

N° Ordre...../FHC/UMBB/2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

KRALED KEBIR Abdenour

GOUGAM Billel

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Electrique : Electricité Industrielle

Thème

**ETUDE DES CONSTITUANTS D'UN GENERATEUR
PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME**

Devant le jury :

HAMADACHE M	MCB	UMBB	Président
TADJER S.A	MAA	UMBB	Examineur
KHELIFI F	MAA	UMBB	Examineur
KIFOUCHE R	MAA	UMBB	Encadreur

Année Universitaire : 2015/2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département : Automatisation des procédés et Electrification
Filière : Hydrocarbures
Option : Génie Electrique : Electricité industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**ETUDE DES CONSTITUANTS D'UN GENERATEUR
PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME**

Présenté par :

KRALEDKEBIR Abdenour
GOUGAM Billel

Avis favorable de l'encadreur :

Mr KIFOUICHE Rezki signature :

Avis favorable du Président du jury

Nom Prénom

Mr HAMADACHE M

Signature :

Cachet et signature

Sommaire

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION Général

CHAPITRE I : Les systèmes de stockage électrochimiques

I.1 Introduction	1
I.2 Historiques	2
I.3 Système de stockage	2
I.4 Les Caractéristiques principales d'une batterie	3
I.4.1 Capacité en Ampère heure.	3
I.4.1.1 Rapports de charge et décharge.	3
I.4.1.2 Température	3
I.4.1.3 La durée de vie.	3
I.4.2 Profondeur de décharge	3
I.4.3 La tension d'utilisation	4
I.4.4 Le rendement	4
I.5 Types des batteries	4
I.5.1 Batterie au Plomb	4
I.5.1.1 Composition d'une batterie Plomb- Acide	4
I.5.1.2 Principe de fonctionnement	6
I.5.1.3 La charge	7
I.5.1.4 La décharge	8

I.5.2 Batterie Nickel-cadmium	8
I.5.3 Lithium-ion	10
I.5.4 Nickel-hydrures métalliques	11
I.6 Durée de vie des batteries	12
I.7 Les caractéristiques pénalisantes des batteries	12
I.7.1 La résistance interne	12
I.7.2 Effet mémoire	13
I.7.2.1 Technologies concernées	13
I.7.3 L'autodécharge.	13
I.8 Assemblages des batteries	14
I.8.1 Assemblage en parallèle	14
I.8.2 Assemblage en série	15
I.9 Recharge de la batterie	15
I.9.1 Charge à tension constante	15
I.9.2 Charge à courant constant	16
I.9.3 Charge pulsée	16
I.9.4 Charge flottante	16
I.9.5 Charge rapide	16
I.10 Conclusion	17

CHAPITRE II : Le générateur Photovoltaïque

II.1 Introduction	18
-----------------------------	----

II.2 Historique	18
II.3 Chaîne de conversion électrique	18
II.4 Structure générale et éléments de conception d'un système photovoltaïque	19
II.5 Les différentes installations photovoltaïques	20
II.5.1 Les installations sur site isolé	20
II.5.2 Les installations raccordées au réseau de distribution public	21
II.5.2.1 Solution avec injection totale	21
II.5.2.2 Solution avec injection de surplus	22
II.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	23
II.6.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque	23
II.6.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	23
II.7 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	23
II.8 Les Caractéristiques électriques des cellules et module	25
II.8.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	25
II.8.2 les paramètres fondamentaux d'une cellule solaire	26
II.8.2.1 Courant de court-circuit (I_{sc})	26
II.8.2.2 Tension en circuit ouvert (V_{oc})	26
II.8.2.3 Point de puissance maximale (P_{max})	26
II.8.2.4 Rendement maximum	26
II.9 Exemple de module photovoltaïque	27
II.10 Modèle électrique de module photovoltaïque	27
II.10.1 Modèle à une diode	28
II.10.2 Modélisation de module photovoltaïque	30

II.11 Raccordement des cellules	33
II.11.1 Association en série	33
II.11.2 Association en parallèle.	34
II .11.3 Les diodes de by-pass	35
II.12 Conclusion	36

CHAPITRE III : Etude du convertisseur et de sa commande

III.1 Introduction	37
III.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	38
III.2.1 Hacheur dévolteur.	39
III.2.2 Hacheur survolteur	41
III.2.3 Hacheur dévolteur-survolteur	42
III.3 Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC	44
III.3.1 Algorithme d'incrémentation de la conductance	45
III.3.2 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	46
III.4 Simulation du fonctionnement du convertisseur survolteur	48
III.4.1 Présentation du modèle à simuler.	48
III.4.2 Les résultats de simulation.	49
III.4.2 Interprétation des résultats de simulation	51
III.5 Conclusion	52

CHAPITRE IV : Simulation du système GPV-Batterie

IV.1 Introduction	53
IV.2 Simulation du générateur PV	53
IV.2.1 Présentation du modèle simulé	53
IV.2.2 Les résultats de simulation	54
IV.2.3 Interprétation des résultats de simulation	55
IV.3 Principe de la connexion directe source PV- charge	56
IV.4. La batterie de stockage	58
IV.4.1 Modélisation de stockage	58
IV.4.1.1 Modèle de la décharge de la batterie	58
IV.5 Simulation de la charge de la batterie avec le GPV	60
IV.5.1 Présentation du modèle à simuler	60
IV.5.1 Les résultats de simulation	61
IV.5.1.1 Interprétation des résultats de simulation.	61
IV.6 Conclusion	62

CONCLUSION Général

ANNEXE

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I Les systèmes de stockage électrochimiques

Figure I.1 Batterie plomb-acide	1
Figure I.2 premier concept de la batterie	2
Figure I.3 Construction d'une batterie plomb-acide	5
Figure I.4 principe de fonctionnement d'une batterie plomb	7
Figure I.5 Évolution de la tension durant la charge d'une batterie plomb	8
Figure I.6 : Évolution de la tension durant la décharge d'une batterie plomb	8
Figure I.7 batterie Nickel-Cadmium	9
Figure I.8 principe de fonctionnement d'une batterie nickel-cadmium	10
Figure I.9 branchement en parallèle de deux batteries	14
Figure I.10 branchement en série de deux batteries	15

CHAPITRE II Le générateur Photovoltaïque

Figure II.1 : Installation photovoltaïque autonome	19
Figure II.2 Les différents types de systèmes photovoltaïques	20
Figure II.3 représentation d'une installation isolée	21
Figure II.4 schéma d'Installation avec injection totale	22
Figure II.5 schéma d'Installation avec injection de surplus	22
Figure II.6 conversion de l'énergie solaire en électricité.	24
Figure II.7 Les Caractéristiques électriques des cellules et module	25
Figure II.8 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	25
Figure II.9 Schéma électrique équivalent du modèle à une diode	28

Figure II.10 Circuit équivalent utilisé dans les simulations
31

Figure II.11 : Exemple de réseau de caractéristiques puissance/tension d'un générateur photovoltaïque,	32
Figure II.12 exemple d'association série des cellules	33
Figure II.13 caractéristique d'association série des cellules	33
Figure II.14 : caractéristique d'association parallèle des cellules	34
Figure II.15 : Caractéristique du générateur (idéale sans/avec intervention des diodes de protection)	34
Figure II.16 : l'emplacement des diodes de protection dans l'association des cellules	35
Figure II.17 : l'effet des diodes de protection	36

CHAPITRE III Etude du convertisseur et de sa commande

Figure III.1 schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage	38
Figure III.2 schéma d'un quadripôle électrique	38
Figure III.3. Périodes de fermeture et d'ouverture d'un convertisseur	39
Figure III.4 schéma de principe d'un convertisseur dévolteur	40
Figure III.5 schémas équivalant du hacheur dévolteur	40
Figure III.6 Schéma de principe d'un convertisseur survolteur	41
Figure III.7 schémas équivalant du hacheur survolteur	42
Figure III.8 Convertisseur dévolteur-survolteur	43
Figure III.9 Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur	43
Figure III.10 schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT	44

Figure III.11	Signe de dP pour différentes zones de fonctionnement	46
Figure III.12	organigramme de la méthode de perturbation et d'observation	47
Figure III.13	Le modèle du convertisseur à simuler	49
Figure III.14	L'évolution de la puissance à l'entrée et à la sortie du convertisseur	49
Figure III.15	L'évolution du courant et de la tension à l'entrée du convertisseur	50
Figure III.16	L'évolution du courant et de la tension à la sortie du convertisseur	50
Figure III.17	L'évolution de la puissance à l'entrée et à la sortie du convertisseur	50
Figure III.18	L'évolution du courant et de la tension à l'entrée du convertisseur	51
Figure III.19	L'évolution du courant et de la tension à la sortie du convertisseur	51

CHAPITRE IV simulation du système GPV-Batterie

Figure IV.1	model de panneau photovoltaïque sous Matlab	54
Figure IV.2	caractéristique I(V) et P(V) dans les conditions standard $T=25^{\circ}\text{C}$ $E=1000\text{W/m}^2$	54
Figure IV.3-a	influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)	55
Figure IV.3-b	influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)	55
Figure IV.4-a	influence de la température sur la caractéristique I(V)	55
Figure IV.4-b	influence de la température sur la caractéristique P(V)	55
Figure IV.5	Caractéristique GPV-Charge	57
Figure IV.6	Le modèle électrique équivalent de la batterie	58
Figure IV.7	Le système GPV-Batterie sous simulink	60
Figure IV.8	Courbes caractéristiques de la recharge de la batterie	62

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. L'objectif recherché est de atteindre une meilleure compréhension du fonctionnement du convertisseur DC-DC et du comportement des générateurs photovoltaïques surtout lors de la recharge des batteries.

Pour mener à terme ce travail, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude des accumulateurs électrochimiques permettant de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome. Leur utilisation est très répandue et

en plein essor. Le problème de ces éléments énergétiques est de réussir à les maintenir en état le plus longtemps possible bien qu'ils soient le siège de nombreux phénomènes électrochimiques non linéaires et qu'ils subissent une altération de leurs performances au cours du temps et des utilisations.

Dans le deuxième chapitre, on effectuera une présentation des généralités sur les générateurs photovoltaïques. On présentera le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite un rappel sur les générateurs PV et leurs performances sera abordé.

Dans le troisième chapitre, on étudiera quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on présentera la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

Dans le chapitre quatre, on effectuera des simulations sous Matlab-Simulink et en présentera les résultats qui seront analysés et traités.

