

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire  
MASTER ACADEMIQUE  
Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Génie électrique  
Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Présenté par :  
Tairi Yacine , Namane Abderazak

**Thème**

# Conception et simulation d'un chargeur solaire pour batterie li-ion

**Devant le jury**

Mr AMIEUR Toufik	MCA	Président	UKM Ouargla
Mr KOURAS Sidali	MAA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
Mr BENMAKHOLOUF Abdeslam	MAA	Examineur	UKM Ouargla

**Année universitaire 2019/2020**

## Avant-propos

Nous dédions ce modeste projet de fin d'études

A nos chers parents qui nous ont poussés et motivés dans nos études, sans eux nous n'aurions certainement pas fait de longues études. Ce travail représente l'aboutissement de leur soutien et de leur encouragement tout au long de notre scolarité.

A tous nos proches et aux personnes qui nous ont quittés tôt, Vous vous êtes dépensés pour nous sans compter.

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour nous permettre d'atteindre cette étape de notre vie.

Et finalement à nos ami(e)s fidèles, qu'ils trouvent dans ce travail toute notre reconnaissance et nos sentiments les plus sincères pour leur soutien.

## Remercîments

Tout d'abord, nous remercions dieu de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Ces remerciements vont au corps professoral et administrative du département d'électrotechnique UKMO pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Notre gratitude va à notre encadrant monsieur KOURAS Sid Ali pour ses conseils et son aide ainsi qu'à notre examinateur BENMAKHLOUF Abdeslam et le président du jury, AMEIEUR Toufik pour le temps précieux accordé à l'examen de notre mémoire de fin d'étude et à l'enrichissement de ce dernier par leurs propositions et leurs conseils.

Enfin, nous tenons à adresser notre gratitude et nos respects à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin en particulier, M. KHELFAOUI, B. Kousayla et C. FERROUKHI pour réaliser ce travail.

*TAIRI Yacine.*

*NAAMANE Abderrazak.*

## Liste des Abréviations

EPV :	ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE
GPV :	GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE
MOSFET:	METAL OXIDE SIMICONDUCTOR FIELD EFFECT TRANSISTOR
P&O :	PERTURBATION ET OBSERVATION
PV :	PHOTOVOLTAÏQUE
MPPT :	MAXIMUM POWER POINT TRACKING
PPM :	POINT DE PUISSANCE MAXIMALE
DC-DC :	CONTINUE/CONTINUE
NS :	NOMBRE DE CELLULES EN SERIE
NP :	NOMBRE DE CELLULES EN PARALLEL
ACCUS :	ACCUMULATEURS
PWM :	PULSE WIDTH MODULATIO

## Liste des Symboles

$I_{ph}$ (A) : LE PHOTO -COURANT.

$I$  (A) : LE COURANT GENERE PAR LA PHOTOPILE. V

(V) : LA TENSION AUX BORNES DE LA CELLULE.

$R_S$  ( $\Omega$ ): LA RESISTANCE SERIE.

$R_{sh}$  ( $\Omega$ ) : LA RESISTANCE SHUNT.

$I_S$  (A) : LE COURANT DE SATURATION.

$Q$  : LA CHARGE DE L'ELECTRON= $1,6.10^{-19}$  C.

$A$  : LE FACTEUR DE QUALITE DE LA CELLULE.

$K$  : LA CONSTANTE DE BOLTZMANNE =  $1.38. 10^{-23}$  J/K.

$T$  : LA TEMPERATURE DE FONCTIONNEMENT EN KELVIN.

$P_{MAXidEale}$ (W) : PUISSANCE MESUREE AUX BORNES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.

$I_{max}$  : LE COURANT CORRESPONDANT AU MAXIMUM DE PUISSANCE

$V_{max}$  :LA TENSION CORRESPONDANTE AU MAXIMUM DE PUISSANCE

FF : FACTEUR DE FORME

$G$  : IRRADIATION SOLAIRE DE FONCTIONNEMENT ( $W / M^2$ )

$ICC$  : COURANT DE COURT CIRCUIT (A)

$VCO$  : TENSION DE CIRCUIT OUVERT (V)

$VOPT$  : TENSION OPTIMALE (V)

$IOPT$  : COURANT OPTIMAL (A)

$POPT$  : POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMALE

$NS$  : NOMBRE DE CELLULES EN SERIE

$NP$  : NOMBRE DE CELLULES EN PARALLELE

$PMAX$  : PUISSANCE MAXIMALE (W)

$\eta_{PV}$ : RENDEMENT PHOTOVOLTAÏQUE

$VR$  : TENSION DE REGULATION DE LA BATTERIE (V)

$VLVD$  : TENSION MINIMALE DE LA BATTERIE (V)

$\alpha$  : RAPPORT CYCLIQUE

$VBAT$  : TENSION AUX BORNES DE LA BATTERIE (V)

$IBAT$  : COURANT AUX BORNES DE LA BATTERIE (A)

## Liste des figures

### Chapitre I : L'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

Figure I-1 : Le rayonnement solaire, en moyenne, des années 1991 à 1993 (24 heures/jour)	4
Figure I-2 : Centrale solaire Ain Skhouna à Saida d'une capacité 30 MW depuis mai 2016	5
Figure I-3 : Station solaire d'Ain el Ibel Djelfa d'une capacité de 20 mégawatts	5
Figure I-4 : Cellule solaire	6
Figure I-5 : Module solaire	6
Figure I-6 : Panneau	6
Figure I-7 : Structure et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
Figure I-8 : Propriétés électroniques	8
Figure I-9 : Diagramme circulaire de l'utilisation du silicium dans les cellules solaires en 2009	9
Figure I-10 : Cellule en silicium amorphe	10
Figure I-11 : Cellule en silicium monocristallin	10
Figure I-12 : Cellule en silicium polycristallin	10
Figure I-13 : Cellule tandem	10
Figure I-14 : Cellule solaire plastique de grande dimension (100mm x 100mm)	11
Figure I-15 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	13
Figure I-16 : La caractéristique $I (V)$ d'une cellule photovoltaïque	14
Figure I-17 : Caractéristique $I (V)$ d'un module solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$	16
Figure I-18 : Caractéristique $p (V)$ d'un panneau solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$	16
Figure I-19 : Les différentes zones de la caractéristique $I (V)$ , $T=25^{\circ}\text{C}$	17
Figure I-20 : Association des modules en série	18
Figure I-21 : Caractéristiques résultantes d'un groupement en série de ns cellules	18
Figure I-22 : Association des modules en parallèle	18
Figure I-23 : Caractéristiques résultantes d'un groupement en parallèle de ns cellules	18
Figure I-24 : Association mixte des modules	19
Figure I-25 : Caractéristiques résultantes d'un groupement mixte	19
Figure I-26 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension pour une température cst	20
Figure I-27 : Influence de la température sur les caractéristiques courant-tension pour un éclairement cst	20
Figure I-28 : Installation photovoltaïque autonome	22
Figure I-29 : Installation photovoltaïque raccordée au réseau	22

### Chapitre II : Stockage d'énergie (accumulateur de batteries)

Figure II-1 : Diagramme d'indice de performances de sept technologies de stockage suivant 3 catégories	28
Figure II-2 : Etat de charge et profondeur de	29
Figure II-3 : Batterie solaire lithium-ion	33
Figure II-4 : Constitution des éléments Li-ion	34
Figure II-5 : Diagramme de charge des accus lithium-ion	36
Figure II-6 : Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie lithium-ion	37

Figure II-7 : Principe de fonctionnement d'accu Li-ion (charge/décharge)	37
Figure II-8 : Circuit électronique de protection	39
Figure II-9 : Modèle de Shepherd de batterie Lithium-ion	40

### **Chapitre III : Contrôleur de charge (chargeur solaire)**

Figure III-1 : Illustration d'un régulateur	42
Figure III-2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur de	43
Figure III-3 : Principes de fonctionnements d'un régulateur de	44
Figure III-4 : Conception d'un régulateur de charge de type shunt	46
Figure III-5 : Principe de fonctionnement d'un régulateur de type	47
Figure III-6 : Conception d'un régulateur de charge de type série	47
Figure III-7 : Évaluation de la tension et du courant en cours de	48
Figure III-8 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	49
Figure III-9 : Recherche et recouvrement du point de puissance maximal	51
Figure III-10 : Schéma représentatif d'un hacheur boost	53
Figure III-11 : Convertisseur boost durant l'état ON	53
Figure III-12 : Convertisseur boost durant l'état OFF	54
Figure III-13 : Schéma représentatif d'un hacheur	54
Figure III-14 : Allure de commande	55
Figure III-15 : Convertisseur Buck durant l'état	55
Figure III-16 : Allure d'onde de courant de l'inductance	57
Figure III-17 : Convertisseur Buck durant l'état OFF	57
Figure III-18 : Organigramme de l'algorithme P&O	59
Figure III-19 : Recherche du PPM par la méthode ( P&O)	60

### **Chapitre IV : Modélisation et Simulation**

Figure IV-1 Schéma conceptionnel panneau solaire dans PSIM1	62
Figure IV-2 : Paramètres d'entrés dans le panneau solaire	63
Figure IV-3 : Schéma conceptionnel de batterie Li-ion	63
Figure IV-4 : L'algorithme de MPPT P&O	64
Figure IV-5 : Schéma conceptionnel Le régulateur MPPT	65
Figure IV-6 : La modélisation du dispositif chargeur solaire	65
Figure IV-7 : Les allures (courant, tension et puissance) délivré par le panneau solaire	66
Figure IV-8 : Allure de la Puissance maximale	66
Figure IV-9 : Tension de batterie en charge	67
Figure IV-10 : Courant aux bornes de la batterie li-ion	67
Figure IV-11 : Courant aux bornes de la batterie li-ion	67
Figure IV-12 : State of charge de la batterie	68

## Liste des tableaux

Tableau (I-1) : Comparaison entre les cellules à base de Silicium	12
Tableau (II-1) : Comparaison des propriétés de différentes technologies de stockage	27
Tableau (III-1) : Les différents types de convertisseurs DC-DC	52
Tableau (III-2) : Comparaison des techniques MPPT	59

# Table des matières

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. INTRODUCTION.....	1
2. MOTIVATION DE LA RECHERCHE ET OBJECTIF DU PROJET.....	2
3. PRESENTATION DU MEMOIRE .....	2

## CHAPITRE I : L'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

INTRODUCTION.....	4
I.1 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE (EPV).....	5
I.2 ANATOMIE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	6
I.2.1 LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES .....	6
I.2.2 MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS .....	6
I.2.3 STRUCTURE ET DESCRIPTION DE LA JONCTION PHOTOVOLTAÏQUE .....	7
I.2.4 L'ELEMENT DE BASE LE SILICIUM.....	8
a. <i>Cellule en silicium amorphe</i> .....	9
b. <i>Cellule en silicium monocristallin</i> .....	9
c. <i>Cellule en silicium polycristallin</i> .....	10
d. <i>Les cellules dites tandem (multi-jonctions)</i> .....	10
e. <i>Cellules organiques</i> .....	11
I.3 MODELE MATHEMATIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	13
I.3.1 CARACTERISTIQUE COURANT - TENSION .....	14
I.3.2 PUISSANCE MAXIMALE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	15
I.4 CARACTERISTIQUES D'UN MODULE SOLAIRE .....	16
I.4.1 CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION I(V).....	16
I.4.2 CARACTERISTIQUE PUISSANCE-TENSION P(V).....	16
I.4.3 ZONES DE FONCTIONNEMENT DU MODULE SOLAIRE .....	16
I.4.4 LIAISON DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE .....	17
I.4.5 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE L'ECLAIREMENT .....	19
I.4.6 PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	21
I.5 LES DIFFERENTS TYPES D'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE .....	21
CONCLUSION.....	23

## CHAPITRE II : Stockage d'énergie (accumulateur de batteries)

HISTORIQUE.....	24
INTRODUCTION.....	25
II.1 DESCRIPTION.....	26
II.2 LES DIFFERENTS TYPES DE BATTERIES.....	26
II.3 CARACTERISTIQUES DES BATTERIES.....	28
II.3.1 LA CAPACITE DE STOCKAGE.....	28
II.3.2 L'ESPERANCE DE VIE.....	29
II.3.3 ÉTAT DE CHARGE.....	29
II.3.4 LA PROFONDEUR DE DECHARGE.....	29
II.3.5 TENSION DE LIMITE DE DECHARGE VLVD.....	30
II.3.6 TENSION DE REGULATION VR.....	30
II.3.7 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE.....	30
II.4 BATTERIES SOLAIRES.....	30
II.5 CRITERE DE CHOIX DE BATTERIE SOLAIRE POUR UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE.....	31
II.5.1 BESOIN DE STOCKAGE ENERGETIQUE DU SYSTEME.....	31
II.5.2 TENSION DES BATTERIES SOLAIRES.....	31
II.5.3 DUREE DE VIE DE LA BATTERIE SOLAIRE.....	31
II.5.4 AUTONOMIE NECESSAIRE DANS LE SYSTEME PV.....	32
II.5.5 DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES SOLAIRES.....	32
II.5.6 TYPES DE DEFAILLANCE.....	32
II.6 LES TECHNOLOGIES LITHIUM-ION INNOVANTES.....	33
II.6.1 LA THEORIE DES ACCUMULATEURS AU LITHIUM.....	33
II.6.2 LA CHIMIE DES ACCUMULATEURS AU LI-ION.....	34
II.6.3 LA CELLULE DE BASE LITHIUM-ION.....	34
II.6.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	35
a. <i>La charge d'accumulateur au Li-ion</i> .....	35
b. <i>Décharge des accumulateurs au Li-ion</i> .....	36
c. <i>Les précautions d'utilisation de bases</i> .....	38
d. <i>Le circuit électronique de protection interne</i> .....	38
e. <i>Stockage des accus au Lithium</i> .....	39
f. <i>Les Températures de fonctionnement</i> .....	39
II.7 MODELISATION D'UNE BATTERIE PAR UN CIRCUIT ELECTRIQUE.....	40
A. AVANTAGES.....	41
B. INCONVENIENTS.....	41
C. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT.....	41
CONCLUSION.....	41

## CHAPITRE III : Contrôleur de charge (chargeur solaire)

INTRODUCTION.....	42
III.1 REGULATEUR SOLAIRE (CONTROLEUR DE CHARGE).....	43
III.2 LES FONCTIONNALITES CLASSIQUES D'UN REGULATEUR SOLAIRE.....	43
III.3 DIFFERENTS TYPES DES REGULATEURS DE CHARGE .....	45
III.3.1 LE REGULATEUR DE CHARGE SHUNT .....	46
III.3.2 LE REGULATEUR DE CHARGE SERIE .....	47
III.3.3 REGULATION PWM (PULSE WITH MODULATION).....	48
III.3.4 REGULATEUR MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING).....	49
A. <i>Caractéristiques du régulateur MPPT</i> .....	50
B. <i>Partie électronique de puissance</i> .....	52
C. <i>Partie commandes (Technique de la commande MPPT)</i> .....	58
CONCLUSION.....	61

## CHAPITRE IV : Modélisation et Simulation

INTRODUCTION.....	62
IV.1 LE LOGICIEL UTILISE « PSIM ».....	62
IV.2 LES PARAMETRES ET SCHEMA DES COMPOSANTS UTILISES .....	62
IV.2.1 PANNEAU SOLAIRE .....	62
IV.2.2 LE MODULE DE BATTERIE LI-ION.....	63
IV.2.3 L'ALGORITHME DE MPPT P&O.....	64
IV.2.4 LE REGULATEUR.....	65
IV.3 LA MODELISATION DU CHARGEUR SOLAIRE .....	65
IV.4 LES COURBES ET LES RESULTATS OBTENUE PAR LA SIMULATION .....	66
IV.4.1 LE COURANT, TENSION ET PUISSANCE GENERES PAR LES PANNEAUX.....	66
IV.4.2 LA PUISSANCE MAXIMALE OBTENU A LA SORTIE DU REGULATEUR MPPT .....	66
IV.4.3 LA TENSION DE LA CHARGE DE (BATTERIE) REGULER PAR LE CHARGEUR SOLAIRE .....	67
IV.5 ALLURES REPRESENTANT L'ETAT AUX BORNES LA BATTERIE LI-ION .....	67
CONCLUSION.....	68

## CONCLUSION GÉNÉRAL

CONCLUSION GENERAL.....	69
-------------------------	----

## Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	71
----------------------------------	----

# **Introduction Générale**

## 1. Introduction

*“Si vous voulez connaître les secrets de l’univers, pensez en termes d’énergies, de fréquences et de vibrations”.*

Ce que Tesla a voulu dire, c’est que tout ce qui nous entoure, des minuscules quarks aux gigantesques galaxies est d’une manière ou d’une autre le résultat, la cause ou la forme de stockage d’une énergie.

Tout d’abord, prenons du recul et regardons notre planète, ses systèmes et son flow d’énergie. Le système physique de la terre inclut l’atmosphère, l’hydrosphère, la lithosphère et la biosphère, et c’est dans ces 4 composantes que l’énergie rentre ou sort, laissant s’échapper pendant ses déplacements : la lumière, le son, les vibrations, la chaleur et le mouvement. Mais d’où vient cette énergie ?

L’énergie de notre planète provient de sources internes et externes, la source externe largement majoritaire est bien entendu le soleil, il affecte les flux d’air, le mouvement des océans et par conséquent le climat mais pas que ! Il représente aussi la source d’énergie des organismes. Dit comme ça, il paraîtrait évident qu’au cours de l’évolution l’être humain aurait dû se rendre compte de cela et investir dans l’énergie solaire, l’énergie renouvelable ultime ! Mais ce n’est malheureusement qu’après plusieurs années qu’on s’est rendu compte de la valeur de cette source.

Nous avons, au cours du temps, utilisée maintes sources d’énergie pour subvenir à nos besoins dont les énergies fossiles qui ne peuvent être reconstituées qu’à l’échelle des temps géologiques (charbon, pétrole, gaz) représentant aujourd’hui plus des trois quarts de la consommation mondiale d’énergie primaire et qui sont également majoritaires (plus des deux tiers) dans la production de l’électricité.

Mais actuellement aussi, à l’ère du développement durable, l’énergie photovoltaïque renouvelable connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d’énergie inépuisable et extraordinairement abondante, puisque l’irradiation que le soleil fait parvenir sur la terre chaque année représente plus 10 000 fois la consommation mondiale actuelle d’énergie primaire, toutes formes et tous usages confondus. Pour illustrer cette progression plus de 2 537 GW ont été produites en 2019 contre 0.4 GW en 1998 portée par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

En Effet l'enjeu climatique n'est pas un élément que l'on peut se permettre de négliger, plusieurs pays ont déjà adopté des lois énergie-climatiques visant à neutraliser le bilan carbone afin de maîtriser ses conséquences tel que la fonte des glaces et la pollution.

La demande globale en énergie ne fait qu'augmenter dû à l'explosion démographique et à l'industrialisation massive au cours des 2 derniers siècles. L'électricité n'est plus un luxe mais une nécessité avec une influence directe sur la santé, l'éducation ainsi que la puissance politique et économique, d'un autre côté la génération de l'énergie pour pallier à cette demande devient de plus en plus dure à réaliser et dans une industrie solaire en plein essor, les progrès de la technologie ne peuvent être que l'accroissement de l'efficacité. Et c'est pour cela que dans le cadre de notre projet de fin d'étude nous nous sommes intéressées à l'étude et à la réalisation d'un chargeur solaire

## **2. Motivation de la recherche et objectif du projet**

- Améliorer le rendement du générateur photovoltaïque (GPV), autrement dit en extraire le maximum de puissance disponible et maximiser la puissance délivrée à la charge reliée à ses bornes en utilisant des algorithmes de suivi du point de fonctionnement optimal de ces panneaux
- L'indisponibilité de l'énergie solaire à la tombée de la nuit ou aux perturbations météorologiques nécessite d'équiper ces systèmes photovoltaïques par des batteries d'accumulateurs qui permettront de stocker l'énergie et de la restituer en temps voulu.
- Pour assurer la meilleure autonomie du système, la régulation de la charge/décharge de la batterie est alors indispensable. Pour cela, il faut intercaler dans le système un régulateur solaire, dont le rôle sera d'augmenter sa durée de vie.

## **3. Présentation du mémoire**

Le premier chapitre donne une perspective sur l'énergie solaire ainsi que son exploitation à travers les panneaux photovoltaïques, Il zoom sur la mise en point du modèle mathématique afin de déterminer Les caractéristique électrique courant-tension, puissance et l'influence des paramètres (température et ensoleillement). Finalement, on citera Les différents types de systèmes photovoltaïques existants.

Le deuxième chapitre, quant à lui, traite l'unité de stockage, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et sa modélisation. Après quoi, on arrivera à la conclusion que connecter la batterie directement au GPV mènerait à la détérioration de cette dernière.

Le troisième chapitre qui nous amène à introduire un étage d'adaptation qui est une interface entre la batterie et générateur photovoltaïque (GPV) pour extraire le maximum de puissance à la sortie du générateur ensuite assurer un contrôle sur la charge et la décharge de la batterie. Cette partie expose aussi les deux types de convertisseurs DC-DC hacheur Boost et Buck en expliquant leurs principes de fonctionnement et montre la définition de la commande MPPT et le principe de recherche du PPM et quelques méthodes de suivi de la puissance maximale et on terminera par le choix des composants utilisés dans notre dispositif.

Enfin, le 4ème chapitre viendra clôturer le tout, sous forme d'une simulation de notre système faite grâce au logiciel "PSIM" qui résumera les points abordés précédemment.

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

## Introduction

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique dont la lumière n'est que la partie visible.

L'énergie électromagnétique provenant du soleil, traverse l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvient à la surface de la terre une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km). Après avoir traversé l'atmosphère l'énergie disponible sera donc inférieure à 1000 W/m<sup>2</sup>.

Le flux maximum d'énergie solaire reçu au sol terrestre se rencontre vers les tropiques secs (ou arides), c'est-à-dire dans les déserts chauds où les conditions météorologiques et géographiques sont optimales : basse latitude, vaste espace, ensoleillement ininterrompu, ciel clair, grande sécheresse de l'air.

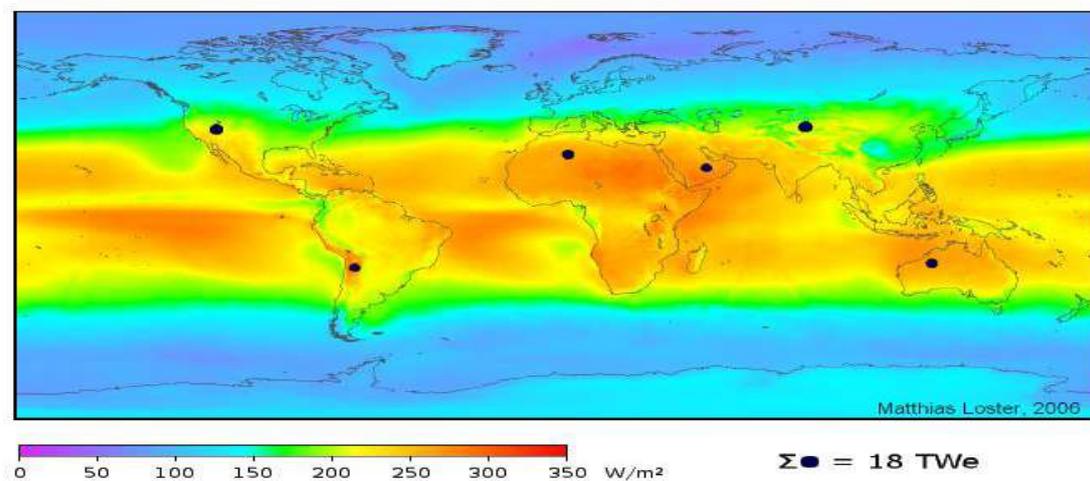


Figure I-1 : Le rayonnement solaire, en moyenne, des années 1991 à 1993 (24heures/jour)

### Remarque :

- Le rayonnement dans les régions sous les points foncés pourrait fournir toute la puissance (électrique, thermique, carburant, etc.) pour alimenter le monde entier si ces régions étaient couvertes de panneaux solaires d'une efficacité de 8%.
- L'Algérie se lance un défi de production de 5600 mégawatts d'ici à 2027.

## Inauguration de quelques centrales solaires en Algérie



Figure I-2 : Centrale solaire Ain Skhouna à Saïda d'une capacité 30 MW depuis mai 2016



Figure I-3 : Station solaire d'Ain el Ibel Djelfa d'une capacité de 20 mégawatt

### I.1 L'énergie solaire photovoltaïque (EPV)

C'est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire par le biais d'une installation solaire.

