

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ DE BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**



**DEPARTEMENT
DE L'ELECTROTECHNIQUE**

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention de diplôme de Master en Electrotechniques

Option : Energie renouvelable

Electromécanique

THÈME

***Fonctionnement autonome d'un système
photovoltaïque incluant un système de
stockage d'énergie***

Réalisé par :

- ***Mr. GUEDJALI Sofiane***
- ***M^{elle}. AROUN Kenza***

➤ *Encadré par :*

- ***Mr. Dj. AOUZELLAG***
- ***Mr. A. REMLI***

Promotion 2014 / 2015

Remerciements

Au terme de notre travail: on tient tout d'abord à remercier le bon DIEU le tout puissant pour le courage, la patience et la santé qu'il nous a donné pour suivre nos études.

Nous souhaitons exprimer nos reconnaissances qui sont innombrables. Cependant, ne pouvant pas dresser la liste exhaustive de tout le monde, dans la crainte d'oublier quelqu'un.

Nous commencerons volontiers par rendre hommage à toutes celles et à tous ceux, sans exception, qui ont contribué de près ou de loin à favoriser ce travail.

Nous exprimons notre gratitude et tout notre respect à notre promoteur M^r DJ.AOUZELLAG, et le Co-promoteur M^r A.REMLI de nous avoir suivies tout au long de notre travail.

Nous remercions vivement le jury d'avoir accepté de juger et de valoriser notre travail.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A mon frère Toufik et ma sœur Tinhinane

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant mon parcours
universitaire*

*A l'âme d'une très chère personne qui été pour mon corps mieux qu'un
cœur*

A tous ceux qui me sont chers

A toi Sofiane

Kenza





Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils se trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A mon frère et ma sœur,

*A mes grandes mères, A mon grand-père, mes oncles, mes tantes, mes cousins
et mes cousines, A la mémoire de mon grand-père*

A tous ma famille,

A tous mes amis, A tous ceux qui me sont chère.

A toi Kenza et Nacir

Sofiane



Sommaire

Sommaire

Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Glossaire.....	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Energie photovoltaïque	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Présentation de l'énergie solaire.....	2
I.3 Rayonnement solaire.....	2
I.3.1 Spectre du rayonnement.....	2
I.3.2 Types de rayonnements solaires	3
I.3.2.1 Rayonnement direct	3
I.3.2.2 Rayonnement diffus	3
I.3.2.3 Rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	4
I.3.2.4 Rayonnement global.....	4
I.4 Energie photovoltaïque	4
I.4.1 Cellule photovoltaïque	4
I.4.2 Semi-conducteur	4
I.4.3 Jonction P-N.....	5
I.5 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	5
I.5.1 Structure d'une cellule PV	5
I.5.2 Principe de fonctionnement.....	7
I.6 Classification des cellules PV	8
I.6.1 Silicium mono cristallin.....	8
I.6.2 Silicium poly cristallin	8
I.6.3 Silicium amorphe	8
I.7 Rendement d'une cellule PV	9
I.8 Module photovoltaïque.....	9
I.9 Association serie parallèle des modules photovoltaïque.....	10
I.9.1 Association en série.....	11

I.9.2 Association en parallèle.....	11
I.10 Energie photovoltaïque dans le monde	12
I.11 Situation du photovoltaïque en Algérie	13
I.11.1 Atlas solaire algérien	13
I.11.2 Projet réalisés ou en cours	14
I.12 CONCLUSION	15
Chapitre II :Stokage de l'énergie.	
II.1 Introduction.....	16
II.2 Stockage naturel de l'énergie	16
II.3 Energie et puissance	16
II.4 Différents types de stockage	17
II.4.1 Stockage électrochimique	18
II.4.1.1 Principes généraux et constitution.....	19
II.4.1.2 Accumulateurs au plomb.....	19
II.4.1.3 Accumulateurs au lithium.....	20
II.4.1.4 Batteries Ni-Cd.....	22
II.4.2 Stockage électromagnétique.....	22
II.4.2.1 Super capacités (stockage électrostatique).....	22
II.4.2.2 Stockage magnétique dans les supra inductances.....	24
II.5 Récapitulatif des systèmes de stockage	24
II.5.1 Avantages et inconvénients	24
II.5.2 Autres caractéristiques.....	25
II.6 Conclusion	26
Chapitre III : Modélisation d'un module photovoltaïque.....	
III.1 Introduction.....	27
III.1. Modélisation d'un module photovoltaïque	27
III.1.1 Cellule photovoltaïque idéal.....	27
III.1.2 Cellule photovoltaïque réel	28
III.2 Module photovoltaïque KC200GT	29
III.3 Résultats de simulation aux condition standart.....	30
III.3.1 Caractéristiques I(V) et P(V) du module à l'état standard (T=25C° et E=1000W/m2).....	30

III.4 Influence de la température et de l'irradiation.....	31
III.4.1 Influence de l'irradiation solaire.....	31
III.5 Influence de la température.....	32
III.6 Nécessité de maximisation de puissance	33
III.7 Méthode P&O (perturbation-observation)	34
III.8 Simulation de la méthode MPPT	35
III.9 Conclusion	37
Chapitre IV : Systeme photovoltaïque en fonctionnement autonome	Erreur ! Signet non défini.
IV.1 Introduction.....	38
IV.2 Modélisation du système photovoltaïque	
IV.3 Modélisation du hacheur élévateur (Boost converter).....	41
IV.3.1 Principe de fonctionnement du hacheur élévateur	41
IV.3.1.1 Conduction continue du hacheur élévateur	41
IV.3.1.2 Courant moyen d'entrée	43
IV.3.1.3 Limite de fonctionnement en conduction continue	43
IV.4 Régulateur PI	44
IV.5 Batteries	45
IV.6 Charge DC.....	45
IV.7 Résultats de simulation et commentaires.....	46
IV.8 Conclusion	50
Conclusion générale	51
Référence bibliographiques	
Annexe.....	

Liste des figures

Figure I.1 : Spectre du rayonnement solaire	3
Figure I.2 : Différents rayonnements solaire	4
Figure I.3 : Jonction P-N	5
Figure I.4 : Mouvement des charges électrique dans une jonction P-N	6
Figure I.5 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque sous éclairement	7
Figure I.6 : Panneau photovoltaïque	9
Figure I.7 : Association de modules en série	11
Figure I.8 : Association de modules en parallèle	11
Figure I.9 : Production mondiale de l'énergie photovoltaïque	12
Figure I.10 : Carte d'éclairement solaire de l'Algérie	14
Figure II.1 : Diagramme de Ragone des condensateurs, des super condensateurs et des batteries électrochimiques	17
Figure II.2: Cellule élémentaire d'une batterie plomb-acide	20
Figure II.3: Principe de fonctionnement des batteries lithium	21
Figure II.4 : Différence entre un super condensateur et un condensateur classique	23
Figure II.5 : Structure simplifiée d'un super condensateur	23
Figure II.6: Géométrie torique et solénoïde d'un SMES	24
Figure III.1 : Modèle de cellule photovoltaïque idéal	27
Figure III.2 : Modèle de cellule photovoltaïque réel	28
Figure III.3: Module PV sous Simulink	30
Figure III.4 : Caractéristiques $I=f(V)$ du module photovoltaïque	30
Figure III.5 : Caractéristiques $P=f(V)$ du module photovoltaïque	31

Figure III.6: Caractéristiques I -V d'un module KC200GT pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C	31
Figure III.7 : Caractéristiques P-V d'un module KC200GT pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C	32
Figure III.8: Caractéristiques I -V d'un module KC200GT pour différentes températures ambiantes et un éclairement constant de 1000 W/m ²	32
Figure III.9 : Caractéristiques P-V d'un module KC200GT pour différentes températures ambiantes et un éclairement constant de 1000 W/m ²	33
Figure III.10: Schéma de converge vers le PPM par P&O	34
Figure III.11 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)	35
Figure III.12 : Schéma block de la commande MPPT	35
Figure III.13: Allure d'Ensoleillement	36
Figure III.14:Allure de la tension	36
Figure III.15: Allure du courant	36
Figure III.16:Allure de la puissance	36
Figure III.17 : Allure de la puissance obtenue par la méthode P&O	37
Figure IV.1 : Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT	38
Figure IV.2 : Caractéristiques P-V du système photovoltaïque pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C	39
Figure IV.3 : Caractéristiques I-V du système photovoltaïque pour différents éclairements et une température ambiante de 25°C	39
Figure IV.4 : Caractéristiques P-V du système photovoltaïque pour différents températures ambiantes et un éclairement constant de 1000 W/m ²	40
Figure IV.5 : Caractéristiques I-V du système photovoltaïque pour différents températures ambiantes et un éclairement constant de 1000 W/m ²	40
Figure IV.6 : Circuit électrique du convertisseur Boost	41

Figure IV.7 : Circuit équivalent du convertisseur (k est fermé)	41
Figure IV.8 : Circuit équivalent du convertisseur (k est ouvert)	42
Figure IV.9 : Forme typique des ondes du convertisseur Boost	44
Figure IV.10 : Régulateur de courante	44
Figure IV.11 : Modèle équivalent de batterie sous Simpower système	45
Figure IV.12 : Schéma Matlab/Simulink système global photovoltaïque	46
Figure IV.13 : Profil d'irradiation journalière	46
Figure IV.14 : Tension du générateur photovoltaïque	47
Figure IV.15 : Puissance du générateur photovoltaïque	47
Figure IV.16 : Allure de courtant	48
Figure IV.17 : Rapport cyclique α	48
Figure IV.18 : Tension de la batterie	49
Figure IV.19 : Etat de charge de la batterie	49
Figure IV.20 : Courbes des puissances	50

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques des cellules PV	8
Tableau I.2: Production mondiale de l'énergie photovoltaïque	12
Tableau I.3: Potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie	13
Tableau II.1: Exemples de densités énergétiques de quelques moyens de stockage	17
Tableau II.2: Classification des technologies de stockage selon les phénomènes qui sont à la base de leur fonctionnement	18
Tableau II.3 : Comparaison des technologies de stockage	25
Tableau II.4 : Caractéristiques des moyens de stockage à grande échelle	25
Tableau II.5 : Caractéristiques des moyens de stockage à petite échelle	26
Tableau III.1: Paramètres d'un panneau solaire KC200GT	29

Glossaire

I_{obs} : Courant sous obscurité [A]

I_{ph} : Courant photogène [A]

I_{cc} : Courant de court-circuit [A]

I_d : Courant de diode [A]

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale [A]

I_l : Courant traversant l'inductance [A]

V_{mpp} : Tension au point maximal du panneau [V]

V_{co} : Tension en circuit ouvert [V]

V_e : Tension d'entrée du hacheur [V]

V_s : Tension de sortie du hacheur [V]

V_{batt} : Tension ou bornes de la batterie [V]

P : Puissance [W]

P_s : Puissance maximum mesurée [W]

P_c : Puissance crête [W]

P_{mpp} : Puissance maximal du panneau [W]

η : Facteur de non idéalité de la photopile

R_s : Résistance série [Ω]

R_p : Résistance parallèle [Ω]

E : Ensoleillement [W/m^2]

α_{cc} : Coefficient d'incrémentement du courant I_{cc} .

β_{co} : Coefficient d'incrémentement de la tension V_{co} .

f : Fréquence [Hz]

L : Inductance [H]

R : Résistance de la charge [Ω]

C : Capacité [F]

T : Période du hachage [S]

α : Rapport cyclique

ZCE : Zone de charge d'espace

FF: Facteur de forme

PV: Photovoltaïque

MPPT: Maximum Power Point Tracking

IGBT: Transistor bipolaire à grille isolée

Ni-Cd : Nickel-cadmium

pb : Plomb acide

Li-ion : Lithium

PO : Perturbation et Observation

DC: Courant Continu (Direct Current)

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

MPP: Point de puissance maximale

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Le recours systématique aux ressources fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour la production de l'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Ainsi, l'électricité produite à partir de ces combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondial de CO₂ [1].

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres [2]:

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles sont inépuisables ;
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

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

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque cette cellule est exposée à la lumière [3].

Les générateurs photovoltaïques sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité d'énergie de façon continue. Le type de stockage utilisé, particulièrement dans les systèmes autonomes, est la batterie électrochimique au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût sont les raisons principales de sa large utilisation dans ce type de systèmes [4].

Dans ce contexte, notre travail concerne l'étude d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome intégrant une batterie électrochimique (plomb-acide) comme moyen de stockage de l'énergie électrique.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on fait un rappel sur les générateurs PV et leurs performances.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes technologies de stockage.
- Dans le chapitre trois, on étudie une modélisation et une simulation par MATLAB-Simulink de générateur photovoltaïque de type KC200GT, ensuite on va montrer l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement.
- Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons une simulation complète du système PV réalisé (générateur photovoltaïque, convertisseur survolteur et commande MPPT « perturbation et observation ») ainsi une batterie de stockage.
- A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale

Chapitre I : Energie photovoltaïque

I.1 Introduction

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle.

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et sous forme stockée durant des millions d'année, de nos réserves de gaz, de pétrole et de charbon [5].

I.2 Présentation de l'énergie solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1 390 000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'Hydrogène, 19% d'Hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermo nucléaire Hydrogène –Hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'Hydrogène en 560 millions tonnes d'Hélium. La réaction de fusion se fait dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius [6].

I.3 Rayonnement solaire

A chaque seconde, le soleil est allégé de quatre millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300 000 km/s, met environ huit minutes pour parvenir à la terre et sa distribution spectrale dans l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μm . La température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780 °K [6].

I.3.1 Spectre du rayonnement

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variante de 0.22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- ❖ 9% dans la bande des ultraviolets (<0.4 μm),
- ❖ 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8 μm),
- ❖ 44 % dans la bande des infrarouges (>0.8 μm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kilowatt par mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3%, selon que la terre s'éloigne ou s'approche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1.2 kW/m^2 (1200 W/m^2) [5]. La variation de la répartition spectrale énergétique est représentée par la figure (I.1) [6].

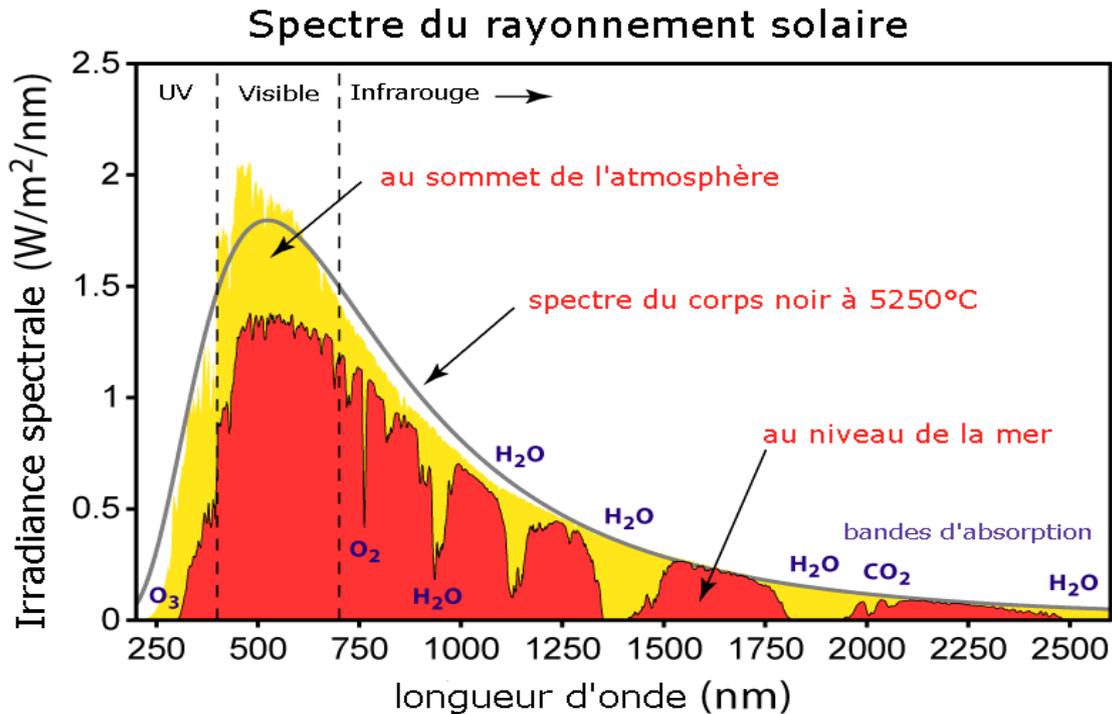


Figure I.1 : Spectre du rayonnement solaire

I.3.2 Types de rayonnements solaires

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes : directe, diffuse et réfléchie. La somme de toutes ces composantes donne le rayonnement global [6].

I.3.2.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. Le pyréliomètre mesure l'intensité du rayonnement direct. Le pyréliomètre doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le Soleil.

I.3.2.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la

lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la Terre.

I.3.2.3 Rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. L'albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

I.3.2.4 Rayonnement global

Le rayonnement global est l'énergie rayonnante totale du soleil, qui atteint une surface horizontale à la surface de la Terre au cours d'une unité de temps précise. Il est d'environ 1000 W/m² pour un rayonnement solaire vertical. Les composants du rayonnement solaire sont représentés par la figure (I.2).