Chapitre I

Les systèmes de stockage électrochimiques

I.1 Introduction

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique ; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire.



Figure I.1 Batterie plomb-acide

Les batteries sont des sources électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant la charge, et l'énergie chimique en énergie électrique au cours de la décharge.

Les batteries peuvent être classées en batteries primaires ou secondaires. Les batteries primaires (les piles) sont utilisées une seule fois parce que les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont irréversibles. Par contre pour les batteries secondaires (les accumulateurs), les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont réversibles.

I.2 Historiques

C'est en 1799 que volta a découvert la première pile électrique en réalisant des empilements successifs d'une lame de zinc, d'une lame de feutre imbibée d'eau vinaigrée et d'une lame de cuivre [1].

Bien que le système plomb-acide ait d'abord été découvert par Sinstedenen en 1854. L'histoire des accumulateurs au plomb industriel ne commence qu'en 1859 lorsque Gaston Planté a construit la première batterie rechargeable. Celle-ci se composait de deux lames de plomb spiralées par une toile de lin plongées dans une solution d'acide sulfurique. L'histoire se poursuit en 1880 quand Camille Faure met au point une technique pour faciliter la fabrication des accumulateurs au plomb [2].

Depuis cette époque, Les progrès techniques se sont multipliés pour faire de l'accumulateur plomb-acide l'un des systèmes électrochimiques le plus répandue et utilisé dans le monde [1].



Figure I.2 premier concept de la batterie

I.3 Système de stockage

Dans une installation PV, le stockage électrochimique permet d'emmagasiner de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une exploitation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [2] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou pendant un mauvais temps par exemple).
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

I.4 Les Caractéristiques principales d'une batterie sont

I.4.1 Capacité en Ampère heure

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que [3] :

I.4.1.1 Rapports de charge et décharge

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à

un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

I.4.1.2 Température

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [2].

I.4.1.3 La durée de vie

Une batterie peut être chargée puis déchargée complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de la batterie, il y a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [3].

I.4.2 Profondeur de décharge

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

I.4.3 La tension d'utilisation

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la décharge.

I.4.4 Le rendement

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par la batterie et l'énergie fournie à la batterie.

I.5 Types des batteries

Il existe plusieurs types de stockage dans les systèmes PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW. On évoque quelque type les plus utilisés mais ce qui nous intéresse c'est les batteries au plomb.

I.5.1 Batterie au Plomb

La technologie des batteries plomb est la forme de stockage électrochimique de l'énergie électrique la plus répandue. Elle a beaucoup évolué depuis ses débuts. Son rapport coût énergie étant de loin le plus bas, son succès devrait se maintenir pour des années encore [4].

I.5.1.1 Composition d'une batterie Plomb- Acide

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de Plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de Plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

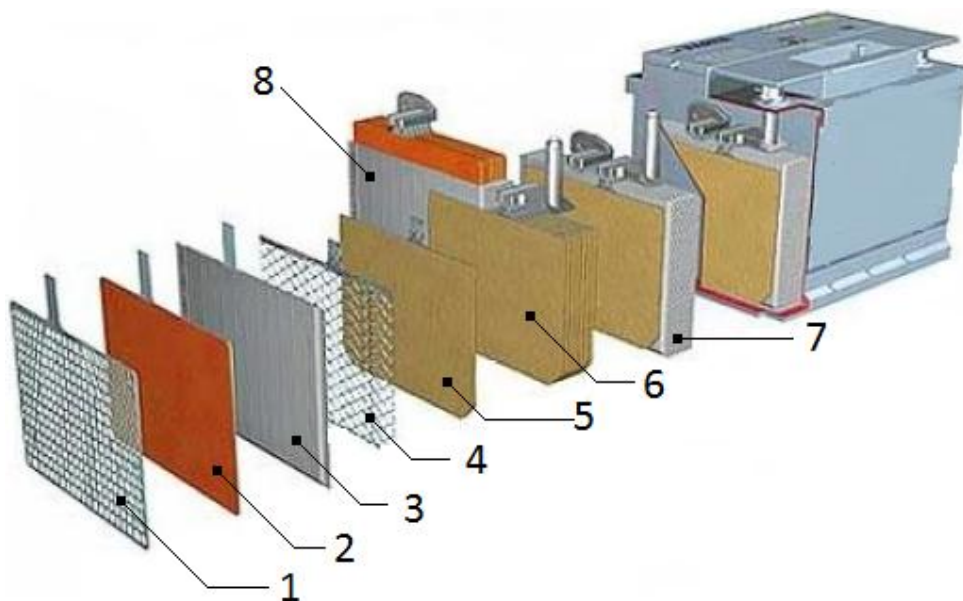


Figure I.3 Construction d'une batterie plomb-acide

- | | |
|----------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1) grille positive | 5) plaque plane négative empâtée |
| 2) plaque plane positive empâtée | 6) électrode négative |
| 3) plaque positive dans des pochettes polyéthylène | 7) élément Pb/PbO ₂ |
| 4) grille négative | 8) faisceau de plaque positive |

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la Batterie. L'alliage en question est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge.

Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries.

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées. Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes"

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie. Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir. Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conditions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%. (pour plomb- Acide)

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les

plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie.

Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont souvent réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte. Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quel que soit le régime [3].

I.5.1.2 Principe de fonctionnement

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge, on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale [5] :

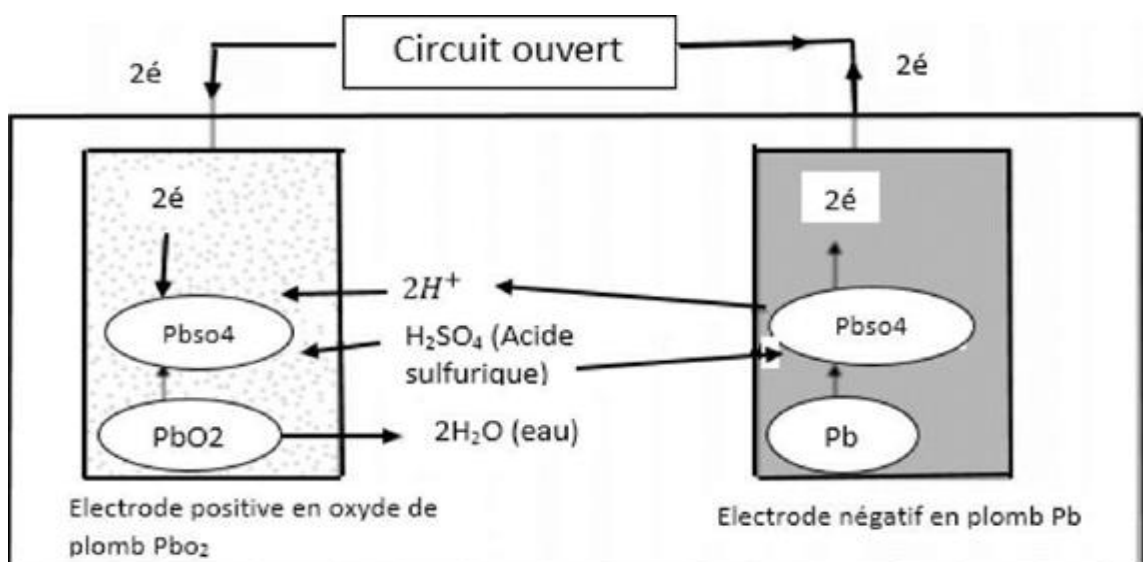
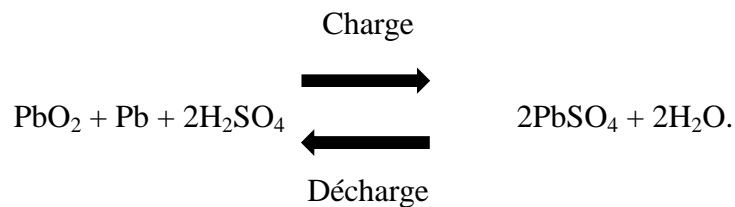
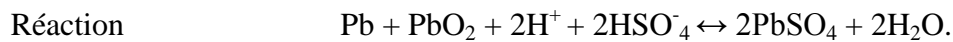
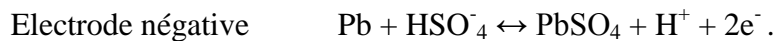


Figure I.4 principe de fonctionnement d'une batterie plomb

Les équations chimiques de la batterie



I.5.1.3 La charge

Pendant la charge, les ions sulfates, du sulfate de Plomb, sont progressivement libérés sous forme d'ions HSO_4^- dans l'électrolyte. Il en résulte une augmentation de la concentration d'acide sulfurique dans l'électrolyte. La concentration d'acide croît rapidement à proximité de l'interface réactionnelle. Ce phénomène est amplifié, côté positif, par une consommation d'eau. En fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension, Les plaques complètement polarisées ne retiennent plus de courant, car la densité de matériel actif baisse. Ce courant tend alors à électrolyser l'eau, produisant de l'oxygène et de l'hydrogène (O_2 sur l'électrode positive et H_2 l'électrode négative). Ce phénomène est appelé gazéification [6].