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base du système, Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir en électricité les ondes électromagnétiques (rayonnements) émises par le soleil.

La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule.

Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module ou capteur solaire photovoltaïque et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).



Figure I-4 : Cellule solaire



Figure I-5 : Module solaire



Figure I-6 : Panneau solaire

## I.2 Anatomie d'une cellule photovoltaïque

### I.2.1 Les différents Types de Cellules Photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de : silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Cependant, le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

### I.2.2 Matériaux semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. Cela est possible grâce à une jonction p-n de grande surface. Cette jonction désigne une zone du cristal où le dopage varie brusquement, passant d'un dopage p à un dopage n dans laquelle les paires électron-trou créées par la lumière sont séparées par le champ électrique de la jonction.

Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant.

### I.2.3 Structure et Description de la jonction photovoltaïque

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction J.

La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode k tandis qu'à l'autre face une plaque métallique joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm.

Ces cellules étant fragiles, elles sont enveloppées par une couche de verre, résistant aux chocs et aux intempéries et parfois recouvertes d'une couche anti-reflet.

Dans l'architecture classique d'une cellule, des collecteurs de charges sont ajoutés par le biais de techniques sérigraphiques, c'est-à-dire par l'ajout d'une pâte métallique (selon un motif défini) qui est par la suite solidifiée durant un nouveau passage dans un four. On dépose sur la couche p, à l'arrière, une électrode positive généralement en aluminium ou en argent, elle-même déposée sur un substrat. Cette métallisation conclut la fabrication des cellules en tant que telles.

La strate n est placée au-dessus de la strate p, elle est donc la première à être exposée à la lumière solaire. Lorsqu'un rayon lumineux frappe le dispositif il peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. En général le semi-conducteur de base est du silicium monocristallin comme celui qui est utilisé pour la fabrication des transistors mais on rencontre maintenant plus fréquemment du silicium polycristallin moins coûteux à produire.

Lors de collisions avec les atomes, les photons peuvent transférer leur énergie aux électrons, au point de les exciter et ainsi de les forcer à quitter leur bande de valence pour rejoindre la bande de conduction (ce qui est possible grâce à la faible épaisseur de la bande interdite). Ils peuvent alors se déplacer dans la matière, tout en laissant un « trou » derrière eux. Pour rappel, les électrons sont chargés négativement. Les trous ont donc une charge positive. Comme il est bien connu, les charges de signe opposé s'attirent ! Les électrons vont donc aller vers la couche dopée p et les trous vont se déplacer jusqu'à la couche dopée n. Ce mouvement de charges engendre un courant électrique, qui est recueilli dans un circuit conducteur placé sous les cellules et qui relie l'ensemble des cellules d'un panneau.

Cette première étape est importante, mais elle ne suffit pas pour générer le courant souhaité. Il faut parvenir à séparer les trous des électrons pour éviter leur recombinaison.

Les panneaux peuvent alors être assemblés en série ou en parallèle, selon les caractéristiques électriques souhaitées puis ils seront encapsulés. Les cellules photovoltaïques

au silicium monocristallin sont d'un bleu ou d'un noir uniforme. En revanche, les structures polycristallines sont marquées par des motifs correspondant aux limites des cristaux.

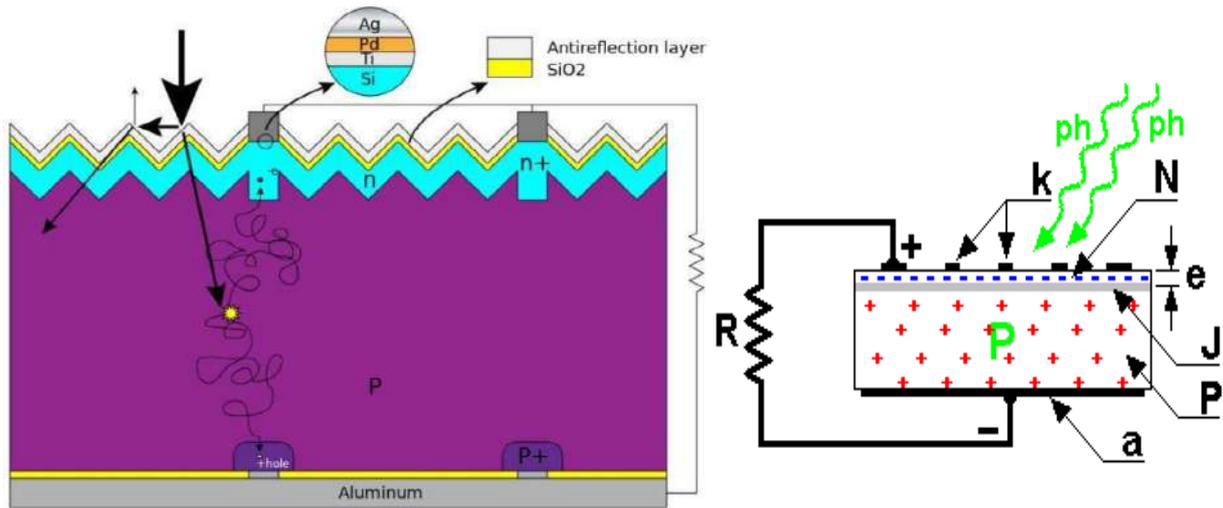
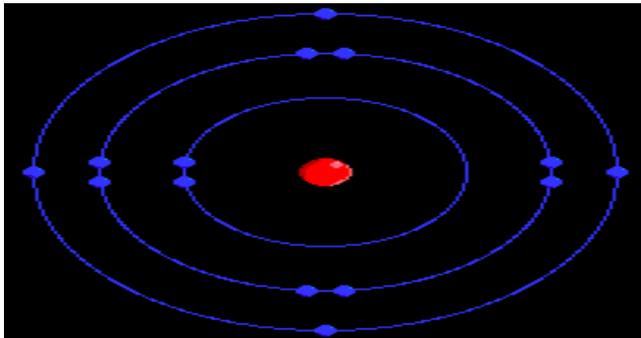


Figure I-7 : Structure et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.2.4 L'élément de base le silicium



symbole	abondance (%)	Nombre de neutrons dans son noyau
$^{28}\text{Si}$	92,23	14
$^{29}\text{Si}$	4,67	15
$^{30}\text{Si}$	3,10	16

Figure I-8 : Propriétés électroniques

Le Silicium a pour numéro atomique  $Z=14$ , sa configuration électronique est  $(K)^2(L)^8(M)^4$ . Un atome de silicium possède donc 4 électrons sur sa couche de valence.

Les installations photovoltaïques utilisées dans l'habitat présentent des avantages. En effet, elles sont d'une grande fiabilité (avec une durée de vie d'environ 25 ans), ne nécessitent aucune pièce mobile, pratiquement aucun entretien et n'engendre aucun coût de fonctionnement. Mais elles présentent aussi quelques inconvénients par rapport à une installation électrique traditionnelle : elles ont des coûts de fabrication élevés, fonctionnent par intermittence (en effet, leur rendement dépend de l'ensoleillement) et ont un rendement qui reste assez faible malgré les grandes améliorations réalisées dans ce domaine depuis leur invention.

Nous allons ici comparer les principaux types de cellules utilisées actuellement, en examinant leurs avantages et leurs inconvénients. Il en existe d'autres actuellement à l'étude, mais leur utilisation est pratiquement négligeable. Elles se distinguent principalement en fonction des technologies de silicium qu'elles utilisent.

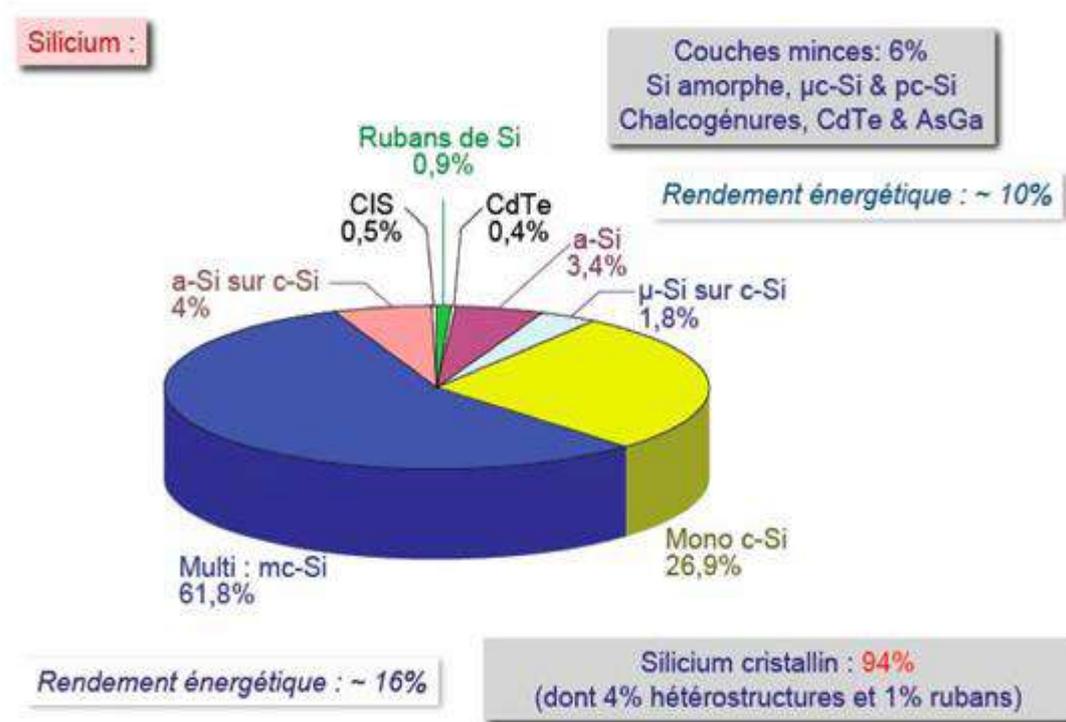


Figure I-9 : Diagramme circulaire de l'utilisation du silicium dans les cellules solaires en 2009

### a. Cellule en silicium<sup>1</sup> amorphe

Lors de sa transformation, le silicium produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire. C'est la cellule qu'on utilise généralement pour les calculatrices et les montres dites « solaires ».

### b. Cellule en silicium monocristallin

Lors de son refroidissement, le silicium fondu se solidifie et ne forme qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal pur en fines lamelles qui donneront les cellules. Ce sont historiquement les premières cellules photovoltaïques élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

<sup>1</sup> Les cellules à silicium cristallin qui peuvent être monocristallin ou polycristallin présentent aujourd'hui plus de 90% du marché des cellules photovoltaïques.

### c. Cellule en silicium polycristallin

Les cellules à silicium polycristallin sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Le silicium est fortement chauffé puis refroidi dans un moule où les cristaux s'orientent de façon irrégulière. Vue de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes) qui forment des motifs. Ce type de cellule est également bleu.

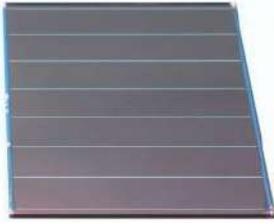


Figure I-10 : Cellule en silicium amorphe



Figure I-11 : Cellule en silicium monocristallin

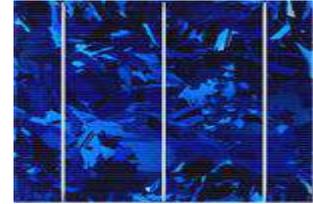


Figure I-12 : Cellule en silicium Polycristallin

### d. Les cellules dites tandem<sup>2</sup> (multi-jonctions)

Pour les cellules dites "tandem", on procède à un empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (de silicium *cellule tandem* amorphe sur du silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes ou cristallines. Grâce à une forme correspondante, les photons de la lumière du soleil peuvent être retenus plus longtemps dans les couches respectives grâce à une réflexion supplémentaire. Elles permettent d'atteindre des largeurs de bande interdite supérieures à celle du silicium massif. On peut donc en associant une cellule silicium classique et une cellule faite avec des nanoparticules ou nano-fils de silicium réaliser une cellule à 2 jonctions dont le rendement potentiel est de 42%.

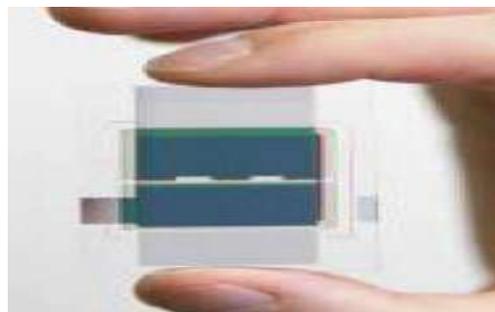


Figure I-13 : Cellule tandem

<sup>2</sup> Tandem est un type de cellules qui a commencé à être industrialisé en 2007 au Japon. Une technologie en progrès.

### e. Cellules organiques

Au-delà de l'amélioration des performances en termes de rendement et de fiabilité des dispositifs photovoltaïques, le véritable enjeu est de réduire de façon significative le coût du kW/h produit. Les matériaux organiques plastiques ou polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever.

Si le marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90% par le silicium cristallin, les composites organiques/inorganiques, encore au stade de l'étude de la faisabilité d'introduction sur le marché en termes de rendement et de fiabilité, sont appelés à s'imposer là où les technologies du silicium et, plus largement, de l'inorganique sont ou seront mal positionnées.

L'organique, autrement dit les plastiques, moins onéreux, apparaît en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible. Dégradables, les polymères (molécules constituées de chaînes de molécules semblables appelés monomères) garantissent une technologie propre dans un contexte de développement durable. Faciles à manipuler, leur choix comme matériaux de base permettrait aux industriels de n'avoir recours, pour l'ensemble de l'ingénierie de la cellule, qu'à une seule et même technologie peu coûteuse, car proche des techniques utilisées par l'imprimerie. Autre avantage, ces plastiques permettraient également d'être utilisés sur des produits souples ou de formes diverses (tuiles de bâtiments par exemple), donnant accès à des marchés inaccessibles aux technologies classiques, notamment par leur intégration à des systèmes complexes.



Figure I-14 : Cellule solaire plastique de grande dimension (100 mm x 100 mm)

L'utilisation des matériaux organiques pour des applications photovoltaïques a été étudiée de manière intensive durant les vingt dernières années. Faute d'innovations importantes, ces premières études ont buté sur de faibles rendements de conversion des matériaux. La recherche redémarre très fortement depuis six ou sept ans en Europe, aux États-Unis et au Japon avec un effort motivé par la découverte de matériaux innovants ainsi que par la mise en œuvre de nouveaux types de jonctions.

	Amorphe	Monocristallin	Polycristallin
Durée de vie	10 ans	35 ans	35 ans
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnent avec un éclairage faible.</li> <li>-Les coûts de fabrication sont meilleur marché que ceux du silicium cristallin.</li> <li>-Résiste aux températures élevées.</li> <li>-Souple et rigide et réalisation simple.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elles offrent une très bonne productivité, (Presque trois fois plus que les cellules amorphes !).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-une bonne productivité, (intermédiaires entre ceux des cellules à silicium monocristallin et amorphe)</li> <li>- coût de fabrication faible par rapport aux cellules à silicium monocristallin.</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mauvais rendement en plein soleil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- très haut coût de fabrication.</li> <li>- moins écologiques que des panneaux polycristallins.</li> <li>-Mauvais rendement aux températures élevées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux).</li> <li>-Prix élevé.</li> </ul>

Tableau (I-1) Comparaison entre les cellules à base de silicium

### I.3 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

Selon la figure, le courant généré par la cellule photovoltaïque  $I$  est donné par :

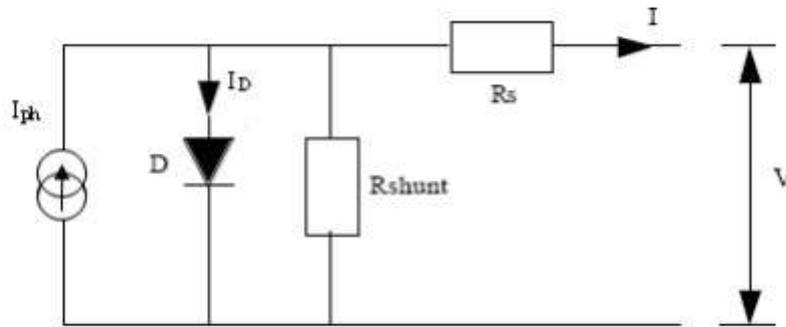


Figure I-15 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (\text{I.1})$$

$$I_D = I_S \left[ \exp \left( q \frac{V + R_S I}{A k T} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.2})$$

$I_{ph}$ (A): le photo -courant.

$I$  (A): le courant généré par la photopile.  $V$

(V) : la tension aux bornes de la cellule.

$R_s$ ( $\Omega$ ) : la résistance série.

$R_{sh}$ ( $\Omega$ ) : la résistance shunt.

$I_S$  (A) : le courant de saturation.

$q$ : la charge de l'électron= $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

$A$  : le facteur de qualité de la cellule.

$K$ : la constante de boltzmanne =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

$T$ : la température de fonctionnement en Kelvin.

Le facteur de qualité de la cellule A est évalué par estimation, sa valeur est de 2 pour les cellules cristallines et entre 1 et 2 pour les cellules amorphes. Si on ne trouve pas de valeur imposée par le constructeur, la valeur de 1.3 est suggérée en fonctionnement normal.<sup>3</sup>

### I.3.1 Caractéristique courant - tension

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette caractéristique  $I = f(V)$  est identique à celle du module photovoltaïque, elle se met sous la forme mathématique à partir des deux équations (I.1) et (I.2) comme suit :

$$I = I_s \left[ \exp \left( q \frac{V + R_s I}{A k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{I.3})$$

Si on trace le courant (I) en fonction de la tension (V) en aura une soustraction de deux courbes : ( $I_{ph}$ ) et ( $I_D$ ) avec ( $R_{sh}$  est très grande ).

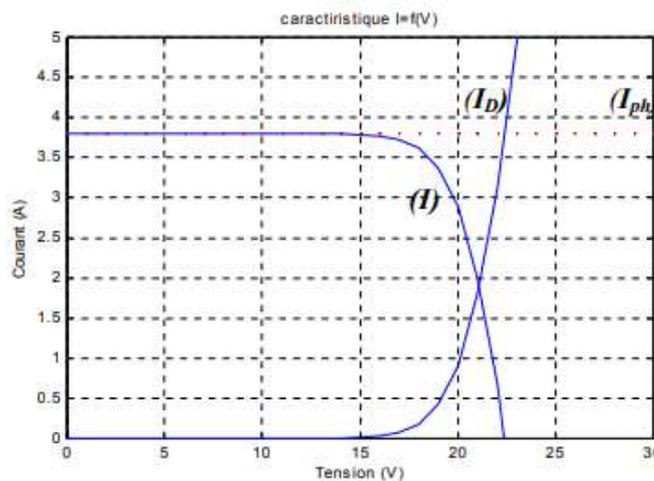


Figure I-16 : La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque

<sup>3</sup> Boukli-hacene Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Énergétique. Thèse, Université Abou Bakr Belkadi, Tlemcen. 2011 p.41-50

### I.3.2 Puissance maximale d'une cellule photovoltaïque

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, etc..), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est égale au produit du courant continu fourni I et la tension continue V

Pour d'une cellule idéale, la puissance maximale  $P_{max\text{idéale}}$  correspond à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multiplié par le courant de court-circuit  $I_{cc}$

$$I_{cc}(V = 0) = I_{ph} ; V_{co}(I = 0) = \frac{A K T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

$$P_{max\text{idéale}} = V_{co} I_{cc} \quad (\text{I.4})$$

$P_{max\text{idéale}}$ (w) : Puissance mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

$V_{co}$ (V) : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque

$I_{cc}$  (A) : Intensité de court- circuit mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est plus « arrondie», et la tension au point de puissance maximale est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  de même que le courant fourni est inférieur pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{cc}$

Donc, avec une résistance série très faible  $R_s$  et une résistance shunt très élevée  $R_{sh}$ , on peut écrire :

$$P = V \left[ I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{qV}{AKT} \right) - 1 \right] \right] \quad (\text{I.5})$$

Cette puissance est donc maximale au point défini par  $dP/dV = 0$  soit :

$$I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{qV}{AKT} \right) - 1 \right) - V I_s \left( \frac{q}{AKT} \right) \exp \left( \frac{qV}{AKT} \right) = 0 \quad (\text{I.6})$$

La tension  $V_{max}$  et le courant  $I_{max}$  correspondant au maximum de puissance sont données alors par :

$$\left( 1 + \frac{qV_{max}}{AKT} \right) \exp \left( \frac{qV_{max}}{AKT} \right) = 1 + \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{I.7})$$

Donc :

$$I_{max} = \left( \frac{I_{ph}}{1 + \frac{qV_{max}}{AKT}} \right) \exp \left( \frac{qV_{max}}{AKT} \right) \quad (\text{I.8})$$

$I_{max}$  : le courant correspondant au maximum de puissance

$V_{max}$  : la tension correspondant au maximum de puissance

Le produit  $V_{max} * I_{max}$  nous donne la puissance maximale qui représente 80% environ de produit  $V_{co} * I_{cc}$

## I.4 Caractéristiques d'un module solaire<sup>4</sup>

### I.4.1 Caractéristique courant-tension I(V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

### I.4.2 Caractéristique puissance-tension P(V)

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière : c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes.

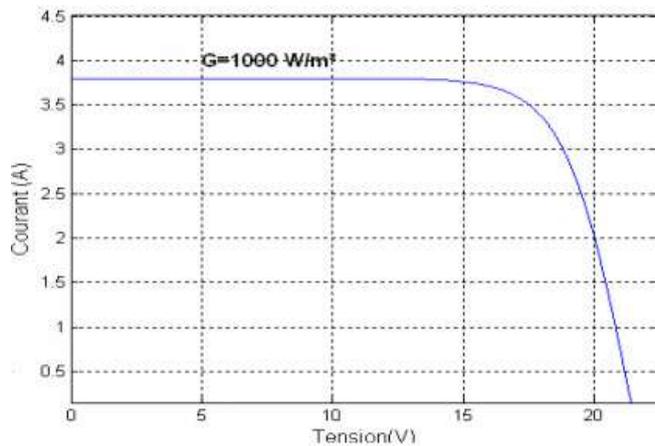


Figure I-17 : Caractéristique I(V) d'un module solaire, T=25°C

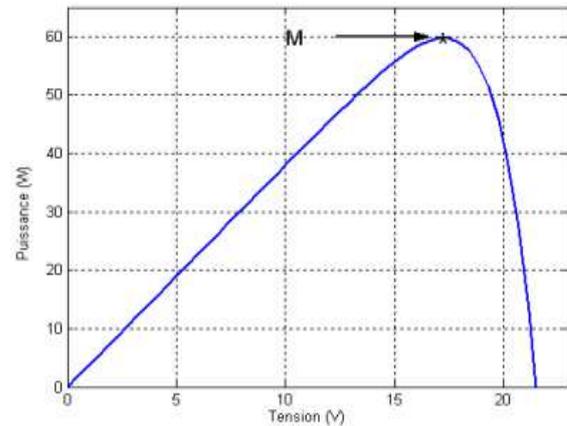


Figure 1-18 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C

**Note :** Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

### I.4.3 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale d'un générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement seule la courbe I (V) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

<sup>4</sup> Nous fixant la température à 25°C

Elle est répartie en trois zones essentielles :

**La zone (I) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**La zone (II) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

**La zone (III) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

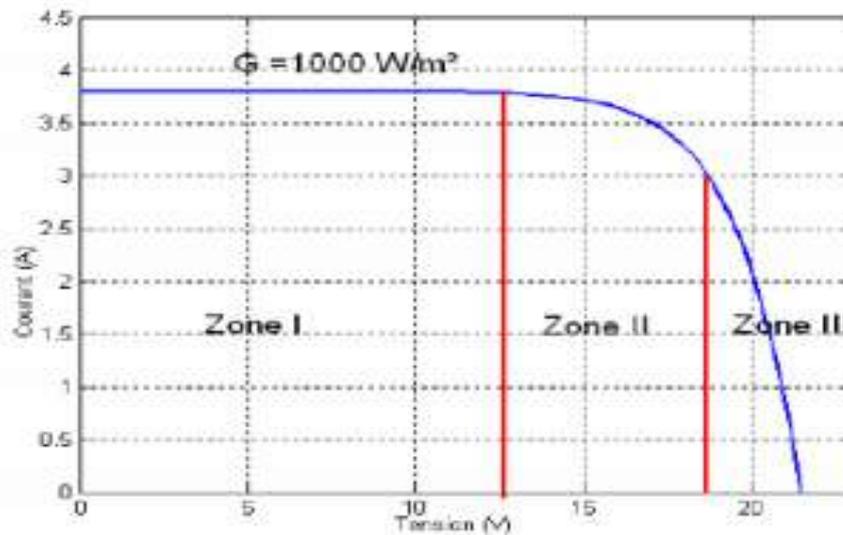


Figure I-19 : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C

#### I.4.4 Liaison des cellules photovoltaïque

La puissance générée par une seule cellule photovoltaïque étant très faible, l'association de plusieurs cellules en série ou en parallèle est nécessaire. Dans cette partie nous présenterons l'influence de cette association sur la tension et le courant fournis par le panneau solaire.