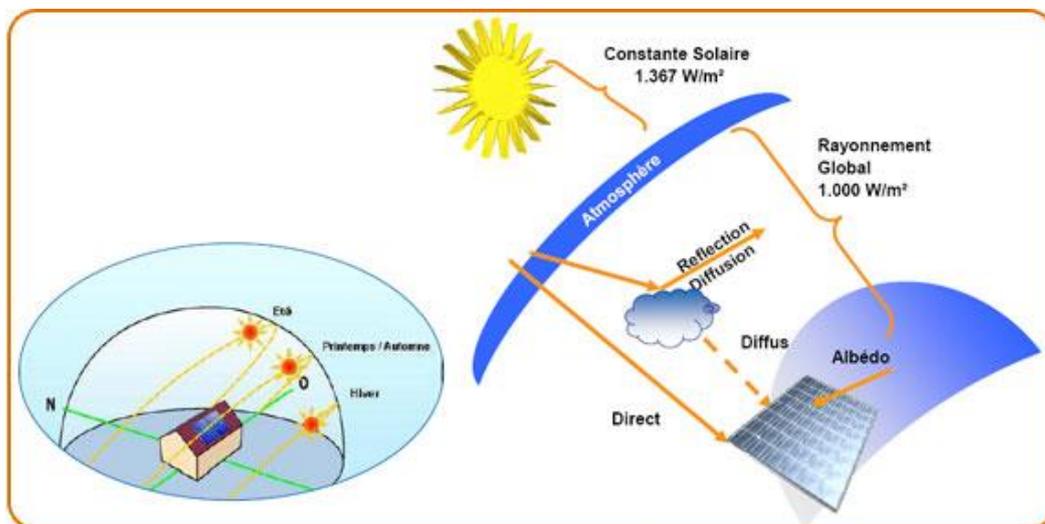


Figure I.2 : Différents rayonnements solaire

I.4 Energie photovoltaïque

I.4.1 Cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et convertie directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [4].

I.4.2 Semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leurs

structures, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées [9].

I.4.3 Jonction P-N

Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur dopé P avec un semi-conducteur dopé N. On l'utilise dans de nombreux dispositifs électroniques.

Les électrons majoritaires dans la zone N vont migrer vers la zone P. Ce mouvement de charge polarise la jonction : la zone N proche de la jonction devient électriquement positive et la zone P devient électriquement négative, par conséquent, un champ électrique interne est créé figure (I.3). Mais cette diffusion de charges crée un autre champ en sens inverse. A l'équilibre thermodynamique, les deux courants s'annulent [11].

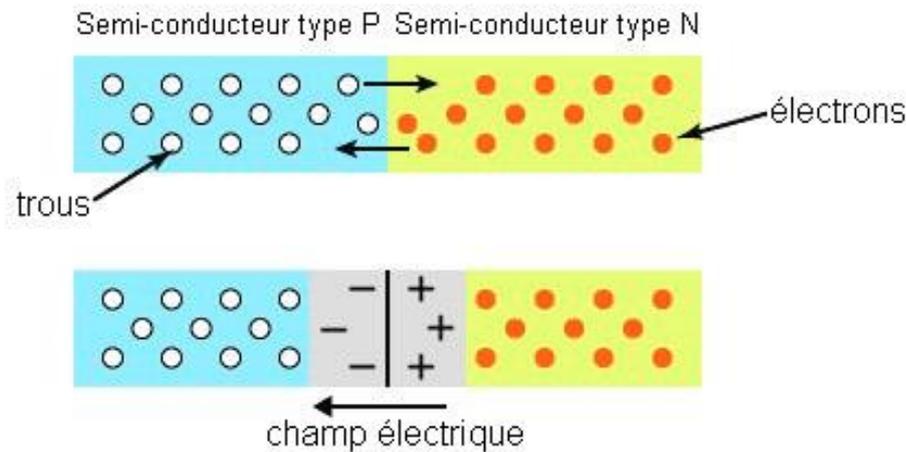


Figure I.3 : Jonction P-N

I.5 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.5.1 Structure d'une cellule PV

Pour obtenir une cellule photovoltaïque, il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire ? réaliser une jonction du type P-N dans un matériau de silicium dopé en volume avec un élément tel que le bore qui le rend positif (zone P) et contre dopé dans une zone superficielle avec du phosphore qui le rend négatif (zone N).

Le champ électrique qui règne à la jonction de ces deux zones dopées différemment sépare les charges électriques photo-générées par la lumière solaire (paires d'électrons-trous) et assure leur évacuation du cristal (les électrons par la cathode et les trous par l'anode) sous une tension de l'ordre

de 0,5 Volt et un courant continu de l'ordre de 30 mA pour chaque cm² de capteur sous un ensoleillement maximum de 1 kW/ m² figure (I.4) [3].

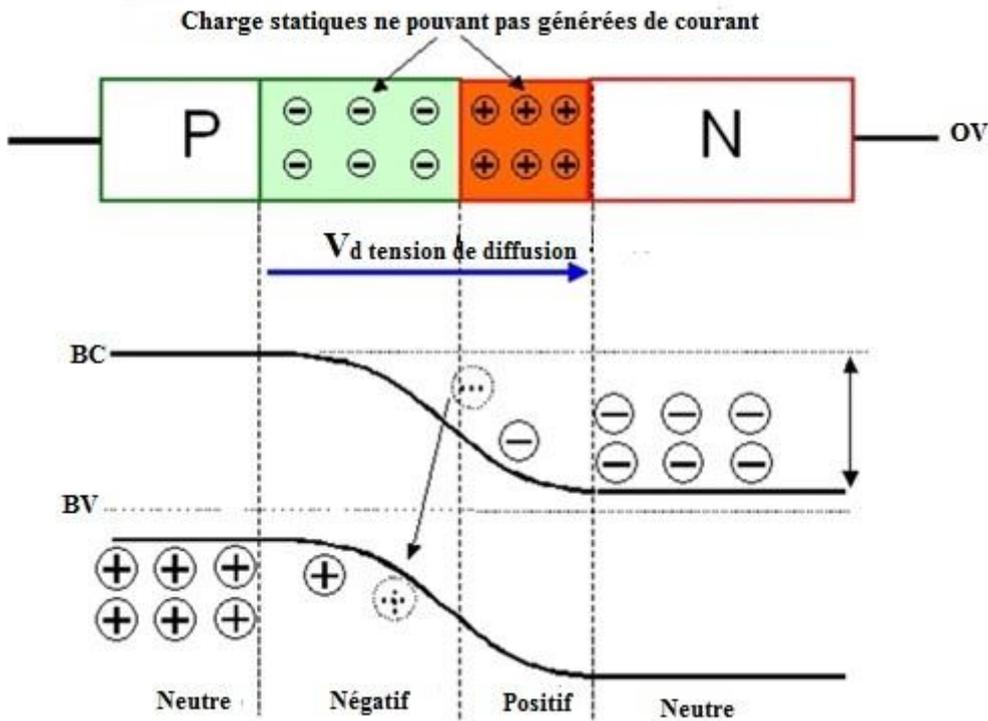


Figure I.4 : Mouvement des charges électrique dans une jonction P-N

La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction P-N, le courant sous obscurité dans une telle structure est donné par la formule :

$$I_{obs} = I_s (\exp (qV/ nKT) - 1) \tag{I.1}$$

Avec :

I_s est le courant inverse de la jonction P-N, il a deux composantes :

- Le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion ;
- Le courant de génération thermique dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.

Le facteur n, compris entre 1 et 2, représentant le coefficient d'idéalité de la jonction (P-N), permet de tenir compte des différentes composantes du courant direct circulant dans la jonction (P-N) :

- Les composantes dues aux recombinaisons dans les régions N et P constituent les courants de la diffusion des électrons et des trous (n=1) ;

- La composante due aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de recombinaison de la jonction ($n=2$).

I.5.2 Principe de fonctionnement

Sous éclairement les paires électrons-trous photo générées dans la zone de charge d'espace (ZCE) sont instantanément séparées par le champ électrique y régnant. Les trous (charges positives) se voient accélérés vers la zone P et les électrons (charges négatives), vers la zone N. Trous et électrons deviennent alors majoritaires : c'est le photo-courant généré.

Parallèlement, les porteurs minoritaires, trous générés de côté N et électrons générés côté P, créent un gradient de concentration et diffusent dans le matériau. S'ils atteignent la ZCE sans se recombiner, le champ électrique leur fait traverser la zone dépliée afin d'atteindre la région où ils deviennent majoritaires : c'est le photo-courant de diffusion [3].

La présence de contact ohmique assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photogène I_{ph} , somme des deux contributions précédentes, et qui participe au courant total selon la relation suivante:

$$I = I_{obs} - I_{ph} \tag{I.2}$$

La figure (I.5) donne la représentation schématique d'une cellule photovoltaïque sous éclairement et le diagramme de bandes correspondant.

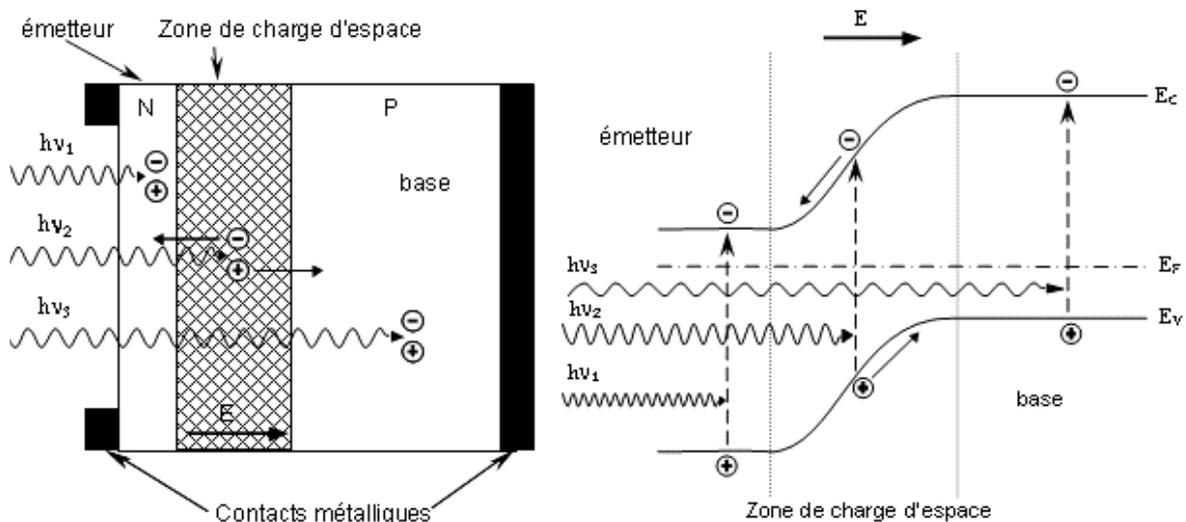


Figure I.5 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque sous éclairement

Comme la longueur de diffusion photo générée (L_n) des électrons est supérieure à celle des trous photo générés (L_p), on dope préférentiellement la base de type P. De plus elle est faiblement dopée (10^{15} à 10^{16} atomes / cm^3) afin de limiter la recombinaison.

Le fort dopage de la zone N, appelée émetteur, assure l'existence d'un champ électrique suffisant dans la ZCE et minimise la résistance série au niveau du contact métallique [4].

I.6 Classification des cellules PV

I.6.1 Silicium mono cristallin

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

I.6.2 Silicium poly cristallin

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

I.6.3 Silicium amorphe

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10%), mais la technologie évolue rapidement. Elle fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par le temps couvert, y compris sous éclairage artificielle de 20 à 3000 lux) [5]. Le tableau (I.1) fourni une comparaison entre les différentes technologies.

Tableau I.1: Caractéristiques des cellules PV

Technologie	Rendements	Durée de vie	Points forts	Points faibles
Silicium Mono cristallins	15 à 18%	35 à 40 ans	Rapport Puissance*/Surface : 130 à 165 Wc/m ² Rendement en forte luminosité	Prix au m ² le+ élevé / Moindre production en faible luminosité, perte de productivité lors de fortes températures
Silicium Poly cristallins	12 à 15%	30 à 35 ans	Rapport Puissance/Surface : 110 à 144 Wc/m ² Meilleur rapport qualité/prix	Moindre production en faible luminosité mais meilleur que le mono, accepte des orientations sud + /-60° et des inclinaisons entre 10 et 45
Silicium Amorphe	6 à 11%	30 à 35 ans	Faible rapport puissance/m ² Moins sensible à l'orientation, à l'inclinaison Productivité en faible luminosité	Rapport P _{ce} * /Surface : 40 à 70 Wc/m ²

I.7 Rendement d'une cellule PV

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{S \times E}$$

D'ou

S : surface génératrice en m². E: l'ensoleillement en W/m²

I.8 Module photovoltaïque

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque figure (I.6) est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies. Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable.

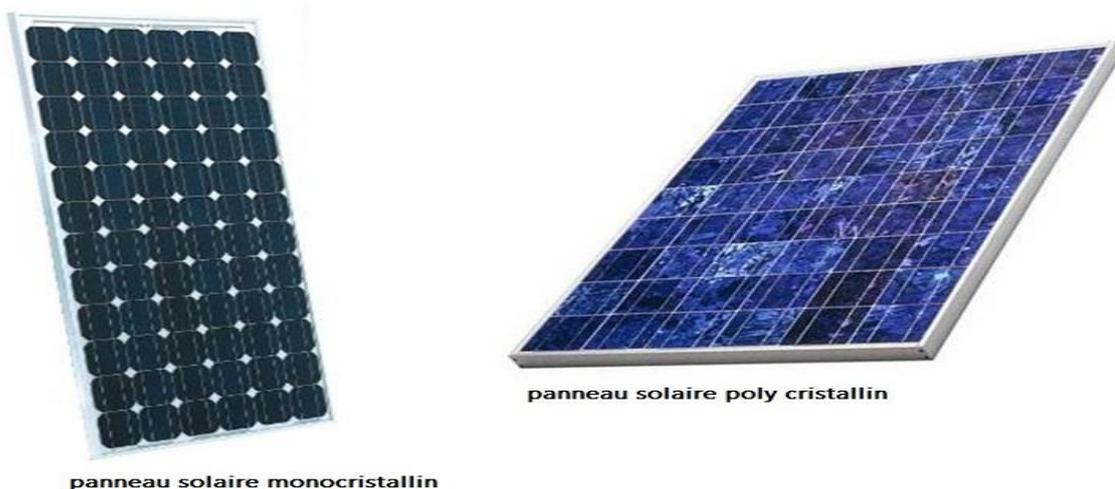


Figure I.6 : Panneau photovoltaïque

Les modules en silicium mono cristallin représentent 64% du marché avec une efficacité de conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%. Les modules poly cristallin représentent 28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de

13 à 15 % et les modules à base du silicium amorphe représentent 13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %.

Les modules photovoltaïques sont caractérisés par certains paramètres [6]:

- ✚ **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (AM 1.5, 25°C et un éclairement de (1000 W/m²) ;
- ✚ **La caractéristique $I(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci ;
- ✚ **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement donné ;
- ✚ **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement donné ;
- ✚ **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- ✚ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$

I.9 Association série parallèle des modules photovoltaïque

Les modules ont une puissance nominale unitaire faible qui varie, selon les modèles proposés, de quelques watts à quelques dizaines de Watts. Dès que l'application envisagée nécessite une puissance installée plus importante, il est nécessaire de regrouper les modules selon une architecture bien déterminée.

Cette architecture dépend de trois facteurs:

- La puissance nominale installée nécessaire,
- La tension continue sous laquelle cette puissance doit être fournie,
- La puissance et la tension d'un module.

Tous les modules constituant un générateur doivent être de même type. En particulier, dans des conditions de fonctionnement données, ils doivent tous fournir la même tension.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [6].

I.9.1 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [14].

La caractéristique d'un groupement de N_s modules solaires en série est représentée par la figure (I.7) suivante :

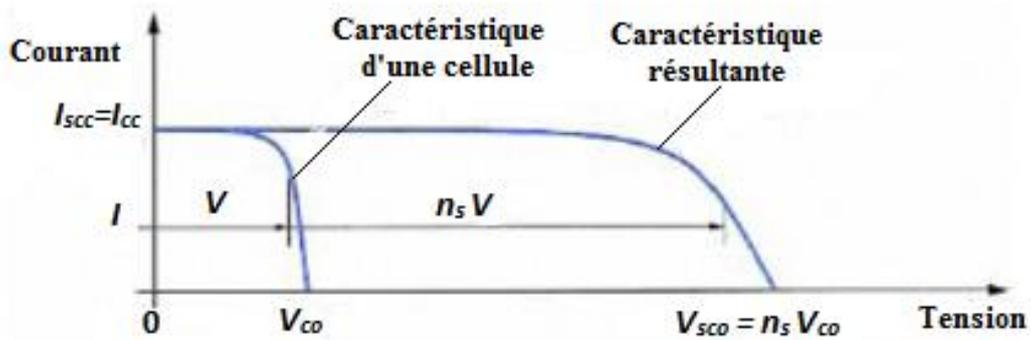


Figure I.7 : Association de modules en série

I.9.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [14].

La caractéristique d'un groupement de (N_p) modules solaires en parallèle est représentée par la figure (I.8) :

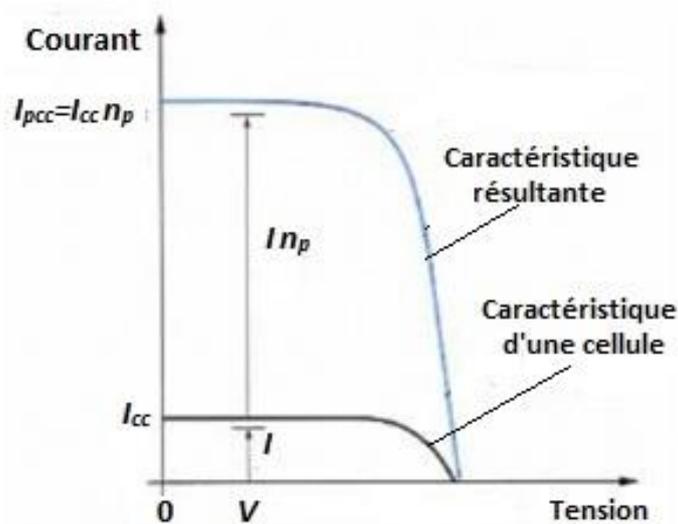


Figure I.8 : Association de modules en parallèle

I.10 Energie photovoltaïque dans le monde

En cinq ans, la puissance solaire photovoltaïque installée a été multipliée par huit dans le monde, passant de 15,8 GW à 136,7 GW Tableau (I.2). En Allemagne, la capacité installée est passée de 6,0 GW à 35,7 GW entre 2008 et 2013. La production mondiale incluant les principaux producteurs est illustrée par la figure (I.9).

