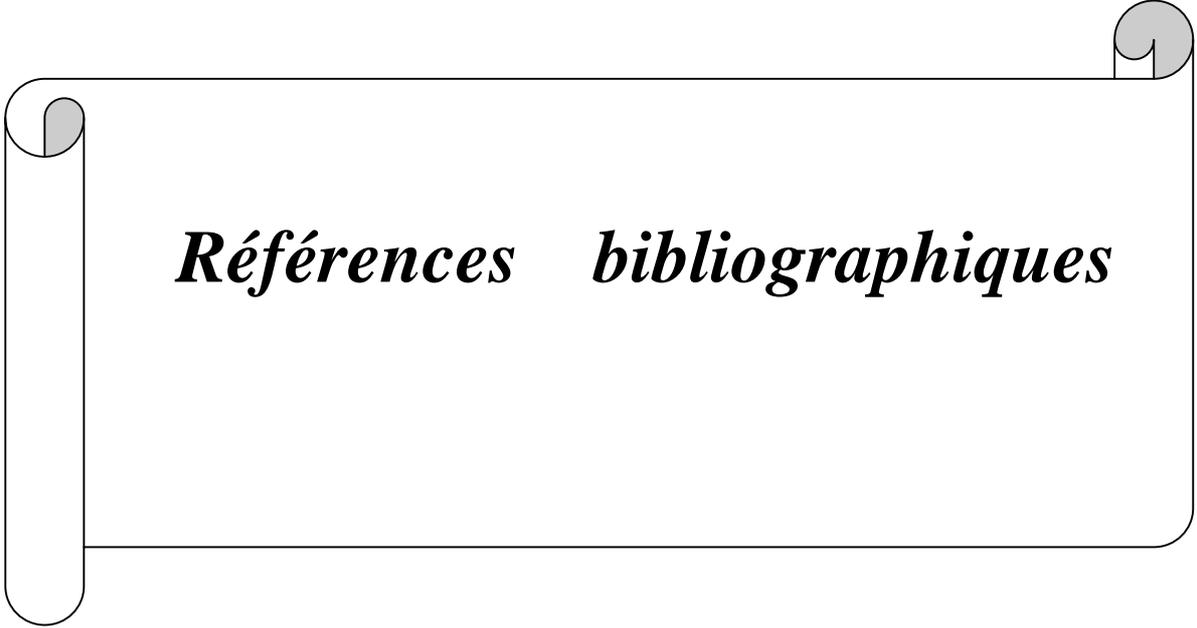
Dans la première partie, nous avons étudié les différents types de système photovoltaïque, leur principe de fonctionnement, les avantages et inconvénients de ce type d'énergie et l'influence de chaque composant constituant le système PV.

Dans la seconde partie, Puis nous avons présenté les modèles des composants nécessaire dans notre étude tel que (le panneau PV, la batterie et les convertisseurs). Nous nous sommes intéressés à l'extraction de la puissance maximale d'un panneau photovoltaïque. Nous avons opté pour la commande MPPT « perturbation et observation ». Cette dernière utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Dans la troisième partie, nous avons dimensionné le système PV/Batterie. Cette méthode permet de calculer le nombre des batteries qui sont associés avec un certain nombre de panneaux pour couvrir les besoin de la charge. Pour un profil de charge identique pour tous les jours de l'année destiné à l'alimentation d'un foyer de type F3. Le système photovoltaïque autonome est composé de 12 panneaux photovoltaïques de 110W, de 6 batteries de stockage de 12V, 260Ah et d'une charge de besoin journalier de 2070Wh/j. Nous avons développé un algorithme de gestion d'énergie qui est basé sur une comparaison entre la puissance produite par les panneaux photovoltaïques est la puissance demandée.

Et pour finir, dans le dernier chapitre nous avons procédé à la simulation du système complet et on a montré l'efficacité de l'algorithme de gestion du flux d'énergie face aux variations climatiques pendant l'été et l'hiver. Comme on a pu le voir à partir des résultats de simulation, la diversification des modes de fonctionnement. Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la maîtrise de ce type d'installation. Ainsi une gestion des flux énergétique dans un tel système s'avèrent 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 bibliographiques