- **Groupement en série :**

Dans un groupement en série figure (I-8-1), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

La figure (I-8-2) montre la caractéristique résultante ( $I_s, V_s$ ) obtenue par l'association en série (indice s) de ns cellules identiques ( $I_{cc}, V_{co}$ ).

Avec :  $I_{sc} = I_{cc}$ : le courant de court-circuit.

$V_{sc} = n_s V_{co}$ : la tension de circuit ouvert

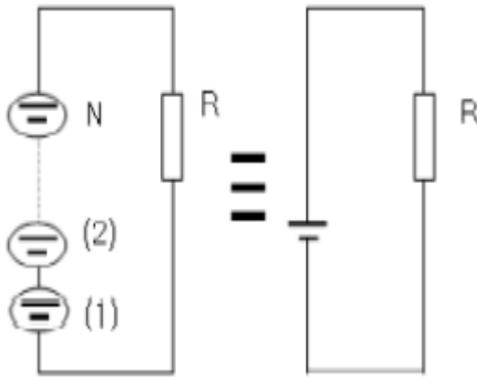


Figure I-20 : Association des modules en série

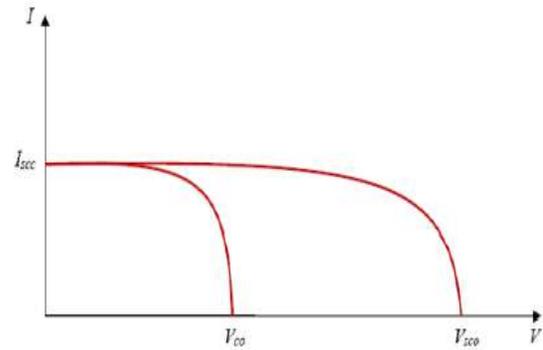


Figure I-21 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules

• **Groupement en parallèle :**

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (I-22), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

La figure (I-23) montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ), Avec :

$I_{pcc} = nI_{cc}$  : le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$  : la tension de circuit ouvert

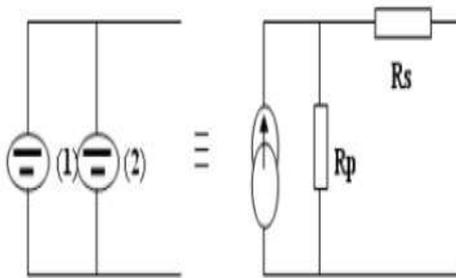


Figure I-22 : Association des modules en parallèle

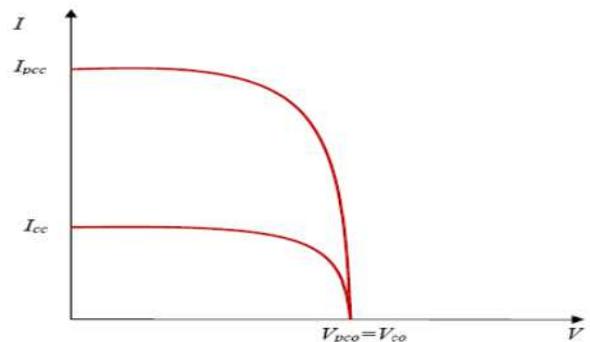


Figure I-23 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle

• **Groupement mixte (série-parallèle) :**

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques.

La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport ns parallèlement à l'axe des tensions et de rapport np parallèlement à l'axe des courants, ns et np étant respectivement les nombres

totaux de cellules en série et en parallèle.

Avec :  $I_{gcc} = n_p \cdot I_{cc}$ : courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = n_s \cdot V_{co}$ : tension du circuit ouvert du module résultant.

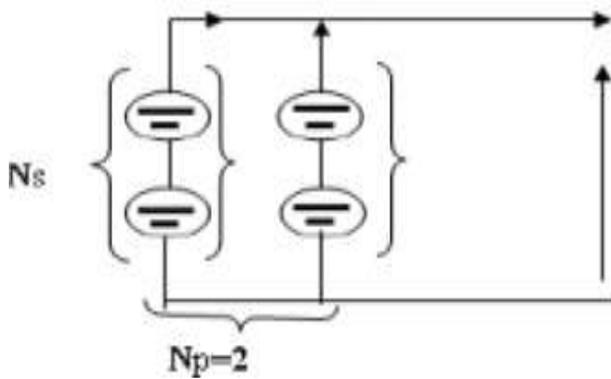


Figure I-24 : Association mixte des modules

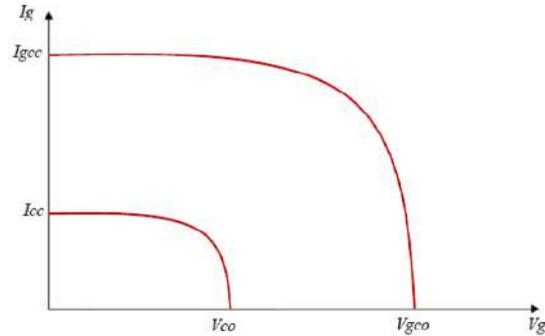


Figure I-25 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques.

Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

#### I.4.5 Influence de la température et de l'éclairement

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque dépend du niveau d'éclairement solaire et de la température de la cellule. Dans cette partie, nous allons démontrer l'influence du changement des conditions météorologiques sur le courant et la tension générés par le panneau solaire.

- **Influence de l'éclairement :**

La figure (I-26) représente l'influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension pour une température constante et sur différentes valeurs d'éclairements ( $200\text{w/m}^2$ ,  $400\text{w/m}^2$ ,  $600\text{w/m}^2$ ,  $800\text{w/m}^2$ ,  $1000\text{w/m}^2$ ), la courbe des caractéristiques  $I(V)$  va présenter cinq allures différentes selon le changement de l'éclairement.

Comme le montre ce graphique, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) croît proportionnellement avec l'éclairement, alors que la tension à vide ( $V_{co}$ ) varie très peu (environ  $0,5\text{ V}$ ).

Ainsi, plus la couverture nuageuse est importante, plus l'intensité du courant généré sera faible.

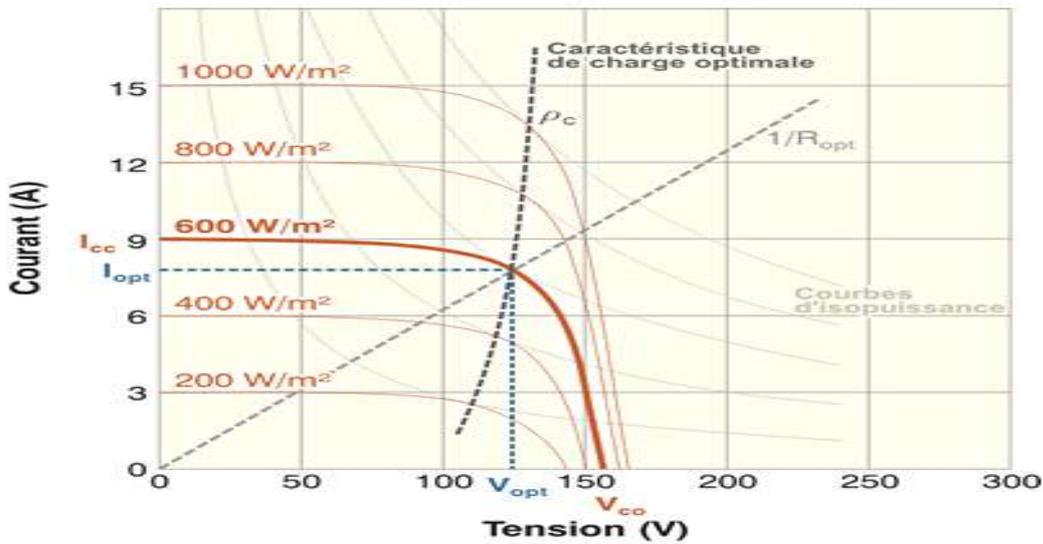


Figure I-26 : l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension pour une température constante

- Influence de la température

La figure (I-27) représente l'influence du changement de la température (-75°C, 0°C, 25°C, 50°C, 75°C) sur la caractéristique courant-tension et puissance-tension à un éclairement fixe.

On remarque que lorsque la température augmente la tension de module diminue et lorsqu'elle diminue la tension augmente en outre la relation entre la température et la tension d'un module est inversement **proportionnelle**, alors que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de module.

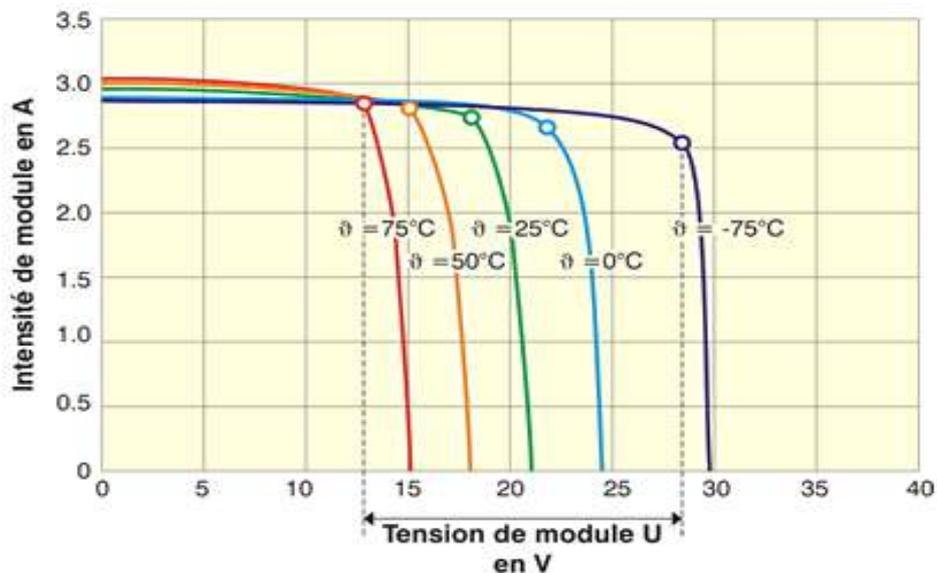


Figure I-27 : L'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension pour une température constante

#### I.4.6 Paramètres électriques de la cellule photovoltaïque

On décrit un GPV élémentaire par les paramètres suivants <sup>5</sup>:

- **La puissance crête** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (température de 25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- **La tension à vide  $V_{CO}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant pour un éclairement « plein soleil ».
- **Le courant de court-circuit  $I_{CC}$**  : Courant débité par un module en court -circuit pour un éclairement « plein soleil ».
- **Point de fonctionnement optimal** : ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ) : Lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil  $P_{opt} = V_{opt} \cdot I_{opt}$ .
- **Le rendement  $\eta_{PV}$**  : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut avoir la cellule  $FF = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{V_{co} \cdot I_{cc}}$

#### I.5 Les différents types d'installation Photovoltaïque

- **Les installations autonomes :**

Sont des installations non raccordées au réseau, composées de panneaux PV et dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité, la présence d'un régulateur est nécessaire pour protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

Ces installations sont des solutions d'un point de vue technique et financier pour les installations isolées, car elles peuvent remplacer des ensembles moteur-générateur. Par ailleurs, dans une configuration autonome, le champ PV est surdimensionné de sorte que l'alimentation de charge ainsi que la recharge des batteries de stockage puissent être garanties avec une certaine marge de sécurité en prenant compte les jours à faible ensoleillement.

---

<sup>5</sup> Pernet, Pascal. *Développement de cellules solaires en silicium amorphe de type "n-i-p" sur substrats souples*. Thèse. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001 p.22

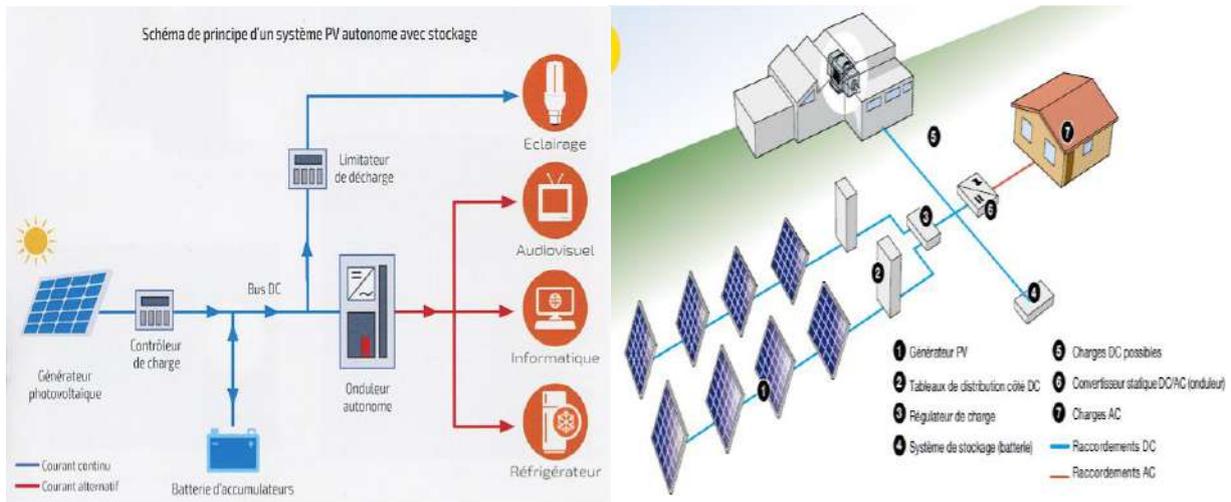


Figure I-28 : Installation photovoltaïque autonome

- **Installations raccordées au réseau :**

Les installations photovoltaïques sont raccordées au réseau électrique grâce à un onduleur, qui convertit le courant continu d'origine photovoltaïque et courant alternatif. L'électricité produite est directement utilisée par la charge ou injectée dans le réseau électrique. Ce système nécessite un compteur spécial car de l'électricité est réinjectée vers le réseau. On utilise donc des compteurs réversibles.

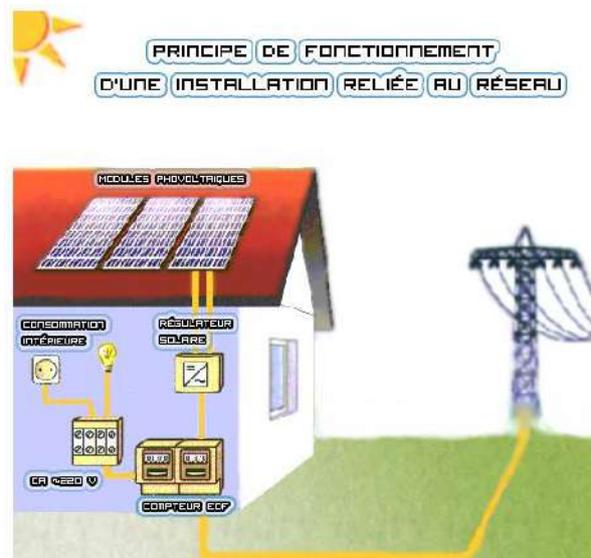
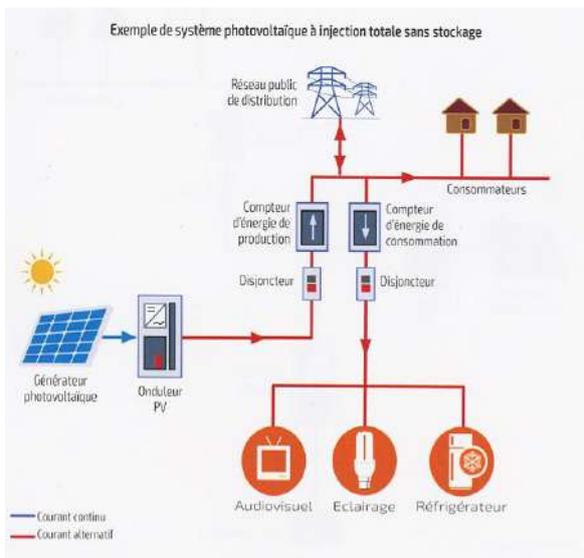


Figure I-29 : Installation photovoltaïque raccordé au réseau

## Conclusion

Après avoir étudié le principe d'exploitation de l'énergie solaire et afin d'assurer une meilleure autonomie à l'installation on doit l'équiper par des accumulateurs solaires dont le processus de charge et de décharge doit être effectué selon un algorithme de charge efficace et très sophistiqué qu'on verra dans le 2<sup>ème</sup> chapitre .

## **Chapitre II**

### **Stockage d'énergie (accumulateur de batteries)**

## Historique

Volta découvrit en 1800 qu'un flux continu de force électrique était possible lorsqu'on utilisait certains fluides conducteurs pour engendrer une réaction chimique entre des métaux. De plus Volta s'aperçut que la tension augmentait lorsque les piles voltaïques étaient empilées. Ceci conduisit à l'invention de la batterie. Dès lors les expériences conduites ne se limitèrent plus à une brève démonstration d'étincelles ne durant qu'une fraction de seconde. Un écoulement apparemment continu de courant électrique était désormais disponible.

Des nouvelles découvertes furent effectuées lorsque Sir Humphry Davy installa la plus grosse et la plus puissante batterie électrique dans les chambres fortes de la 'Royal Institution' de Londres. Il raccorda la batterie à des électrodes en charbon et produisit la première lumière électrique. Comme il le fut rapporté par des témoins, sa lampe voltaïque à arc produisit « l'arc ascendant de lumière d'une brillance encore jamais vue ».

En 1802, le Docteur William Cruickshank conçut la première batterie électrique capable d'être produite en série. Cruickshank arrangea des feuilles carrées de cuivre soudées à leurs extrémités et intercalées avec des feuilles de zinc de même taille. Ces feuilles étaient placées dans une longue boîte en bois rectangulaire qui était ensuite refermée étanchement à l'aide de ciment. Des encoches à l'intérieur de la boîte permettaient de maintenir les plaques métalliques bien en place. La boîte était remplie d'une solution aqueuse salée (saumure) ou d'acide dilué. Jusqu'à une certaine époque toutes les batteries comportaient des éléments/accumulateurs primaires, ce qui voulait dire qu'elles n'étaient pas rechargeables. En 1859, Le physicien français Gaston Planté inventa la première batterie rechargeable. La batterie secondaire était basée sur un couple chimique acide plomb, qui est toujours utilisée de nos jours.

La troisième méthode d'obtention d'électricité fut découverte relativement tard : l'électricité produite par magnétisme. En 1820, André-Marie Ampère (1775-1836) s'aperçut que des fils transportant un courant électrique étaient de temps en temps attirés l'un vers l'autre mais que parfois ils se repoussaient. En 1831, Michael Faraday (1791-1867) démontra comment un disque de cuivre pouvait produire le passage d'un courant électrique en permanence quand il était en rotation à l'intérieur d'un fort champ magnétique. Faraday et son équipe de recherche réussirent à produire une force électrique permanente tant que le mouvement entre une bobine et un aimant continuait.

En 1899, Waldmar Jungner, un Suédois, inventa la batterie au nickel-cadmium. En 1947, Neumann réussit à étanchéfier complètement l'accumulateur. Ces progrès conduisirent à la batterie moderne étanche au nickel-cadmium.

La recherche sur les batteries au NiMH commença dans les années 1970 mais les alliages d'hydrures métalliques étaient instables dans le contexte d'un accumulateur. Des nouveaux alliages d'hydrures furent développés dans les années 1980 qui améliorèrent leur stabilité. Le NiMH devint disponible commercialement dans les années 1990.

Les premières batteries primaires au lithium apparurent au début des années 1970. Des tentatives de développement de batteries rechargeables au lithium suivirent dans les années 1980 mais échouèrent à cause de problèmes de sécurité. Du fait que le lithium sous forme métallique est par nature très instable, particulièrement lors de la charge, la recherche donc s'est orientée vers des batteries à lithium non métallique utilisant des ions de lithium. Bien que légèrement inférieur en densité d'énergie que son homologue à lithium métallique, le Lithium-ion (Li-ion) ne présente pas de danger si certaines précautions lors de la charge et de la décharge sont prises. En 1991, Sony Corporation a commercialisé la première batterie au Li-ion.<sup>6</sup>

## Introduction

Pour une utilisation optimale d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'avoir un élément de stockage pour stocker l'énergie produite.

En effet, la demande énergétique est une fonction de la charge à alimenter et les appareils utilisés. L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit). Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité.

Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est les batteries d'accumulateurs électrochimiques.

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 Photovoltaïque. 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.

---

<sup>6</sup> Isidor Buchmann, *L'histoire des accumulateurs* [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://nicd.net/wpnicd/index.php/lhistoire-des-accumulateurs/>

- Stabilisation de la tension : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ photovoltaïque et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

Généralement, les batteries solaires sont très coûteuses, elles doivent être utilisées avec prudence afin de prolonger leur vie, et pour cela nous procéderons à une étude sur les différents types de technologies des batteries d'accumulateurs, leurs caractéristiques et leurs principes de fonctionnement.

*Qu'est-ce qu'une batterie ?*

## II.1 Description

Une batterie d'accumulateurs appelé plus communément "batterie", est un assemblage d'accumulateurs électrochimiques qui est un "générateur réversible", il peut stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer en énergie électrique à tout moment sur demande, Elle peut donc se charger et se décharger, selon des opérations réversibles.

Cette réaction est activée au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte, une substance conductrice liquide ou solide, et reliées à l'extérieur par un fil conducteur. Quand la batterie se décharge, l'électrode négative (anode) émet des électrons qui passent par le fil et sont absorbées par l'électrode positive (cathode). Ce mouvement d'électrons constitue un courant électrique qui peut être ensuite transformé pour faire tourner un moteur ou faire fonctionner un appareil électronique.

Pour équilibrer cet échange d'électrons, un échange d'ions positifs s'effectue entre les deux électrodes via l'électrolyte. Quand la batterie est en phase de recharge, avec un apport extérieur d'électricité, les mouvements sont inversés.

La quantité d'énergie pouvant être stockée dans une batterie s'appelle la "capacité". Elle est exprimée en Ampère-heure (Ah). En multipliant cette capacité par la tension de la batterie on obtient une quantité d'énergie en Watt-heure (Wh). Exemple : Une batterie 12V / 100Ah à une capacité de  $100\text{Ah} \times 12\text{V} = 1200\text{ Wh}$  soit 1.2 kWha.

## II.2 Les différents types de batteries

Les batteries utilisent des couples de matériaux capables d'échanger facilement et longtemps des électrons et des ions positifs, *Il existe quatre principaux types de batteries utilisées pour stocker l'électricité produite par les installations solaires photovoltaïques* **les batteries au plomb (plomb ouvert, AGM et Gel).**

Parmi les technologies les plus prometteuses, les batteries à base de lithium, occupant plus de 70% du marché mondial dans le domaine des accumulateurs portables, possèdent des caractéristiques et un potentiel d'amélioration important, pouvant servir au développement de nouveaux systèmes de production notamment les systèmes photovoltaïques.

Le rendement énergétique de chaque technologie a été également comparé (Tableau (II-1)).

La synthèse de l'ensemble des critères a permis d'établir un indice nommé indice de performance énergétique<sup>1</sup> qui permet de pouvoir effectuer une comparaison entre chaque technologie suivant les applications dans lesquelles elle est potentiellement utilisable.