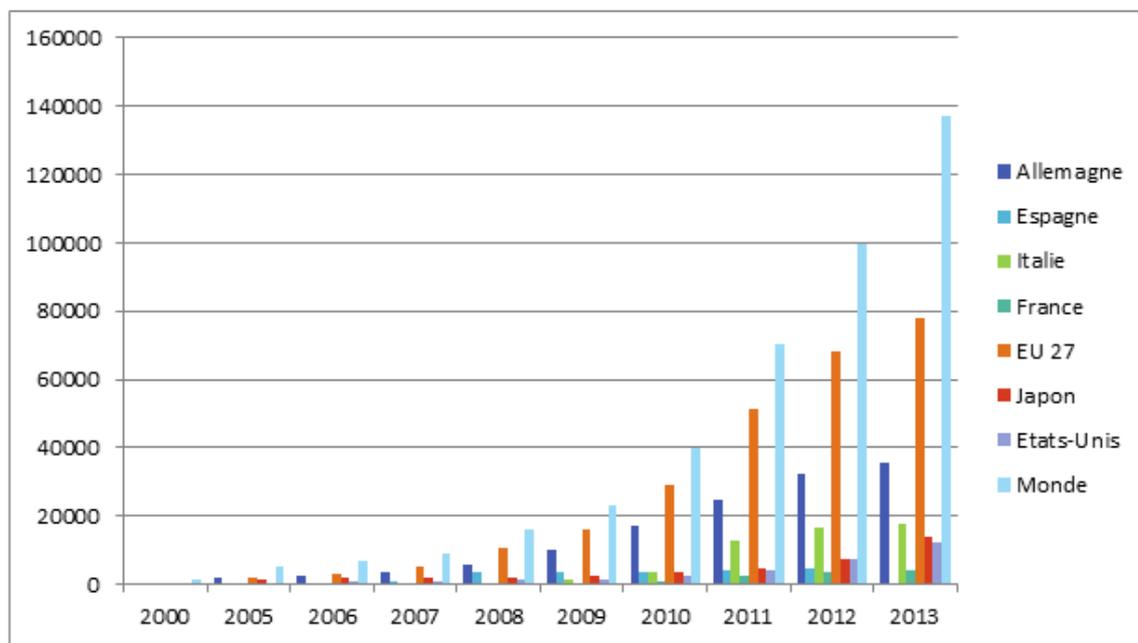


Figure I.9 : Production mondiale de l'énergie photovoltaïque

L'initiative de l'Allemagne, commencée en 1990 avec l'opération « 1000 toits solaires », a permis le développement de la filière photovoltaïque à travers le monde, conduisant à une forte baisse des prix des systèmes photovoltaïques au cours des années.

Aujourd'hui, l'électricité solaire photovoltaïque devient une réalité économique dans de nombreux pays, les coûts de production de cette électricité devenant équivalents à ceux de l'électricité achetée sur le réseau pour les tarifs « résidentiels » (tous les tarifs privés ou professionnels non industriels). C'est la « parité réseau », qui se réalise aussi pour une partie des tarifs « industriels » (hors très grosses entreprises).

Pour chaque pays, la parité s'étend progressivement selon les différents tarifs du réseau, variables selon la puissance souscrite et le niveau de la consommation annuelle, et selon les tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque, variables selon la nature (intégré au bâtiment ou pas) et la puissance de l'installation photovoltaïque [12].

Tableau I.2: Production mondiale de l'énergie photovoltaïque

Cumul	Allemagne	Espagne	Italie	France	EU 27	Japon	Etats-Unis	Monde
2000	114	12	22	11	185	320	140	1 280
2005	1 910	58	46	26	2 170	1 420	480	5 100
2006	2 740	175	50	34	3 150	1 710	620	6 600
2007	3 85	735	120	47	4 940	1 920	830	9 200
2008	6 020	3 420	460	104	10 380	2 150	1 170	15 800
2009	9 960	3 440	1 160	335	16 300	2 630	1 650	23 100
2010	17 380	3 810	3 480	950	29 320	3 620	2 530	40 200
2011	24 880	4 210	12 760	2 560	51 360	4 700	4 200	70 200
2012	32 200	4 400	16 400	3 580	68 100	7 200	7 400	99 700
2013	35 700	-	17 500	4 320	78 200	14 100	12 200	137 000

I.11 Situation du photovoltaïque en Algérie

I.11.1 Atlas solaire algérien

L'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme essentiellement dans le sud du pays (Tableau I.3). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures [7].

Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production trop faibles entraînent des coûts très élevés, qui freinent le volume des ventes.

Tableau I.3: Potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Concernant la mesure du rayonnement solaire en Algérie, le réseau de mesures est peu dense relativement à la superficie du territoire. Pour pallier aux insuffisances des réseaux de mesures, des

modèles sont proposés, ils sont basés essentiellement sur l'utilisation des données météorologiques en particulier la durée d'insolation. La figure (I.10) donne d'éclairement solaire en Algérie directe [14].

Dans ce cadre, l'équipe de recherche en gisement solaire du laboratoire « Evaluation du potentiel énergétique », s'est assignée pour objectif le développement d'une méthodologie qui a permis une estimation réaliste du gisement solaire pouvant être exploité à des fins énergétiques par les concepteurs de systèmes solaires [8].

I.11.2 Projet réalisés ou en cours

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques. Parmi les projets réalisés on peut citez [11] :

- ✓ La centrale électrique hybride gaz-solaire de Hassi R'mel ;
- ✓ Tour solaire dans la ville de Boughezoul ;
- ✓ Une station photovoltaïque à Ghardaïa ;
- ✓ Centrale solaire thermique à El Oued (150 MW).

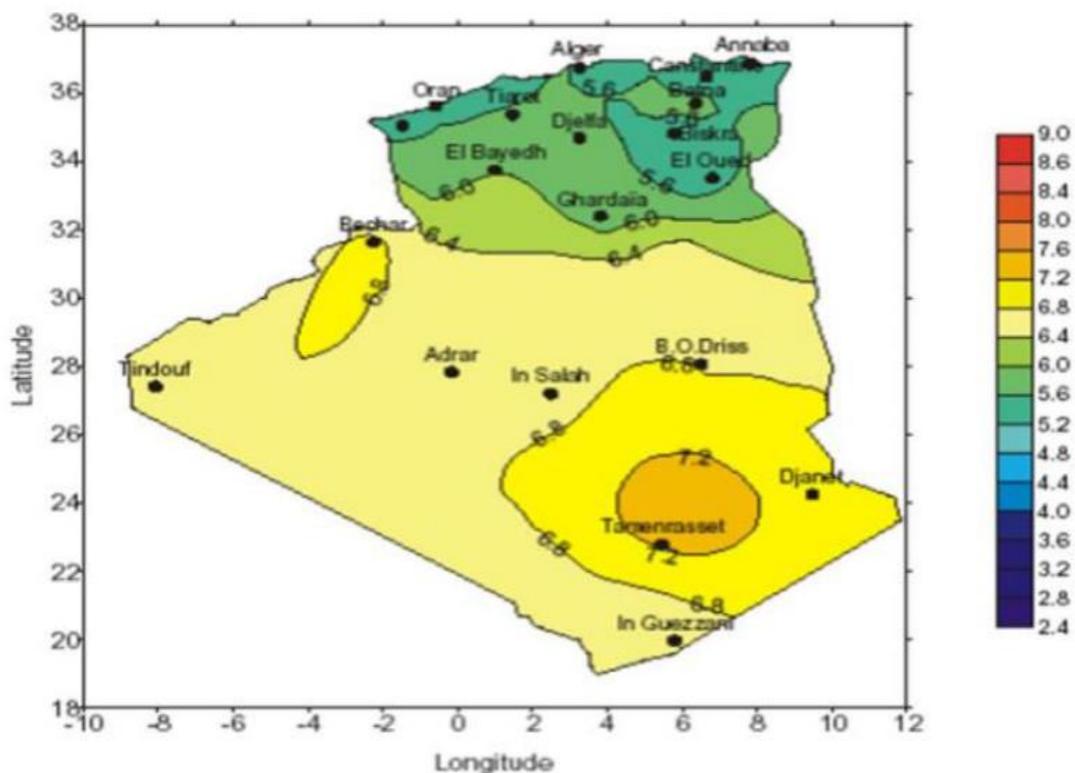


Figure I.10 : Carte d'éclairement solaire de l'Algérie

Parmi les projets en cours :

- ✓ Usine de Rouïba pour la production de modules photovoltaïques (capacité 120 MW) ;
 - ✓ La future nouvelle ville de Hassi-Massoud sera entièrement alimentée en énergies renouvelables ;
 - ✓ Les aires de repos de l'autoroute Est-Ouest seront alimentées, en électricité solaire, par système photovoltaïque ;
 - ✓ 42 stations solaires photovoltaïques pour les éleveurs à Nâama, dans le sud-ouest du pays ;
 - ✓ Chaque station sera dotée de six chauffe-eau solaires qui permettront de donner 1800 litres d'eau chaude par jour ;
 - ✓ Atelier de fabrication de chauffe-eau solaire à Ouargla ;
- Une soixantaine de projets de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides, devraient être réalisés.

I.12 CONCLUSION

L'application des systèmes photovoltaïques n'est pas limitée aux systèmes isolés, mais peut être utilisée localement au niveau domestique, donc une optimisation d'utilisation d'énergie est indispensable.

Puisque la demande d'énergie dans les applications photovoltaïques ne coïncide pas toujours avec sa production, il est donc nécessaire d'avoir un élément de stockage pour stocker l'énergie produite. Par conséquent le stockage d'énergie fera l'objectif de deuxième chapitre.

Chapitre II :
Stockage de l'énergie.

II.1 Introduction

Le stockage, d'une manière générale et plus particulièrement celui de l'électricité, a toujours été le point faible de l'énergie. Cependant, il constitue un point clé pour l'essor des énergies renouvelables. Indispensable quand la source d'énergie et l'utilisateur sont isolés, le stockage l'est aussi quand cette source est reliée au réseau électrique. De ce fait, le stockage énergétique paraît comme une solution immédiate pour faire face à la production irrégulière des sources renouvelables, liée à leur nature répartie [19].

II.2 Stockage naturel de l'énergie

L'énergie exploitable est stockée, avant tout, dans la nature sous des formes et avec des densités très diverses [19]:

- Stockage fossile, dans les couches géologiques terrestre ;
- Stockage gravitaire, en utilisant l'eau par exemple ;
- Stockage biochimique, pour la biomasse ;
- Stockage thermique, pour le soleil qui traduit aussi ses effets dans le vent ou l'énergie des mers.

Pour la majorité de ses formes de stockage qualifiées de primaires, l'homme, en exploitant ces énergies, ne paye que les frais de déstockage.

Suivant les applications visées, plusieurs paramètres technico-économiques (coût d'investissement, densité d'énergie, ou de puissance, cyclabilité, impact sur l'environnement, ...etc.) vont conduire au choix de la technologie de stockage la mieux adaptée pour une application donnée.

II.3 Energie et puissance

L'énergie massique en Wh/kg ou volumique en Wh/l et la puissance massique en W/kg permettent de quantifier les performances d'un système de stockage. Le diagramme de Ragone de la figure (II.1) permet de représenter avec des échelles logarithmiques, la puissance massique en fonction de l'énergie massique. On peut ainsi comparer les performances des super condensateurs, des batteries d'accumulateurs et des condensateurs traditionnels [19].

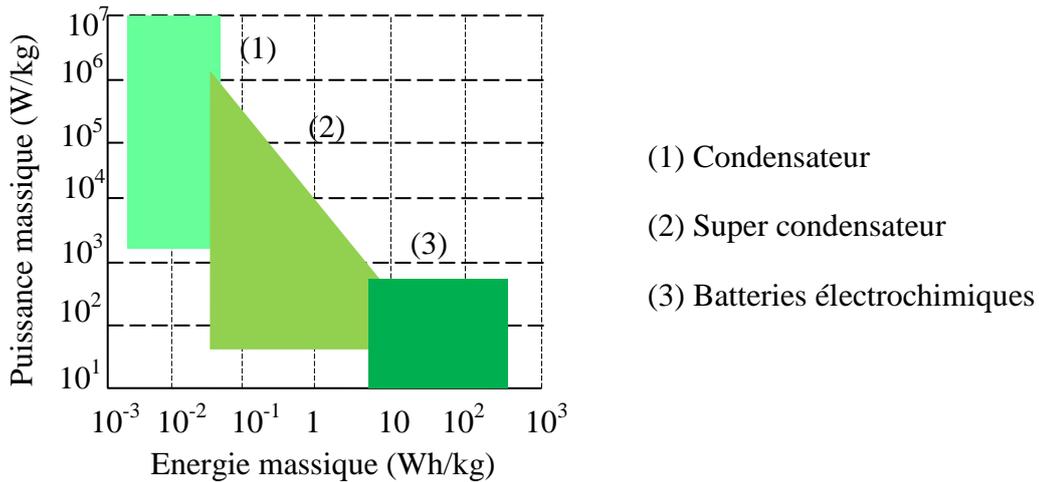


Figure II.1 : Diagramme de Ragone des condensateurs, des super condensateurs et des batteries électrochimiques

Les densités d'énergie stockées dans les matériaux ou les composants de stockage sont très différentes. Le tableau (II.1) donne quelques exemples des densités énergétiques exprimées en Wh/kg. Ces données montrent l'énorme avantage des sources fossiles sur les sources secondaires de stockage [16].

Tableau II.1: Exemples de densités énergétiques de quelques moyens de stockage

Moyen de stockage	H ₂	Charbon	Bois	Batterie Zn-air	Batterie Li-ion	Batterie alcaline	Air comprimé	Batterie Pb-acide
Densité d'énergie (Wh/kg)	31 000	11 500	2 800	480	330	164	34	25

Le choix d'une batterie de stockage pour une application donnée nécessite le respect de certains critères comme la tension, la durée de vie, la maintenance, la température, l'autodécharge, la caractéristique de charge, la cyclabilité, la sécurité d'exploitation, les dimensions physique, le prix et la recyclabilité (contrainte environnementale).

D'une manière générale, une technologie de stockage doit assurer un meilleur compromis en termes de coût, de fiabilité et de rendement du système.

II.4 Différents types de stockage

Les technologies de stockage utilisent des principes physiques ou chimiques différents. On peut classer celles-ci en fonction des phénomènes physico-chimique qu'elles font intervenir tableau (II.2) [16].

**Tableau II.2: Classification des technologies de stockage selon les phénomènes
qui sont à la base de leur fonctionnement.**

Origine de l'énergie stockée	Technologies
Electrochimique	Batteries Hydrogène/PAC (pile à combustible)
Mécanique	Hydraulique, Volant d'inertie, Air comprimé, Ressort.
Electromagnétique	Capacité/super capacité Inductance/Stockage magnétique
E	Energie sensible : eau, masse thermiques Chaleur latente : sels fondus avec changement de phase

II.4.1 Stockage électrochimique

Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie sous forme chimique. Cette énergie est générée par des réactions électrochimiques activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte. L'énergie stockée est restituée sous forme électrique dans un circuit extérieur.

L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible, il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme batterie est utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires rechargeables [15].

Un accumulateur, quelle que soit sa technologie, est caractérisé par trois grandeurs essentielles : sa densité d'énergie, sa densité de puissance et sa cyclabilité [15].

- **Densité d'énergie massique ou volumique** : elle correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (en Wh/kg) ou de volume (Wh/l) d'accumulateur.
- **Densité de puissance massique** : elle représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur (en W/kg), c'est l'énergie fournie par unité de temps et par unité de masse.

- **Cyclabilité** : elle est exprimée en nombre de cycles (correspondant à une charge et une décharge, elle caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale.

II.4.1.1 Principes généraux et constitution

Les accumulateurs électrochimiques sont basés sur les réactions chimiques d'oxydoréduction.

Ils sont composés de trois éléments principaux :

- + Anode : électrode négative (réductrice) métallique ; elle fournit des électrons au circuit extérieur.
- + Cathode : électrode positive (oxydante), en générale en oxyde métallique ; elle reçoit les électrons du circuit extérieur.
- + Electrolyte : c'est une solution aqueuse siège des réactions électrochimiques, il joue le rôle d'un conducteur ionique.

On trouve aussi parfois une membrane séparatrice entre les électrodes.

Le rôle de la température dans les réactions chimiques est déterminant. En effet, ces accumulateurs ne fonctionnent pas de façon optimale à basse température voire à température ambiante et la montée en température favorise la conduction ionique et pénalise la conduction électronique. Cela mène à un compromis à considérer avec la valorisation éventuelle de la chaleur dans le système [18].

Le choix de l'électrolyte détermine, par sa conductivité, la gamme de température de fonctionnement. Son état (liquide ou solide) affecte la sûreté du système. En d'autres termes, sécurité et performances sont les principales exigences auxquelles doivent répondre les électrolytes de la batterie [19].