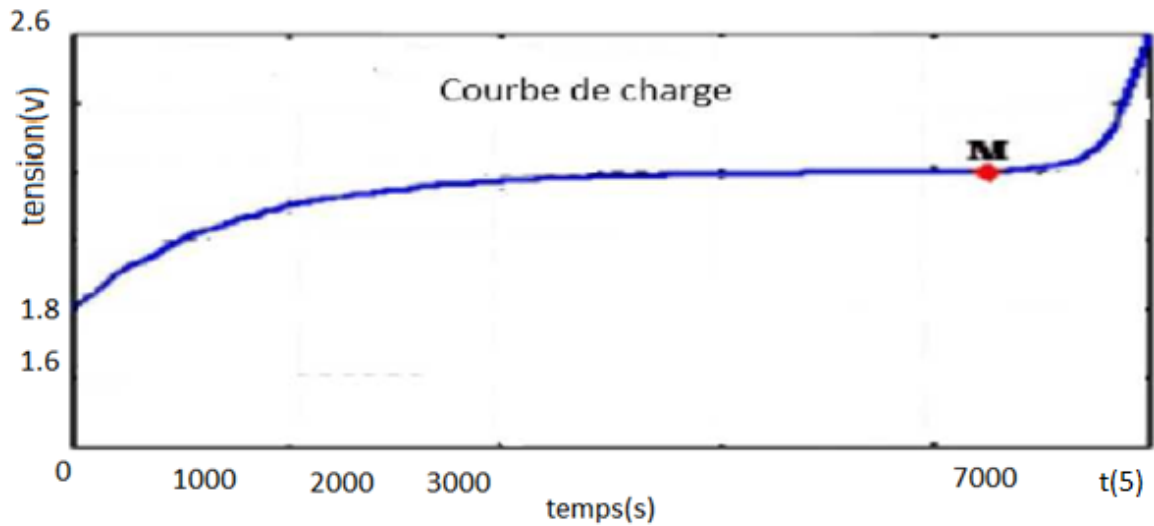


Figure I.5 Évolution de la tension durant la charge d'une batterie plomb

I.5.1.4 La décharge

La capacité dépend du régime auquel est effectuée la décharge. Plus le temps de la décharge n'est court, donc le régime élevé, plus la capacité est faible. La fin de décharge est déterminée par une tension d'arrêt fixée de la façon suivante :

Sur la courbe de tension en fonction du temps lors d'une décharge, une chute brutale de la tension vers la fin de décharge est observée. La tension d'arrêt est une valeur choisie avant cette chute. Cette valeur dépend du régime de décharge.

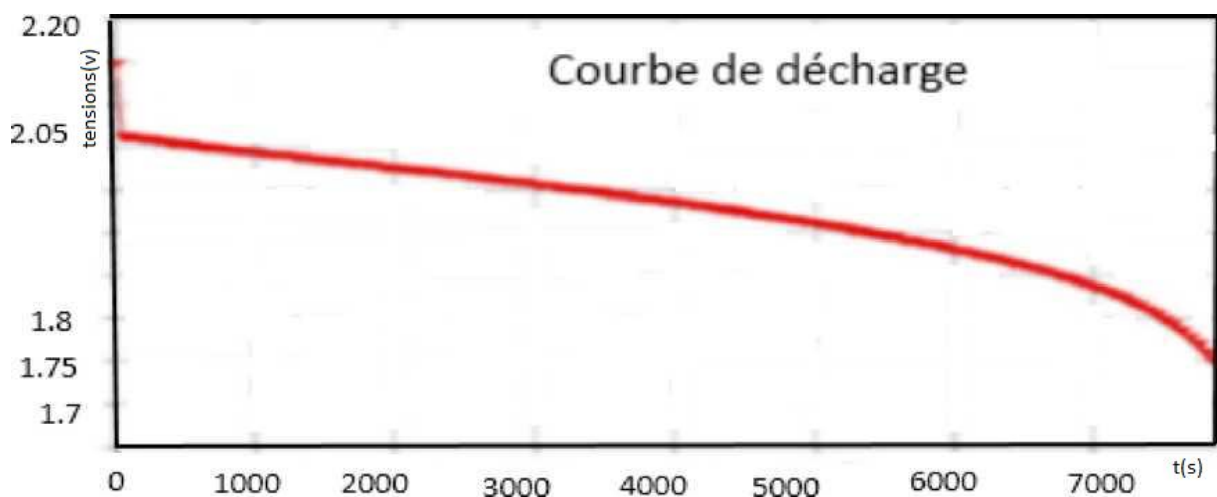


Figure I.6 : Évolution de la tension durant la décharge d'une batterie plomb

I.5.2 Batterie Nickel-cadmium [7]

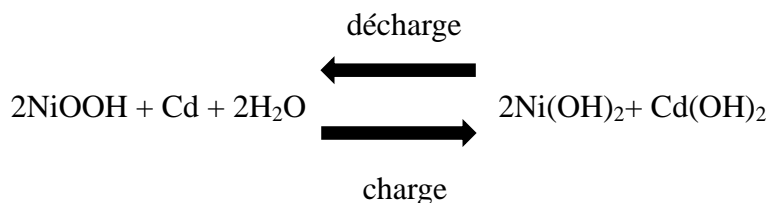
La technologie nickel/cadmium (Ni/Cd, historiquement l'une des plus anciennes technologies, elle date de 1899) est aujourd'hui bien connue.



Figure I.7 batterie Nickel-Cadmium

L'anode est chimiquement imprégnée de nickel et la cathode de cadmium est moulée dans le plastique sur un substrat en acier. Le séparateur est en fibres non tissées et l'électrolyte est un alcalin liquide. Les cellules sont montées dans un caisson en polypropylène.

La réaction générale de charge et décharge est comme suit :



La tension nominale est de 1,2 V mais elle varie entre 1,15 V et 1,45 V par élément suivant l'état de charge.

Les batteries nickel-cadmium supportent un grand nombre de décharges complètes sans destruction et peuvent être utilisés par grand froid - ils peuvent fonctionner sur une grande plage de température. Les éléments sont, par leur construction, plus robustes et moins lourds que ceux au plomb, ils acceptent plus facilement la surcharge ou décharge profonde et ils nécessitent un entretien réduit ce qui leur confère une grande durée de vie.

Mais ils présentent aussi des inconvénients : leur coût est environ cinq fois plus élevé que celui de la technologie plomb, ils ont un mauvais rendement énergétique de charge/décharge

(rendement faradique = 70 %), l'autodécharge est plus élevée que celle des batteries au plomb (> 15%) et ils ont un effet de « mémoire » lié à l'électrode négative de cadmium (il est préférable de vider la batterie complètement avant de la recharger).

Les batteries Ni-Cd sont aujourd'hui relativement dépassées en termes d'autonomie, elles ont été supplantées vers 1990 par les batteries Ni-MH, elles-mêmes aujourd'hui concurrencées par les batteries Li-ion.

I.5.2 Lithium-ion[7]

Commercialisée pour la première fois par [Sony Energitech](#) en [1991](#), la batterie lithium-ion occupe aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable.

La batterie lithium-ion est basée sur l'échange réversible de l'[ion lithium](#) entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithiné ([dioxyde de cobalt](#) ou [manganèse](#)) et une électrode négative en [graphite](#). L'emploi d'un électrolyte [aprotique](#) (qui ne peut contenir ou fournir des protons) est obligatoire pour éviter de dégrader les électrodes très réactives.

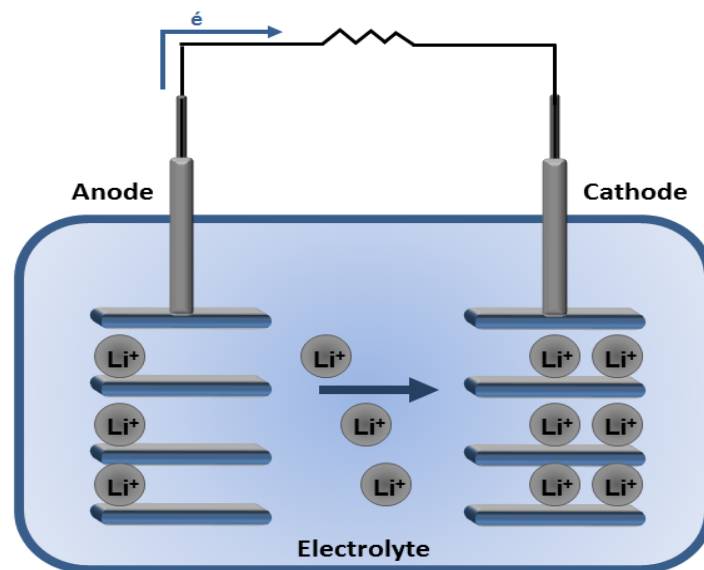


Figure I.8 principe de fonctionnement d'une batterie nickel-cadmium

La tension nominale d'un élément Li-ion est de 3,6 ou 3,7 V (selon la technologie). Cette équivalence : 1 élément Li-ion = 3 éléments Ni-MH

Ils possèdent une haute densité d'énergie pour un poids très faible, grâce aux propriétés physiques du lithium ([densité massique](#) de 100–265 Wh/kg, ou [puissance massique](#) 300-1 500 W/kg).

- Ils ne présentent aucun [effet mémoire](#) contrairement à la batterie à base de [nickel](#).
- Ils ont une faible [autodécharge](#) (10 % par mois souvent moins de quelques % par an).
- Ils ne nécessitent pas de maintenance.

La profondeur de décharge : ces batteries vieillissent moins vite lorsqu'elles sont rechargées par des recharges partielles que lorsqu'elles subissent des cycles complets de décharge/ recharge.

Les courants de charge et de décharge admissibles sont plus faibles qu'avec d'autres techniques.

Il peut se produire un court-circuit entre les deux électrodes par [croissance dendritique](#) (solidification) de lithium.

L'utilisation d'un électrolyte liquide présente des dangers si une fuite se produit et que celui-ci entre en contact avec de l'air ou de l'eau (transformation en liquide corrosif : l'hydroxyde de lithium).

Cette technique mal utilisée présente des dangers potentiels : elles peuvent se dégrader en chauffant au-delà de 80 °C en une réaction brutale et dangereuse. Il faut toujours manipuler les batteries lithium-ion avec une extrême précaution, ces batteries peuvent être explosives. Et comme avec toute batterie : ne jamais mettre en court-circuit la batterie, inverser les [polarités](#), surcharger ni percer le boîtier.

Pour éviter les problèmes, ces batteries doivent toujours être équipées d'un circuit de protection, d'un circuit de régulation, d'un [fusible thermique](#) et d'une [soupape de sécurité](#). Elles doivent être chargées en respectant des [paramètres](#) très précis et ne jamais être déchargées en dessous de 2,5 V par élément.

I.5.3 Nickel-hydrures métalliques [7]

La technologie des batteries au nickel/hydrures métalliques (Ni-MH) s'est montrée performante à température ambiante. Elle est pratiquement non polluante en comparaison

avec des technologies comme le Pb/acide ou le Ni/Cd. Ce système fonctionne sensiblement de la même façon que la technologie Ni-Cd.

La tension nominale d'un élément de ce type est de 1,2 V. Son énergie massique est supérieure de 40 % à celle des Ni-Cd et son effet mémoire est très faible, en raison de la suppression de l'électrode négative de cadmium.

La fin de charge est caractérisée par une variation de la tension de charge très faiblement négative. C'est ce seuil qui est détecté par les chargeurs automatiques de qualité pour arrêter la charge.