Technologie	Densité énergétique (Wh/kg)	Densité de puissance (W/kg)	Temps de décharge	Durée stockage	Auto décharge (%/mois)	Rendement (%)	Durée de vie (nbr. Cycle)	Coût (€/kWh)
Plomb (Pb)	25 à 45	80 à 150	15 mn. à 100 h	>1mois	40	60 à 98	300 à 1500 Cy. 80%DOD <sup>2</sup>	50 à 200 €/kWh
Lithium-ion (Li-ion)	80 à 150	500 à 2000	45 mn. à 100 h	Plusieurs Mois	20	90 à 100	> 1500 Cy. 100%DOD	700 à 1000 €/kWh
Nickel-Cadmium Ni-Cd	20 à 60	100 à 800	15mn. à 100h	<1mois	25	60 à 80	300 à 1500 Cy. 100%DOD	200 à 600 €/kWh
Batterie Redox	25 à 35	100 à 140	De 1s à 100h	>1mois	-	>80	1500 à 13000 Cy. 100%DOD	7 à 100 €/kWh
Batterie Métal-air	110 à 300	70 à 150	1h à 100h	-	-	50	-	50 à 200 €/kWh
Super-capacité	0,0001 à 0,005	100 à 10000	De 1s à 10s	Quelques minutes	50	80 à 100	10000 à 500000 Cy. 100%DOD	16000 €/kWh
Volant d'inertie	0,03 à 0,1	400 à 2000	2s à 1h	Quelques minutes	0,1	90	>10000 Cy. 100%DOD	1000 à 5000 €/kWh

Tableau (II-1) : Comparaison des propriétés de différentes technologies de stockage

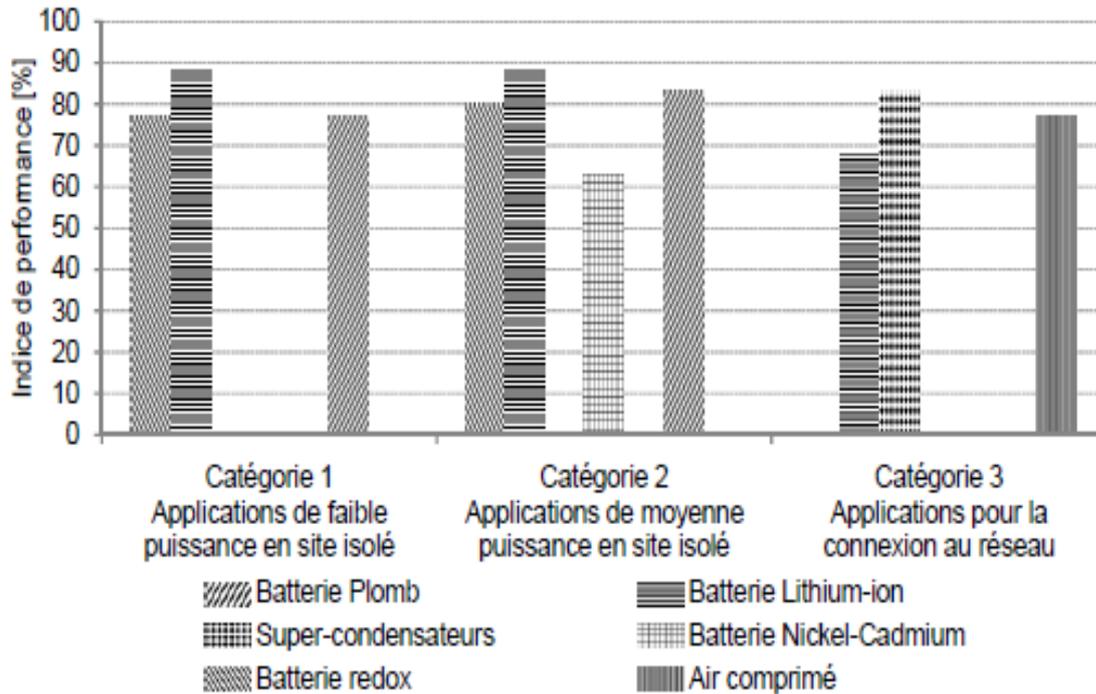


Figure II-1 : Diagramme d'Indices de performances de sept technologies de stockage suivant trois catégories d'applications

Ainsi pour des applications stationnaires de faible puissance dont le principal critère est l'autodécharge (la plus faible possible), le lithium ressort comme le meilleur candidat.

Par contre, pour les applications de puissance moyenne en site isolé, ayant comme critère l'autonomie, la batterie plomb reste le meilleur compromis entre la performance et le coût.

Le lithium-ion ressort dans cette catégorie comme le plus performant mais avec un coût encore trop élevé. Pour la connexion au réseau où le critère essentiel est le stockage de l'énergie élevé (mwh), l'air comprimé et les batteries redox sont les plus appropriés (figure II-2).

Les applications envisageables avec les moyens de stockage actuellement industrialisés se différencient principalement par l'utilisateur du système (distributeur ou particulier) et l'échelle de temps de fonctionnement.

## II.3 Caractéristiques des batteries

### II.3.1 La capacité de stockage

L'énergie stockée dans une batterie, appelée capacité de la batterie, est mesurée en wattheures (Wh), en kilowattheures (kWh) ou en ampères-heures (Ahr). Elle détermine le volume d'énergie pouvant être emmagasinée par la batterie puis redistribuée dans la maison.

La capacité en wattheures (Wh) d'une batterie se calcule à partir de l'intensité de la batterie (donnée en ampère Ah) et en la multipliant par la tension exprimée en volt.

### II.3.2 L'espérance de vie

La durée de vie d'une batterie est généralement évaluée en nombre de cycles qu'elle peut effectuer avant de ne plus être fonctionnelle, c'est à dire sa capacité à se charger et à se décharger. Chaque batterie réduira lentement sa capacité au fur et à mesure du temps qui passe et de la profondeur quotidienne de décharge. Moins une batterie effectuera de cycles, moins elle s'usera rapidement. On estime qu'une batterie sera bientôt inefficace lorsqu'elle aura perdu environ 20% de sa capacité d'origine. De nos jours, les batteries lithium sont notamment les plus performantes avec une durabilité pouvant atteindre les 6000 cycles !

### II.3.3 État de charge

L'état de charge (SOC), exprimé en %, est le rapport entre la capacité résiduelle et la capacité nominale de l'accumulateur. C'est à dire l'énergie restant dans la batterie. La profondeur de décharge (DOD), exprimé en %, est le rapport entre la capacité déjà déchargée et la capacité nominale de l'accumulateur. C'est à dire l'énergie consommée dans la batterie. La somme des valeurs de SOC et DOD donne toujours 100%. Exemple : Une batterie qui a une profondeur de décharge de 30% à un état de charge de 70%.

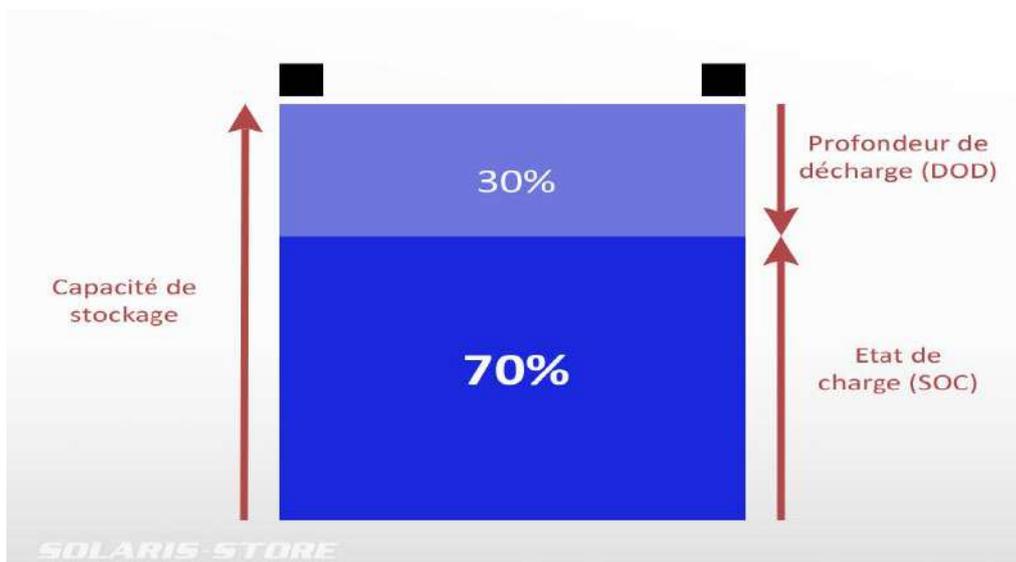


Figure II-2 : Etat de charge et profondeur de décharge

### II.3.4 La profondeur de décharge

En fonction de la technologie utilisée, et afin de prolonger la durée de vie des batteries, celles-ci ne se déchargent jamais complètement. C'est pourquoi les batteries sont largement "surdimensionnées" par rapport à l'installation en place, de façon à ce qu'elles ne se déchargent pas au-delà d'un certain seuil. Si ce seuil est donné par le fabricant à 50% par

exemple, alors seulement 50% de la capacité de la batterie peut être utilisée, pas davantage. Cette méthode permet de mieux préserver les batteries sur la durée.

### II.3.5 Tension de limite de décharge VLVD<sup>7</sup>

Il s'agit de la tension minimale  $V_{min}$ , que la batterie ne devra pas aller en dessous, afin d'éviter que celle-ci ne soit endommagée.

### II.3.6 Tension de régulation VR

Les constructeurs des batteries définissent une tension de régulation VR inférieure à la tension de gazéification. Cette tension est la valeur maximale que le régulateur permettra à la batterie d'atteindre à une température donnée. Elle peut être dépassée légèrement en fin de charge.

### II.3.7 Influence de la température

La capacité tient compte de la température de l'accumulateur, elle est annoncée en général pour 20 à 25°C. La capacité augmente quand la température augmente et baisse quand la température baisse.

La durée de vie de la batterie va également être liée à cette température d'exploitation. En effet, une augmentation de 10°C au-dessus de 20°C la réduira de moitié.

## *Qu'est-ce qu'une batterie solaire ?*

### II.4 Batteries solaires

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes.

Son fonctionnement de base est identique à celui des autres types de batteries c'est à dire que l'énergie est stockée sous forme chimique. Des composants réagissent entre eux à l'intérieure, ce qui permet d'accumuler ou de restituer de l'électricité au moment voulu. Cependant, la façon dont on utilise les batteries solaires n'est pas la même, ce qui implique des technologies différentes. Par exemple, les batteries de voiture sont fortement sollicitées au démarrage, et se rechargent ensuite très vite. A l'inverse, les batteries solaires sont vidées lentement, sur de longues périodes, et sont parfois rechargées quelques jours après seulement.

---

<sup>7</sup> Low Voltage LoadDisconnect

C'est pour cela qu'elles sont également appelées "batteries stationnaires", ou "batteries à décharge lente". Une batterie de voiture ne peut pas survivre très longtemps à ce traitement. Les batteries des téléphones ou des ordinateurs portables fonctionnent sur le même principe que les batteries solaires, mais la quantité d'énergie stockée n'est pas la même. Une batterie de téléphone stocke quelques Ampères-heures (Ah), alors qu'une batterie solaire peut en stocker plusieurs centaines.

Le terme exact, quand on parle de batterie, est "batterie d'accumulateurs". Elles sont en effet constituées de plusieurs éléments (les accumulateurs) ayant chacun une tension de 2V. Pour obtenir une tension supérieure, ces éléments sont assemblés en série. On peut trouver des batteries solaires de 2V, 6V, 12V (le plus courant), 24V ou même 48V.<sup>8</sup>

## II.5 Critère de Choix de batterie solaire pour une installation photovoltaïque

### II.5.1 Besoin de stockage énergétique du système

- La quantité d'électricité stockable dans une batterie s'exprime en Wattheure (Wh)
- La capacité d'une batterie est accompagnée d'une indication de type C5, C20 ou C100, correspondant respectivement à un temps de décharge de 5h, 20h et 100h.

### II.5.2 Tension des batteries solaires

On augmente la valeur de la tension Afin d'éviter les dispersions d'énergie dans le stockage et le transport.

Pour obtenir la tension ou la capacité souhaitée, il est souvent nécessaire d'assembler plusieurs batteries.

- Le montage en série permet d'additionner la tension des batteries (en V), tout en gardant la capacité en Ah d'une seule batterie.
- Le montage en parallèle permet d'additionner la capacité de stockage (Ah), tout en gardant la même tension en V.

### II.5.3 Durée de vie de la batterie solaire

Les batteries doivent pouvoir être chargées et déchargées un grand nombre de fois. C'est ici que la notion de cycle prend toute son importance car c'est l'unité permettant d'estimer la durée de vie d'une batterie solaire. Un cycle est constitué d'une phase de charge et d'une phase

---

<sup>8</sup> Zonetronik.com. *Définition d'une batterie solaire* [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://www.zonetronik.com/definition-dune-batterie-solaire/>

de décharge. La durée de vie, ou nombre de cycles, que peut effectuer une batterie varie fortement en fonction du type de batterie et surtout de son utilisation.

### II.5.4 Autonomie nécessaire dans le système PV

Le nombre de jours pendant lesquels les batteries peuvent tenir sans avoir besoin d'être rechargées, L'autonomie moyenne d'une installation en site isolé est de 3 à 5 jours. Pour trois jours d'autonomie, il vous faudra donc une batterie capable de stocker 3000Wh si votre besoin énergétique journalier est de 1000Wh. Avec une tension de 12V, la capacité sera de 250 Ah. Pour respecter la profondeur de décharge maximale de 40%, une capacité de 420 Ah environ sera nécessaire.

### II.5.5 Dimensionnement des batteries solaires

$$C(\text{Ah}) = \frac{(D, N)}{(L, U)}$$

(II.1)

Le calcul de la capacité C du pack de batteries dépend de plusieurs données :

N, le nombre de jours avec un ensoleillement insuffisant. En Afrique de l'Ouest, pour une utilisation annuelle nous prenons 3 jours ou 4 jours de réserve en batteries sont nécessaires en intégrant la saison des pluies.

D, la demande énergétique quotidienne exprimée en Wh/jour. Il s'agit de l'énergie nécessaire pour alimenter vos appareils électriques. D s'obtient en multipliant la puissance de chacun de vos appareils par leur durée d'utilisation quotidienne en heures.

U, la tension en Volt sous laquelle est installée le pack de batteries (12 V, 24 V, 48 V)

L, la profondeur de décharge maximum des batteries.

### II.5.6 Types de défaillance

On groupe généralement les causes de défaillances en six catégories :

- 1- Réparable
- 2- Endommagée : une erreur de manipulation lors d'un transport ou un choc violent a endommagé la batterie.
- 3- Circuit ouvert : dans ce cas, une rupture du circuit électrique se produit dans la batterie, par exemple la liaison électrode/borne terminale, et le circuit est interrompu. La tension aux bornes vaut alors 0 V. la batterie est inutilisable.
- 4- Court-circuit.

- 5- Electrode/grille cette catégorie regroupe tous les phénomènes de défaillance liée aux électrodes et aux grilles supportant les matériaux actifs.
- 6- "Abusée" La batterie a été dans ce cas exposée à des conditions extrêmes : courant de charge ou de décharge trop important ou prolongé.

## II.6 Les technologies lithium-ion innovantes

### II.6.1 La théorie des accumulateurs au Lithium



Figure II-3 : Batterie solaire lithium ion

Bien que le principe en soit connu depuis les années 80 les premiers éléments rechargeables au Lithium n'ont été commercialisés qu'en 1991. Cela à cause du caractère instable du Lithium métallique pendant la phase de charge. Le problème a été résolu en utilisant des ions de lithium pour réaliser l'accu. Le lithium ion (Li-ion) ne présente pas de danger si certaines précautions sont prises lors de la charge.

**Attention :** les accumulateurs au Lithium ion peuvent présenter un risque d'explosion s'ils sont rechargés dans de mauvaises conditions. Ce sont des éléments très sensibles qui demandent des précautions de mise en œuvre.

Les accumulateurs au Lithium sont aujourd'hui très prisés. En effet ils offrent une densité d'énergie très supérieure aux autres technologies pour un poids inférieur. De plus ils sont dépourvus d'effet mémoire, ils présentent une auto décharge presque négligeable et ils ne nécessitent aucun entretien particulier.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Solaris-store.com. *Principe de fonctionnement d'une batterie solaire* [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020.  
Lien : <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie-solaire>

## II.6.2 La chimie des accumulateurs au Li-ion

Le lithium a suscité l'intérêt car c'est un métal très léger, le troisième dans la classification des éléments après l'hydrogène et l'hélium, L'atome de lithium a une forte capacité à libérer un de ses trois électrons, constituant ainsi un ion chargé positivement,  $\text{Li}^+$ . Les constructeurs ont d'abord utilisé le lithium métal pour constituer l'électrode négative, émettrice d'électrons. Mais il est apparu que la répétition de cycles charges-décharges l'altérait. Pour y remédier, la cathode est souvent formée d'oxyde de cobalt, avec un peu de lithium, tandis que l'anode est faite de graphite. L'électrolyte est constitué de sels de lithium dans un solvant et contient donc des ions lithium en grande quantité. D'où l'appellation batterie lithium-ion.

## II.6.3 La cellule de base lithium-ion

L'élément de base est une cellule qui se présente un peu comme un feuilleté : une plaque d'aluminium servant à collecter le courant, puis la cathode, l'électrolyte, puis l'anode, enfin une plaque de cuivre encapsulé dans un boîtier cylindrique ou prismatique rigide comme ci-dessous.

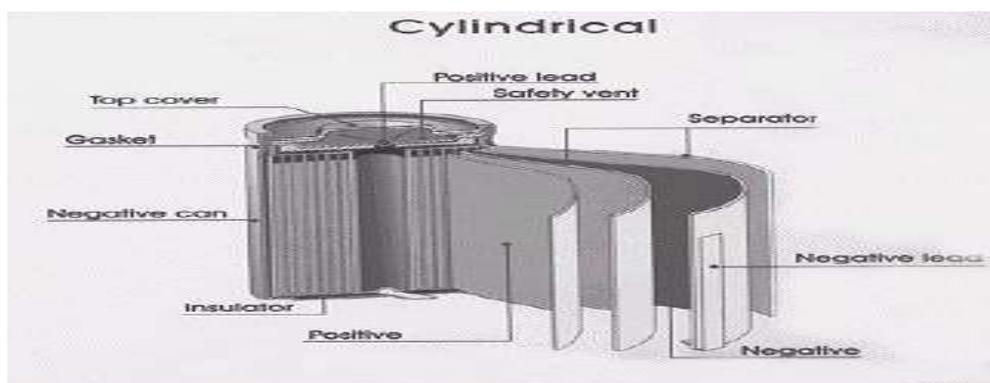


Figure II-4 : Constitution des éléments Li-ion :

Ces cellules, de quelques volts chacune, sont regroupées en plus ou moins grand nombre selon la puissance recherchée pour alimenter un téléphone portable ou une batterie solaire.

**Note :** On trouve rarement dans le commerce des éléments Li-ion au détail. Cette technologie étant potentiellement dangereuse (risque d'explosion en cas de mauvaise mise en œuvre) les éléments sont pratiquement systématiquement intégrés dans un boîtier et l'ensemble est équipé d'un ou plusieurs circuits électroniques de protection qui garantissent votre sécurité.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Planete-Energies, *La batterie lithium-ion : comment ça marche ?* [en ligne]. Consulté le 17 Mai 2020. Lien : <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-batterie-lithium-ion-comment-ca-marche>

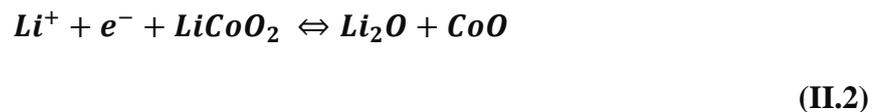
## II.6.4 Principe de fonctionnement

### a. La charge d'accumulateur au Li-ion

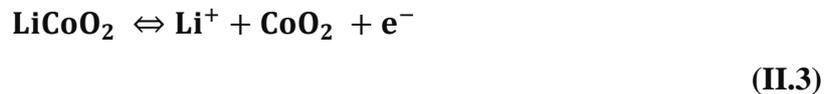
Lors de la charge, les ions de lithium  $\text{Li}^+$  quittent l'électrode positive (la cathode) relâché par l'oxyde de cobalt et va s'insérer dans l'électrode négative (l'anode) dans la phase graphitique pour être stocker

Lors de la charge de l'accumulateur, cela se traduit par les équations chimiques suivantes :

À l'électrode (+) :



À l'électrode (-) :



Particularité de la charge des accumulateurs aux li-ion :

- La charge se fait à tension constante et courant limité.
- Ils ne supportent pas la surcharge aussi faible soit elle.
- Il faut respecter le niveau de la tension de charge sinon ça ne charge pas.
- Il faut donc que la tension de charge soit régulée très précisément

La technologies Li-ion a deux niveaux de tensions nominales différents 3,6V et 3,7V qui impliquent des tensions de charges correspondantes :

- Tension nominale 3,6V : Tension de charge 4,1 Volts par élément.
- Tension nominale 3,7V : Tension de charge 4,2 Volts par élément.

Dans ces conditions respectées, la charge dure entre 2 et 3 heures.

- En début de charge et durant toute la première phase de la charge le courant est limité et la tension augmente petit à petit jusqu'à atteindre la tension régulée.
- A partir de là on atteint la deuxième phase dite de remplissage la tension reste parfaitement stable et alors le courant diminue.

- La charge est terminée lorsque le courant passe en dessous du seuil de 0,03C.

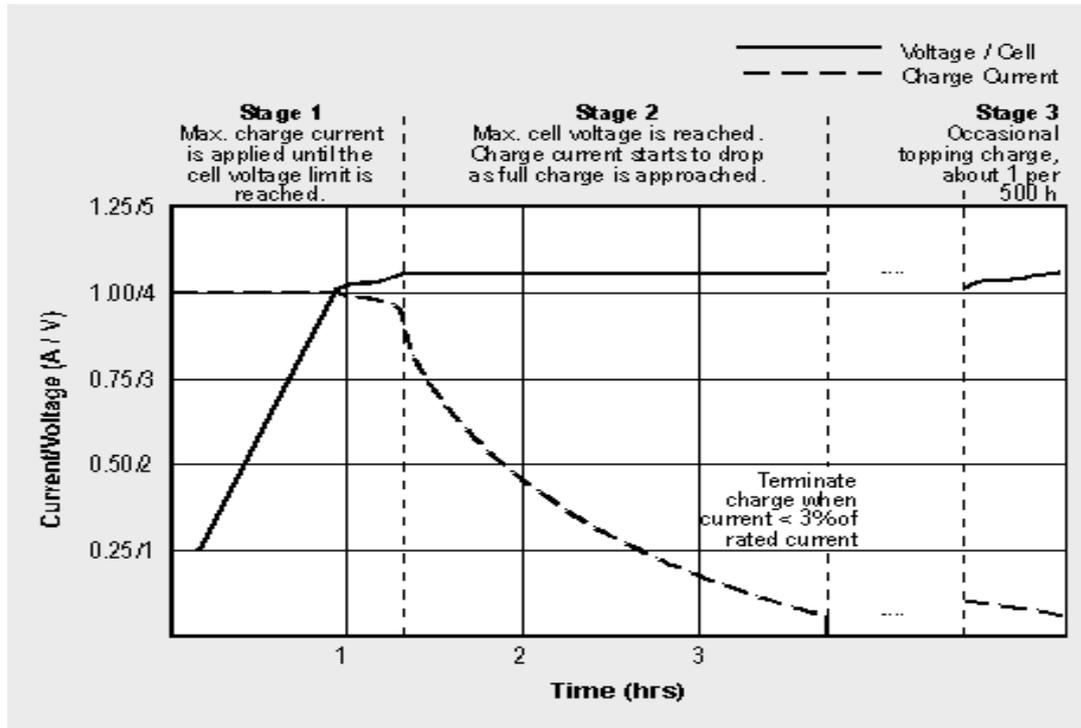


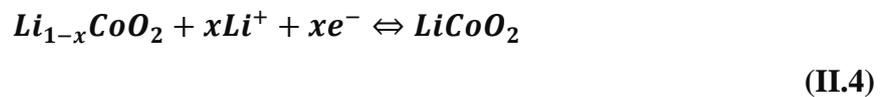
Figure II-5 : Diagramme de charge des acccus lithium-ion

### b. Décharge des accumulateurs au Li-ion

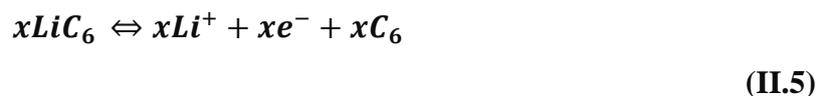
Quand la batterie se décharge, c'est-à-dire quand elle produit le courant électrique les ions de lithium  $\text{Li}^+$  est libéré par une matrice de graphite pour laquelle il a peu d'affinité et se déplace vers un oxyde de cobalt avec lequel il a une grande affinité l'électrode positive (la cathode).