II.4.1.2 Accumulateurs au plomb

Les batteries au plomb restent actuellement les plus répandues dans l'automobile et pour des applications stationnaires; leur technologie est bien maîtrisée, néanmoins on cherche toujours à améliorer leur durée de vie qui constitue leur majeur inconvénient. Elles présentent l'avantage non négligeable d'avoir le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connues. Son utilisation s'étend aux installations de plusieurs MWh [16, 18].

II.4.1.2.1 Principe de fonctionnement

Il se produit au cours de la décharge, une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode figure (II.2). Ces réactions sont inversées lors de la recharge. Ces batteries, comme toutes les batteries à électrolyte liquide, nécessite un entretien régulier (remise à zéro de l'électrolyte).

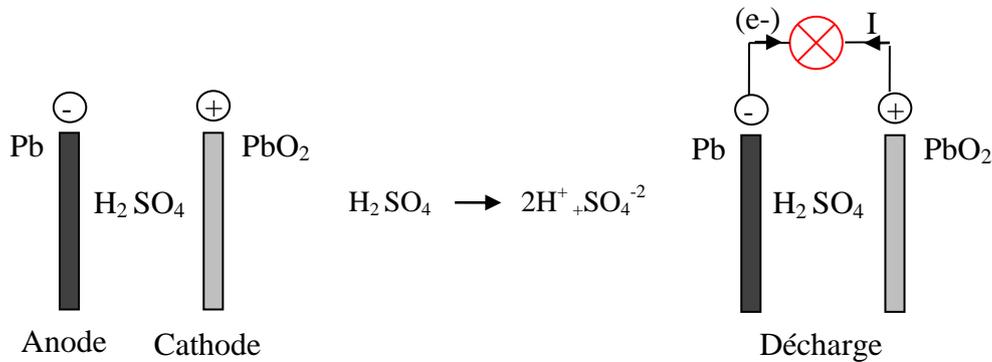


Figure II.2: Cellule élémentaire d'une batterie plomb-acide

II.4.1.2.2 Réactions chimiques

A l'anode : $\text{Pb} + \text{HSO}_4^- \longrightarrow \text{PbSO}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$

A la cathode : $\text{PbO}_2 + \text{HSO}_4^- + 3\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

II.4.1.3 Accumulateurs au lithium

Dans ce type d'accumulateurs l'électrode positive, composée d'une structure en couches, est constituée d'un oxyde du type LiMO_2 (M pour métal) pour les accumulateurs lithium-ion. Trois oxydes sont utilisables : LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiFePO_4 et LiMnO_4 . Vu le coût élevé de l'oxyde de cobalt, et de sa forte réactivité à haute température, seuls les autres oxydes sont utilisés [12, 13]. Pour les accumulateurs lithium-métal, ce sont l'oxyde de vanadium, l'oxyde de manganèse ou des polymères conducteurs qui sont utilisés [18].

L'électrode négative est réalisée en composés carbonés : graphite, carbone hydrogéné, carbone dur, oxyde mixte de vanadium amorphes, oxyde mixtes à base d'étain ou à base de titane. Elle sert de matériau d'insertion, elle n'est donc pas modifiée lors de la réaction [18].

L'électrolyte est une solution de LiPF_6 dans un mélange de solvant organique. Il se trouve sous forme liquide ou solide (polymère sec, polymères-gels ou composées organiques vitreux). Pour les applications basse température, une tendance consiste à utiliser les sels fondus (constitués uniquement d'anions et de cations) [18, 19].

II.4.1.3.1 Principe de fonctionnement

Lors de la décharge de l'accumulateur figure (II.3), le lithium relâché par l'électrode négative sous forme ionique Li^+ migre à travers l'électrolyte et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive. Le passage de chaque ion lithium dans le circuit interne de l'accumulateur s'accompagne du passage d'un électron dans le circuit externe, donnant ainsi naissance à un courant électrique.

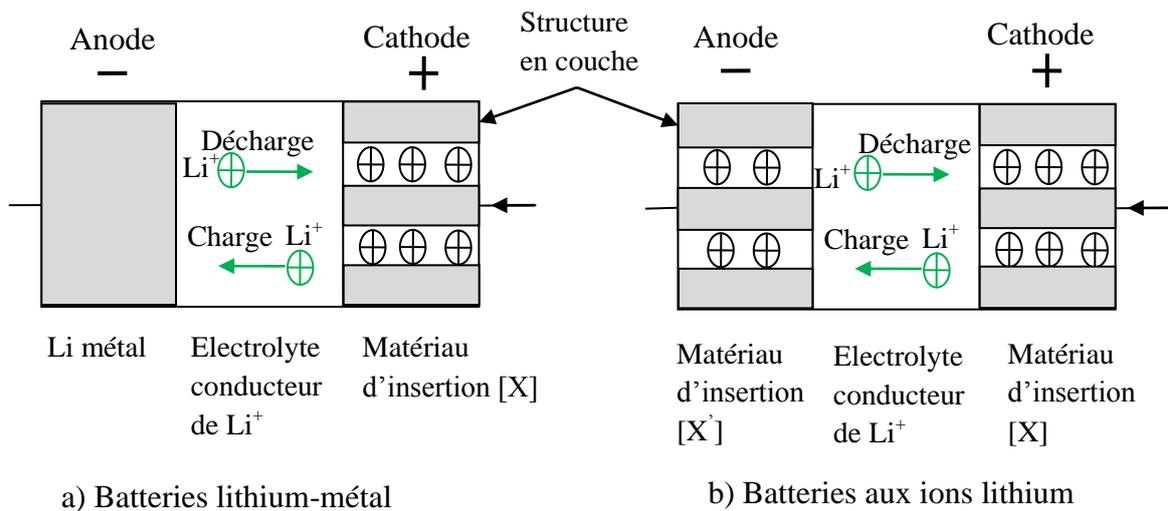


Figure II.3: Principe de fonctionnement des batteries lithium

II.4.1.3.2 Réactions chimiques

	Accumulateur Li-métal	Accumulateur Li-ion
A l'anode	$\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$	$[\text{Li}_n\text{X}'] \rightarrow [\text{X}'] + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$
A la cathode	$[\text{X}] + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \rightarrow [\text{Li}_n\text{X}]$	$[\text{X}] + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \rightarrow [\text{Li}_n\text{X}]$

II.4.1.3.3 Caractéristiques des batteries au lithium

Le lithium est un métal très léger, sa masse molaire atomique est de 6.94 g, et il est le plus réducteur des métaux (grande aptitude à perdre des électrons). La tension à vide d'une cellule élémentaire peut atteindre 4 V, cela constitue un avantage intéressant car la densité d'énergie massique libérée par les réactions électrochimiques au sein de l'électrolyte est à la fois proportionnelle à la différence de potentielle entre les deux électrodes et à la quantité de lithium qui sera intercalée dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Par conséquent, les batteries au lithium offrent les plus importantes densités d'énergie massiques et volumiques (typiquement plus de 160 Wh/kg et 400 Wh/l, supérieures en moyenne de 50 % ou plus par rapport aux batteries conventionnelles [18, 19].

Finalement, on peut constater que les batteries au lithium offrent d'intéressants avantages par rapport aux batteries plomb-acide [15]:

- Durée de vie supérieure ;
- Très faible autodécharge ;
- Systèmes 5 à 6 fois plus léger ;
- Absence de maintenance.

II.4.1.4 Batteries Ni-Cd

Ces batteries utilisent une cathode d'hydroxyde de nickel Ni(OH)_2 , une anode de cadmium et un électrolyte en hydroxyde de potassium KOH. Cette batterie est chère et ses éléments sont toxiques [14]. Les réactions de décharge sont données par les équations chimiques suivantes :

- A l'anode: $\text{Cd} + 2\text{OH}^- \longrightarrow \text{Cd(OH)}_2 + 2\text{e}^-$
- A la cathode : $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \longrightarrow \text{OH}^- + \text{Ni(OH)}_2$
- Soit la réaction globale : $\text{Cd} + 2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Cd(OH)}_2 + 2\text{Ni(OH)}_2$

Les batteries Ni-hydrures métalliques, non toxique et de grande densité d'énergie stockée dans une gamme de température étendue, tendent à remplacer les batteries Ni-Cd. Les hydrures métalliques sont utilisés ici comme électrode négative puisque elles sont capables de stocker de l'hydrogène, utilisé comme élément actif. L'électrode positive est en hydroxyde de nickel et l'électrolyte un hydroxyde de potassium qui doit absorber les ions H^+ . Leur inconvénient est de ne pas retrouver leur pleine capacité si elles ne sont pas complètement déchargées (effet mémoire) [16, 20].

II.4.2 Stockage électromagnétique

II.4.2.1 Super capacités (stockage électrostatique)

Les performances et les utilisations des super condensateurs sont en constante progression depuis plus de 20 ans. Ils se présentent sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide Figure (II.4) [18].

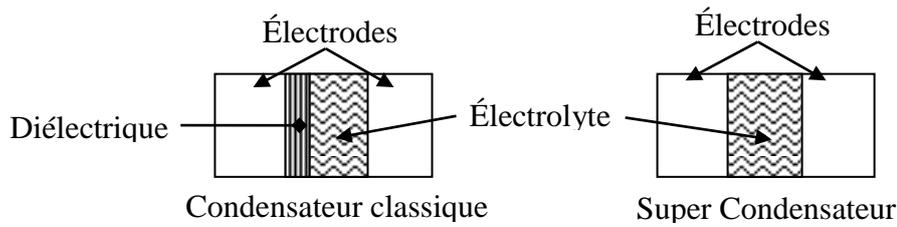


Figure II.4 : Différence entre un super condensateur et un condensateur classique

L'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire d'un solvant contenu dans l'électrolyte. Les électrodes sont faites du charbon actif, ce qui permet d'augmenter considérablement leur surface active et d'obtenir des valeurs de capacité très élevées dans un encombrement réduit [16, 18].

II.4.2.1.1 Principe de fonctionnement

Découvert par Helmholtz en 1879, le principe de fonctionnement des super condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface entre l'électrolyte et chaque électrode figure (II.5) [17].

Sous l'influence d'un champ électrique créé par la différence de potentiel appliquée aux bornes du condensateur lors de la charge, les ions de l'électrolyte se déplacent en direction de l'électrode de signe opposé. Lorsque le condensateur est chargé, une fraction des anions et des cations de l'électrolyte est ainsi localisée dans le voisinage immédiat des électrodes, de façon à équilibrer la charge en excès dans le charbon actif. Les deux couches de charge en excès de polarité opposée à l'interface électrode-électrolyte forment la double couche électrochimique [16-18].

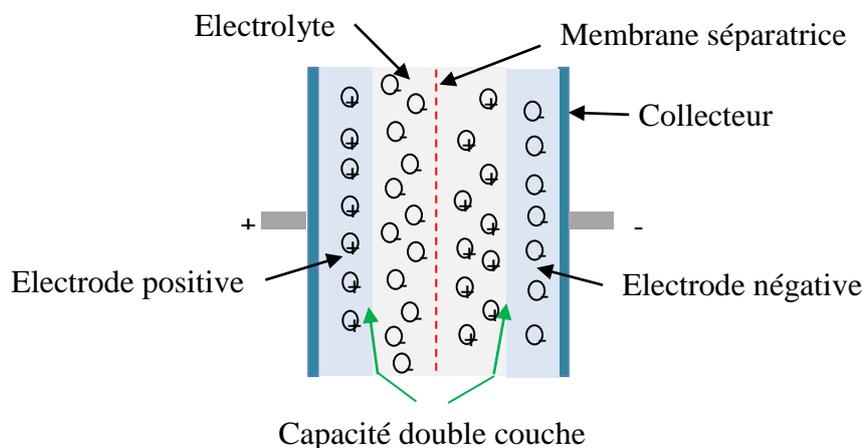


Figure II.5 : Structure simplifiée d'un super condensateur

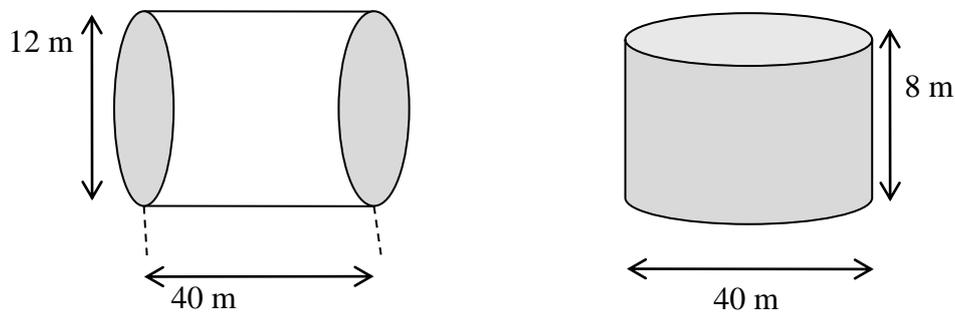
II.4.2.2 Stockage magnétique dans les supra inductances

Cette technique utilise le champ magnétique comme moyen de stockage. L'énergie stockée par unité de volume dans l'air est donnée par :

$$\frac{dW}{dV} = \mu_0 \frac{B^2}{2} \quad (\text{II.1})$$

Avec μ_0 Perméabilité magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m et B Induction magnétique en Tesla (T).

La bobine peut avoir une géométrie solénoïde, mais avec des champs de fuites élevés ou une forme torique permettant de réduire considérablement les champs parasites figure (II.6).



SMES 100 MWh, B=10T

Figure II.6: Géométrie torique et solénoïde d'un SMES.

L'utilisation des matériaux supraconducteurs permet d'obtenir des densités d'énergie de l'ordre de 10 kWh/m^3 dans de grands volumes. L'absence de résistance des conducteurs dans l'état supraconducteur autorise le stockage de l'énergie dans un bobinage court-circuité sur lui-même pendant un temps théoriquement infini. Cependant, l'utilisation des supraconducteurs comme NbTi nécessite une température de fonctionnement de l'ordre de 4 K, cela conduit à des coûts de refroidissement et d'isolation élevés [16].

II.5 Récapitulatif des systèmes de stockage

II.5.1 Avantages et inconvénients

On peut résumer les avantages et inconvénients de chacun des systèmes de stockages étudiés dans le tableau (II.3) [16].

Tableau II.3 : Comparaison des technologies de stockage

Technologies	Avantages	Inconvénients
Batteries Pb-Acide	faible coût	durée de vie faible
Batteries Li-ion	grande densité d'énergie et de puissance bon rendement	coût élevé circuit de charge spécial
Batteries Ni-Cd	grande densité d'énergie et de puissance bon rendement	Toxicité
Super capacité	durée de vie élevée bon rendement	faible densité d'énergie
SMES	puissance élevée	faible densité d'énergie coût élevée

II.5.2 Autres caractéristiques

Les tableaux (II.4) et (II.5) donnent quelques caractéristiques des moyens de stockage à grande échelle et à petite échelle respectivement [21].

Tableau II.4 : Caractéristiques des moyens de stockage à grande échelle

Technologie	Hydraulique gravitaire	Batteries électrochimiques
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m	Pb : 33 kWh/t Li-ion 100 kWh/t
Capacité réalisable	de 1 à 100 GWh	0.1 à 40 MWh
Puissance réalisable	0.1 à 1 GW	0.1 à 10 MW
Rendement électrique	0.6 à 0.8	0.7 ou moins en décharge rapide
maturité	très bonne	plusieurs expériences avec des technologies matures
Remarques	sites avec dénivelée et retenue d'eau	métaux lourds

Tableau II.5 : Caractéristiques des moyens de stockage à petite échelle

Technologie	Supra conducteur	Super capacité	Electrochimique	Volant d'inertie
Forme d'énergie	Magnétique	Electrostatique	chimique	mécanique
Densité d'énergie	de 1 à 5 Wh/kg	de 10 à 60 Wh/kg	de 20 à 120 Wh/kg	de 1 à 5 Wh/kg
Capacité réalisable ou réalisé	kWh	qq ¹ kWh	de qq kWh à qq MWh	de qq kWh à qq 10 kWh
Constante de temps	de qq s à 1 min	de qq s à qq min	de 10 min (NiCd) à 10h (Pb)	de qq min à 1h
Cyclabilité	de 10000 à 100000 fatigue mécanique	de 10000 à 100.000	de 100 à 1000 dégradations chimiques	de 10000 à 100000 fatigues mécaniques
Rendement électrique	>0.9	de 0.8 à >0.9 selon régime	de 0.7 à 0.8 selon technologie et régime	de 0.8 à >0.9 selon régime
Connaissance de l'état de charge	aisée (courant)	aisée (tension)	difficile (paramètres variables)	aisée (vitesse)
Remarques	cryogénie	grande cyclabilité	technologie mature	coût global compétitif sur la durée de vie

II.6 Conclusion

Le développement des énergies renouvelables, en particulier leur intégration au réseau électrique de distribution, conduit à des besoins nouveaux en matière de stockage d'énergie. L'exploitation des technologies présentées varie selon les applications, néanmoins, elles doivent assurer : un bon rendement énergétique, un bas coût, une fiabilité élevée et une sécurité d'exploitation.

Le chapitre suivant sera consacré sur la modélisation et la simulation du module photovoltaïque avec la commande MPPT.

Chapitre III :
Modélisation d'un module
photovoltaïque

III.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système photovoltaïque, et les différentes techniques de stockage ainsi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation d'un module PV.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord le modèle d'un module photovoltaïque. L'objectif de cette étude consiste à obtenir par simulation, les caractéristiques dynamiques de la cellule photovoltaïque, sous l'environnement Simulink/Matlab.

III.1. Modélisation d'un module photovoltaïque

III.1.1 Module photovoltaïque idéal

Le module photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{cc} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure (III.1).