I.6 Durée de vie des batteries [8]

La durée de vie d'une batterie est directement liée à leurs conditions d'utilisation. Elle dépend essentiellement du nombre de cycles 'charge-décharge'. Pour obtenir une durée de vie de 10 à 15 ans, il est indispensable que la batterie, dans son fonctionnement, soit maintenue dans un état de charge supérieur à plus de 50 %.

La durée de vie des batteries au Plomb-Acide est déterminée par les trois facteurs suivants :

- 1er facteur : vie cyclique et résistance aux températures élevées.
- 2ème facteur : effets de la sulfatation et les sous-charges, qui sont seulement spécifiques dans les applications PV.
- 3ème facteur : c'est les facteurs catastrophiques, défauts de fabrication, sous dimensionnement, utilisation abusive, congélation, etc..., qui peuvent être souvent évité.

Toute surcharge élevée provoque la corrosion, des déformations et de l'érosion sur les plaques, ainsi qu'une surchauffe. La présence de certains composés organiques et inorganiques (utilisés comme additifs dans les matériaux actifs, électrolyte) peut causer la coalescence des particules de Pb avec une perte consécutive de porosité. il existe des produits qui, ajoutés aux matériaux des plaques négatives, préviennent cet inconvénient.

A une concentration inférieure à 50 % de H_2SO_4 , la corrosion est inférieure à 0,13 mm/an. Le fonctionnement des batteries dans les systèmes PV est différent de leur fonctionnement traditionnel. Les conditions opératoires de la batterie dans ces systèmes conduits aux faibles durées de vie. Pour les systèmes PV qui utilisent les batteries au plomb, la durée de vie est souvent limitée par la dépendance de la température avec notamment la résistance à la corrosion et non pas la vie cyclique.

I.7 Les caractéristiques pénalisantes des batteries

I.7.1 La résistance interne

La résistance interne est une caractéristique de la batterie. C'est elle qui provoque la chute de la tension de la batterie lorsqu'on augmente le courant consommé.

La résistance interne est due en partie aux connexions internes, à l'inertie de la réaction chimique, aux circuits de protection intégrés dans l'élément pour certaines batteries. La valeur de cette résistance est généralement de quelques centaines de milli ohms ($m\ \Omega$).

I.7.2 Effet mémoire

Est un phénomène physico-chimique affectant les performances des batteries s'ils ne sont pas complètement déchargés avant d'être rechargés

Le problème apparaît après quelque temps d'utilisation des batteries, soit lorsque tous les cycles de décharge sont identiques (exemple : décharge pendant dix heures à $C/20$, recharge complète, répété de nombreuses fois), ou ce qui revient sensiblement au même, dans des appareils munis d'une détection de la tension d'alimentation. Cette détection est destinée à provoquer l'arrêt de l'appareil, lorsque les batteries sont censées être vides. Cette sécurité est nécessaire au bon fonctionnement de l'appareil lui-même et évite aussi la destruction irréversible des batteries par décharge profonde, mais elle intervient alors que les batteries ne sont pas complètement vides et toujours à la même valeur de décharge.

On observe notamment ce phénomène lors des décharges partielles identiques suivies d'une recharge complète, cycles répétés de la batterie.

I.7.2.1 Technologies concernées

L'effet mémoire concerne principalement les deux technologies [Ni-Cd](#) (nickel-cadmium) et [Ni-MH](#) (nickel-hydrure métallique).

Bien que la plupart des fabricants prétendent que les batteries Ni-MH n'y sont pas sujettes, des exemples peuvent être trouvés dans la littérature.

Les [batteries plomb](#) ou à base de [lithium](#) (comme les [batteries Li-ion](#)) sont moins sensibles à l'effet mémoire qui reste néanmoins présent ; on peut par conséquent recharger ces batteries sans les avoir préalablement déchargées entièrement, en attendant suffisamment après un cycle de charge

I.7.3 L'autodécharge

Est une réaction [électrochimique](#) provoquant une réduction progressive du niveau de charge d'une [batterie](#), en l'absence d'un appareil consommateur de [courant](#), lorsqu'il n'est pas

sollicité pendant une période donnée. Il s'agit d'une limitation technologique au stockage de l'énergie électrique sur les batteries.

I.8 Assemblages des batteries

Dans le cas où on a besoin d'une tension ou un courant important et on ne dispose pas d'une batterie qui convienne, on peut assembler deux ou plusieurs batterie pour atteindre la valeur désiré

Il y a 2 façons pour assembler des batteries selon le besoin :

- L'assemblage en parallèle qui permet d'augmenter la capacité (Ah) de la batterie finale.
- L'assemblage en série qui permet d'augmenter la tension (V) de la batterie finale

I.8.1 Assemblage en parallèle

Ce type de branchement se fait à partir de 2 batteries (ou plus) de même tension (V) et de même capacité (Ah) cela permet d'augmenter l'autonomie de la batterie.

Exemple : 2 batteries de 24V 25Ah.

Le branchement en parallèle nous donnera une batterie de 24V 50Ah soit 2 fois plus d'autonomie.

Pour ce faire, il suffit de connecter, comme indiqué sur le schéma ci-dessous : le pôle plus (+) de la batterie 1 sur le pôle plus (+) de la batterie 2, puis le pôle moins (-) de la batterie 1 sur le pôle moins (-) de la batterie 2.

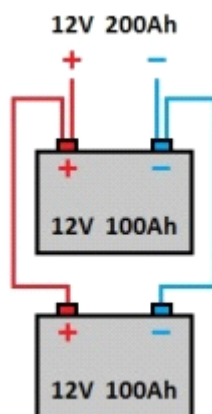


Figure I.9 branchement en parallèle de deux batteries.

I.8.2 Assemblage en série

Ce type de branchement se fait à partir de 2 batteries (ou plus) de même tension (V) et de même capacité (Ah) : cela permet d'augmenter la tension.

Exemple : 2 batteries de 12V 100Ah.

Le branchement en série nous donnera une batterie de 24V 100Ah soit 2 fois plus de puissance.

Pour ce faire, il suffit de connecter, comme indiqué sur le schéma ci-dessous, le pôle moins (-) de la première batterie sur le pôle plus (+) de la deuxième batterie.

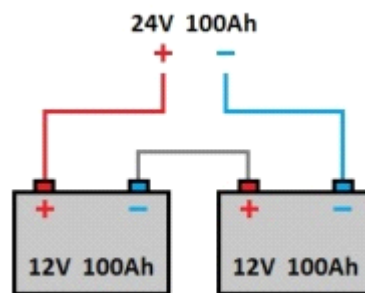


Figure I.10 branchement en série de deux batteries.

I.9 Recharge de la batterie

La recharge appropriée d'une batterie (dans le cas de batterie plomb acide) devient prépondérante pour obtenir une durée de vie et des performances optimales quel que soit les conditions d'utilisation de cette batterie. De plus, il existe des exigences techniques telles que la fiabilité et la longévité. Plusieurs méthodes de charge existe, nous pouvons citer : charge à tension constante, charge à courant constant, charge pulsée, charge flottante et charge rapide

I.9.1 Charge à tension constante

Différentes variations existent suivant qu'on ajoute une limitation de courant de charge au début de la charge ou bien même au début et à la fin de celle-ci. Ces types de charge sont appelés respectivement : charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début de la charge, charge modifiée à tension constante avec une phase finale à niveau de courant constant et charge modifiée à tension constante avec un courant constant au début de la charge et une phase finale à niveau de tension constante. Pour cette dernière, le circuit de charge au début de celle-ci a une limite de courant de charge, cette valeur limite est maintenue jusqu'à un niveau de tension donné, ensuite la tension est régulée à cette valeur pendant que le courant de charge diminue exponentiellement, jusqu'à atteindre un niveau de charge de 100% de la batterie.

I.9.2 Charge à courant constant

Cette méthode de charge s'applique au moyen d'un contrôle qui assure que le courant de charge délivré à la batterie reste fixé à une valeur déterminée. Il peut s'agir également de charge à de différents niveaux de courant programmés à l'avance. Le chargeur doit être capable de supporter une tension suffisante à ses bornes. Cette tension est adaptée en permanence par un système de régulation et on arrête la charge après avoir injecté une certaine quantité d'ampère heure dans la batterie ou lorsque l'on atteint une tension fixée.

I.9.3 Charge pulsée

Dans ce type de charge, le chargeur est périodiquement isolé des connexions de la batterie pour pouvoir effectuer la mesure de la tension en circuit ouvert. Si cette tension est plus haute qu'une valeur fixée, le chargeur ne délivre pas d'énergie à la batterie. Dans le cas contraire le chargeur délivre une impulsion dont la durée dépend du temps qu'il faut à la batterie pour atteindre de nouveau la valeur butoir de la tension.

I.9.4 Charge flottante

La charge flottante est une faible charge de type « tension constante » qui est utilisée pour maintenir la batterie en état de pleine charge.

I.9.5 Charge rapide

La charge rapide consiste à fournir à la batterie la plupart de la charge en peu de temps (inférieur à une heure) à fort courant, afin de récupérer près de 60% de la capacité de la

batterie. Le contrôle de la charge sous des conditions extrêmes devient très important pour prévenir des dégradations de la batterie liées à un changement de la morphologie des électrodes, une augmentation de la température et une surcharge.

I.10 Conclusion

La définition électrochimique et les principales caractéristiques des accumulateurs, et principalement, au plomb acide sont présentés dans ce chapitre. Le stockage de l'énergie électrique réside dans l'utilisation des générateurs électrochimiques, malgré les efforts déployés dans le but de mettre au point de nouveaux générateurs électrochimiques, L'accumulateur au plomb, découvert en 1860 par Planté, reste de nos jours le générateur le plus fiable, son fonctionnement est basé essentiellement sur la réduction de PbO_2 en $PbSO_4$. Comme il est le système de stockage le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques autonomes.

Chapitre II

Le générateur Photovoltaïque

II.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques sont devenus de plus en plus populaires et sont parfaitement adaptés pour les systèmes distribués. Des études récentes montrent une augmentation exponentielle dans la capacité de puissance photovoltaïque installée dans le monde entier. Il y a des recherches en cours visant à réduire le coût et atteindre des performances encore meilleurs. L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus importante du monde

et est disponible partout même si en quantités différentes. Les panneaux photovoltaïques ne disposent pas de pièces mobiles, fonctionnent silencieusement et ne génèrent aucune émission. Un autre avantage est que l'énergie solaire est très modulaire et peut être facilement mis à l'échelle pour fournir la puissance nécessaire[9].