Lors de la décharge de l'accumulateur, cela se traduit par les équations chimiques suivantes :

À l'électrode (+) :



À l'électrode (-) :



Comme pour les autres technologies les accumulateurs aux Lithium ont une tension minimum de décharge en dessous de laquelle il ne faut surtout pas les décharger sous peine de destruction des éléments.

Particularité de la décharge des accumulateurs aux li-ion :

- La tension basse de destruction est de 2,5 Volts.
- Mais en utilisation il ne faut pas descendre en dessous de 3 Volts.

De toute façon entre les deux cela va très vite la courbe de tension en décharge chute rapidement.

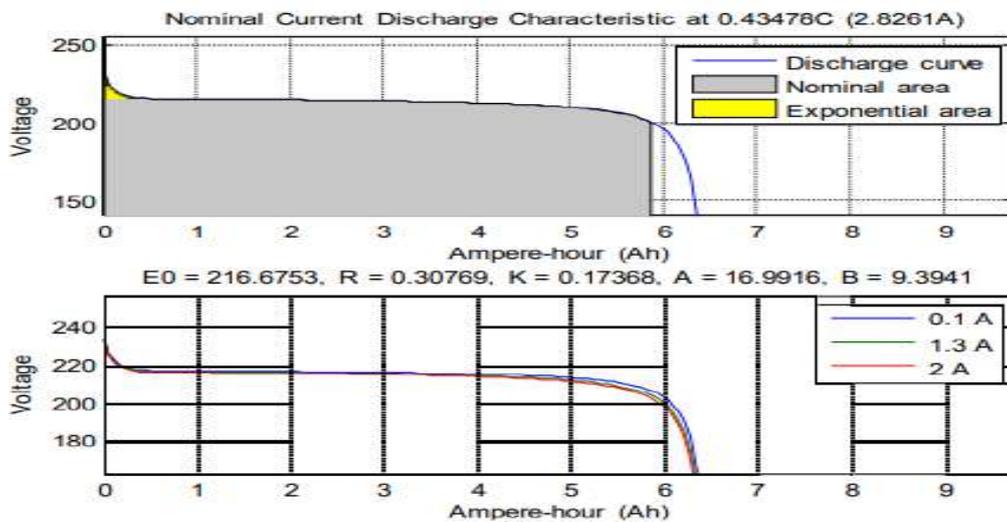


Figure II-6 : Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie lithium-ion (Li-Ion)

- L'autodécharge des accus au Lithium est d'environ 10% par mois.
- L'accumulateur au Li-ion est aujourd'hui capable de débiter de forts courants
- Résistance interne du Li-ion : environ 150 à 250 milli-ohm.

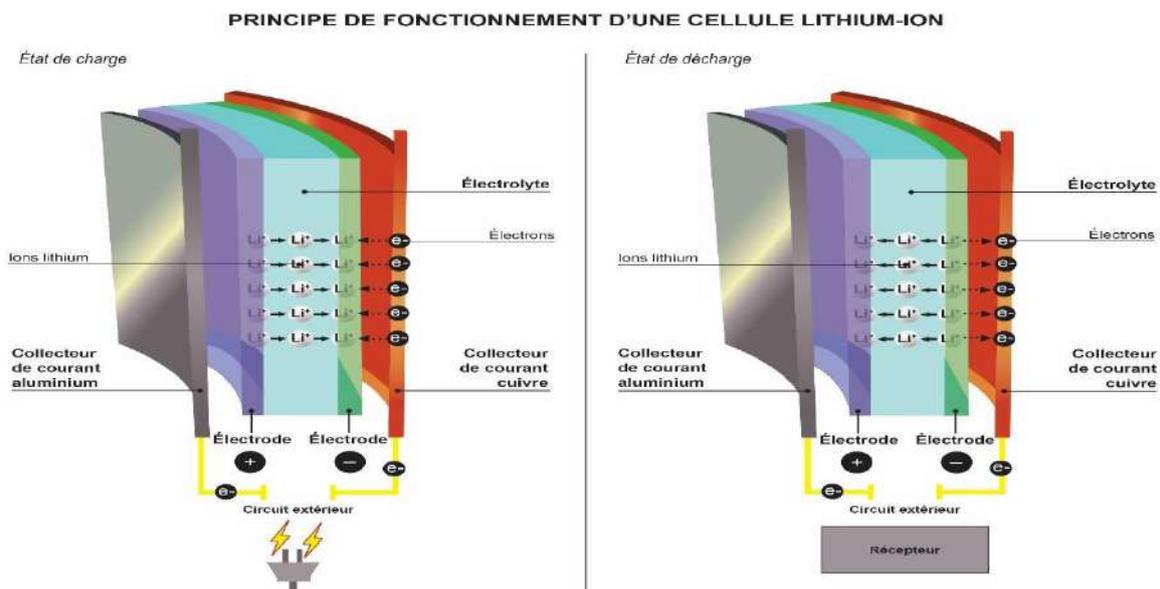


Figure II -7 : Principe de fonctionnement d'accum Li-ion (charge /décharge)

### c. Les précautions d'utilisation de bases

- Ne jamais surcharger un élément.
- Ne pas laisser un accu en charge sans surveillance.
- Ne pas poser un accu en charge sur une surface conductrice.
- Ne pas stocker les batteries en vrac.
- Ne jamais court-circuiter un accu.
- Ne pas exposer les éléments à une source de chaleur importante.
- Ne pas laisser une batterie lithium déchargée, en dessous d'une certaine tension, les dommages sont irréversibles.
- Ne pas maintenir en floating (charge terminée) une batterie lithium-ion, provoque une usure prématurée.
- Le courant de charge ne doit pas excéder 30% de la capacité  *nominale soit pour une batterie de 100Ah, le courant de charge maximum sera de 30A.*

Aujourd'hui pour prévenir ce genre de risque, la plupart des accus au Lithium vendus en pack sont équipés de circuits de protections et notamment d'un fusible, pour protéger des éventuels courts-circuits.

Inutile de vous rappeler que dans ce cas, si le fusible fonctionne, le pack est inutilisable. Il part au recyclage...

### d. Le circuit électronique de protection interne

Pour préserver les utilisateurs du moindre risque, les fabricants de packs d'accumulateurs au Li-ion insèrent un circuit électronique de protection dans leurs batteries.

Ce circuit comporte généralement plusieurs éléments :

- Un transistor qui coupe la charge si la tension de charge est supérieure à 4,3V.
- Un fusible thermique qui grille si la température approche 90°C
- Un interrupteur à pression qui interrompt définitivement le courant de charge si la pression interne monte trop.
- Plusieurs circuits qui surveillent les tensions et qui isolent la batterie si les seuils hauts et bas sont atteints.

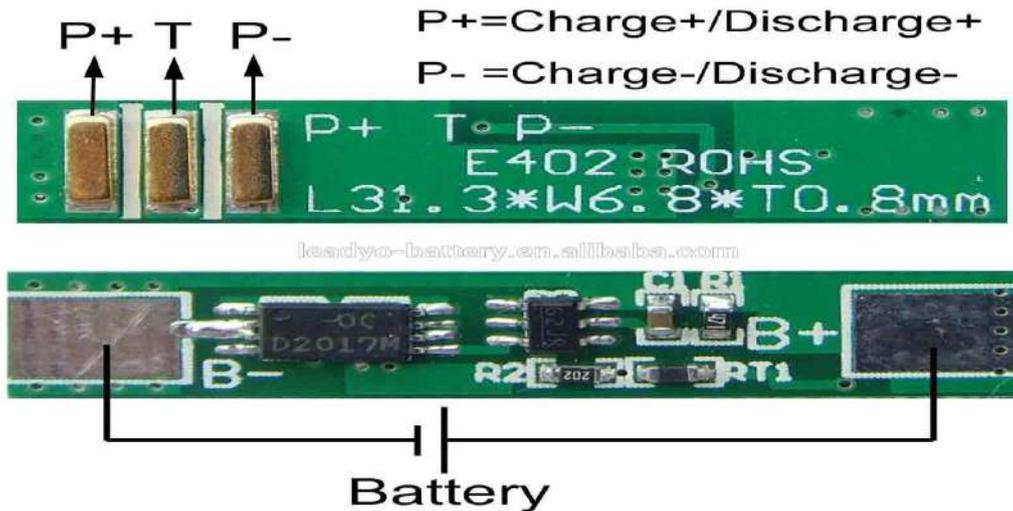


Figure II-8 : Circuit électronique de protection

### e. Stockage des accus au Lithium

Les accus au Lithium se stockent à un taux d'environ **40% de capacité restante**, pour garder de quoi alimenter le circuit de protection interne. Le stockage se fera de préférence au frais sec.

### f. Les Températures de fonctionnement

Les accus au lithium fonctionnent correctement sur toute leur plage de température allant généralement de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+60^{\circ}\text{C}$ .

Evitez malgré tous les charges par température inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$  et supérieure à  $45^{\circ}\text{C}$ . Il y a un risque de placage de Lithium sur les électrodes qui peut rendre l'accu instable. Dans tous les cas préférez une charge à  $20^{\circ}\text{C}$ .

## II.7 Modélisation d'une batterie par un circuit électrique

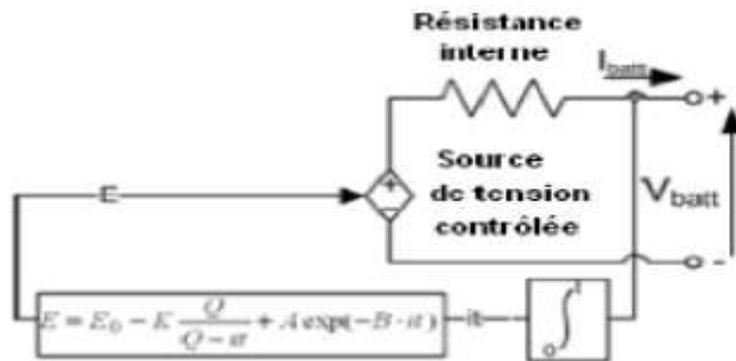


Figure II-9 : Modèle de Shepherd de batterie Lithium-Ion

Model de charge ( $i^* < 0$ )

$$V_{CH} = E_0 - k \cdot \frac{Q}{it+0,1Q} \cdot i^* - k \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (II.6)$$

Model de décharge ( $i^* > 0$ )

$$V_{DECH} = E_0 - k \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - k \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (II.7)$$

Avec :

$E_0$  : constant de voltage de la batterie en v

$k$  : constante de la polarisation en  $Ah^{-1}$

$Q$  : capacité maximale de la batterie en Ah

$i^*$  : courant à basse fréquence en A

$i$  : courant de batterie en A

$it$  : Capacité extraite en Ah

$A$  : tension exponentielle en V

$B$  : capacité exponentielle en  $Ah^{-1}$

**a. Avantages**

- Meilleure durée de vie du marché : jusqu'à 6000 cycles.
- Ne nécessite pas d'entretien.
- Compacte, elle prend moins de place et Recyclable à 70 %
- Ils ne présentent aucun effet mémoire
- Incarne le futur des moyens de stockage solaire

**b. Inconvénients**

- Les batteries lithium sont d'un coût élevé (600 et 1000 € pour 1 kWc).
- Sensibles aux températures et tensions extrêmes.
- Elle présente un risque d'embrassement soudain de la batterie, avec dégagement de gaz toxiques, dû à l'emballement thermique de l'électrolyte au-delà de 100 °C.
- **Cette technologie s'utilise même quand on ne s'en sert pas.**

**c. Impact sur l'environnement**

Les éléments lithium-ion ont un impact environnemental faible, étant donné qu'ils ne renferment pas de métaux lourds et que leurs matériaux actifs (oxydes de lithium et sels) peuvent être recyclés facilement. Toutefois, au démontage, le sel conducteur peut réagir avec l'eau pour donner de l'acide fluorhydrique, et l'électrode négative de la lithine qui sont des produits corrosifs.

Le cobalt est un matériau qui est amené à disparaître mais il est progressivement retiré des nouvelles générations de batterie lithium-ion (< 8%).<sup>11</sup>

**Conclusion**

Les batteries solaires sont essentielles dans un système d'alimentation photovoltaïques, la brancher directement au panneau solaire, pourrait l'endommager et nuire à sa durée de vie.

C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un étage d'adaptation entre le panneau solaire photovoltaïque et les batteries solaires pour une utilisation optimale.

---

<sup>11</sup> Tarfaya Yazid Siad Heythem. *Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV*. Mémoire. Université Badji Mokhtar Annaba, 2019 p-35-42.

## **Chapitre III**

### **Contrôleur de charge (chargeur solaire)**

## Introduction

La connexion directe d'un générateur photovoltaïque et la charge présente plusieurs inconvénients et n'offre aucun type de limitation ou de réglage de la tension, Nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

L'introduction d'une interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit plus proche de  $P_{max}$  Disponible.

L'étage d'adaptation utilisé entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC), La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter soit survolteur ou dévolteur, généralement commandé afin d'effectuer des tâches précise.

Dans ce chapitre nous allons identifier et citer différents types des régulateurs de charge ainsi que leurs fonctionnalités, Ensuite nous passerons à l'étude des différents types de convertisseurs DC-DC le hacheur Buck et Boost et sélectionner le premier pour notre système, par la suite on va présenter les algorithmes de la commande MPPT les plus populaires afin de trouver la technique la plus adéquate pour notre réalisation ; nous terminerons ce chapitre par la présentation des différentes parties du chargeur de batterie solaire MPPT.



Figure III-1 : Illustration d'un régulateur solaire

### III.1 Régulateur solaire (contrôleur de charge)

Le régulateur de charge est un élément essentiel dans l'installation Photovoltaïque, dont son prix et sa consommation électrique restent faibles relativement aux autres éléments. C'est l'élément central du système photovoltaïque, complètement autonome, qui réalise toutes les opérations de mesure correction de la charge de manière automatique, il protège la batterie pour qu'elle ait une durée de vie meilleure, ce qui est important, car cette dernière est très inférieure à celle des panneaux solaires.

La batterie doit être protégée contre les surcharges et les décharges excessives qui peuvent causer une perte d'électrolyte et endommager ses plaques. Ceci est le rôle du régulateur de charge qui maintient la tension de la batterie entre deux seuils et permet ainsi une plus longue durée de vie du système photovoltaïque.

Ce régulateur est caractérisé par un courant maximum de charge (panneaux solaires), un courant maximum de décharge (équipements consommateurs) et par la tension nominale de fonctionnement. Raison Pour laquelle le régulateur doit toujours être installé à côté des batteries.

Figure III-2 illustre ce principe de fonctionnement :

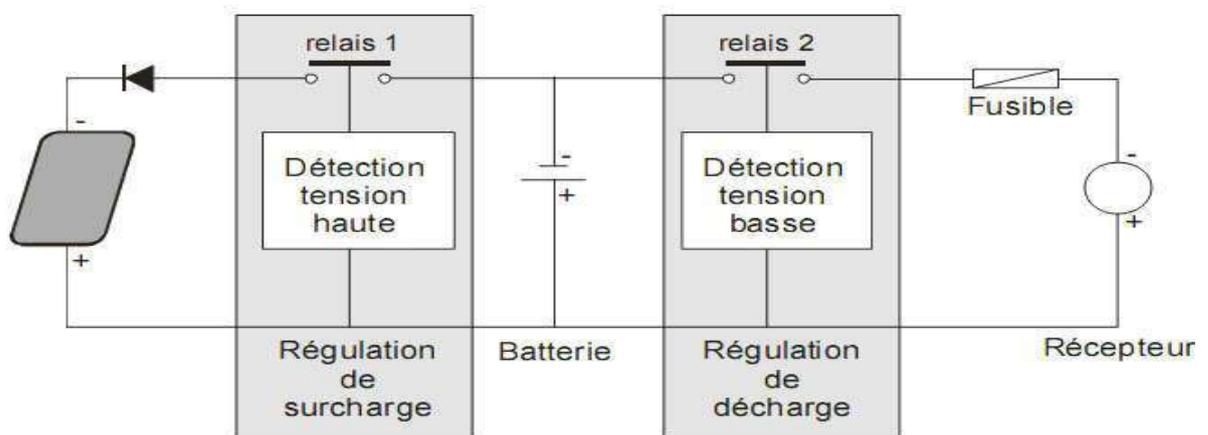


Figure III-2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur de charge

### III.2 Les fonctionnalités classiques d'un régulateur solaire

- Affichage du niveau de charge.
- Affichage des incidents (surchage, décharge profonde, court-circuit).
- Protection contre les décharge profonde, surcharge, court-circuit.

- Protections des panneaux solaires photovoltaïques (contre les retours de charges électriques).
- Protections thermiques (sonde des batteries).
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appuiera le régulateur pour assurer sa fonction, Cette dernière mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-régler : seuil haut et seuil bas.

Si la batterie est chargée aux maximum 13.8 V pour une tension nominale de 12 V par exemple, le régulateur met les modules hors circuit afin de ne pas détériorer la batterie en la surchargeant. Lorsque la tension retombe en dessous du seuil 13.8 V, le régulateur reconnecte automatiquement les panneaux solaires pour recharger la batterie.

Pour ne pas décharger la batterie très profondément, le régulateur interrompt la consommation à 11.4 V pour éviter la sulfatation des plaques. La consommation sera réenclenchée lorsque la recharge de la batterie atteint 12.6 V, pour ne pas démarrer avec une batterie trop peu chargée.

Afin de paramétrer le régulateur de charge, il est nécessaire d'utiliser deux valeurs caractéristiques de la batterie : la tension de fin de charge VFC, et la tension de recharge VRE pour laquelle le processus de charge recommence.

La plupart des régulateurs travaillent en tout ou rien et utilisent ces deux tensions pour arrêter ou recommencer la charge.

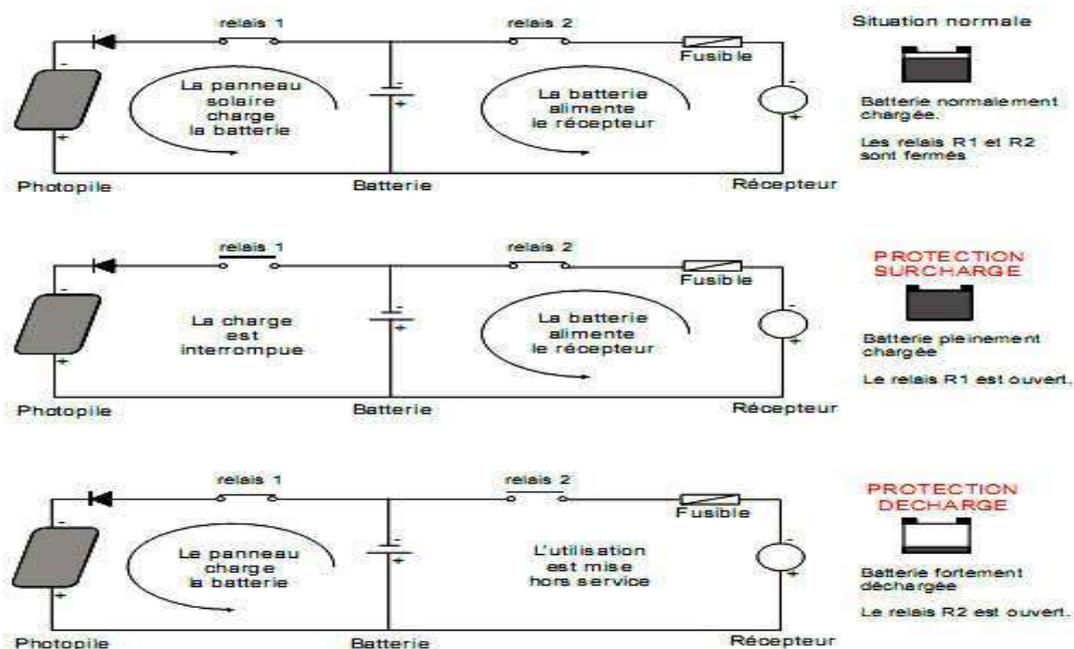


FIGURE III - 3 : Principes de fonctionnements du régulateur de charge

### III.3 Différents types des régulateurs de charge

Au début de l'usage du photovoltaïque, deux grandes familles de régulateurs étaient utilisées : les modèles « shunt » et les modèles « série ».

Ces deux technologies reposent en fin de compte sur le même fondement : les modules photovoltaïques peuvent fonctionner sans que leur électricité soit utilisée, ce qui est pratique lorsque les batteries sont pleines. On peut donc court-circuiter le module (c'est la méthode shunt) ou ouvrir le circuit (c'est la méthode série).

Avec l'utilisation de plus en plus courante de microprocesseurs. Il existe de nombreux modèles de régulateurs à l'intérieur de ces deux technologies, allant du plus élaboré au plus rudimentaire. Les plus simples se contentent d'assurer leurs fonctions de base (anti-surcharge, obstacle au courant inverse, protection des modules, contrôle de la température). Mais certains régulateurs solaires plus performants proposent des fonctions avancées intégrées ou en option (enregistreurs de données) :

- Compensation de la température ambiante pour mesurer la charge de la batterie d'information digital (à la place de LED de signalisation).
- Connexion par fil ou à distance (wifi par exemple) a un pc ou un réseau informatique.
- Enregistrement pour analyse de données issues de régulateur.
- Possibilité de plusieurs modes de charges : charge rapide état de veille etc.
- Déclenchement automatique de sources d'énergie complémentaires aux panneaux solaires photovoltaïques (groupe électrogène ou réseaux électrique Sonelgaz).

Il limite, et peu même stopper, la charge de la batterie solaire par les modules solaire quand la batterie est complètement chargée.

Il ralentit la décharge par délestage de l'utilisation, et même l'arrêt total, afin d'éviter les décharges profondes risquant d'endommager les batteries.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> LEPANEAUSOLAIRE.NET. *Les différentes technologies des contrôleurs de charge* [en ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://www.lepanneausolaire.net/les-differentes-technologies-contrôleurs-charge.php>

### III.3.1 Le régulateur de charge shunt

La figure (III-4) montre une structure shunt d'un régulateur solaire, le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque.

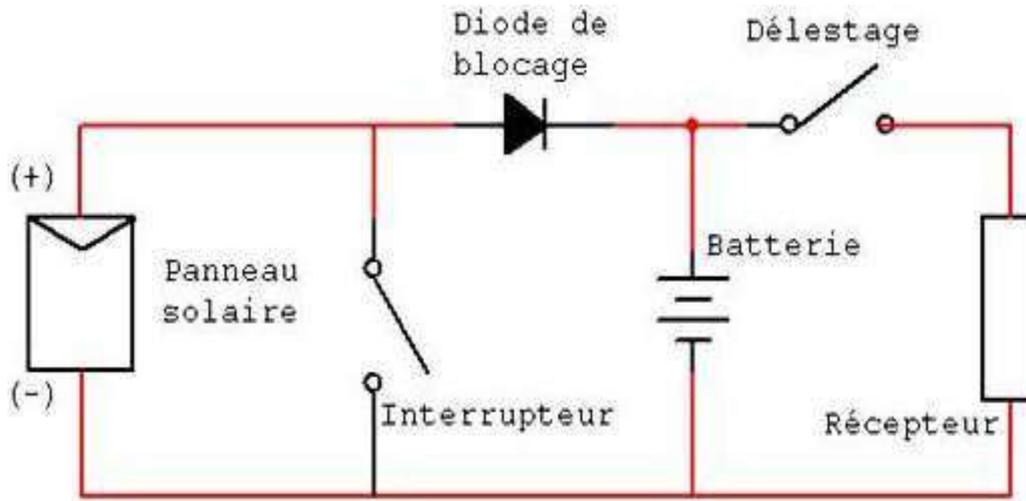


Figure III-4 : Conception de Régulateur de charge de type shunt

Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie.

Typiquement le régulateur shunt peut fonctionner selon deux techniques de contrôle :

- **La première technique Le régulateur série « tout ou rien »**

Le courant du panneau solaire est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge.

Le principe de fonctionnement est un simple aiguillage : tout le courant délivré par les panneaux photovoltaïques, passe normalement dans les batteries jusqu'à ce que le seuil de coupure soit atteint.

Alors, le courant est dérivé dans l'interrupteur équipé d'une diode.