D'après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{III. 1})$$

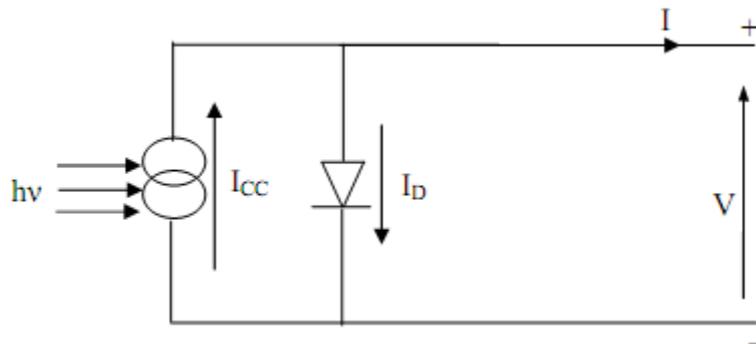


Figure III.1 : Modèle de module photovoltaïque idéal.

Pour un générateur PV idéal :

$$V = V_d \quad (\text{III. 2})$$

La diode étant un élément non linéaire, le courant qui la traverse est :

$$I_d = I_s \left(\exp \left(\frac{q V}{n K T} \right) - 1 \right) \quad (\text{III. 3})$$

Donc la relation (III.1) sera

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (III.4)$$

Avec:

- I_s : Courant de saturation inverse de la diode.
- I : Courant de sortie.
- I_{ph} : Courant circulant dans la diode.
- V : Tension de sortie.
- q : Charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}C$).
- n : Facteur de non idéalité de la photopile ($1 < n < 2$).
- K : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}J/K$).
- T : Température de la jonction en K.

En circuit ouvert, la charge tend vers l'infini et V tend vers V_{co} , qui est la tension en circuit ouvert.

III.1.2 Module photovoltaïque réel

Dans le cas d'un module photovoltaïque réel, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs.

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la figure (III.2) par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistance R_s et R_p .

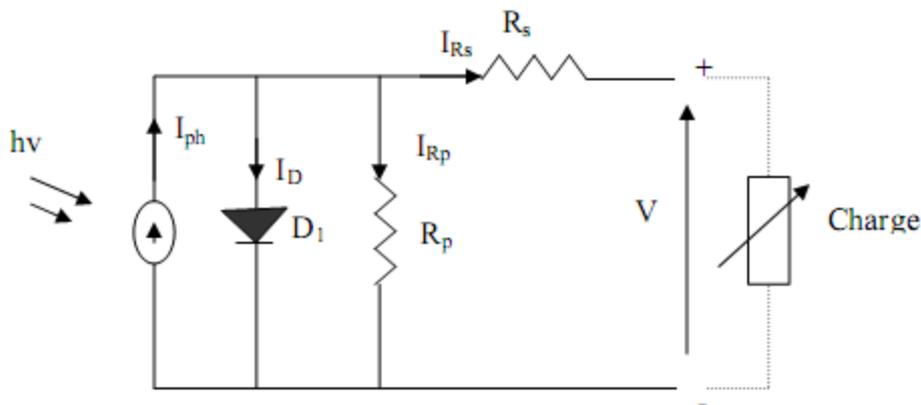


Figure III.2 : Modèle de module photovoltaïque réel.

L'équation donnant la caractéristique $I(V)$ de module photovoltaïque basée sur le circuit équivalent à une diode; en prenant en compte la résistance R_s et R_p , devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V+IR_s}{nKT}\right) - 1 \right) - \frac{V-IR_s}{R_p} \quad (III.5)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} représente le courant maximum généré par le module. Il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit $V=0$. Comme $R_s \ll R_p$, on peut admettre que $I_{ph} \approx I_{cc}$ pour ($G=1000\text{W/m}^2$). L'équation (III.5) devient :

$$I = I_{cc} - I_s \left(\exp\left(\frac{V+IR_s}{nKT}\right) - 1 \right) - \frac{V-IR_s}{R_p} \quad (\text{III.6})$$

La résistance série est la résistance interne de la cellule; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

Une photopile comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I - V) de la photopile.

III.2 Module photovoltaïque KC200GT

Nous avons choisi comme module le KC200GT composé de 54 cellules en silicium poly cristallin ayant une puissance maximal de 200.143W dans les conditions standards $G=1000\text{w/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

Les principaux paramètres du panneau choisi sont donnés dans le tableau (III.1) [25].

Tableau III.1: Paramètres d'un panneau solaire KC200GT

Paramètres	Valeurs
Puissance maximal du panneau P_{mpp}	200.143 W
Courant au point de puissance maximal I_{mpp}	7.61 A
Tension au point de puissance maximal V_{mpp}	26.3V
Courant de court-circuit I_{cc}	8.21A
Tension de circuit ouvert V_{co}	32.9V
Coefficient d'incrémentatation du courant I_{cc} (α_{cc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension V_{co} (β_{co})	-152 mV/°C

III.3 Résultats de simulation aux condition standart

Le schémas de simulation réaliser sous Matlab est illustré par la figure (III.3)

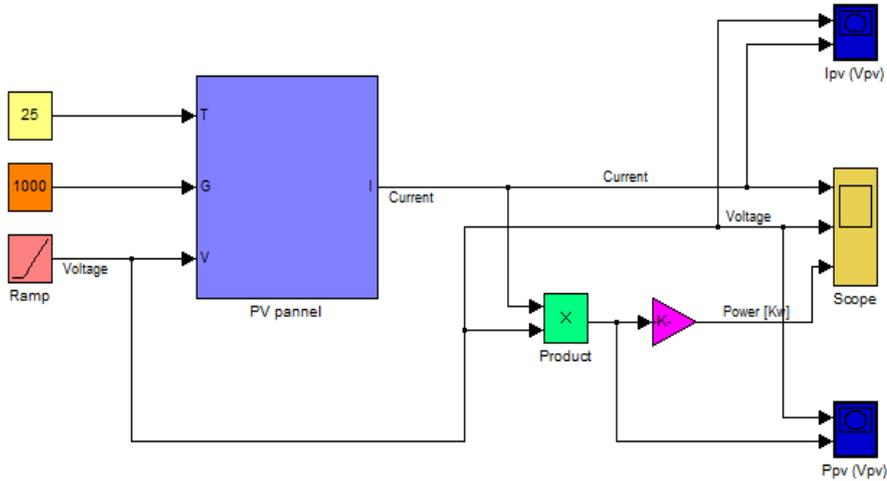


Figure III.3: Module PV sous Simulink

III.3.1 Caractéristiques I(V) et P(V) du module aux conditions STC $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$

Les figures (III.4) et (III.5) donnent, sous l'environnement Matlab / Simulink, les caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du module photovoltaïque aux conditions standards $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$.

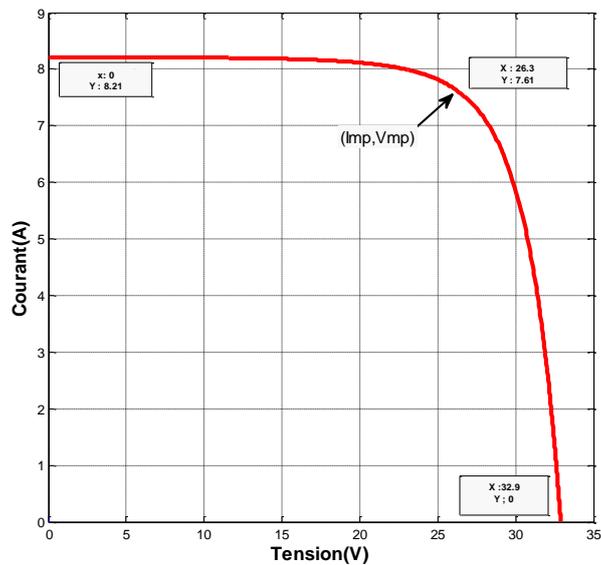


Figure III.4 Caractéristiques $I=f(V)$ du module photovoltaïque

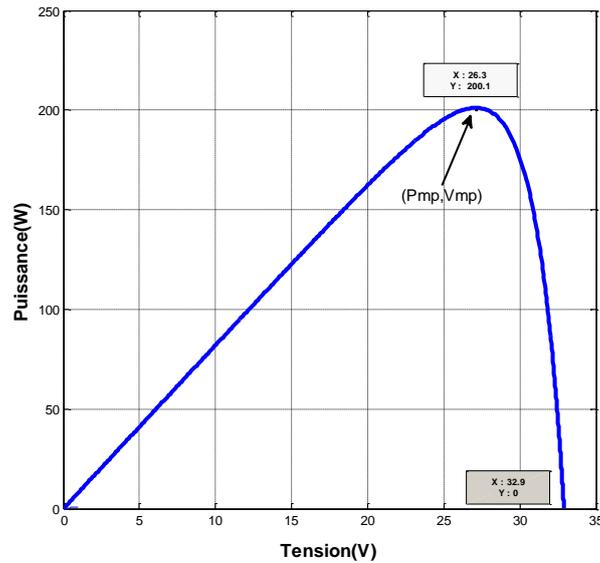


Figure III.5 : Caractéristiques $P=f(V)$ du module photovoltaïque

On remarque que dans un premier temps, la tension augmente, le courant quant à lui reste stable. Dans un second temps, le courant baisse légèrement et la tension augmente peu : nous sommes dans la zone du point de puissance maximale P_{mp} . Dans un troisième temps, le courant baisse fortement et la tension augmente très peu.

III.4 Influence de la température et de l'irradiation

III.4.1 Influence de l'irradiation solaire

Les figures (III.6) et (III.7), illustrent des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$, pour différents éclairagements et sous une température ambiante constante de 25°C .

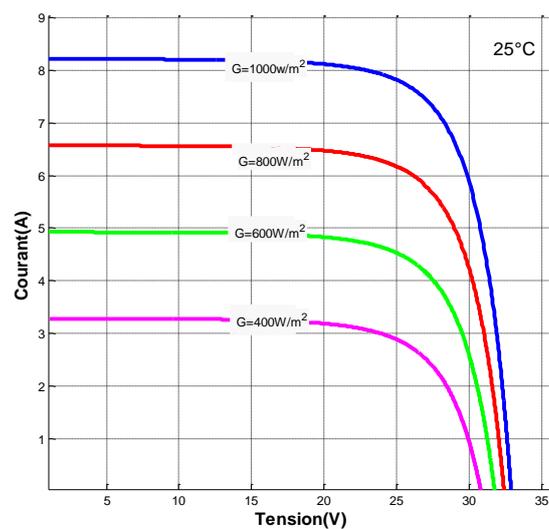


Figure III.6: Caractéristiques $I-V$ d'un module KC200GT pour différents éclairagements et une température ambiante de 25°C

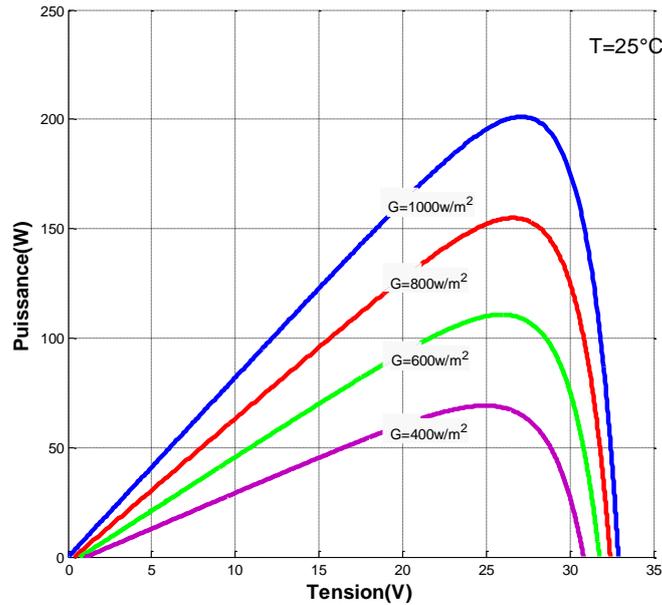


Figure III.7 : Caractéristiques P-V d'un module KC200GT pour différents éclairagements et une température ambiante de 25°C

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairage.

III.5 Influence de la température

Les figures (III.8) et (III.9), illustre des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$, pour différents températures et sous ensoleillement constant $E = 1000 \text{ W/m}^2$.

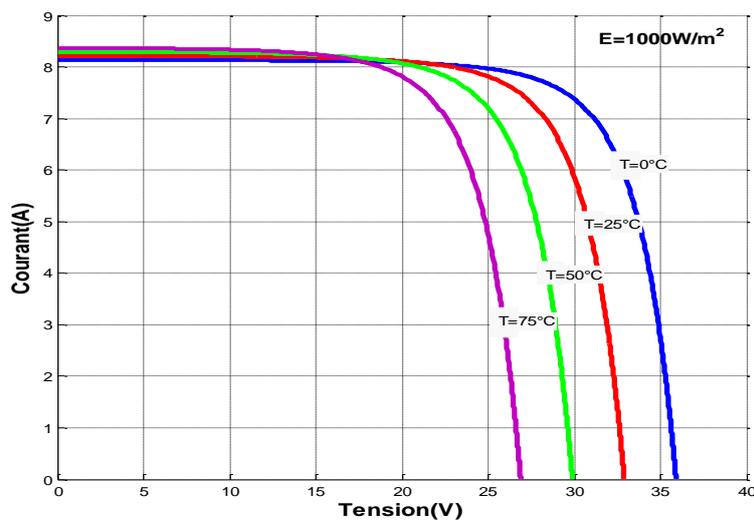


Figure III.8: Caractéristiques I-V d'un module KC200GT pour différentes températures ambiantes et un éclairage constant de 1000 W/m²

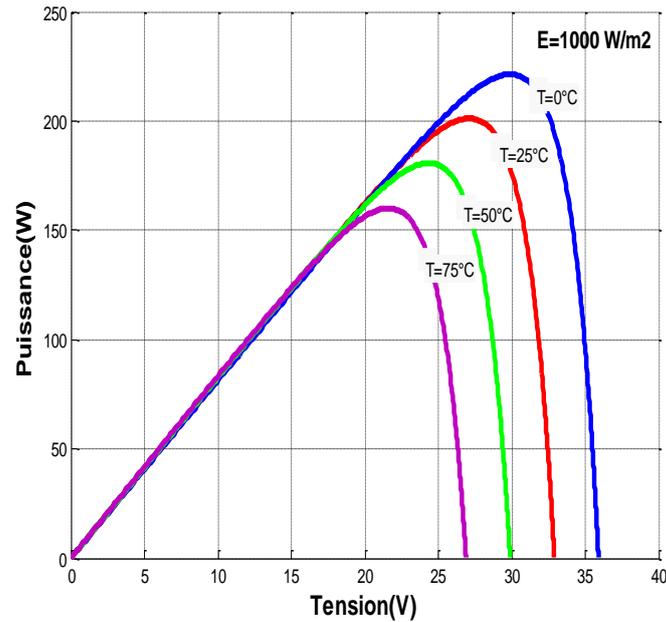


Figure III.9 : Caractéristiques P-V d'un module KC200GT pour différentes températures ambiantes et un éclairement constant de 1000 W/m^2

Pour la figure (III.8) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert.

Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (III.9).

III.6 Nécessité de maximiser la puissance

En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance extractible est variable et elle fonction de la tension (ou du courant) imposée aux bornes du panneau photovoltaïque.

Il est donc nécessaire que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le plus de puissance possible : c'est ainsi d'où vient en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracker).

Afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes.

Dans ce travail, la technique de perturbation et observation, 'P&O' a été implantée en raison de sa facilité d'exécution sous sa forme de base.

III.7 Méthode P&O (perturbation-observation)

Le principe des commandes MPPT de type (P&O) consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (III.10), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{pv} et V_{pv} , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

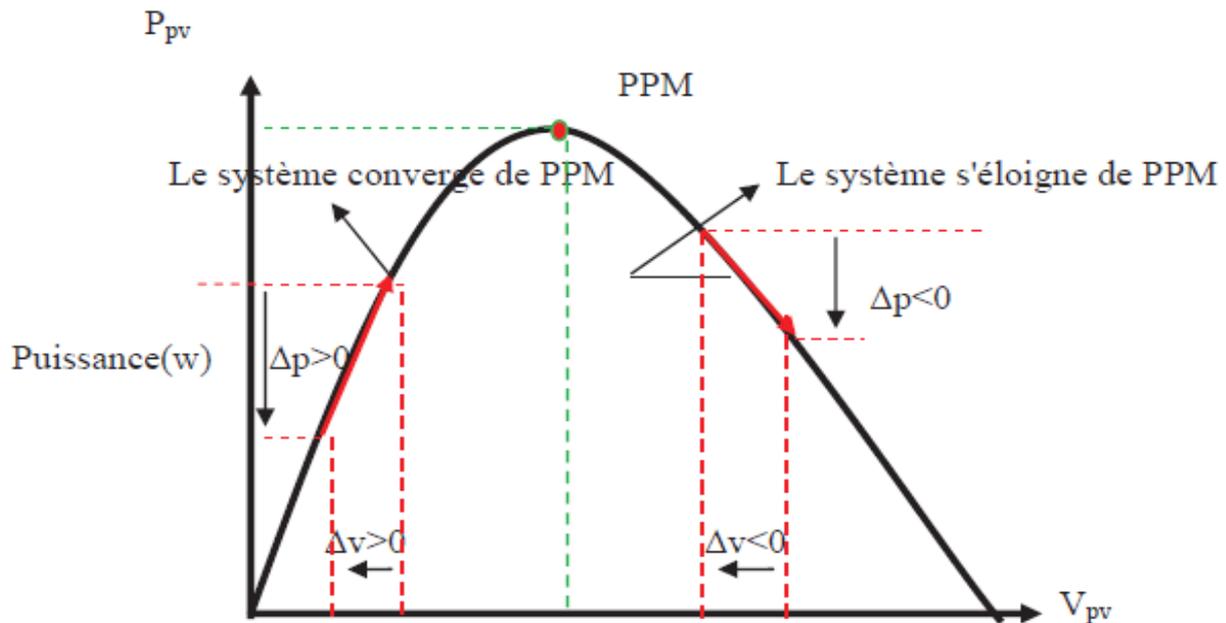


Figure III.10: Schéma de convergence vers le PPM par P&O

La figure (III.11) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du panneau à chaque instant.