II.2 Historique

Comme son nom le laisse deviner, l'effet photovoltaïque consiste à transformer la lumière en électricité. Ce principe fut découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Becquerel. Plus scientifiquement parlant, ce phénomène apparaît lorsqu'un matériau semi-conducteur absorbe des photons, émis par la lumière, qui lui permettent de produire une tension électrique.

II.3 Chaîne de conversion électrique

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230V alternatif.

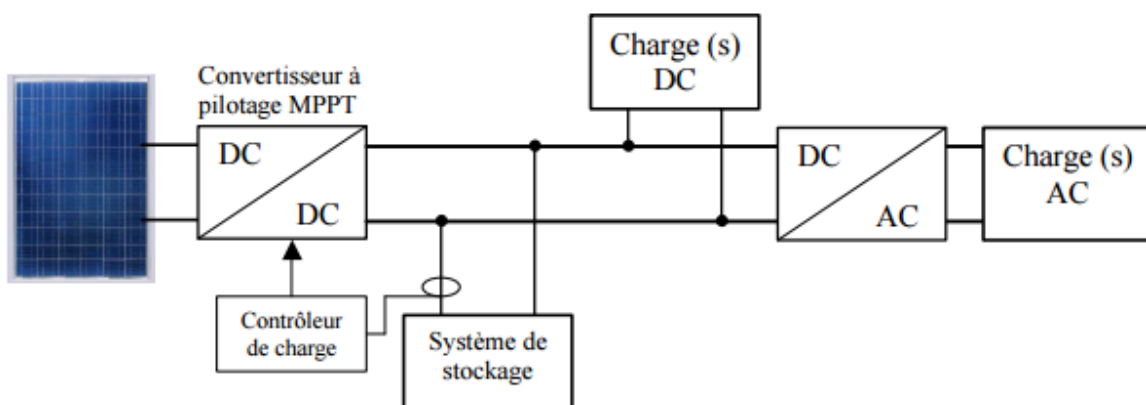


Figure II.1 : Installation photovoltaïque autonome

II.4 Structure générale et conception d'un système photovoltaïque

Parmi les sources d'énergies citées, l'énergie photovoltaïque est la mieux partagée par tous les habitants du globe qui fait appel au rayonnement solaire pour générer de l'électricité. Les systèmes photovoltaïques autonomes ont connu un succès dans le monde, vu leurs capacités à couvrir la totalité de la demande énergétique. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits dans la figure (II.2) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

Dans la plupart des systèmes photovoltaïques le coût du générateur seul représente plus de 50% du coût total de l'installation. De ce fait, il est judicieux de définir des stratégies de fonctionnement qui minimisent la puissance photovoltaïque crête installée pour satisfaire le service requis par l'application dans les conditions de gisement solaire offertes par le site et qui permettent d'absorber à chaque instant la puissance optimale disponible au niveau du générateur avec une batterie qui permet de stocker la production d'un surplus de puissance éventuelle.

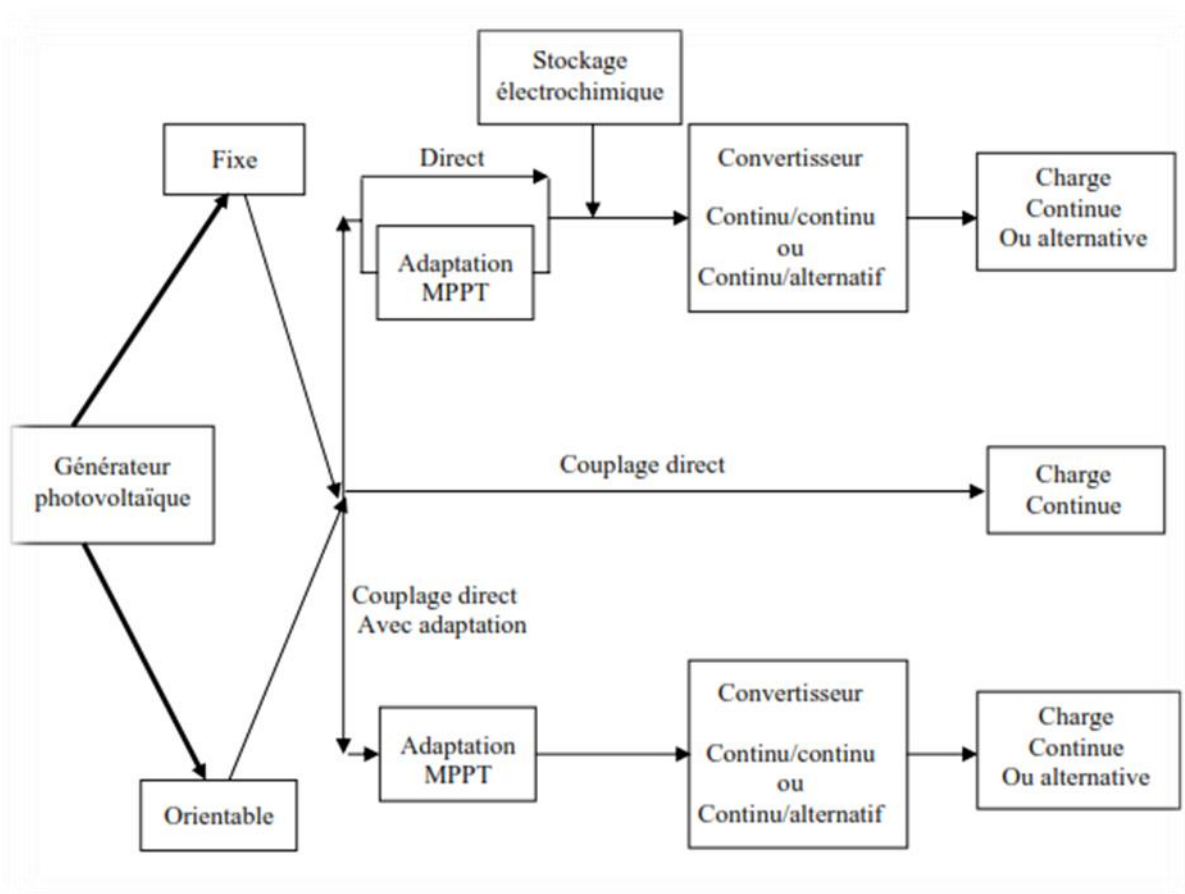


Figure II.2 Les différents types de systèmes photovoltaïques

II.5 Les différentes installations photovoltaïques [9]

II.5.1 Les installations sur site isolé

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

- Les panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu.
- Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.
- L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC.
- Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.
- Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables.

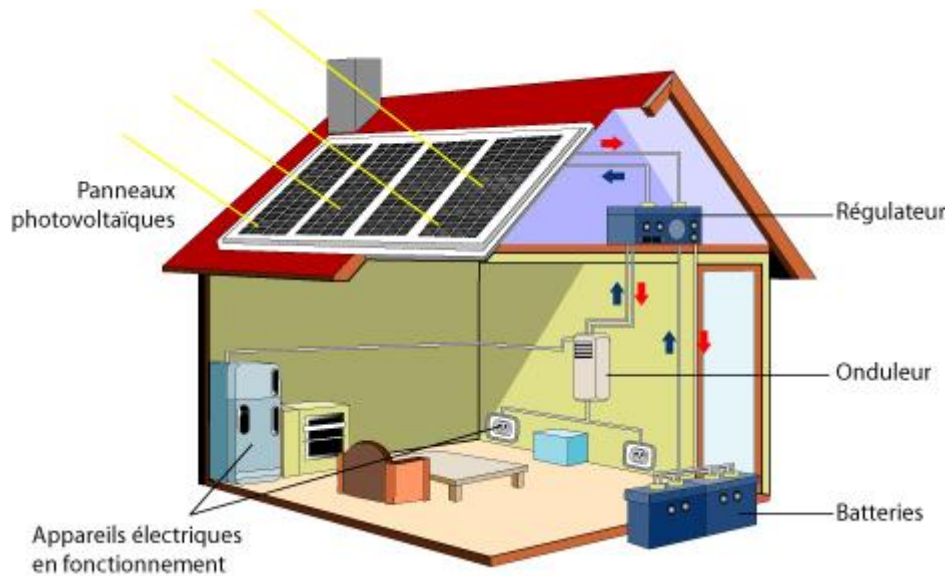


Figure II.3 représentation d'une installation isolée

II.5.2 Les installations raccordées au réseau de distribution public

II.5.2.1 Solution avec injection totale

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- **Le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production).**
- **Le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :**
 - ✓ l'un pour la production,
 - ✓ l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).



Figure II.4 schéma d'Installation avec **injection totale**

II.5.2.2 Solution avec injection de surplus

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point, l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant



Figure II.5 schéma d'Installation avec injection de surplus

II.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

II.6.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [10] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

II.6.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [4]

II.7 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir

directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. [9]

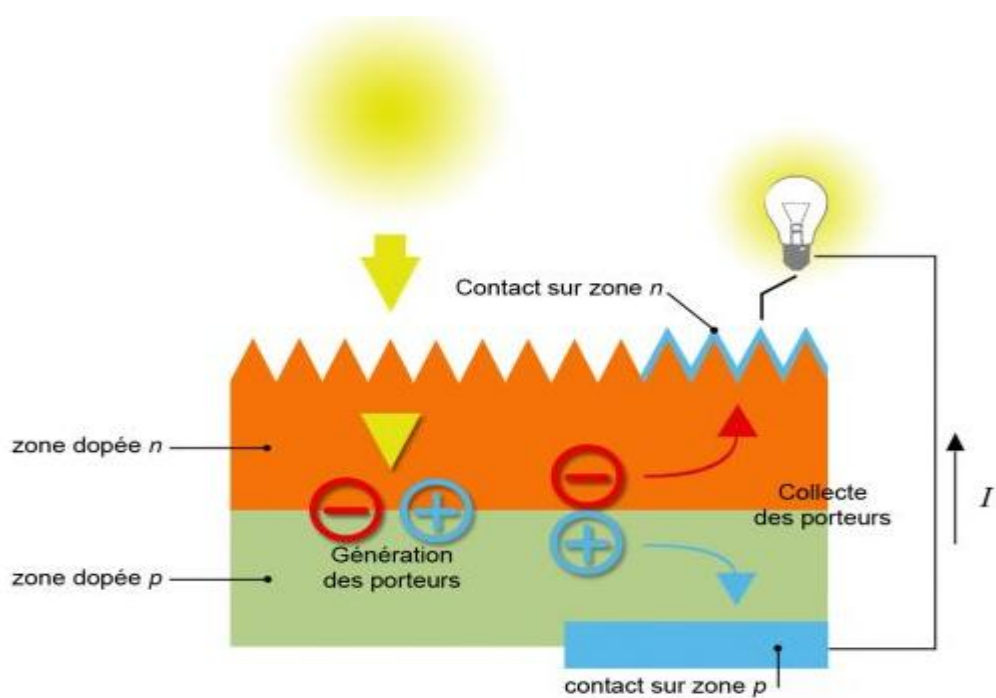


Figure II.6 conversion de l'énergie solaire en électricité.