Cette diode joue également le rôle de blocage du courant nocturne pouvant « s'écouler » des batteries (pour éviter le court-circuit au niveau de la batterie)

L'interrupteur le plus souvent utilisé est un MOSFET à faible résistance de passage, plus intéressant qu'un transistor bipolaire qui dissipe trop d'énergie.

Voir figure III-5 (a).

- **La deuxième technique Le régulateur shunt linéaire**

Ce type de régulateur maintient une tension constante aux bornes des batteries lorsqu'elles atteignent leur pleine charge.

L'avantage est que la charge totale des batteries est garantie.

L'inconvénient, c'est que la puissance non utilisée provenant des panneaux photovoltaïques doit être dissipée par un transistor en parallèle, ce qui limite ce type de régulation aux petits courants. Voir figure III-5 (b)

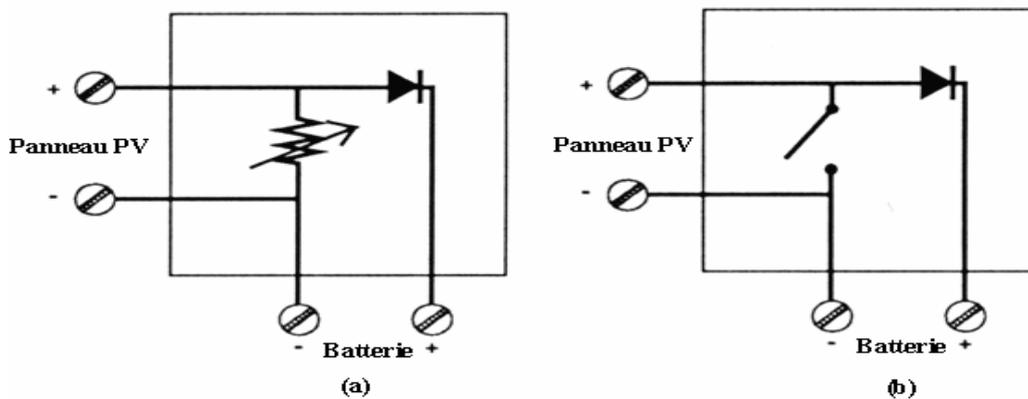


Figure III-5 : Principe de fonctionnement d'un régulateur de type shunt

### III.3.2 Le régulateur de charge série

La figure (III-2-3) montre une structure électrique typique d'un contrôleur série.

Ce type de régulateur est très répandu et a supplanté le régulateur shunt.

L'interrupteur de charge est ici en série avec les batteries et il s'ouvre lorsque la fin de charge est atteinte.

La différence avec la technique « shunt », c'est que le relais peut être commutant en laissant passer le courant vers un autre récepteur.

Cette propriété permet d'utiliser la totalité de la puissance solaire en alimentant un récepteur auxiliaire (ventilation, pompage, chauffage en pays froid).

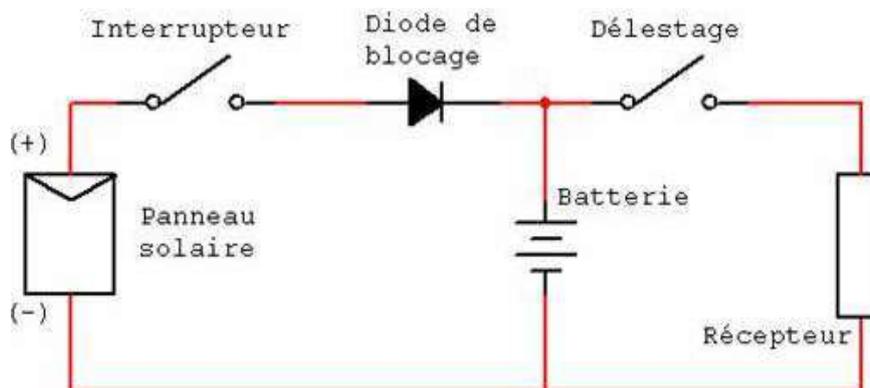


Figure III-6 : Conception de Régulateur de charge de type série

### III.3.3 Regulation PWM (Pulse With Modulation)

Le régulateur connecte directement le panneau solaire à la batterie, il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (diode).

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique s'effectuent à une certaine fréquence, ce qui permet de réguler le courant de charge en fonction de l'état de charge avec précision.

Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de limitation du régulateur, l'interrupteur est fermé, La batterie se charge alors avec le courant correspondant à l'ensoleillement. On est en phase "Buck".

Lorsque la tension batterie atteint un seuil de régulation prédéterminé, l'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe pour maintenir un courant moyen injecté dans la batterie. La batterie est chargée, on est en phase "Floating".

**Remarque :** Le régulateur PWM ne peut fonctionner qu'exclusivement avec des modules photovoltaïques 36 ou 72 cellules (12V ou 24V).

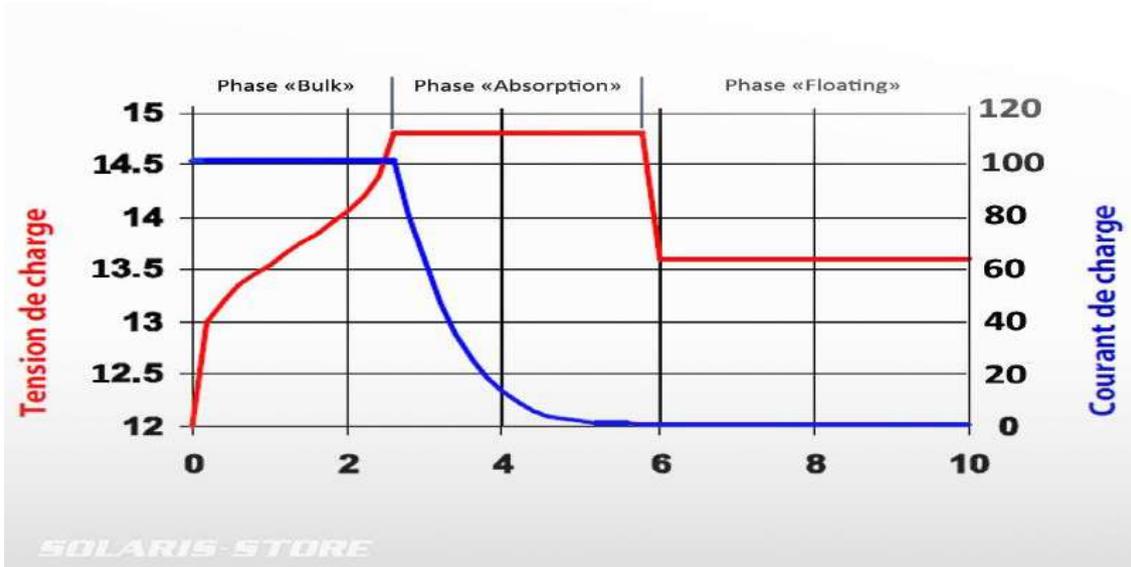


Figure III-7 : Évaluation de la tension et du courant au cours de charge

### III.3.4 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Il existe des lois de commandes spécifiques nommées dans la littérature « commande extrême » pour des dispositifs physiques devant fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques même si, a priori ces points ne sont pas connus à l'avance, ces derniers pouvant même à n'importe quel moment se modifier pour diverses raisons.

Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par la présence d'un à plusieurs Points de Puissance Maximum (PPM).

Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT) lorsqu'il est appliqué aux systèmes énergétiques.

Cette nouvelle technologie permet de tirer les meilleures performances des panneaux solaire photovoltaïques de 15% à 30 % d'énergie en plus.

Doté d'une fonction de balayage, qui parcourt la tension du panneau solaire toutes les deux heures pour trouver le point de sortie de puissance maximum, ainsi il peut adapter la tension délivrée par le panneau à celle que les batteries solaires peuvent absorber.

Ces régulateurs permettent non seulement d'augmenter la production d'énergie d'une installation photovoltaïque. Mais en optimisant la charge des batteries, ils prolongent aussi significativement la durée de vie des batteries.

La figure (III-8) représente une chaîne élémentaire typique de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT fournissant une puissance électrique à une charge DC.

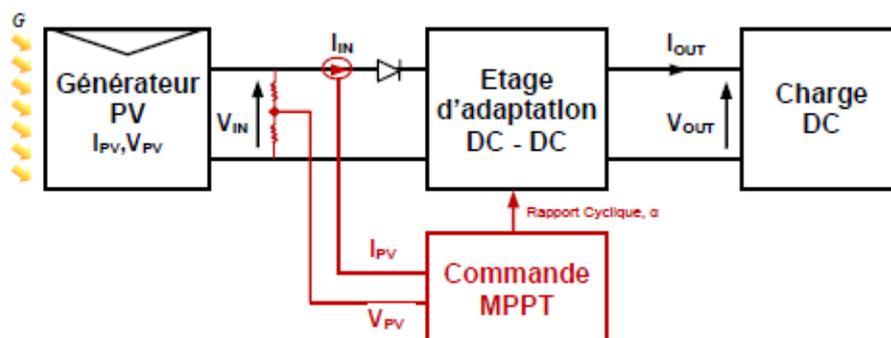


Figure III-8 : Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Comme le montre cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un, quadripôle (convertisseur statique) possédant un à plusieurs degrés de liberté en fonction de sa structure, permettant d'adapter à chaque instant l'impédance du GPV à celle de la charge.

Dans le cas de la conversion de l'énergie solaire en électricité, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un simple convertisseur statique dc-dc à un degré de liberté noté  $\alpha$  et correspondant au rapport cyclique, de telle sorte que la puissance fournie par le gpv à son entrée correspond à la puissance maximale ( $p_{max}$ ) qui peut générer à chaque instant.

De plus cette puissance doit pouvoir être transférée simultanément et totalement directement à la charge. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement, quelles que soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

#### A. Caractéristiques du régulateur MPPT

Le régulateur de charge est composé d'un convertisseur DC/DC à découpage de haut rendement qui assure trois fonctions :

- Détection de la puissance maximale du champ photovoltaïque tant que la batterie n'est pas chargée.
- Conversion DC/DC.
- Régulation de la tension de sortie en fonction de la phase de charge (Buck, Absorption et Floating)
- Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de régulation, le régulateur fait fonctionner le générateur photovoltaïque à puissance maximale et transfère cette puissance à la sortie.

**Remarque :** Le convertisseur DC/DC est utilisé comme abaisseur de tension. Ce qui signifie que la tension MPP du générateur photovoltaïque doit toujours être supérieure à la tension batterie.

La figure (III-9) illustre trois cas de perturbations possibles.

Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal noté PPM1 vers un nouveau point de fonctionnement noté P'1, plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum qui correspond à PPM2.

Pour une variation de charge (cas b), impliquant une nouvelle caractéristique de la charge, on peut également constater qu'une modification du point de fonctionnement est nécessaire pour rechercher une nouvelle position optimale grâce à la recherche d'un nouveau rapport cyclique.

Un autre cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié par exemple aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c).

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande en imposant un autre niveau de rapport cyclique, ce dernier n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents et n'implique aucune contrainte de dimensionnement de la commande.

De façon générale, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher à chaque instant le PPM du GPV sans connaître à priori l'origine de la variation du point de fonctionnement.

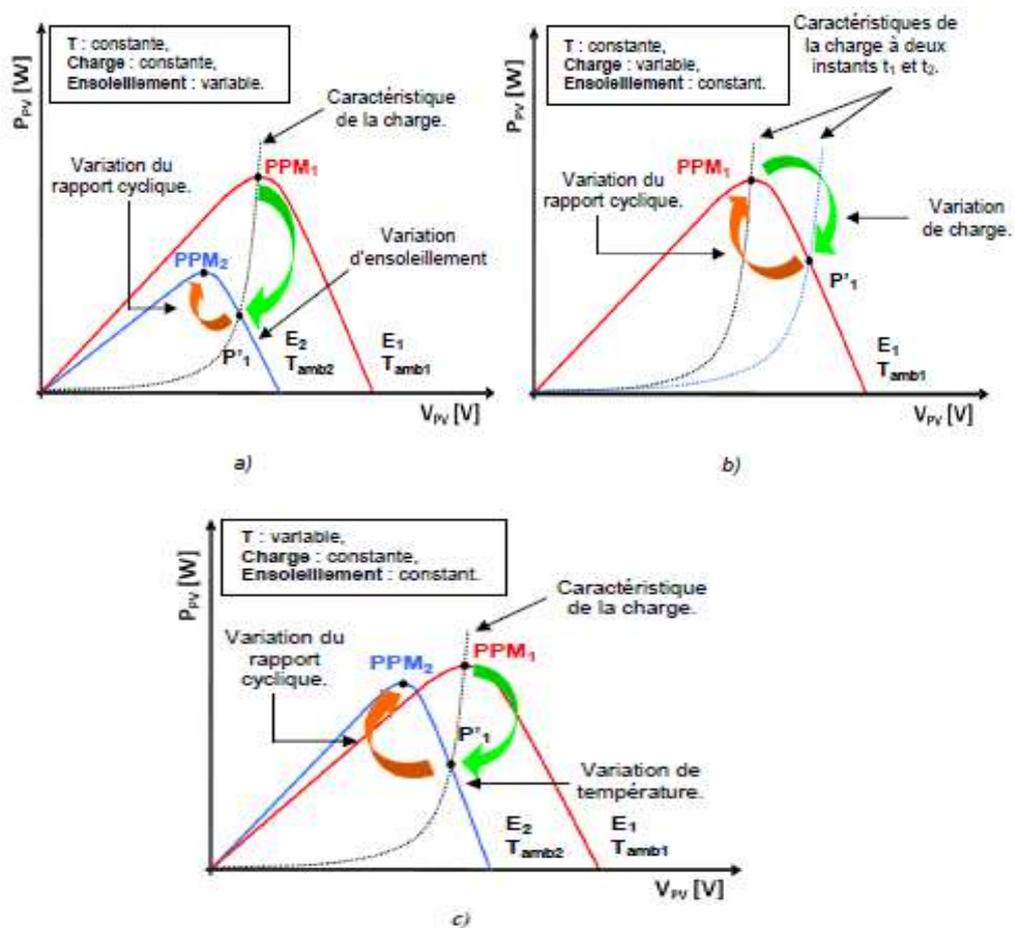


Figure III-9 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

- (a) Suite à une variation d'ensoleillement au niveau du GPV.
- (b) Suite à une variation de consommation de charge.
- (c) Suite à une variation de température au niveau du GPV.

## B. Partie électronique de puissance

### a. Convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donnée, dans les systèmes photovoltaïques on le trouve soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu/continu ou hacheur), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

### b. Convertisseur Continu–Alternatif

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente.

### c. Convertisseurs continus-continu

Le hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés qui permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable, à partir d'une source de tension continue constante avec un rendement élevé, présentant la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque.

Le tableau (III-1) donne les différents types des convertisseurs DC-DC. Les trois premiers sont les plus fondamentaux, ils sont largement utilisés à cause de leur faible complexité.

Type	Fonction	Inductance	Interrupteur de Puissance	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
Boost	Élévateur	Oui	1	1	Non	Faible
Buck- boost	Élévateur Abaisseur	Oui	1	1	Non	Faible
Flyback	Élévateur Abaisseur	Non	1	1	Oui	Moyenne
Half forward	Élévateur Abaisseur	Oui	1	1	Oui	Moyenne
Push pull	Élévateur Abaisseur	Oui	2	2	Oui	Forte
Demi pont	Élévateur Abaisseur	Oui	2	4	Oui	Forte
Pont	Élévateur Abaisseur	Oui	4	4	Oui	Très forte

Tableau (III-1) Les différents types de convertisseur DC = DC

**d. Convertisseur Boost**

Un convertisseur Boost ou élévateur comme son nom l’indique sert à la conversion d’une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure il se compose essentiellement d’un interrupteur à base de matériau semi-conducteur placé en parallèle avec la source de type continue, d’une diode D, une inductance et un condensateur,

La figure (III-10) montre le schéma équivalent d’un hacheur parallèle.

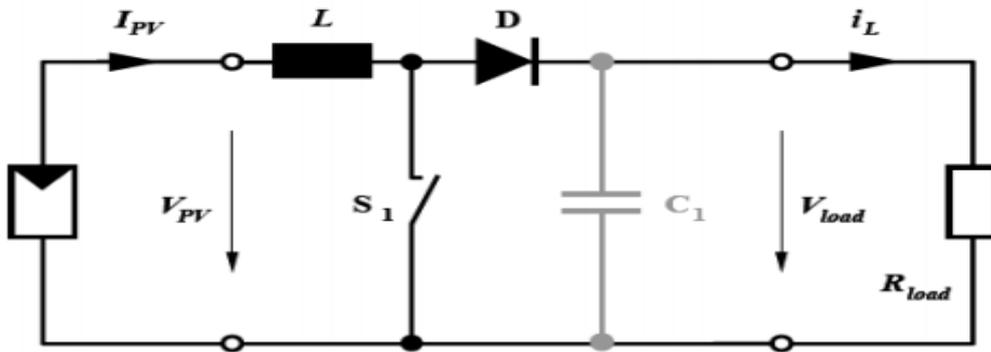


Figure III-10 : Schéma représentatif d’un hacheur boost

**Phase une du fonctionnement :**

A  $t = 0$  , L’interrupteur est fermé, cela entraîne l’augmentation du courant dans l’inductance, suivant l’équation (III.1), la diode D est bloquée et la charge est alors déconnectée de l’alimentation comme le montre la figure (III-11).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \tag{III.1}$$

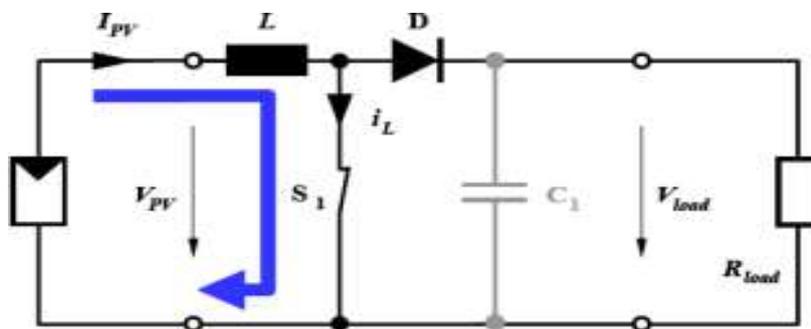


Figure III-11 : Convertisseur Boost durant l’état ON

### Phase deux du fonctionnement :

A l'instant  $t = \alpha T$ , l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur, le courant  $I_L$  traversant l'inductance, la diode D, le condensateur C et la charge.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (\text{III.2})$$

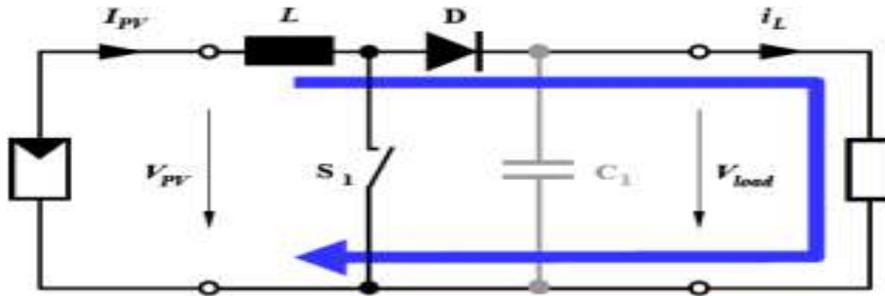


Figure III-12 : Convertisseur Boost durant l'état OFF

La valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  est donnée par l'équation (III.3).

$$V_s = \frac{1}{(1-\alpha)} V_e \quad (\text{III.3})$$

Le rapport cyclique  $\alpha$  est entre 0 et 1 donc la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

### e. Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck ou dévolteur comme son nom l'indique sert à la conversion d'une tension continue en une autre tension continue de valeur moyenne inférieure. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est éloigné du MPP. Il est composé essentiellement d'un interrupteur à base de matériau semi-conducteur (IGBT, MOSFET, GTO. etc.) placé en série avec la source de type continue et d'une diode de roue libre pour assurer la continuité du courant en cas d'absence d'alimentation. La figure (III-13) montre le schéma équivalent d'un hacheur type série.

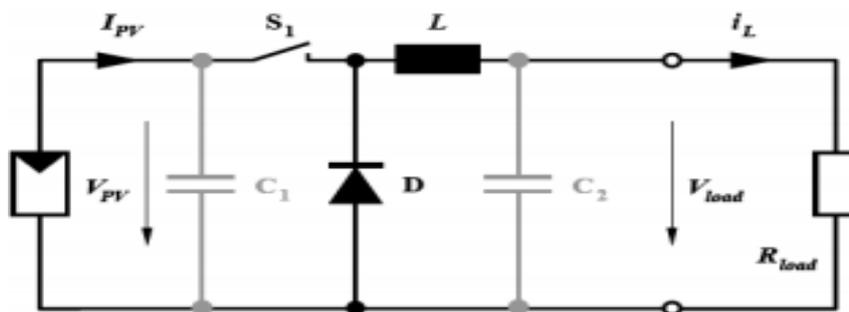


Figure III-13 : Schéma représentatif d'un convertisseur Buck

La figure (III-14) présente l'allure du signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de fréquence fixe et de largeur d'impulsion variable qui commande l'interrupteur  $S_1$ . Il est ajusté par le paramètre  $\alpha$  nommé le rapport cyclique dans le temps où l'interrupteur est fermé ( $T_{on}$ ) divisé sur la période de sa commutation  $T$ .

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T}$$

(III.4)

Durée de conduction :  $T_{on} = \alpha T$

(III.5)

Durée de blocage :  $T_{OFF} = (1 - \alpha) T$

(III.6)

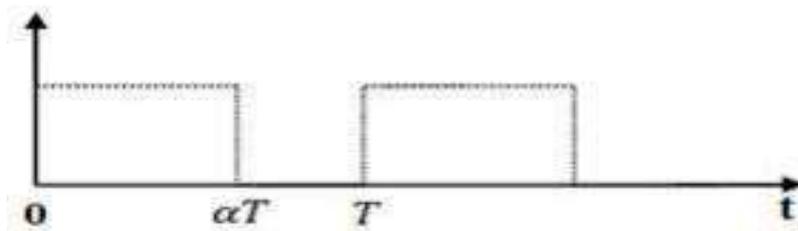


Figure III-14 : L'allure de commande d'interrupteur

A  $t = 0$

L'interrupteur  $S_1$  est dans l'état passant, ce qui polarise la diode  $D$  en inverse. Le courant d'entrée recharge la bobine  $L$  par une énergie inductive. Tant que l'interrupteur est fermé, la tension à ses bornes est nulle, le courant recharge au même temps le condensateur  $C$  et fournit le courant à la charge

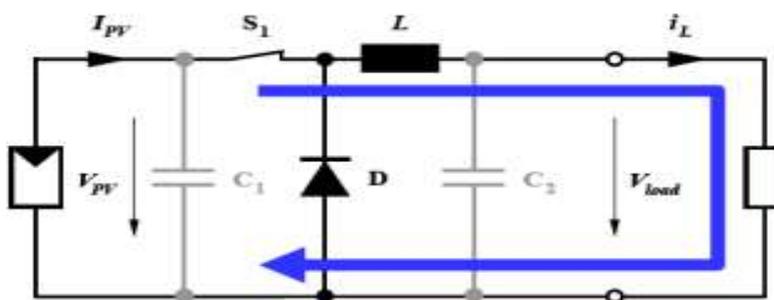


Figure III-15 : Convertisseur Buck durant l'état ON

En appliquant la loi des mailles dans l'intervalle de temp  $[0, \alpha T]$  on trouve :

$$v_s(t) = V_{s1}(t) + V_L(t) + V_s(t) \quad (\text{III.7})$$

Dans le cas d'un interrupteur idéal :

$$V_{s1}(t) = 0 \quad (\text{III.8})$$

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

$$\frac{L di_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) \quad (\text{III.10})$$

$$i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_{L,min} \quad (\text{III.11})$$

À l'instant  $t=0$  le courant de l'inductance est de valeur minimale  $I_L(0) = I_{min}$ , et augmente jusqu'à atteindre la valeur  $I_{max}$  à l'instant  $t=\alpha T$ , comme le montre la figure (III-16)

$$I_{L,max} = \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T + I_{L,min} \quad (\text{III.12})$$

Détermination de l'ondulation du courant :

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} \quad (\text{III.13})$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{III.14})$$

A partir de l'équation (III.13) et (III.14) on aura :

$$\Delta I_L = \frac{V_e - V_s}{L f} \alpha \quad (\text{III.15})$$

L'équation (III.15) montre que pour diminuer l'ondulation de courant il faut augmenter la fréquence de commutation.