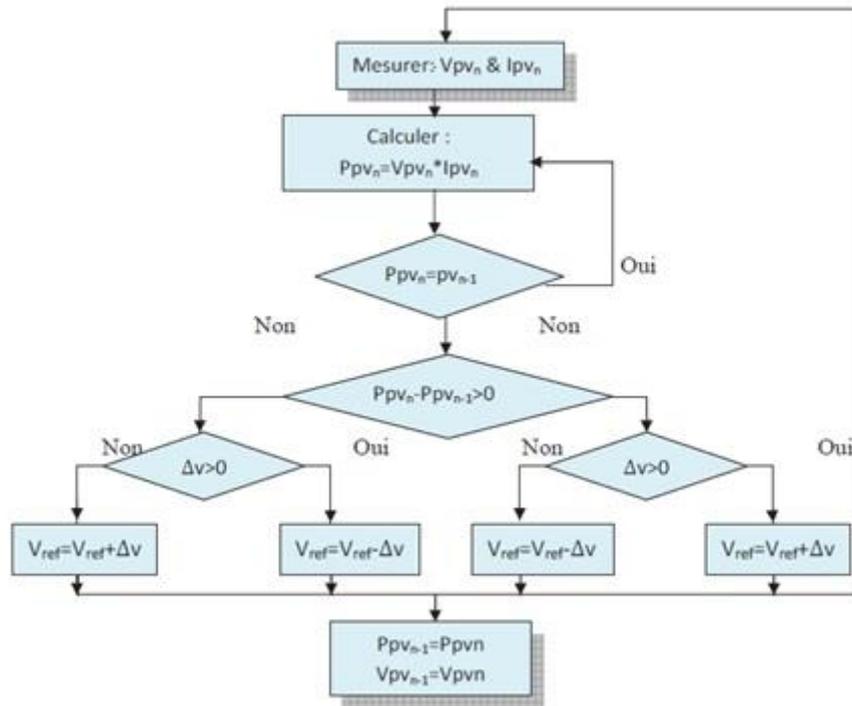


Figure III.11 : Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation (P&O)

III.8 Simulation de la méthode MPPT

La figure (III.12) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :

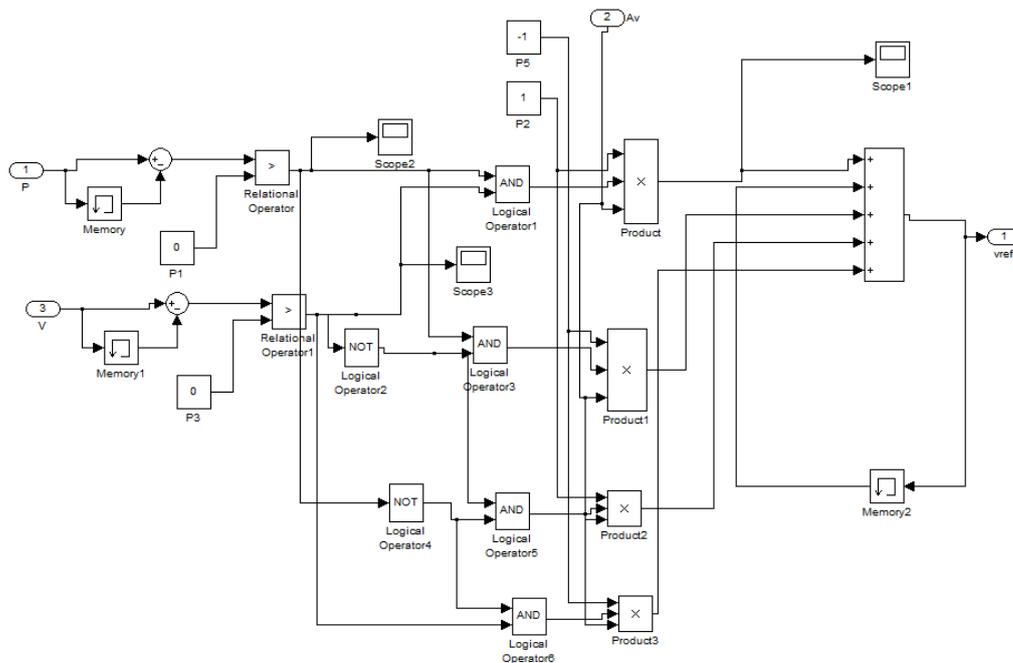


Figure III.12 : Schéma block de la commande MPPT

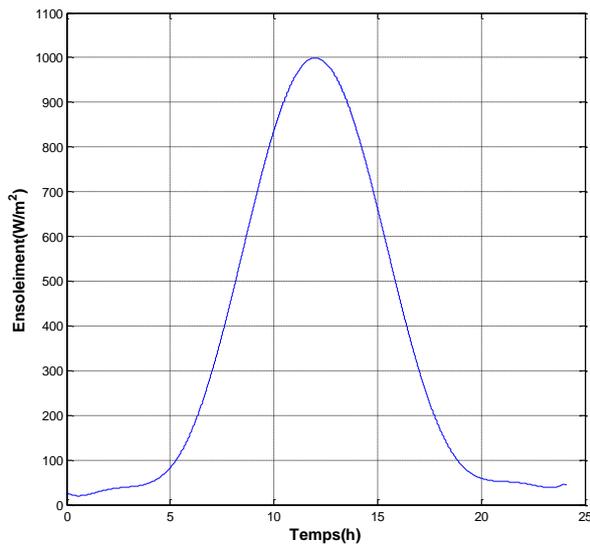


Figure III.13 Allure d'Ensoleillement

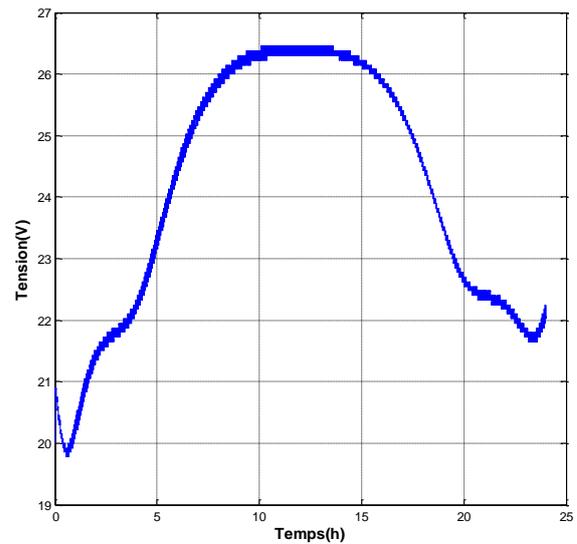


Figure III.14: Allure de la tension

Les figures (III.13) et (III.14) illustrent respectivement le profil typique d'ensoleillement et tension du module PV. On remarque que le profil ensoleillement une fonction continue d'où elle atteinte la valeur maximal $G=1000\text{W/m}^2$ et la tension de module PV atteinte sa valeur maximal $V=26.3\text{V}$ et elle reste présente pour de faible ensoleillements.

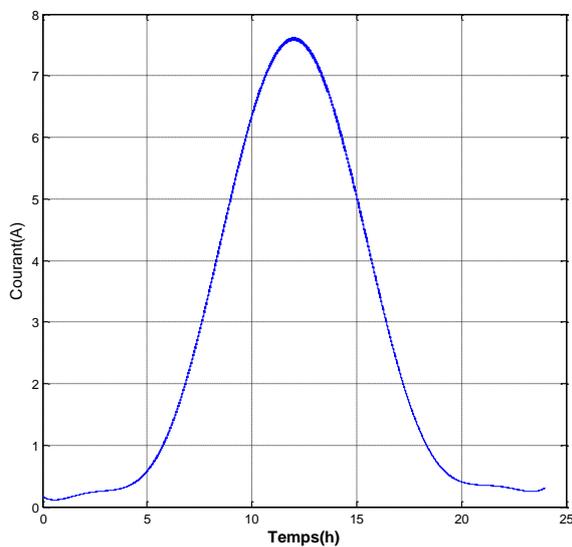


Figure III.15: Allure du courant

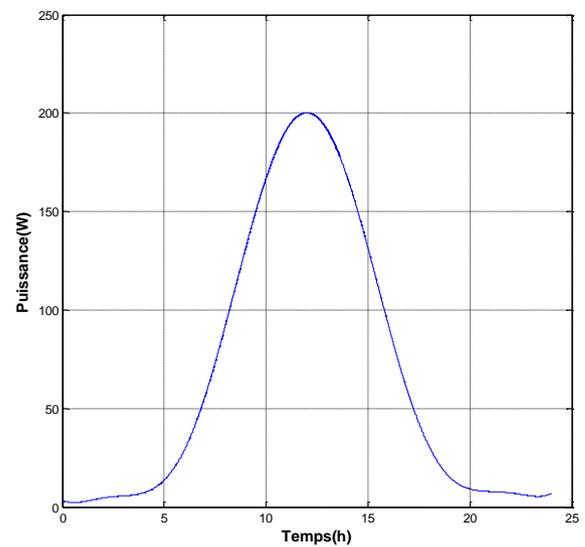


Figure III.16: Allure de la puissance

Les figures (III.15) et (III.16) illustrent respectivement la variation temporelle de courant puissance. On remarque que les deux figures sont l'image de profil d'ensoleillement, le courant et la puissance atteint leur valeur maximale a un ensoleillement maximal qui est égale à 1000W/m^2 .

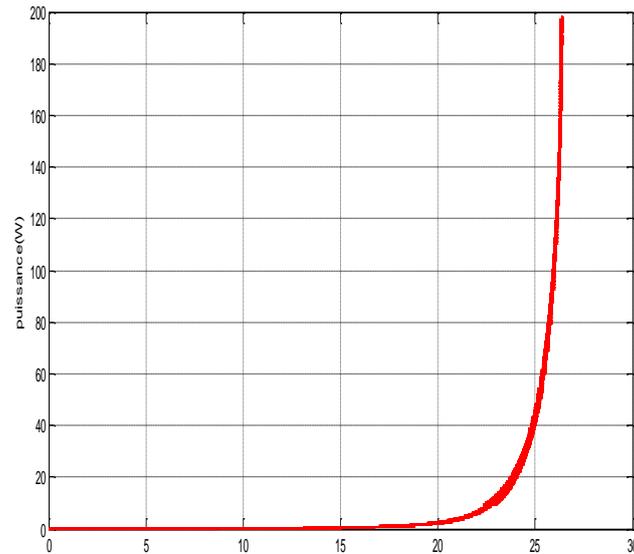


Figure III.17 : Allure de la puissance obtenue par la méthode P&O

La figure (III.17) illustre la puissance obtenue par la méthode PO. Le module PV fonction à son point de puissance maximal.

III.9 Conclusion

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à une diode pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques technique données par le constructeur.

Dans le chapitre suivant on présentera une étude sur le convertisseur DC-DC (hacheur Boost). Après on passe à la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT ainsi une batterie plomb-acide.

Chapitre IV :
Système photovoltaïque en
fonctionnement autonome

IV.1 Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé en plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible, il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT), et c'est dans ce chapitre que nous évaluerons les performances du système global avec stockage. figure(IV.1).

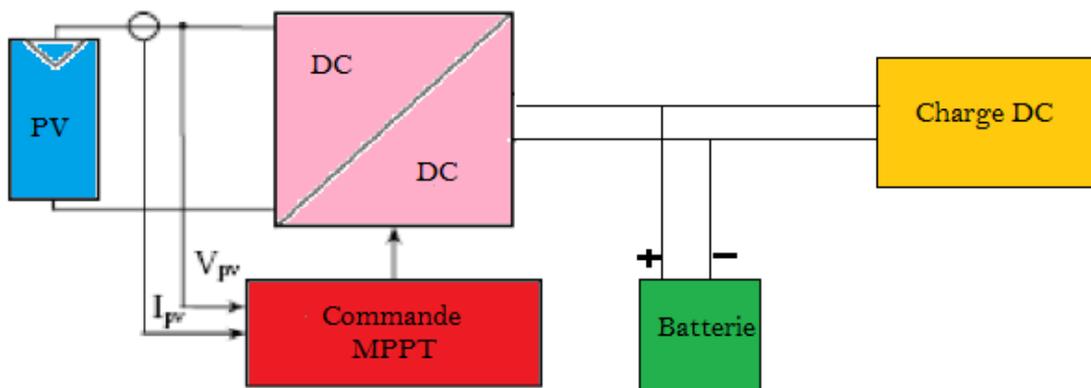


Figure IV.1 : Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT

IV.2 Modélisation du système photovoltaïque

Afin d'obtenir 3000W à la sortie du générateur photovoltaïque, nous disposerons d'un modèle composé de 15 modules (5 en parallèle et 3 en série).

Les figures (IV.2) et (IV.3) donnent, sous l'environnement Matlab / Simulink, les caractéristiques $I=f(V)$, $P=f(V)$ du générateur photovoltaïque sous ensoleillement variable et une température constante (25°C) et avec une température variable et un ensoleillement fixe.

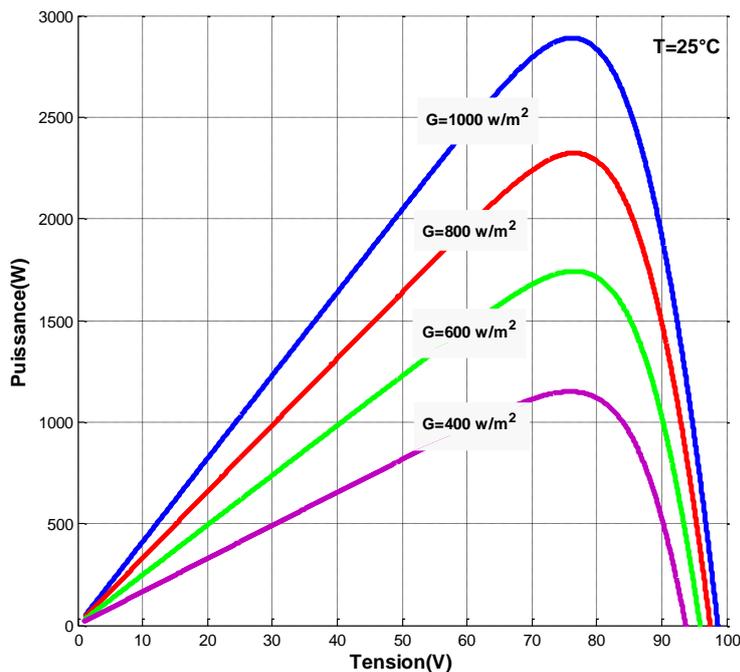


Figure IV.2 : Caractéristiques P-V du système photovoltaïque pour différents éclaircements et une température ambiante de 25°C

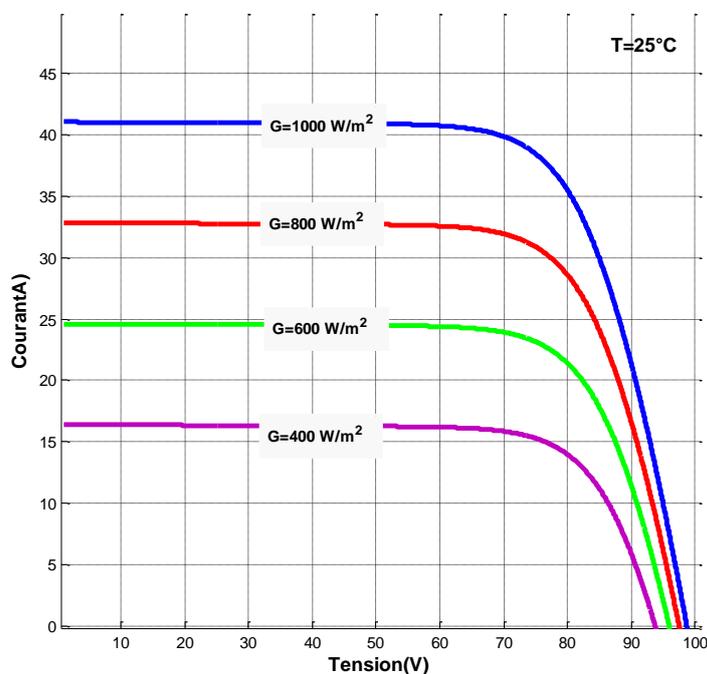


Figure IV.3 : Caractéristiques I-V du système photovoltaïque pour différents éclaircements et une température ambiante de 25°C

Les figures (IV.2) et (IV.3) montrent que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque l'irradiation baisse.