II.8 Les Caractéristiques électriques des cellules et module

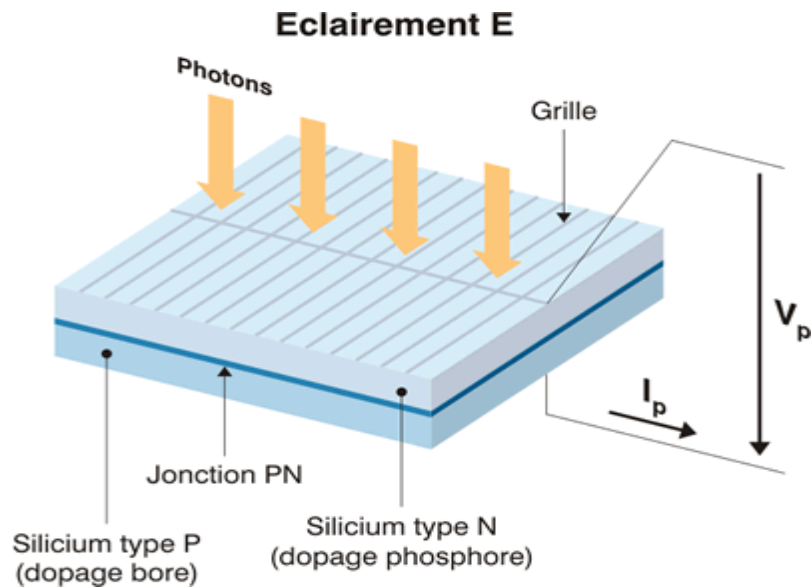


Figure II.7 Les Caractéristiques électriques des cellules et module .

II.8.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances

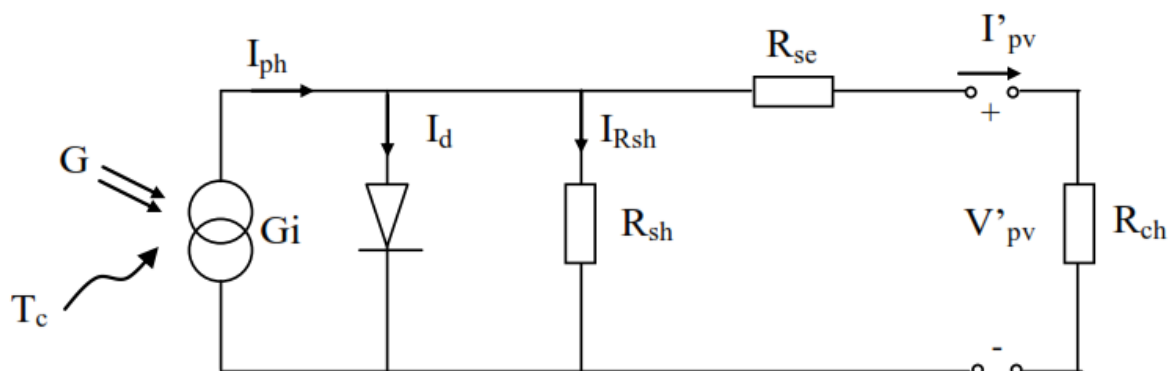


Figure II.8 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

G_i : Source de courant parfaite.

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui Intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

R_{se} : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

R_{ch} : Résistance qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré.

II.8.2 les paramètres fondamentaux d'une cellule solaire :

II.8.2.1 Courant de court-circuit (I_{sc})

C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ($V_{pv}=0$).

II.8.2.2 Tension en circuit ouvert (V_{oc})

Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_d = I_{ph}$) quand ($I_{pv}=0$). Elle reflète

II.8.2.3 Point de puissance maximale (P_{max})

C'est le point où la puissance dissipée dans la charge est maximale

$$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt}$$

Avec :

V_{opt} : La tension optimale.

I_{opt} : Le courant optimale.

II.8.2.4 Rendement maximum

C'est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{op} * I_{op}}{A_{pv} * G}$$

Où :

G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

A_{pv} : Surface effective des cellules.

V_{op} : Tension au point de puissance maximale.

I_{op} : Le courant au point de puissance maximale.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1000\text{W}/\text{m}^2$ d'une température ambiante de 25°C et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort [11].

II.9 Exemple de module photovoltaïque

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du module (I_{sc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température de 25°C , AM 1.5). Le tableau suivant présente les données d'un module photovoltaïque, de type SIEMENS SM 110-24.

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

Tableau II.1 paramètres du module type SIEMENS SM 110-24.

II.10 Modèle électrique de module photovoltaïque :

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant -tension pour l'analyse et l'évaluation

des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par le nombre de paramètres pris en compte

II.10.1 Modèle à une diode :

Le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (Figure II.9) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état de la longueur de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexion, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

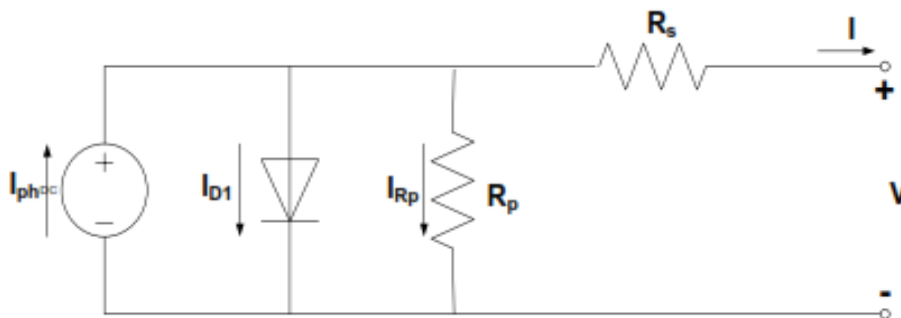


Figure II.9 Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

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

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

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

Où :

I_{ph} : Le courant photo-généré.

I_0 : Le courant de saturation sombre.

I : Le courant de saturation due à la recombinaison dans la couche de charge d'espace.

I_{Rp} : Courant circulant dans la résistance de dérivation.

R_s : Résistance série de cellules.

R_p : La résistance de la cellule (shunt).

A: Le facteur de qualité de diode.

q: La charge électronique, $1,6 * 10^{-19}$ C.

k: Constante, $1,38 * 10^{-23}$ J / K du Boltzmann.

T: la température ambiante, en degrés Kelvin.[4]

L'équation II.2 est non linéaire. En outre, les paramètres (I_{ph} , R_s , R_p et A) varient avec la température, l'éclairement et dépendent de la tolérance de fabrication.

Après avoir remplacé ces valeurs dans l'équation exponentielle unique (II.2), l'équation peut être obtenue [12]

$$0 = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qV_{OC}}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{OC}}{R_p} \quad (II.3)$$

Au point de court-circuit sur la courbe (I, V), $I = I_{sc}$ et $V = 0$. En utilisant l'équation (1), nous pouvons obtenir.

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qI_{sc} R_s}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{I_{sc} R_s}{R_p} \quad (II.4)$$

Au point de puissance maximale de la courbe IV, on a $I = I_{mpp}$ et $V = V_{mpp}$ Nous pouvons utiliser ces valeurs pour obtenir le suivant:

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{mpp} + I_{mpp} R_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_p} \quad (II.5)$$

La puissance transférée à la charge peut être exprimé sous la forme :

$$P = I.V \quad (\text{II.6})$$

$$P_{max} = V_{mpp}(I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{mpp} + I_{mpp} R_S)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_S}{R_P}) \quad (\text{II.7})$$

Une très bonne approximation, le courant photo-généré, qui est égal à I_{sc} , Est directement proportionnelle à l'éclairement énergétique, l'intensité de l'illumination sur la surface de la cellule photovoltaïque.

Ainsi, si la valeur I_{sc} est connu à partir de la fiche technique, sous la condition de test standard $G_0=1000\text{W/m}^2$ à la masse d'air (AM) = 1,5, puis le courant photo-généré à tout autre irradiation, G (W / m²), est donnée par:

$$I_{sc|G} = \left(\frac{G}{G_0} \right) I_{sc|G_0} \quad (\text{II.8})$$

II.10.2 Modélisation de module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque seule produit une tension de sortie inférieure à 1V, donc un certain nombre de cellules photovoltaïques sont connectés en série à obtenir une tension de sortie désirée. Lorsque les cellules connectées en série sont placées dans un cadre, il est appelé un module. Quand les cellules photovoltaïques sont connectés ensemble en série, le courant de sortie est la même que la cellule unique, mais la tension de sortie est la somme de la tension de chaque cellule. En outre, plusieurs modules peuvent être câblés en série ou en parallèle pour fournir la tension et le courant nécessaire. Le groupe de modules est appelé un tableau. La construction du panneau fournit une protection pour les cellules individuelles contre l'eau, la poussière, etc., c'est pour cela que les cellules solaires sont placées dans une encapsulation de verre plat.

La stratégie de modélisation d'un module PV ne diffère pas de la modélisation d'une cellule photovoltaïque. Elle utilise le même modèle de cellules photovoltaïques. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement paramètre de tension (telle que la tension en circuit ouvert) est différente et doit être divisé par le nombre de cellules. Un modèle électrique avec la complexité modérée est représenté dans la (figure II.10), et fournit des

résultats assez précis. Le modèle est constitué d'une source de courant (I_{sc}), une diode (D) et une résistance série (R_s). L'effet de la résistance parallèle (R) est très faible dans un seul module, ainsi le modèle ne diffère pas. Pour faire un meilleur modèle, il inclut également les effets de la température sur le courant de court-circuit (I_{sc}) et le courant inverse de saturation de la diode (I_0). Il utilise une seule diode avec le facteur diode idéalité fixé pour atteindre la meilleure courbe (I-V).