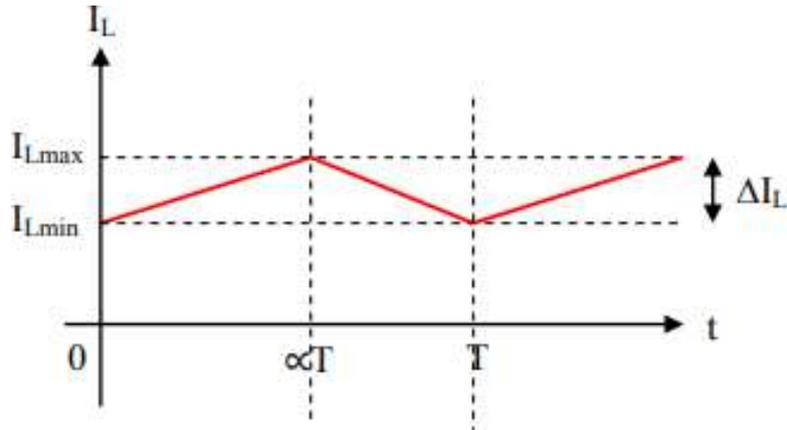


Figure III-16 : Allure d'onde du courant de l'inductance.

### Phase deux du fonctionnement :

A l'instant  $t = \alpha T$  l'interrupteur  $S_1$  est ouvert, à ce moment la charge est déconnectée de son Alimentation et le courant est maintenu grâce à l'énergie stockée dans l'inductance et circule à travers la diode qui est polarisée en directe.

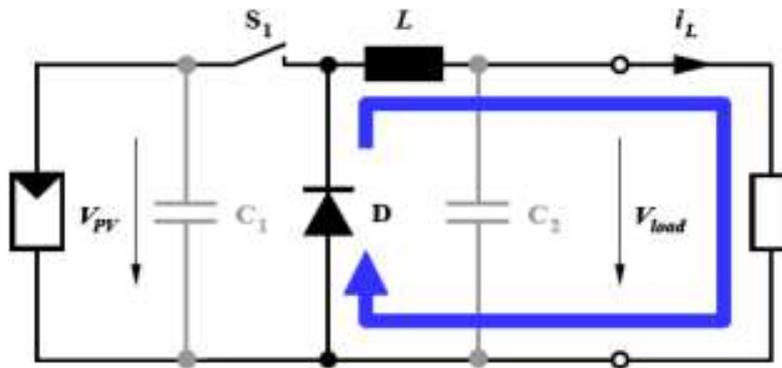


Figure III-17 : Convertisseur Buck durant l'état OFF

En appliquant la loi des mailles dans l'intervalle de temps  $[\alpha T, T]$  on trouve :

$$V_D(t) + V_L(t) + V_s(t) = 0 \quad (\text{III.16})$$

Dans le cas d'un interrupteur idéal on a  $V_D(t) = 0$

$$V_L = -V_s \quad (\text{III.17})$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_s$$

$$I_L(t) = \frac{-V_s}{L}t + I_{L,\max} \quad (\text{III.18})$$

$$(\text{III.19})$$

Quand  $t = T$  le courant de l'inductance diminue de sa valeur maximale à une valeur minimale.

$$I_{L,\min} = \frac{-V_s}{L}(1 - \alpha)T + I_{L,\max} \quad (\text{III.20})$$

La détermination de l'ondulation du courant.

$$\Delta I_L = \frac{V_s}{L_f}(1 - \alpha) \quad (\text{III.21})$$

A partir des deux équations (III.5) et (III.21) :

$$\frac{V_s}{L_f}(1 - \alpha) = \frac{V_e - V_s}{L_f}\alpha \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Ce qui implique : } v_s = \alpha V_e \quad (\text{III.23})$$

L'équation (III.23) nous montre que la variation de la tension de sortie est en fonction du rapport cyclique quand on fait varier  $\alpha$  de 0 à 1 la tension de sortie varie linéairement de 0 à la valeur de la tension d'entrée.

### C. Partie commandes (Technique de la commande MPPT)

Le point où l'annulation de la dérivée par rapport à une variable donnée est la définition mathématique de l'optimum d'une fonction, les algorithmes de calcul du point de puissance maximum consultés se basent sur ce principe-là.

#### Les algorithmes MPPT

- 1- Algorithme perturbation et observation (P&O).
- 2- Algorithme incrémental de la conductance (INC).
- 3- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction de la Tension Voc (FCO)
- 4- Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant Icc(FCC)
- 5- Algorithme à Base de la Logique Floue.

Algorithmes MPPT	P&O	INC	FCO	FCC	LF
Type de Capteurs utilisés	1 Tension 1 courant	1 tension 1 courant	1 tension	1 courant	1 courant
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire
Complexité	Basse	Moyenne	Très Basse	Très Basse	Haute
Nombre d'itérations	45	48	35	41	27
Vitesse de convergence	Moyenne	Moyenne	Rapide	Rapide	Très rapide
Précision	95%	98%	94%	94%	99%

Tableau (III-2) Comparaison Des Techniques MPPT

Dans notre application nous utiliserons l’algorithme Perturb & Observ (P&O) :

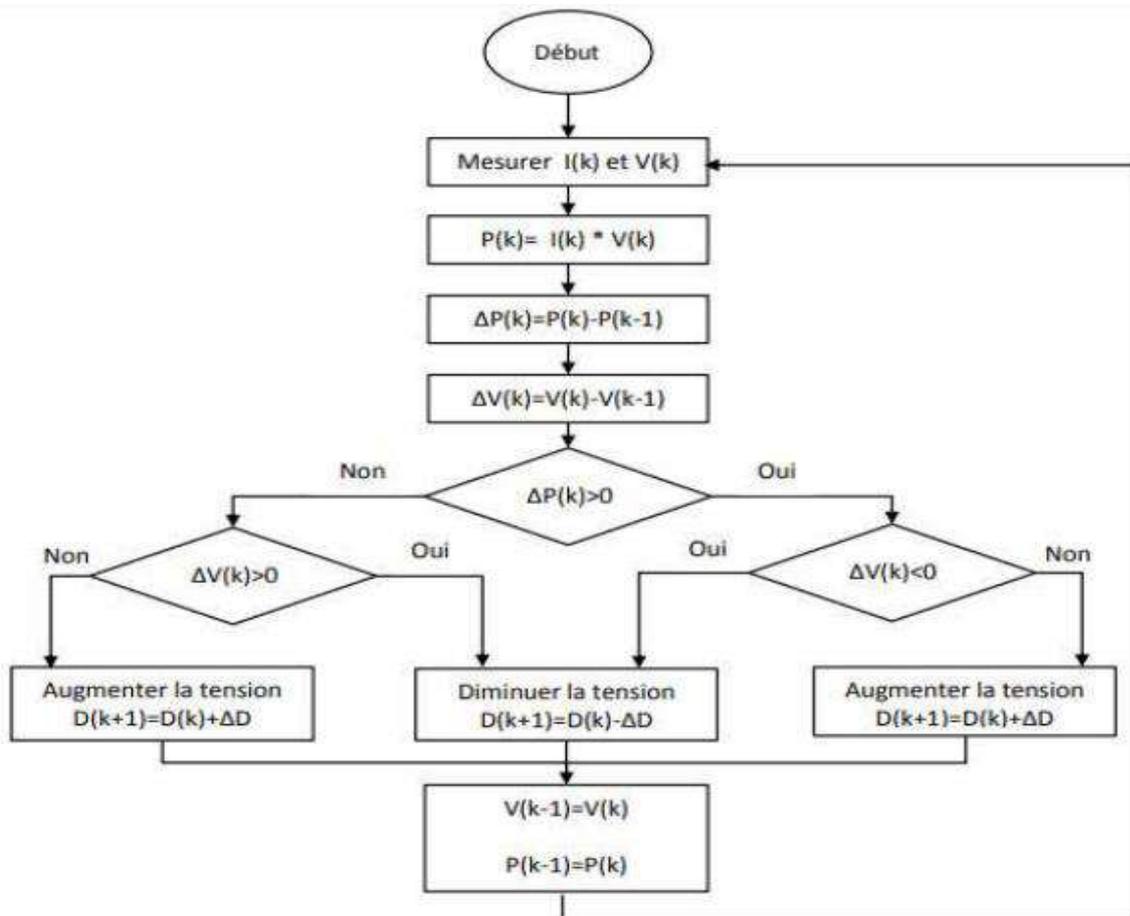


Figure III-18 : Organigramme de l’algorithme P&O

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension  $V_{ref}$ , ou du courant  $I_{ref}$ , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ( $P=VI$ ).

Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k-1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.

La Figure (III-19) montre qu'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.

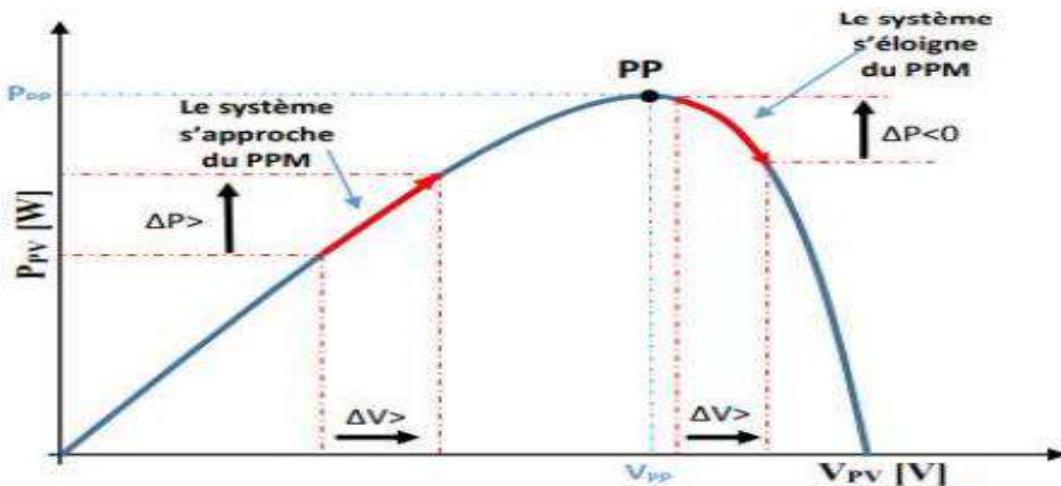


Figure III-19 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P(V)$ , 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 approprié.

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés.

## **Conclusion**

Le régulateur solaire est la pièce maîtresse d'un système photovoltaïque autonome, il assure un meilleur rendement de l'exploitation des panneaux solaires ainsi que la sécurité des accumulateur électrochimique (batteries).

**CHAPITRE IV**  
**Modélisation et Simulation**

## Introduction

Afin d'affirmer la tangibilité des théories étudiées lors des précédents chapitres, nous avons mis en place une simulation d'un chargeur solaire MPPT de batteries Li-ion à l'aide du logiciel « PSIM ». Lors de celle-ci nous avons visualisé et comparé les courbes (puissance, tension et courant) à l'entrée puis à la sortie du régulateur solaire. Le régulateur utilisé est un convertisseur Buck commandé par un algorithme B&O.

### IV.1 Le logiciel utilisé « PSIM »

PSIM est un logiciel de simulation pour l'électrotechnique et l'électronique de puissance. Le logiciel permet de dessiner le schéma du montage, à partir des éléments de la bibliothèque (machines, transformateurs, interrupteurs électroniques, éléments de commande et de contrôle...).

Les appareils de mesure disposés sur le schéma de montage définissent les courbes représentatives des grandeurs électriques et mécaniques que l'on peut obtenir après simulation. Dans cette simulation la version utilisée est : **9.1.4**