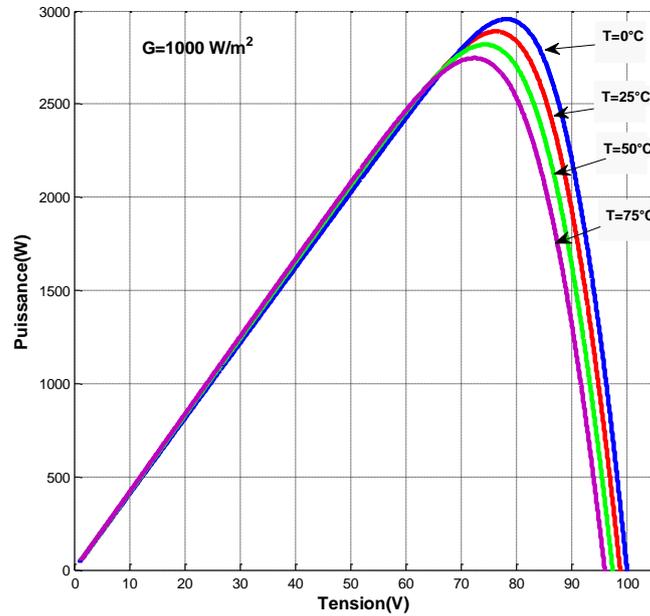


Figure IV.4 : Caractéristiques P - V du système photovoltaïque pour différents températures ambiantes et un éclairement constant de 1000 W/m^2

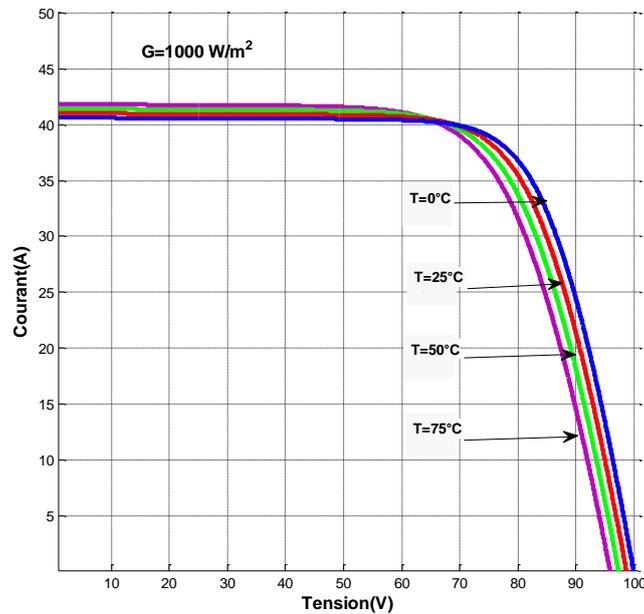


Figure IV.5 : Caractéristiques I - V du système photovoltaïque pour différents températures ambiantes et un éclairement constant de 1000 W/m^2

Les figures (IV.4) et (IV.5) montrent que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

IV.3 Modélisation du hacheur élévateur (Boost converter)

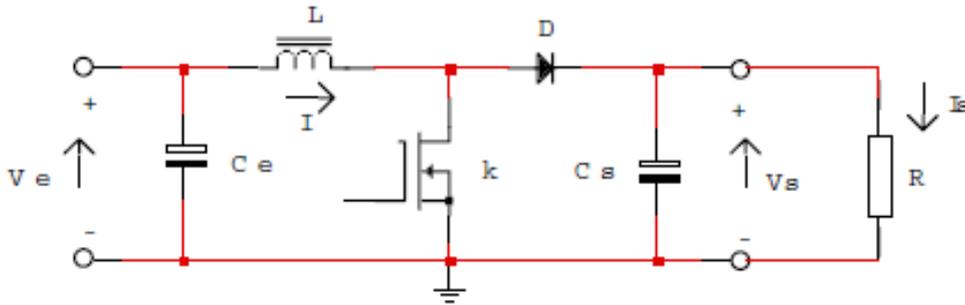


Figure IV.6 : Circuit électrique du convertisseur Boost

IV.3.1 principe de fonctionnement du hacheur élévateur

Le circuit est alimentée par une source de tension V_e , la sortie est chargée par une résistance R et débite un courant I_s .

L'interrupteur K , symbolisé ici comme un MOS FET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique α à la fréquence $F = 1/T$.

On distingue deux modes de fonctionnement de ce circuit selon que le courant circulant dans l'inductance L est ou non continu (ne s'annule pas au cours de la période).

Le mode conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur, nous n'étudierons que ce mode.

IV.3.1.1 La conduction continue du hacheur élévateur

Phase 1 : ($0 < t < \alpha T$) :

L'interrupteur K est fermé, la diode D est bloquée. Le schéma équivalent du circuit est le suivant :

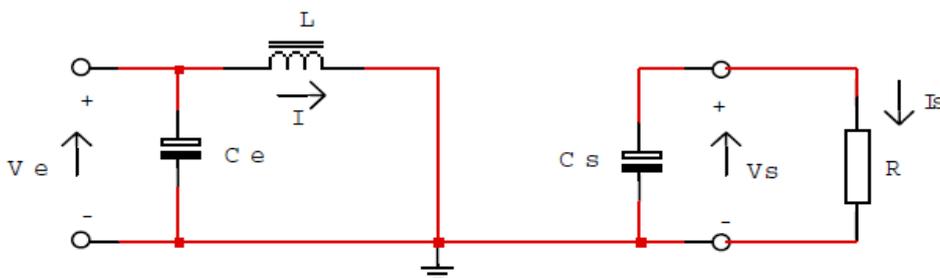


Figure IV.7 : Circuit équivalent du convertisseur (k est fermé)

on a:

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (IV-1)$$

d'où

$$i(t) = I_m + \frac{V_e}{L} t \quad (IV-2)$$

A l'instant $t = \alpha T$ le courant dans l'inductance atteint la valeur crête :

$$I_M = I_m + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (IV-3)$$

Phase 2 : ($\alpha T < t < T$) :

A $t = \alpha T$ on ouvre l'interrupteur K. La diode D devient conductrice et le schéma équivalent du circuit devient :

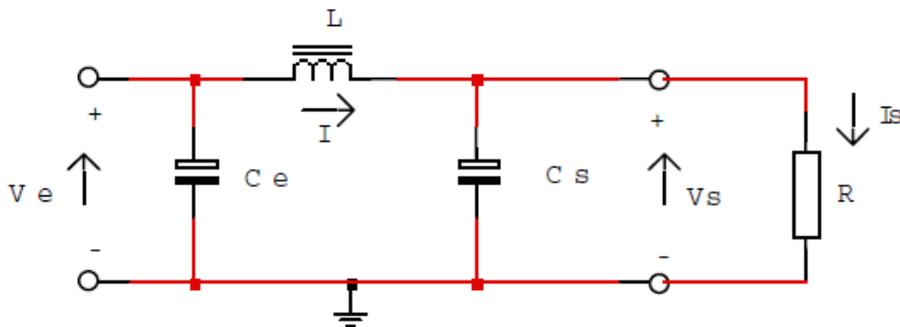


Figure IV.8 : Circuit équivalent du convertisseur (k est ouvert)

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (IV-4)$$

Ou :

$$V_s - V_e = -L \frac{di}{dt} \quad (IV-5)$$

$$i(t) = I_M - \frac{V_s - V_e}{L} (t - \alpha T) \quad (IV-6)$$

Soit (ΔI) l'ondulation du courant dans l'inductance : $\Delta I = I_M - I_m$:

De l'équation (IV.3) on tire:

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (IV-7)$$

Et de l'équation (IV.7):

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha) \quad (IV-8)$$

En combinant ces deux relations, on peut établir l'expression de la tension de sortie:

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \quad (IV-9)$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension.

On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge. Dans la pratique, la boucle de régulation ne devra donc compenser que les variations de la tension d'entrée et les imperfections des composants réels.

La stratégie de régulation qui semble la plus évidente est la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à fréquence fixe et rapport cyclique α variable.

IV.3.1.2 Courant moyen d'entrée

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1. On peut donc écrire:

$$V_s I_s = V_e I_e \quad (\text{IV-10})$$

En combinant avec l'équation, (IV-10) on établit l'expression du courant d'entrée:

$$I_e = \frac{I_s}{(1-\alpha)} \quad (\text{IV-11})$$

IV.3.1.3 Limite de fonctionnement en conduction continue

Lorsque le courant de sortie I_s diminue, par exemple par augmentation de la résistance R , le circuit peut passer en conduction discontinue (le courant s'annule au cours de la période).

On montre que l'expression de la tension de sortie s'écrit alors:

$$V_s = V_e \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{RT}{2L} \alpha^2} \right) \quad (\text{IV-12})$$

On remarque la tension de sortie n'est plus indépendante de la charge et de la fréquence. Il est donc important de connaître la limite de fonctionnement en conduction continue. La valeur moyenne du courant traversant la diode (donc transitant vers la charge durant la phase (2) est égale au courant de sortie I_s .

$$I_s = \frac{1}{T} \int_0^T I_D dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T \left[I_M - \frac{(V_s - V_e)}{L} (t - \alpha T) \right] dt \quad (\text{IV-13})$$

La limite de conduction continue étant atteinte pour $I_m = 0$, on tire de l'équation (IV.3):

$$I_M = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{IV-14})$$

En portant cette expression dans l'équation précédente, on détermine l'expression de la valeur minimale du courant de sortie permettant de rester en conduction continue.

$$I_{smin} = \frac{(1-\alpha) \Delta I}{2} \quad (\text{IV-15})$$

La valeur d'inductance est conçue pour être supérieure au minimum de l'inductance nécessaire pour le fonctionnement dans les modes de conduction continu qui est donnée par l'expression suivante :

$$L_{min} = \frac{(1-\alpha)^2 \alpha R}{2f} \tag{IV-16}$$

La valeur de la capacité minimale sera donnée par l'expression suivante :

$$C_{min} = \frac{\alpha}{Rf_s V_s} \tag{IV-17}$$

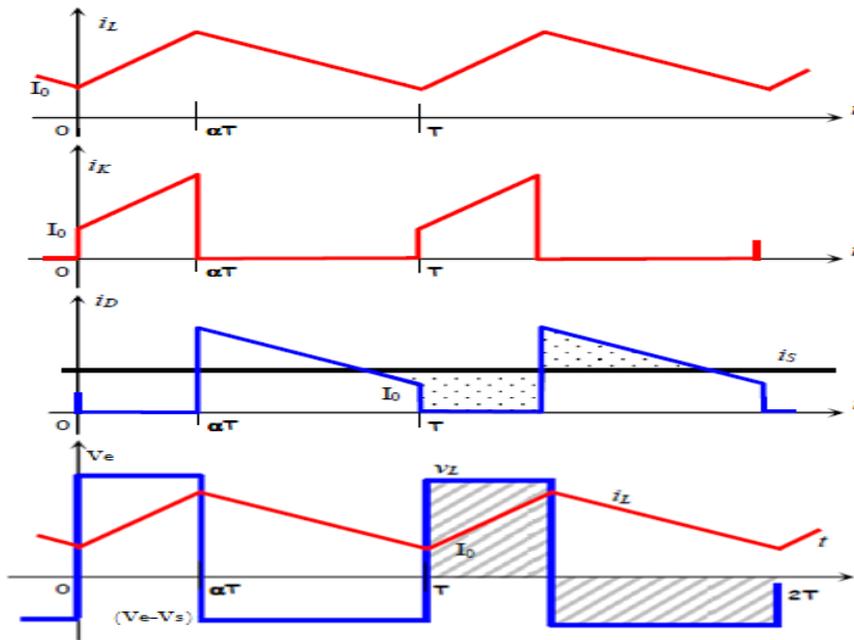


Figure IV.9 : Forme typique des ondes du convertisseur Boost

IV.4 Régulateur PI

On utilise un correcteur proportionnel intégral (PI) pour réguler le courant la figure (IV.10) représente la structure de la régulation du courant.

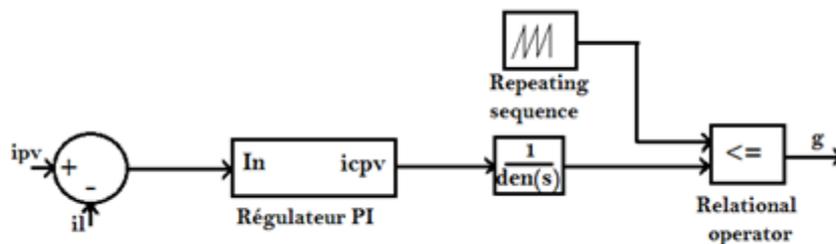


Figure IV.10 : Régulateur de courante

Le courant de référence est obtenu à partir de la puissance de référence générée par la stratégie MPPT.

L'interrupteur IGBT est commandé par un signal à MLI. La valeur du rapport cyclique α est donc comparée à une porteuse triangulaire de fréquence élevée.

IV.5 Les batteries

Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques, est la batterie d'accumulateurs électrochimiques [22,23]. Les deux types de batteries, utilisés le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques, sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb acide) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd). La batterie au plomb-acide est la plus connue, étant utilisée depuis plus de 150 ans pour fournir le courant de démarrage des voitures [24].

Dans notre cas, nous avons opté pour le modèle de la batterie plomb-acide fourni par la bibliothèque simpower système de matlab.

Ce choix correspond à la dominance de la technologie des batteries au plomb dans le domaine du stockage photovoltaïque. et la figure (IV.11) donne le modèle équivalent de batterie sous Matlab.

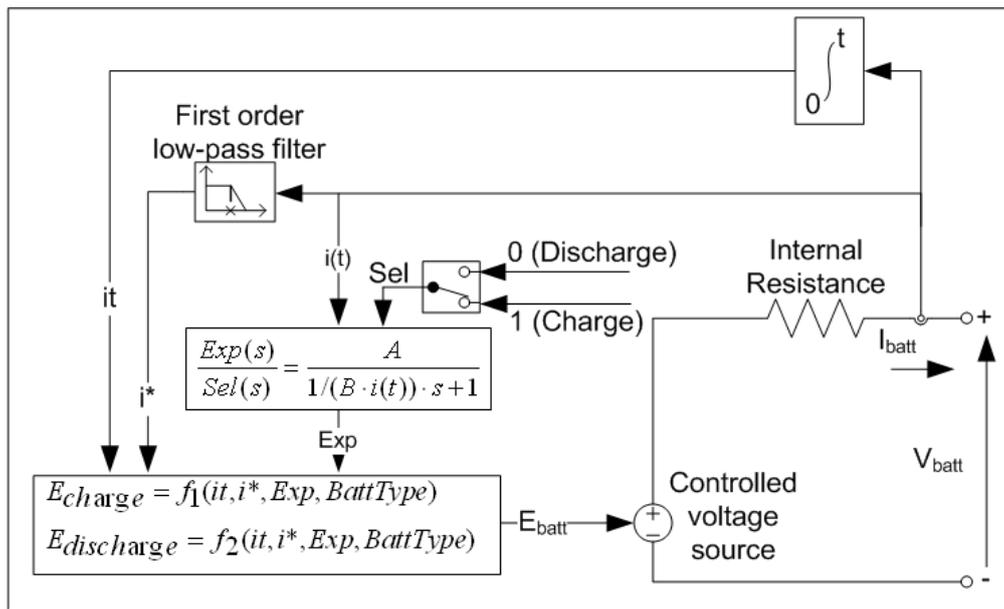


Figure IV.11 : Modèle équivalent de batterie sous Matlab Simpower système

IV.6 Charge DC

La puissance consommée par cette charge sous une tension continue de 400V est de l'ordre de 2kW on déduit que $R=80\Omega$

On remarque que le profil typique solaire indiqué dans la figure (IV.13) est utilisé comme entré dans le système PV ou il atteint la valeur maximal $G=1000\text{W/m}^2$ au environ de 12h.

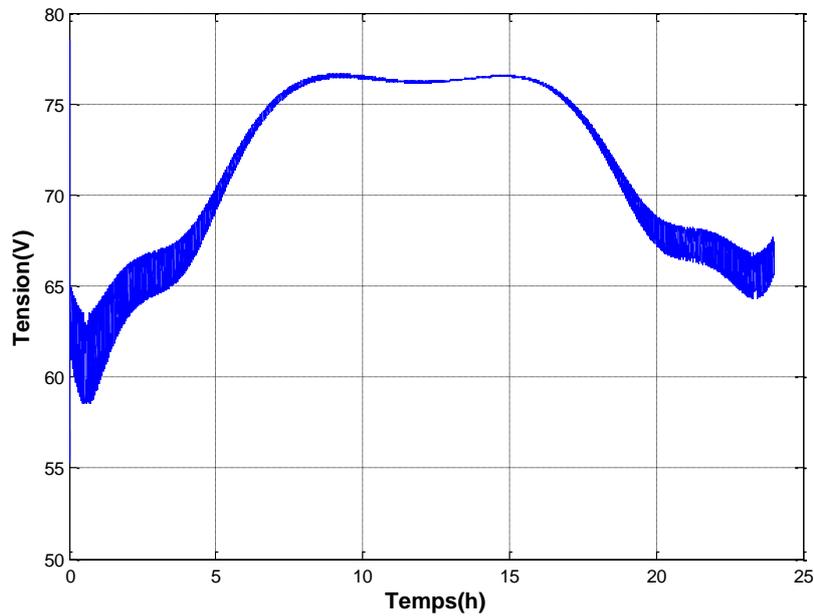


Figure IV.14 : Tension du générateur photovoltaïque

D'après la figure (IV.14), on remarque que la tension à la sortie du générateur PV atteint son maximum ($V=78.9\text{V}$) et elle diminue considérablement maximal et elle reste présente pour de faible ensoleillements. .