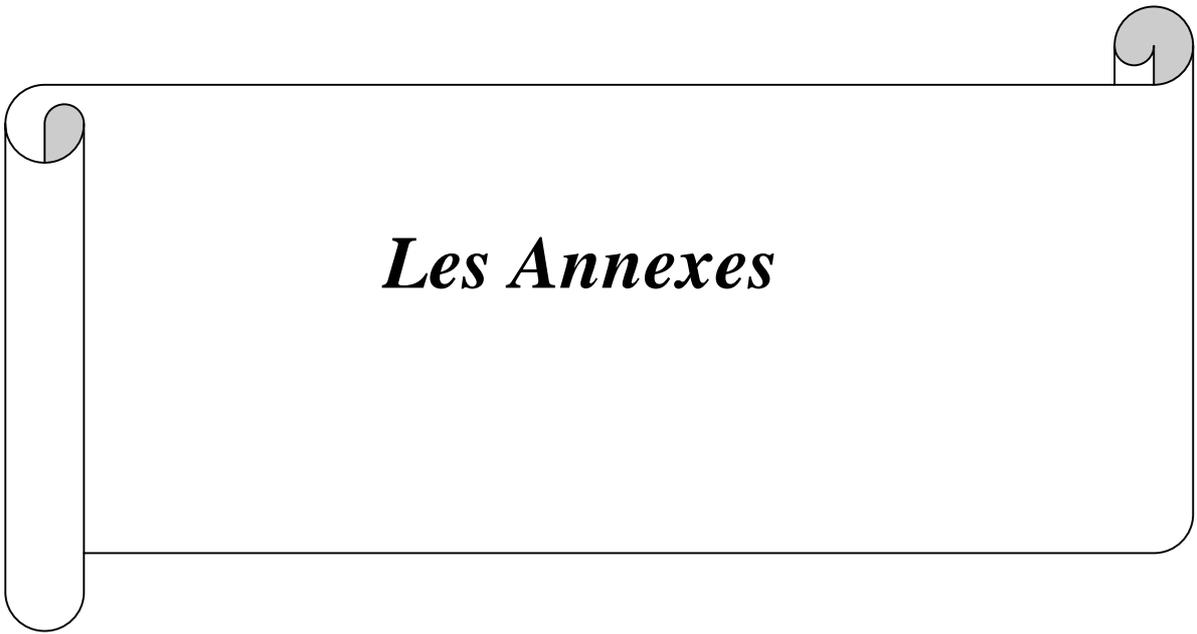
Bibliographie

- [1] D.Boukhers, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au Pompage », mémoire de magister, université Mentouri Constantine, 2007.
- [2] Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.
- [3] Otman Benseddik, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de master2, université Kasdi Merbah- Ouargla, 2012.
- [4] M. Chaabene, « Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques », mémoire de magister, université de Sfax, 2008.
- [5] 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.
- [6] L. Dabbou et D. Maghribi, « Commande d'un système hybride (Photovoltaïque-Eolienne) de production d'énergie », mémoire d'ingénieur d'état, université de Bejaia, 2009
- [7] A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [8] Mr Bouzid Allal El Moubarek, « Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme (Étude de l'onduleur triphasé li à cette application) », mémoire d'ingénieur d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2008.
- [9] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de magister, université de Bechar, 2008.

- [10] A. Labouret, P. Cumunel, J. Braun et B. Faraggi, « Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque », édition Dunod Paris, 2010.
- [11] B. Flèche et D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », édition, 2007.
- [12] Alain Ricaud, « Les convertisseurs photovoltaïques, Gisement solaire, cellules, modules et champs de module », European Master in Renewable Energy, Valbonne, 2011.
- [13] M. Merad-Boudia « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique », mémoire de magister, université de Tlemcen 2010.
- [14] S. Belakehal « Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine 2010.
- [15] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister, université Ferhat Abbas – Setif 2011
- [16] R. Kabouche, S. Harrouni et A. Talha, « Etude comparative des différentes techniques de stockage de l'énergie solaire photovoltaïque », séminaire sur les énergies nouvelles et renouvelable SIENR'12 Ghardaïa, 2012.
- [17] S. Lalouni, « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un Chargeur de batteries », universités de Bejaia, mémoire de magister, 2005.
- [18] Reynaud Jean-François, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, université Toulouse III - Paul Sabatier, 2011.
- [19] Alain Ricaud, « Modules et systèmes photovoltaïques », European Master in Renewable Energy, université de Savoie, 2008.
- [20] G. Dillensege, « Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours », thèse de doctorat, université de Montpellier, 2004.

- [21] Abbasen Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », université mouloud Mammeri de tizi- ouzou ,mémoire de magister ,2011.
- [22] Boucheritte wafa, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Université Mohamed Khider – Biskra.
- [23] Ait-Cheikh, Salah Mohamed, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », mémoire de magister, Ecole Nationale polytechnique bibliographie, 2007.
- [24] .F.Bouchtouche Cherfa « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT », mémoire de magister, Ecole National Polytechnique, El-Harrach, 2004
- [25] V.Boitier, P. Maussion, C. CABAL « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques », université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, Septembre 2008.
- [26].Dezo Sera,Remus Teodorescu,Tamas Kerekes, « Teaching maximum power point trackers using a photovoltaic array model with graphical user interface » .Instates of Energy Technology, Aalborg University Pontoppidanstraede 101DK-9220,Aalborg,Denmark.
- [27] T. S. a. K. U. Verachary, "Voltage-based maximum power point tracking control of PV systems," IEEE Trans. Aerop.Electron, vol. 38, pp. 262-270, 2002.
- [28] 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.
- [29] Anne Labouret – Michel Villos « énergie solaire photovoltaïque le manuel du professionnel » édition dunod, PARIS 2003.

[30] Halilou Kane Amadou– Ousmane Mahamadou «Etude du Dimensionnement d'un système photovoltaïque Autonome », mémoire d'ingénieur d'état, université de Bejaia ,2008.



Les Annexes

Paramètre des batteries :

- La tension des batteries : $V=12V$
- La capacité de la batterie : 260Ah

Caractéristique mécaniques des panneaux photovoltaïques :

- Epaisseur : 40 mm
- Poids : 11.5 Kg
- La surface : 1316*660 mm²

Paramètre d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24 :

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35V
Courant de court-circuit I_{sc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5V
Coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} (α_{sc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc}	-152mV/°C

Tableau1 : Paramètres d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24

Résumé

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique. Dans ce mémoire on a utilisé cette énergie pour la production de l'électricité pour un habitat. Pour ce système autonome nous avons proposé l'utilisation un élément de stockage qui va nous permettre de contrôler la production et la consommation. Par conséquent, 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 et on a montré l'efficacité de l'algorithme de gestion du flux d'énergie face aux variations climatiques pendant l'été et l'hiver.