### IV.2 Les paramètres et Schéma des composants utilisés

#### IV.2.1 Panneau Solaire

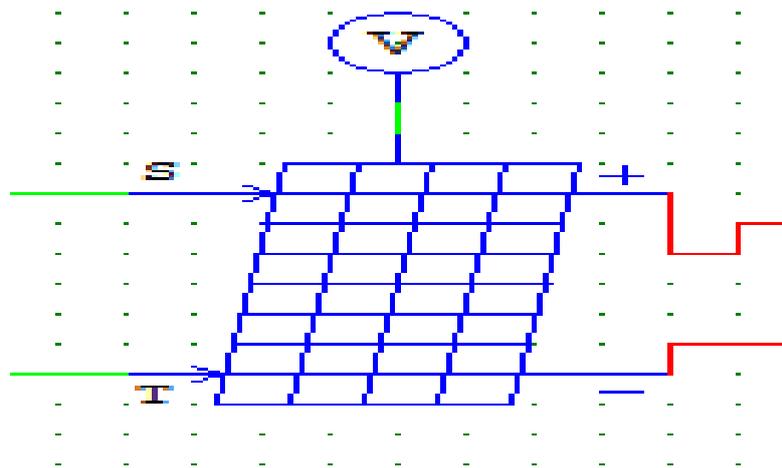


Figure IV-1 : Schéma conceptionnel panneau solaire dans PSIM2

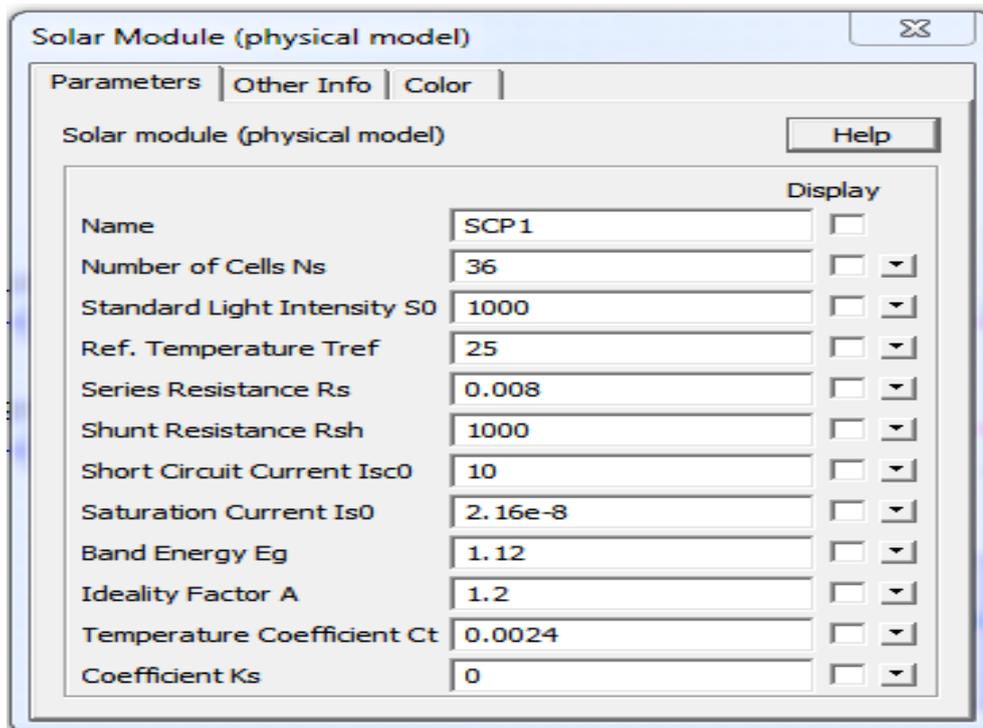


Figure IV-2 : Les paramètres entrés dans le panneau solaire

### IV.2.2 Le module de batterie Li-ion

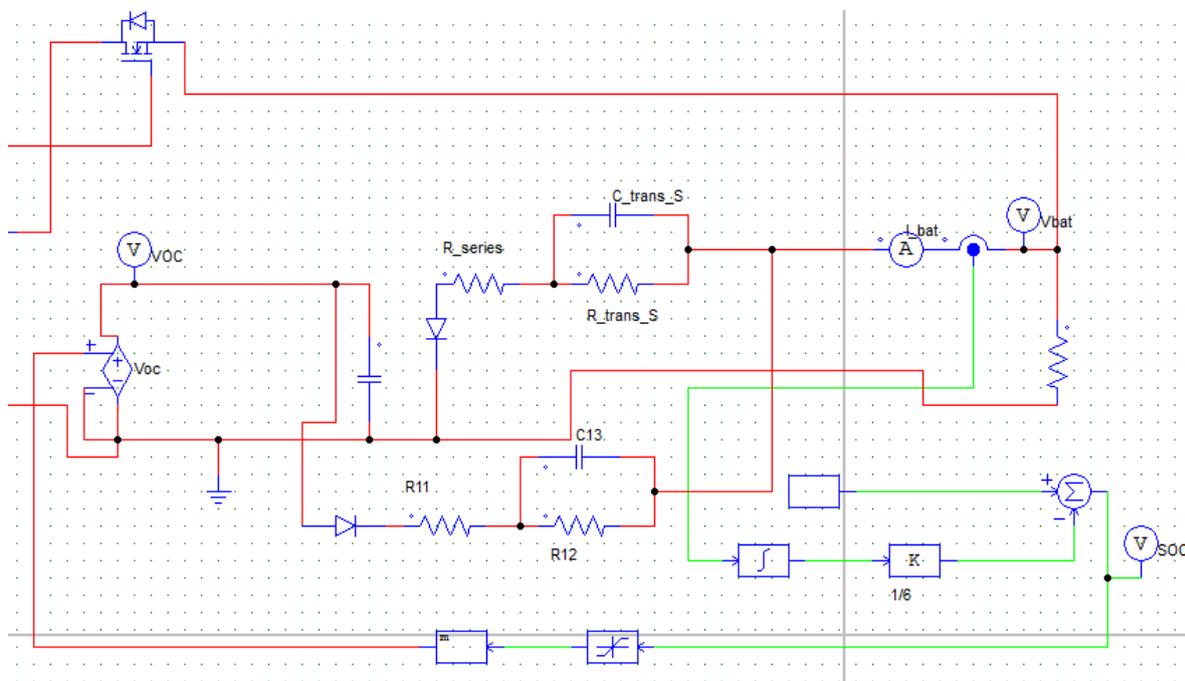


Figure IV-3 : Schéma conceptionnel de la batterie Li-Ion

## IV.2.3 L'algorithme de MPPT P&amp;O

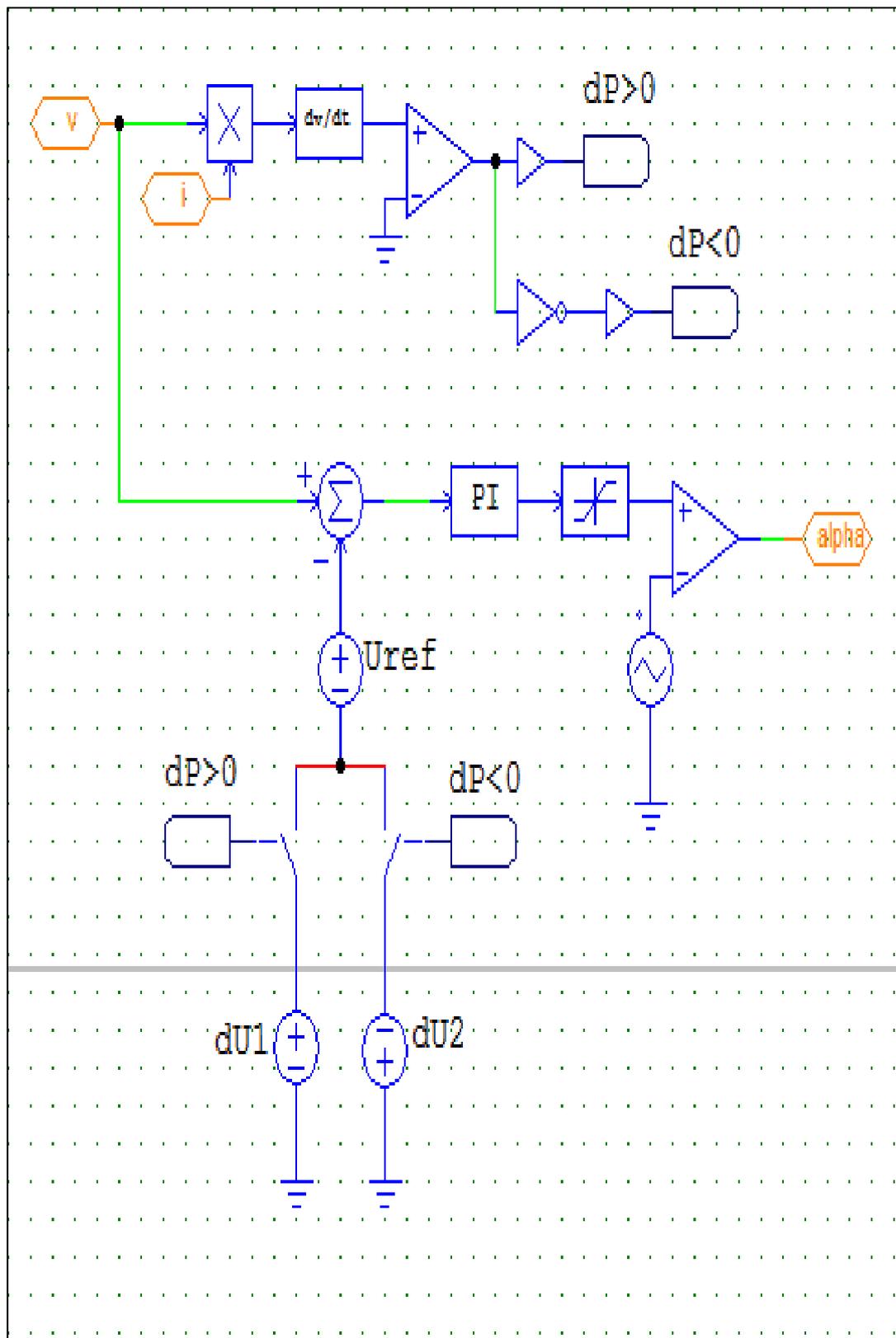


Figure IV-4 : L'algorithme de la commande MPPT

### IV.2.4 Le régulateur

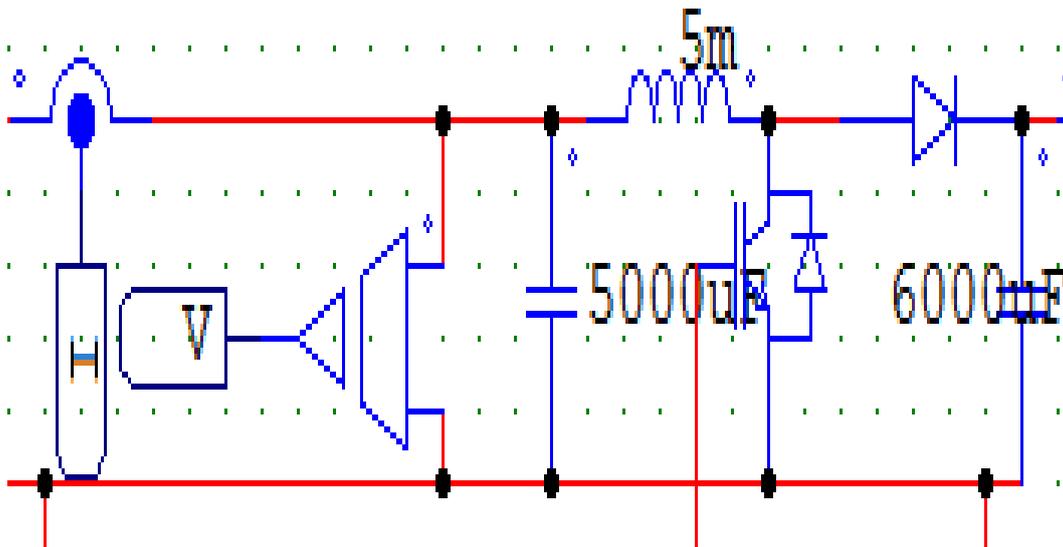


Figure IV-5 : Schéma conceptionnel du régulateur MPPT

### IV.3 La modélisation du chargeur solaire

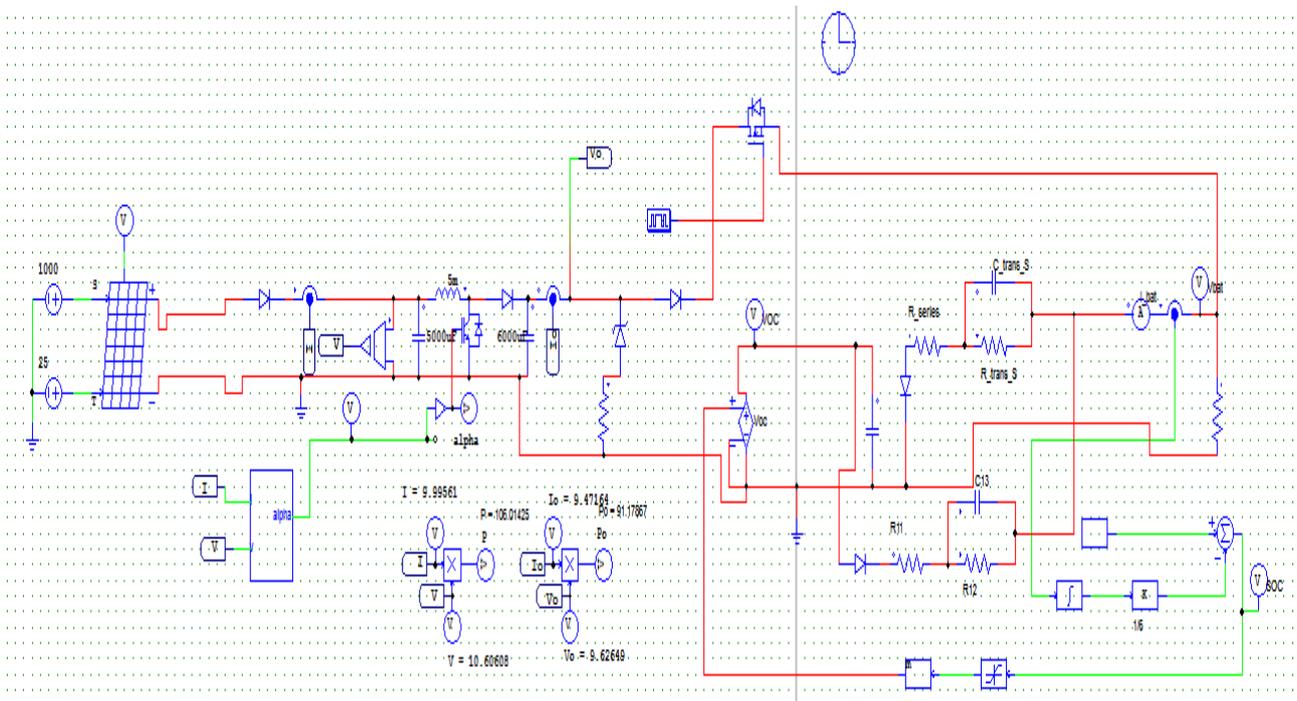


Figure IV-6 La modélisation du dispositif chargeur solaire

## IV.4 les courbes et les résultats obtenue par la simulation

### IV.4.1 Le courant, tension et puissance générés par les panneaux

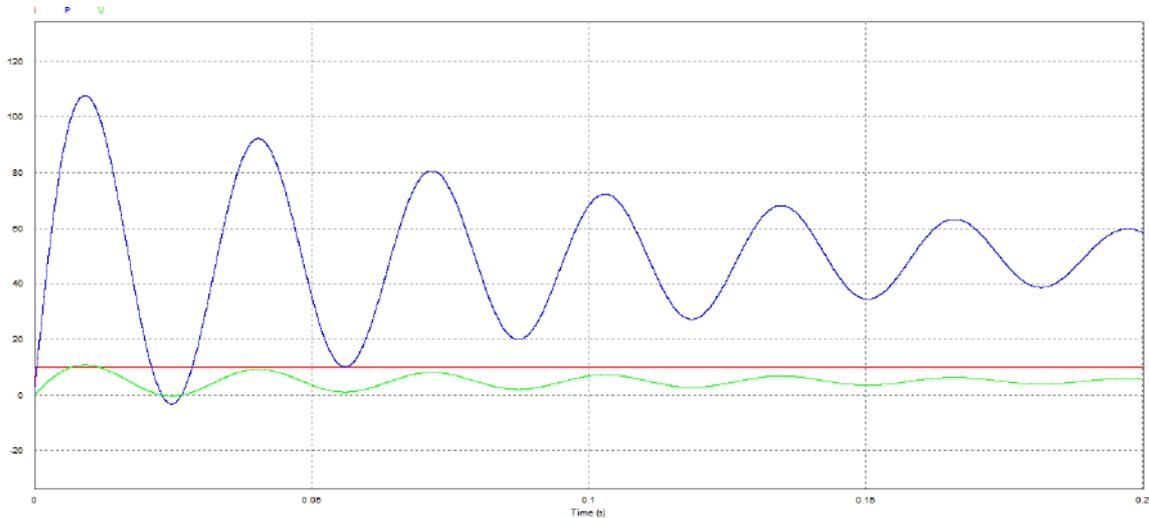


Figure IV-7 : Les allures (courant, tension et puissance) délivrés par le panneau solaire

$$\langle V \rangle = 5.83241 \text{ V}, I = 9.997 \text{ A}, P = 58.32242 \text{ W}$$

Ces valeurs enregistrées sont liées aux paramètres d'entrées du panneau solaire (figure IV-7) qui représentent les allures courantes, tension et puissance délivrée avant l'insertion du régulateur MPPT.

### IV.4.2 La puissance maximale obtenue à la sortie du régulateur MPPT

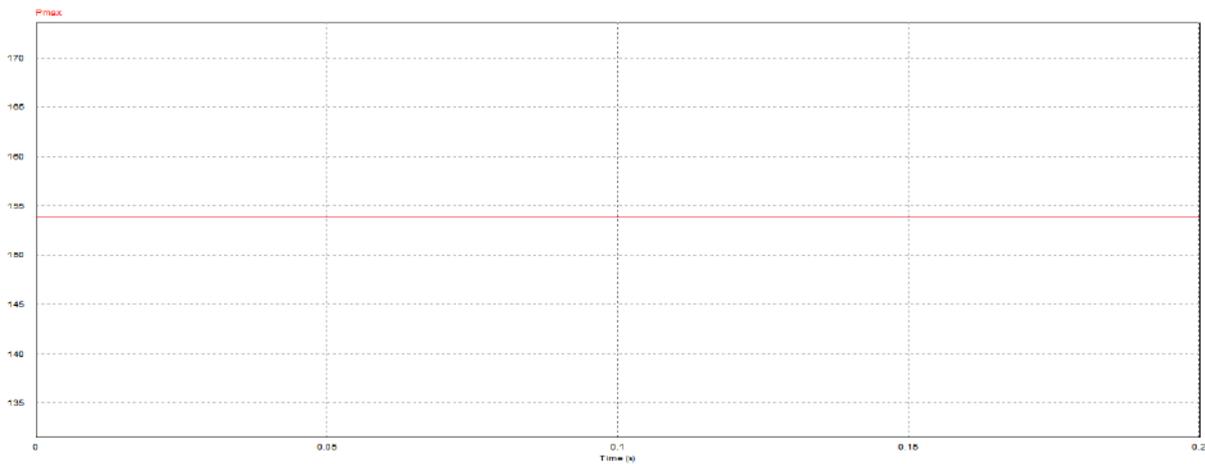


Figure IV-8 : Allure de la puissance maximale

$$P_{\max} = 153.38547 \text{ W}$$

La Puissance maximale obtenue après l'insertion du régulateur MPPT est quasiment multipliée par trois par rapport à la puissance initiale délivrée par le panneau.

### IV.4.3 La tension de la charge de (batterie) réguler par le chargeur solaire

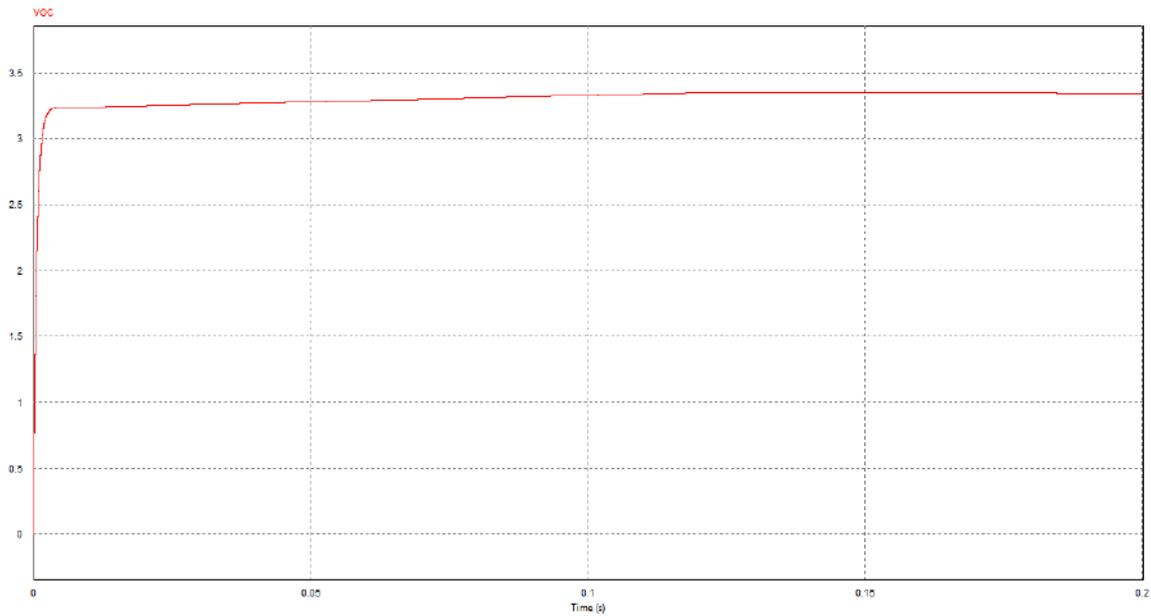


Figure IV-9 : Tension de charge de la batterie

**VR =3.354 V**

Cette allure démontre la capacité du régulateur MPPT à adapter la tension délivrée par le panneau à une valeur inférieure, plus adéquate pendant le chargement de la batterie.

### IV.5 Allures représentant l'état aux bornes la batterie Li-ion

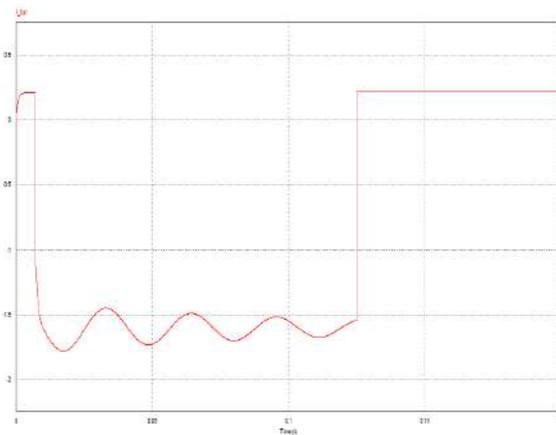


Figure IV-10 : Courant aux bornes de la batterie li-ion

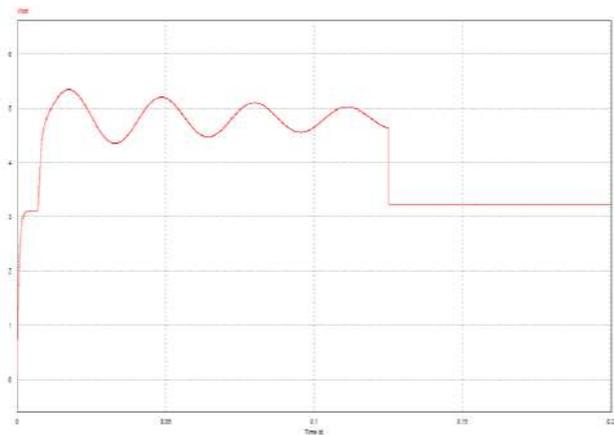
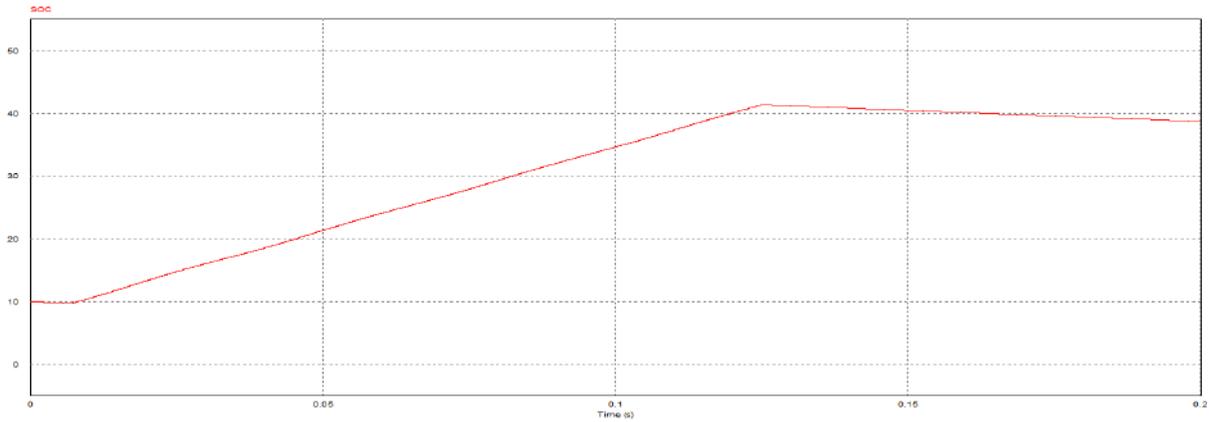


Figure IV-11 : Tension aux bornes de la batterie li-ion

**V<sub>Bat</sub>=3.225 V, I<sub>Bat</sub>=0.0215 A**

Les figures (IV-10 et IV-11) représentent respectivement l'état du courant et de la tension aux bornes de la batterie li-ion.



**Figure IV-12 : State of charge de la batterie**

Cette allure représente l'état de charge de la batterie ou l'on peut distinguer les phases de chargement suivantes : Bulk Absorption et Floating.

## Conclusion

Ce travail représente une simulation du chargeur solaire (photovoltaïque) de la batterie Lithium-ion, ce système injecte de l'énergie solaire dans le réseau comme une puissance active à travers un système de conversion, composées d'un convertisseur continu-continu (Buck).

Le contrôleur MPPT est appliqué pour la poursuite du point de puissance maximale du système PV dans des conditions variables d'éclairement. La tâche de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) dans un système de puissance PV.

On constate que  $P_{max}$  est presque 3 fois la valeur de  $P$ , qui représente un bon rendement du chargeur. (Voir figure IV-8).

La tension de charge est maintenue entre 3.6 et 3.3 avec précision afin de charger la batterie li ion. (Voir figure IV-9).

On conclut que le régulateur remplit bien sa fonction.

# **Conclusion Général**

## Conclusion Général

« Étant donné la facilité avec laquelle le soleil fait sortir les gens de chez eux, on est amené à penser que l'énergie solaire pourrait faire fonctionner à peu près n'importe quoi. ». Voici des paroles qui résument la valeur de cette énergie. Durant le dernier siècle les investigations pour trouver différents moyens de l'exploiter n'ont cessé de ramener des résultats prometteurs.

Le sujet traité de ce mémoire, le chargeur solaire MPPT, représente l'une de ces innovations, comportant un générateur photovoltaïque, batterie de stockages lithium-ion et un chargeur solaire. Ce mémoire aborde deux volets :

- La technologie accumulateurs de batteries comme solution pour la discontinuité.
- La commande MPPT pour l'amélioration du rendement des panneaux solaires et l'adaptation de l'énergie fournie par ces derniers aux batteries de stockage.

Durant la vie d'un panneau solaire (20 ans environ), celui-ci consomme une quantité d'énergie grise estimée entre 420 à 600 kWh/m<sup>2</sup> selon les technologies, pour un temps de retour énergétique qui varie entre 1,36 et 4,7 années selon le pays où est située l'installation.<sup>13</sup>

En prenant en compte cette information on conclut que c'est un investissement rentable. C'est pour cela que les moyens mis en œuvre à cette fin ne cessent de se développer. En effet, les différentes avancées tendent à :

- Limiter les pertes d'énergies lors des conversions en courant alternatif exploitable par des onduleurs.

La Réalisation d'une installation entièrement en courant continu éviterait ces pertes, mais au prix d'une complexité accrue et de protections électriques plus coûteuses. En outre Une installation entièrement en courant alternatif est plus classique, moins coûteuse et mieux maîtrisée par les électriciens.

- Présenter des nouvelles technologies de stockage modulaire

Tel que la technologie LFP Lithium Fer Phosphate, capacité modulaire à partir de briques de 1,2 kWh, garantie 10 ans, rendement de 96%, capacité de décharge « supérieure » à 100%, et, un stockage d'énergie sous forme d'hydrogène qui permet un stockage saisonnier (rempli en

---

<sup>13</sup> Dualsun.com. *Qu'en est-il du « temps de retour énergétique » des panneaux photovoltaïques ?* [En ligne]. Consulter le 28 Aout 2020. Lien : <https://news.dualsun.com/technologie-solaire/temps-retour-energetique-panneaux-photovoltaïques/>

été, utilisé en hiver).

- Rassembler toutes les composantes et les logiciels en package pour réaliser et piloter une installation domestique avec panneaux PV et stockage d'énergie.

Ces idées ont d'ailleurs été abordé lors des salons Inter-solar et EES Europe qui ont eu lieu à Munich en 2019.<sup>14</sup>

Pour conclure, grâce à son énorme surface ensoleillée l'Algérie est l'un des pays qui ont le plus de potentiel pour apprivoiser cette énergie propre, afin de subvenir à ses besoins. Malgré quelques centrales inaugurées, elle est loin d'être au maximum de son potentiel.

---

14 Batirama.com. *Intersolar 2019 : les solutions de stockage d'énergie se multiplient*. [En ligne]. Consulter le 02 Sept 2020.  
Lien : <https://www.batirama.com/article/26409-intersolar-2019-les-solutions-de-stockage-d-energie-se-multiplient.html>

## Références Bibliographiques

### Ouvrage

Robert Soler, *L'énergie solaire : des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain*. Lavoisier-Tec & Doc., 2019

### Thèses et Mémoire

Pernet, Pascal. *Développement de cellules solaires en silicium amorphe de type "n-i-p" sur substrats souples*. Thèse. École Polytechnique Fédérale, Lausanne, 2001

Grosjean Camile. *Usages de batteries lithium-ion comme fonction de stockage de l'électricité à la convergence des besoins énergétiques de l'habitat solaire et du transport électrique*. Thèse. Université de Corse Pasquale Paoli - Campus Grimaldi, France. 2013

Boukli-hacene Omar. *Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Énergétique*. Thèse, Université Abou Bakr Belkadi, Tlemcen. 2011

Tarfaya Yazid Siad Heythem. *Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV*. Mémoire. Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019

Mamouni Rania, ZEMMITE Seddik. *Etude et réalisation d'un chargeur solaire par Arduino*. Mémoire. Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2018

*Énergies Renouvelables*, Mémoire. Université Saad Dahlab, Blida. 2018

El Atmi Anas. *Conception et réalisation d'un régulateur solaire sous Labview à base de microcontrôleur*. Mémoire, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc 2014

Belarbi Mustapha. *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome*. Mémoire. Université Des Sciences Et De La Technologie Mohamed Boudiaf, Oran. 2015

### Bulletin et rapport

*Evaluation du potentiel énergétique solaire*, Bulletin des énergies renouvelables N° 2 Décembre 2002.

### Webographie

Planete-Energies, *La batterie lithium-ion : comment ça marche ?* [En ligne]. Consulter le 17 Mai 2020. Lien : <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-batterie-lithium-ion-comment-ca-marche>

Isidor Buchmann, *L'histoire des accumulateurs* [En ligne]. Consulter le 10 juin 2020. Lien : <https://ni-cd.net/wpnicd/index.php/lhistoire-des-accumulateurs/>

Planete-Energies, *Les énergies fossiles* [En ligne]. Consulter le 02 juillet 2020. Lien : <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-fossiles>

Lepanneausolaire.net. *Les différentes technologies des contrôleurs de charge* [En ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://www.lepanneausolaire.net/les-differentes-technologies-controleurs-charge.php>

Zonetronek.com. *Définition d'une batterie solaire* [En ligne]. Consulter le 10 juillet 2020. Lien : <https://www.zonetronek.com/definition-dune-batterie-solaire/>

Solaris-store.com. *Principe de fonctionnement d'une batterie solaire* [En ligne]. Consulter le 25 juillet 2020. Lien : <https://www.solaris-store.com/content/43-principe-de-fonctionnement-d-une-batterie-solaire>

Algerie1.com, *Djelfa : Une centrale solaire de 20 mégawatt inauguré* [En ligne]. Consulter le 03 Aout 2020. Lien : <https://www.algerie1.com/actualite/djelfa-une-centrale-solaire-de-20-megawatt-inaugure>

Dualsun.com. *Qu'en est-il du « temps de retour énergétique » des panneaux photovoltaïques ?* [En ligne]. Consulter le 28 Aout 2020. Lien : <https://news.dualsun.com/technologie-solaire/temps-retour-energetique-panneaux-photovoltaïques/>

Batirama.com. *Intersolar 2019 : les solutions de stockage d'énergie se multiplient.* [En ligne]. Consulter le 02 Septembre 2020. Lien : <https://www.batirama.com/article/26409-intersolar-2019-les-solutions-de-stockage-d-energie-se-multiplient.html>

## **Résumé :**

L'énergie solaire renouvelable représente le nouvel espoir qui permettra à l'environnement de reprendre son souffle et à l'humain de pouvoir consommer sans consumer, mais un problème se pose : son rendement est faible. En effet, à cause de la fluctuation de la quantité d'énergie produite, liée aux perturbations météorologiques (température et niveau d'éclairement), cette énergie est loin d'être une source stable ! D'où l'impératif de relier le générateur photovoltaïque autonome à un système de stockage (batterie), pour ainsi garantir une disponibilité de l'énergie en cas d'absence du rayonnement solaire et palier au problème. Néanmoins, cette liaison n'est optimale que lors de la présence d'un intermédiaire (étape d'adaptation).

Ce projet de mémoire a justement pour objectif d'étudier un de ces intermédiaires, qui n'est autre que le chargeur solaire MPPT commandé par un algorithme "perturbe et observe" qui permettra au générateur photovoltaïque de fonctionner à sa puissance maximale et qui s'occupera de la régulation de charge et décharge des batteries lithium-ion afin de les préserver.

**Mots clés :** générateur photovoltaïque, chargeur solaire, algorithme perturber et observer, batterie, suivi du point de puissance maximum.

## **Abstract:**

Renewable solar energy represents the new hope that will allow the environment to catch its breath and the people to live without harming our mother earth, but a problem arises: its efficiency is low. Because of the fluctuation in the amount of energy produced, linked to meteorological disturbances (temperature and light level), this energy is far from being a stable source! Hence the need to connect the autonomous photovoltaic generator to a storage system (battery), thus guaranteeing availability of energy in the absence of solar radiation and alleviating the problem. However, this connection is only optimal when there is an intermediary (adaptation stage).

The objective of this thesis project is precisely to study one of these intermediaries, which is none other than the MPPT solar charger controlled by a "perturb & observe" algorithm which will allow the photovoltaic generator to operate at its maximum power and which will take care of the charge and discharge regulation of lithium-ion batteries in order to preserve them.

**Keywords:** photovoltaic generator, solar charger, battery, algorithm perturb & observe, maximum power point tracking.

## ملخص:

الطاقة الشمسية المتجددة تمثل أمل للبيئة، إلا أنّ كفاءتها منخفضة بسبب تقلب كمية الطاقة المتعلقة باضطرابات أحوال الطقس (درجة الحرارة ومستوى الإضاءة) مما يجعل هذه الطاقة مصدراً غير مستقر ومن هنا تأتي الحاجة إلى ربط المولد الكهروضوئي المستقل بنظام تخزين (بطارية)، وبالتالي ضمان توفر الطاقة في غياب الإشعاع الشمسي ومع ذلك، فإن هذا الربط يكون مثاليًا فقط عندما يكون هناك وسيط (شاحن البطارية الشمسي).

هذه المذكرة تقوم بدراسة شاحن البطارية الشمسي MPPT المتحكم فيه بواسطة خوارزمية "الاضطراب والمراقبة".

هذا الشاحن يسمح للمولد الكهروضوئي بالعمل في أقصى طاقته ويهتم بتنظيم شحن وتفريغ بطاريات الليثيوم من أجل الحفاظ عليها.

**الكلمات المفتاحية:** المولد الكهروضوئي، شاحن للطاقة الشمسية، البطارية، اضطراب ومراقبة الخوارزمية، تتبع أقصى نقطة للطاقة.