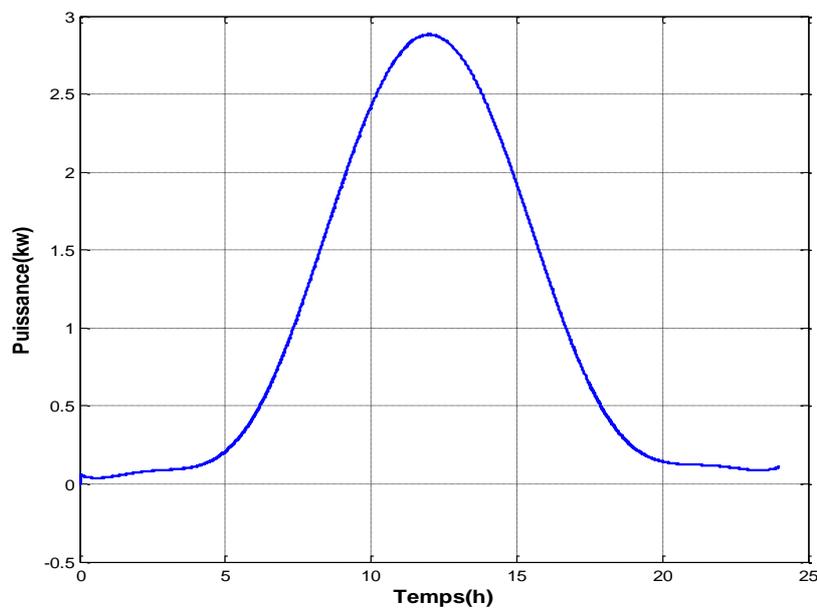


Figure IV.15 : Puissance du générateur photovoltaïque

La figure(IV.15) illustre la puissance du générateur photovoltaïque. on remarque que la puissance produite par le générateur photovoltaïque suit généralement l'évolution du profil d'irradiation lorsque la température est maintenue constante.

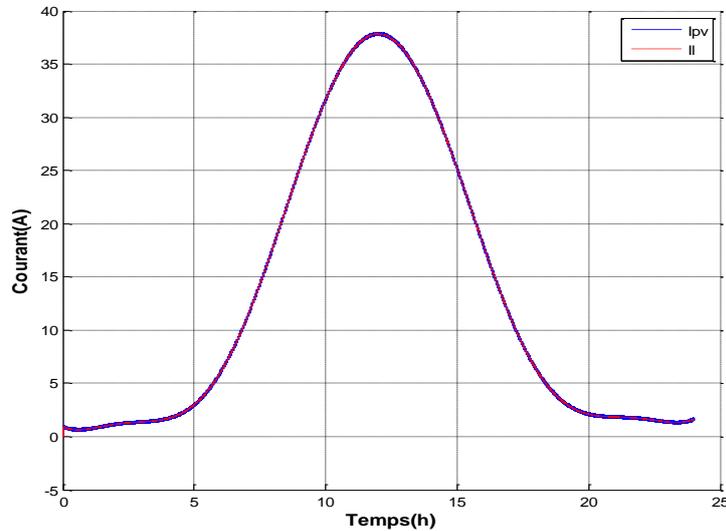


Figure IV.16 : Allure de courant

La figure (IV.16) illustre la variation en fonction du temps du courant I_{PV} I_l , on remarque que le courant I_{pv} suit sa référence I_l .

Les figures (IV.17), (IV.18), illustrent respectivement le rapport cyclique α l'état de charge et la tension de la batterie.

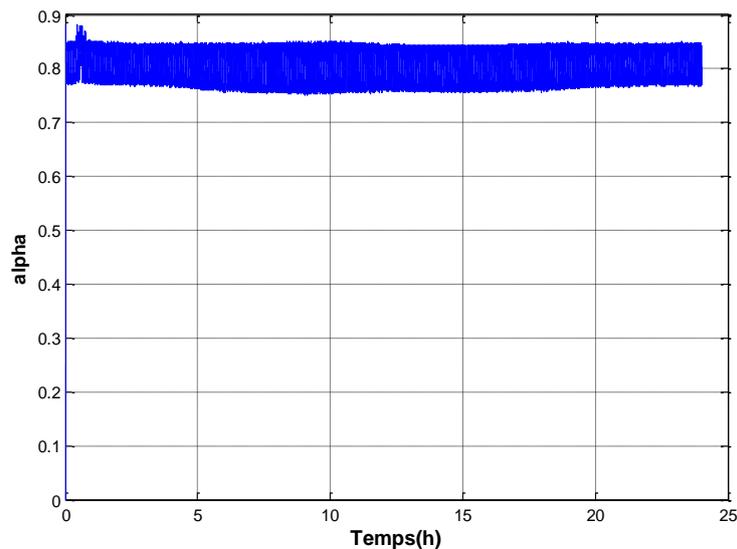


Figure IV.17 : Rapport cyclique α

On remarque que le rapport cyclique α est maintenu à $\alpha=0.8$.

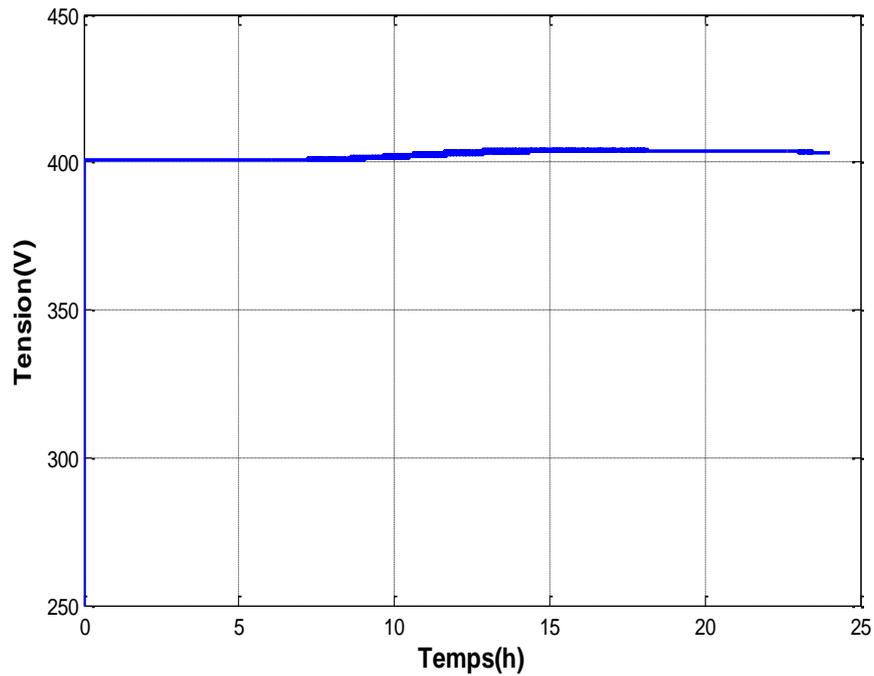


Figure IV.18 : Tension de la batterie

La figure (IV.18) montre que la tension de la batterie est maintenue constante a une valeur de $V_{batt}=400V$.et elle sera imposée à la sortie du hacheur.

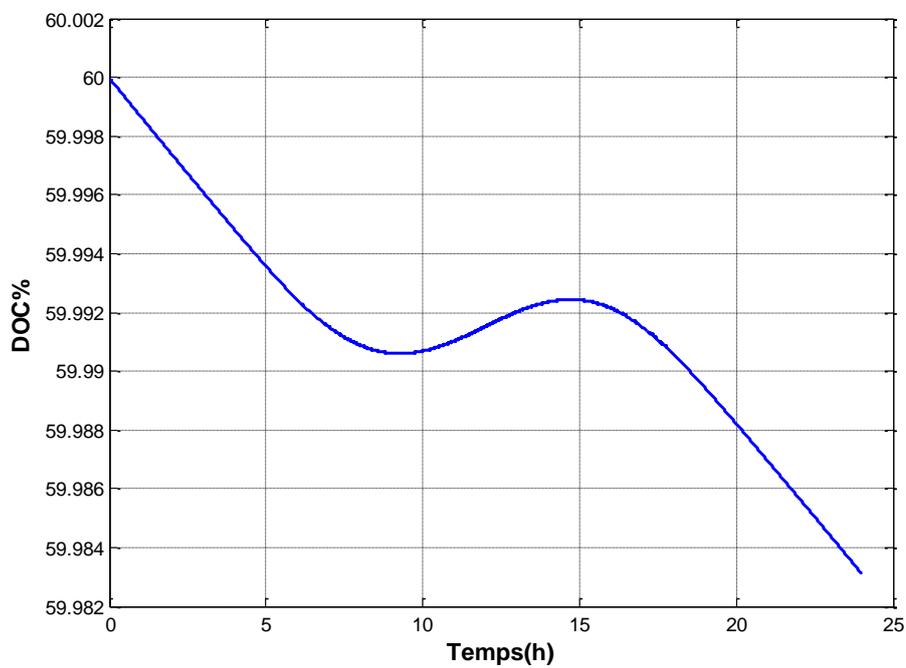


Figure IV.19 : Etat de charge de la batterie

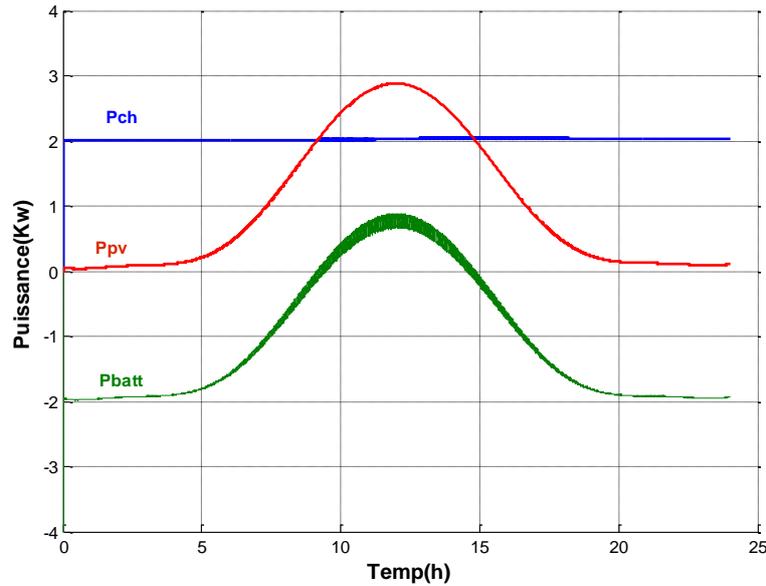


Figure IV.20 : Courbes des puissances

D'après la figure (IV.20), on remarque que dans l'intervalle [0 à 5] h et [18-24] h la puissance du générateur PV est insuffisante pour alimenter la charge, donc la puissance de la charge est entièrement livrée par la batterie. Cette situation est accompagnée d'une diminution de l'état de charge de la batterie comme représenté sur la figure (IV.19). Entre 6h et 18h la puissance PV produite est suffisante pour alimenter la charge et assurer la charge de la batterie.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons obtenu les résultats de simulation de système photovoltaïque autonome avec batterie de stockage. Ces résultats ont révélé un bon comportement face au profilé typique solaire, assurant le stockage d'énergie électrique au moyen de batteries et le maintien du transfert d'énergie à la charge en réponse à ces exigences.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'augmentation des besoins énergétiques mondiaux, et dans un souci du respect de l'environnement, pousse le monde de plus en plus à s'intéresser aux énergies renouvelables.

L'intérêt porté aux énergies renouvelables, nous a amené à nous intéresser au système photovoltaïque autonome. La puissance de ce système est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et de la température.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et simulation de chaque élément constituant le système photovoltaïque avec stockage.

Dans la première partie, nous avons exposé les fondements nécessaires à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé des notions sur le rayonnement solaire, les multiples types et leur application dans le champ photovoltaïque. Puis nous avons expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques, leurs particularités essentielles. Nous n'avons pas omis aussi de signaler les modules photovoltaïques et leurs associations.

En ce qui concerne la deuxième partie, le caractère intermittent de l'énergie solaire étant un de ses principaux inconvénients pour son utilisation permanente ainsi il s'avère indispensable d'emmagasiner une partie de l'énergie produite. De ce fait, nous avons tenté de mettre en exergue, de manière critique un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de cout qui conditionnent l'acceptabilité du stockage. Pour réaliser cela, on dénombre plusieurs méthodes de stockage : sous forme mécanique (système : inertiel, hydraulique et stockage par air comprimé), électromagnétique (super capacité et supra-inductance), et électrochimique (batteries).

Dans la troisième partie nous avons présenté les différentes simulations sur les caractéristiques électriques du modèle électrique équivalant de la cellule photovoltaïque, ainsi que l'influence de la température et de l'éclairement sur ces caractéristiques. Notre étude ensuite est faire une estimation mathématique sur la fonction de changement du point de puissance maximal en fonction de l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques électriques. Les résultats obtenus par simulation du modèle sont satisfaisantes, car les courbes obtenus décris bien les caractéristiques électriques d'un système photovoltaïque type KC200GT.

La dernière partie, destinée à la simulation sous Matlab/ Simulink du système photovoltaïque autonome fonctionnant en MPPT, assurant le stockage d'énergie électrique au moyen de batteries.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- La température et l'ensoleillement influe sur les caractéristique I(V) et (V) du générateur photovoltaïque. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions STC : température 25C, éclairement 1000W/m².
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.
- Le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jour prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïque.

Références bibliographiques

Référence bibliographiques

- [1] F.BRIHMAT « Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien » Mémoire de magister. Université de Tizi-Ouzou. 2012
- [2] O.GERGAUD «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production hybride PV/Eolien couplé aux réseaux et associé à un accumulateur» thèse de doctorat électrotechnique. École normal supérieure de Cachan. décembre 2002
- [3] D.BOUKERS «Optimisation d'un système énergétique photovoltaïque application au pompage » mémoire de magister. Université de Constantine. 2007
- [4] M.BELHADJ « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » mémoire de magister. Centre universitaire de Béchar. 2009
- [5] Livre d'ANNE LABOURET et MICHEL VILOZ « énergie solaire photovoltaïque » 2ème édition
- [6] Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens «le pompage photovoltaïque» IEPF/université d'Ottawa
- [7] R.HERINO A.PERIO K.BARLA.et AL« Microstructure of porous silicon and its evolution with temperature» materials letters. 1984
- [8] N.SATO et K.SAKAGUCHI et AL« Epitaxial growth on porous Si for a new porous and etch back SILICON-ON-INSULATOR » J.electrochem.1995
- [9] A.BOUZID «Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme (étude de l'onduleur triphasé à cette application) » mémoire d'ingénieur d'état. Université d'ORAN .2008
- [10]F.BENYAROU « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïque, modalisation, dimensionnement et simulation » thèse de doctorat. Université de Tlemcen.2004
- [11] M.E.M – BRAHIMI « Situation des énergies renouvelables en Algérie ». Conférence sur la maîtrise de l'énergie de l'environnement dans un contexte d'économie. Mai 2001
- [12] A.MEFTI H.MIMOUNI « Evaluation du potentiel énergétique solaire bulletin des énergies renouvelables » N°2 .décembre 2002
- [13] M.VANDAMME « Etudes comparative de panneaux solaires photovoltaïques » .thèses de doctorat. Mai 2006

- [14] L.CHANALIER E.LAURENT « L'électricité solaires » livre GRET. Ministère de la Coopération.
- [15] S.MARTINET «Nouvelles Voix dans les Accumulateurs Lithium et les Electrolytes de Batteries », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 130-133, Hiver 2004-2005.
- [16] S.CLAUDE « Nouvelles Technologies de l'Energie 2 : Stockage à Emission Réduite», Edition Hermès, 2007.
- [17] F.VIAROUGE« Les Super Condensateurs », Mag. CHOC, Octobre 2008.
- [18] R.SAISSET «Contribution à l'Etude Systémique de Dispositifs Énergétiques à Composants Electrochimiques », Thèse de Doctorat, INPT, France, Avril 2004.
- [19] S.MARTINET et all «Vers de Nouveaux Electrolytes de Batteries », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 135, hiver 2004-2005
- [20]E.JANKOWSKA .and all, «Electrochemical Performance of Sealed Ni-MH Batteries using Nano crystalline TiNi-Type Hydride Electrodes», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 211-215, 2008.
- [21] S.MARTINET «Nouvelles Voix dans les Accumulateurs Lithium et les Electrolytes de Batteries », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 130-133, Hiver 2004-2005.
- [22] M.S.IMAMURA and J.I. « Portscheller, Year Evaluation of the Methods of Determining Solar Cell Series Resistance, Proc. 8 HT Photovoltaic Specialists » Conf., Seattle, WA, pp 102-107, 1970.
- [23] C.F. Lu, C.C. Liu, and C.J. Wu, « Dynamic modeling of battery energy storage system and application to power system stability », In IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Volume 142(4), pages 429-435, IEE, Stevenage, Herts., U.K., July 1995.
- [24] Z.M. SALAMEH, M.A.CASACCA, A.W.LYNCH « A mathematical model for lead-acid batteries, IEEE Transactions on Energy Conversion » 7(1):93-98, March 1992.
- [25] The new value frontier KYOCERA.KC200GT high efficiency multicrystal photovoltaic module.

Annexes :

Annexes

$$T= 298 \text{ k}$$

$$E= 1000$$

$$R_s=0.221 \ \Omega$$

$$R_p= 415.405 \ \Omega$$

$$N_s= 54$$

$$K= 1.38e^{-23}$$

$$q= 1.6e^{-19}$$

$$I_{cc}= 8.21 \text{ A}$$

$$I_{pv}= 8.2144 \text{ A}$$

$$V_{co}= 32.9 \text{ V}$$

$$K_v= -0.123$$

$$K_i= 0.0032$$

$$L= 0.05 \text{ H}$$

$$C= 1e^{-4} \text{ F}$$

$$R_{ch}= 80 \ \Omega$$

$$K_p= 0.25$$

$$K_i= 50$$

$$V_{bt}= 400 \text{ V}$$

$$C_{batt}= 100 \text{ Ah}$$

$$\text{SOC}=60\%$$