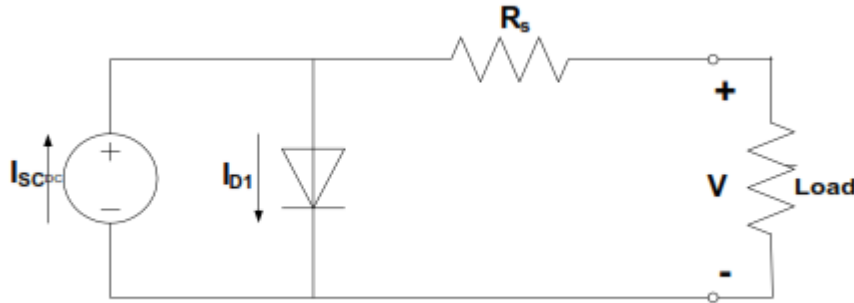


Figure II.10 Circuit équivalent utilisé dans les simulations

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left(q \left(\frac{V + IR_s}{AkT} \right) \right) - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

$$I_{sc|T} = I_{sc|T_{ref}} [1 + \alpha (T - T_{ref})] \quad (\text{II.10})$$

Ou : I_{sc} et T_{ref} sont donnée dans la fiche technique (mesurée sous irradiation de 1000 W/m^2), T_{ref} est la température de référence de la cellule photovoltaïque en Kelvin (K), généralement 298 K ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), α est le coefficient de température qui corrige I_{sc} . Qui est également donné par la fiche technique. Le courant de court-circuit (I_{sc}) est proportionnelle à l'intensité du rayonnement, ainsi I_{sc} à une irradiation donnée (G) est introduit dans l'équation (II.9).

Le courant inverse de saturation de la diode (I_0) à la température de référence (T_{ref}) est donné par l'équation (II.11) en considérant la diode idéalité, donne :

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left(\exp \left(\frac{qV_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right)} \quad (\text{II.11})$$

Évidemment cette caractéristique dépend fortement de l'éclairement et la température aux quels est soumis le générateur. On peut voir sur la figure ci-dessous l'allure générale des caractéristiques de la puissance en fonction de la tension pour différents éclairements (à gauche) et pour différentes températures (à droite)

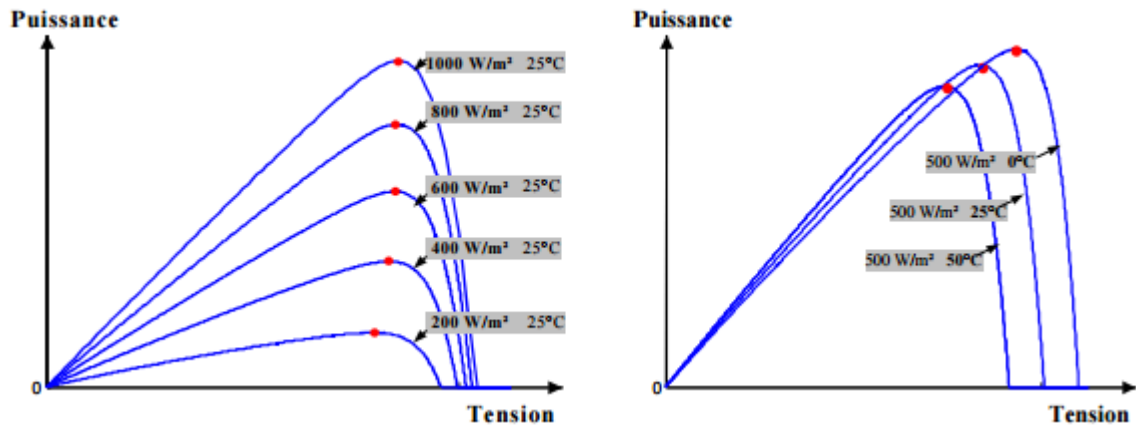


Figure II.11 : Exemple de réseau de caractéristiques puissance/tension d'un générateur photovoltaïque, à gauche pour différents éclairements, à droite pour différentes températures de jonction.

Sur chaque courbe, le point rouge représente le point de puissance maximale. On voit bien que pour un éclairement et une température donnés, il existe une valeur de la tension qui maximise la puissance produite par le générateur. Il peut donc être intéressant d'insérer un convertisseur de puissance entre le générateur photovoltaïque et sa charge pour assurer un fonctionnement à puissance maximale quelles que soient la charge et les conditions d'éclairement et de température, Ce convertisseur est un dispositif d'asservissement de la puissance couramment appelé à pilotage MPPT (Maximum Power Point Tracker)

II.11 Raccordement des cellules

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

II.11.1 Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

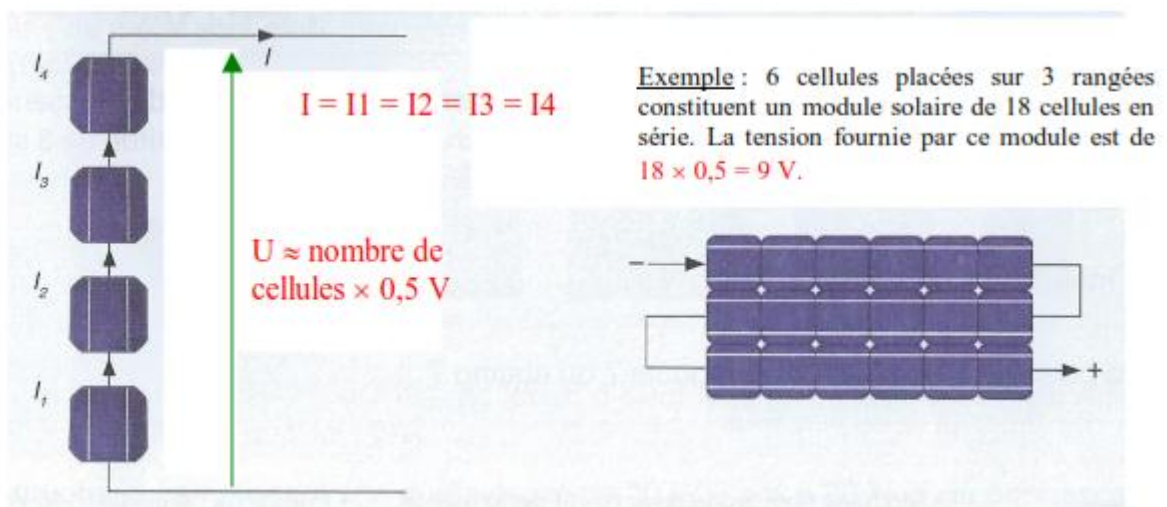


Figure II.12 exemple d'association série des cellules

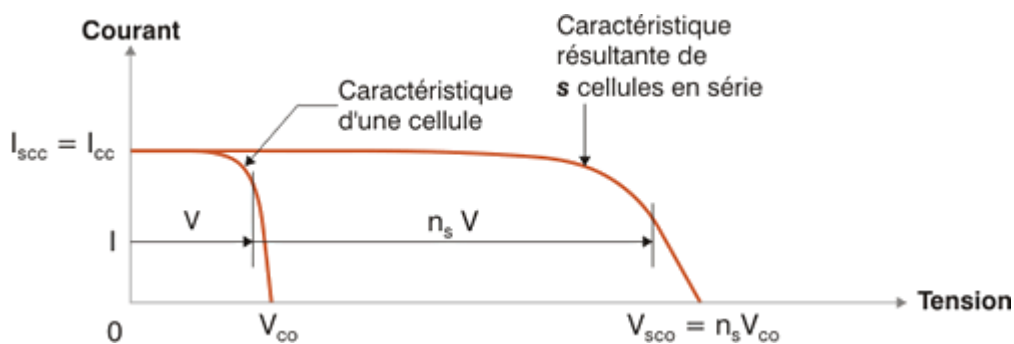


Figure II.13 caractéristique d'association série des cellules

II.11.2 Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s \cdot n_p$.

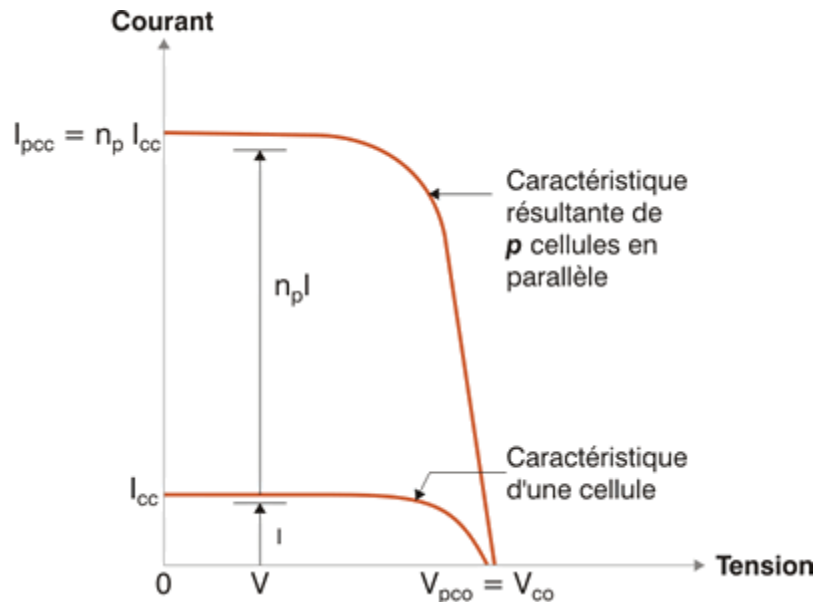


Figure II.14 : caractéristique d'association parallèle des cellules

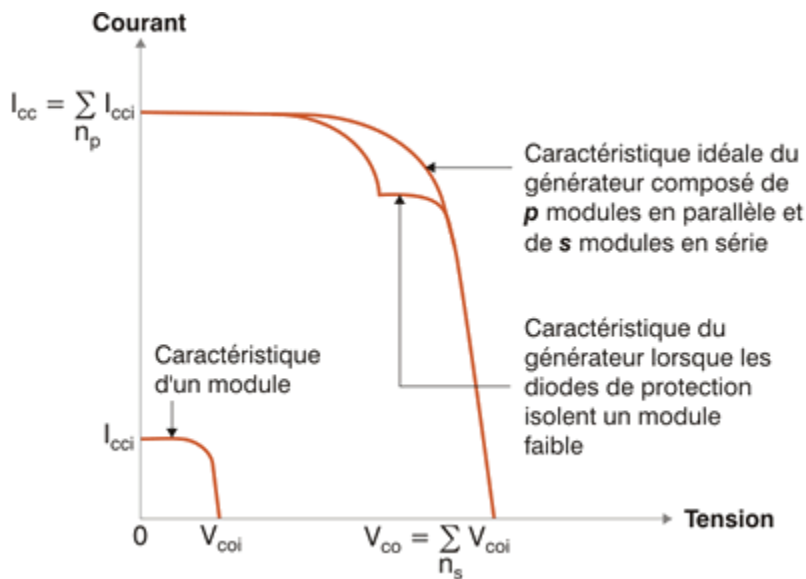


Figure II.15 : Caractéristique du générateur (idéale sans/avec intervention des diode de protection)

II .11.3 Les diodes de by-pass

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement,...).

Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante.

Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série. Les modules aujourd'hui commercialisés comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différents strings qui le composent.

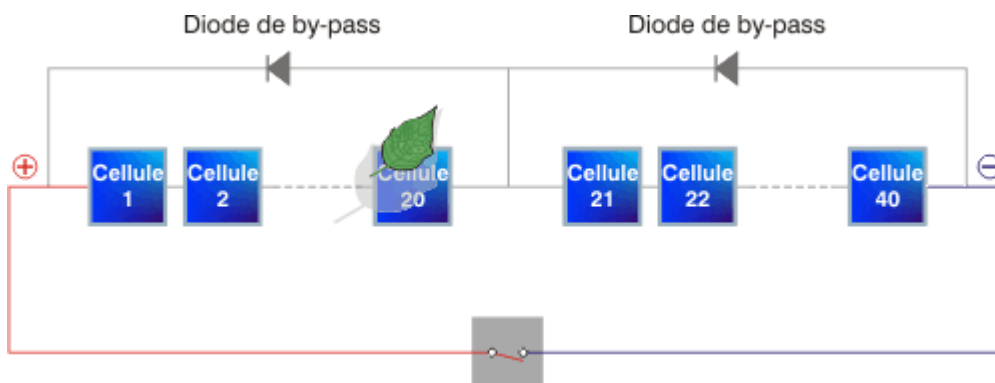


Figure II.16 : l'emplacement des diodes de protection dans l'association des cellules

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module :

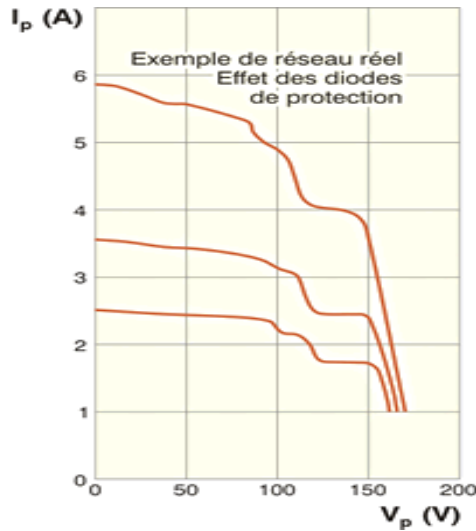


Figure II.17 : l'effet des diodes de protection

Pour ne pas induire inutilement ces pertes, il est donc très important que ces diodes de by-pass soient utilisées et placées en cohérence avec les ombres générées par l'environnement du module.

Conclusion

Dans ce chapitre on décrit les panneaux photovoltaïque, dont on a citer leur structures et conceptions ainsi que les différent types des installations, comme ana signalé les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque, et pour un meilleurs rendement notre panneau doit être adapter à un convertisseur, chose qu'on va présenter dans le prochaine chapitre.

Chapitre III

Étude du convertisseur et de sa commande

III.1 Introduction

On a vu précédemment que la puissance maximale générée par un module solaire dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Pour avoir une puissance maximale le module solaire doit générer une certaine tension et un certain courant de fonctionnement.

Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite de la puissance maximale «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [14].

Les batteries rechargeables sont largement utilisées dans les systèmes photovoltaïques autonomes pour emmagasiner le surplus d'énergie et pour alimenter les charges de faible et moyenne puissance. Les batteries de type plomb - acide sont de loin les plus employées en raison de leur faible coût, leur simple maintenance et leur adaptation à tout type d'application. Ces batteries sont cependant si fragiles devant les phénomènes de surcharge, de décharge profonde et les dérives de température et de courant qu'il faut leur associer un régulateur de charge approprié pour assurer leur protection. L'importance d'un régulateur de charge dans un système photovoltaïque autonome n'est donc plus à discuter. Il doit cependant être réalisé avec le plus grand soin pour répondre aux exigences de coût, de simplicité, de généralité et de fiabilité.

Le but de ce chapitre est l'étude des quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi que quelques méthodes MPPT utilisées dans la commande des convertisseurs DC-DC dans les systèmes photovoltaïques

III.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [17].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a que des bons rendements dans les hacheurs [17].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage (Figure III.1), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue.

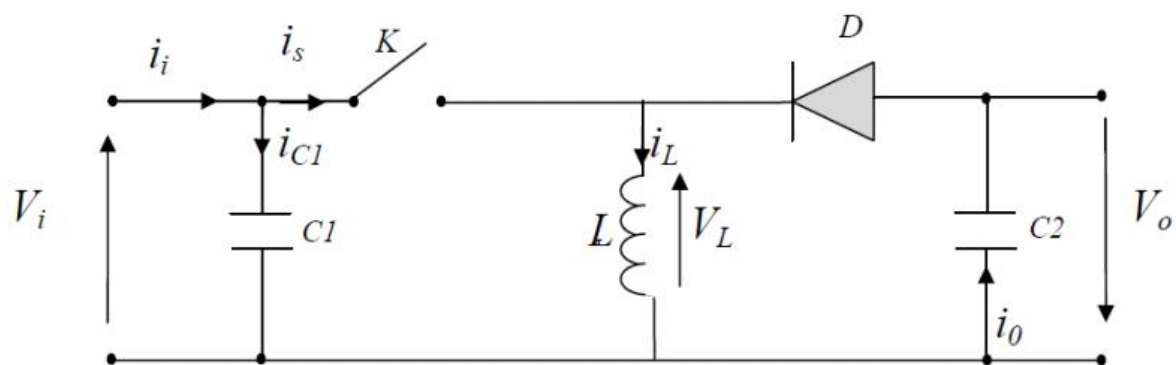


Figure III.1 schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure III.2), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

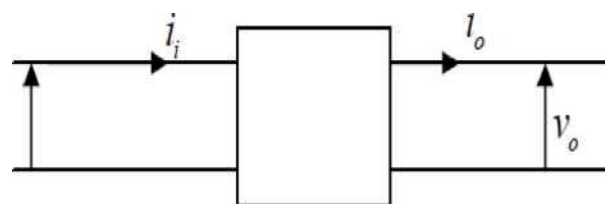


Figure III.2 schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure III.3). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-ou-rien (bloqué - saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est

bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [17].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $=dTs$ et un temps d'ouverture $= (1-d) Ts$. Où :

T_s : est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$

d : le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

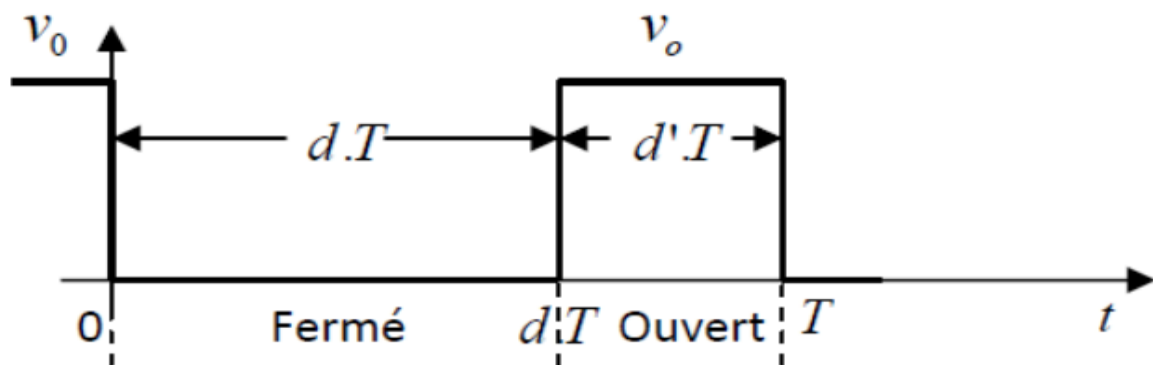


Figure III.3. Périodes de fermeture et d'ouverture d'un convertisseur.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges [18].

III.2.1 Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. La figure (III.4) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = \frac{v_o}{v_i}$ change avec le rapport cyclique du commutateur.

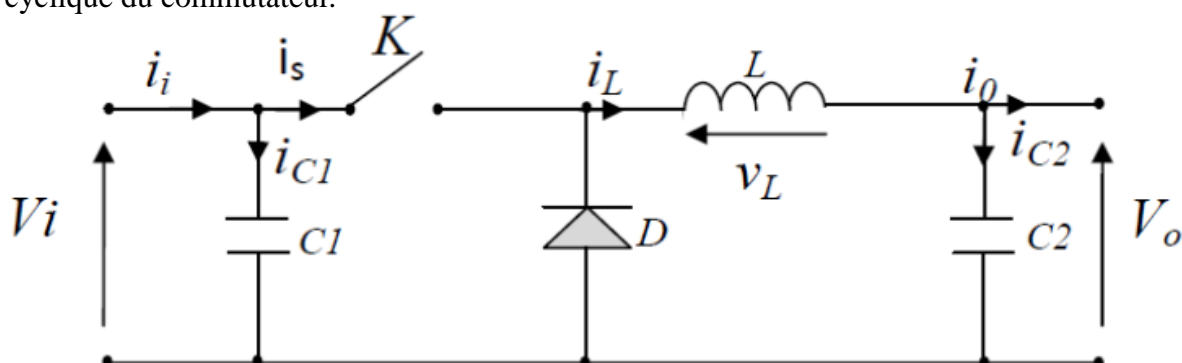


Figure III.4 schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (III.5) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant dT_s et l'interrupteur ouvert pendant $(1-d) T_s$

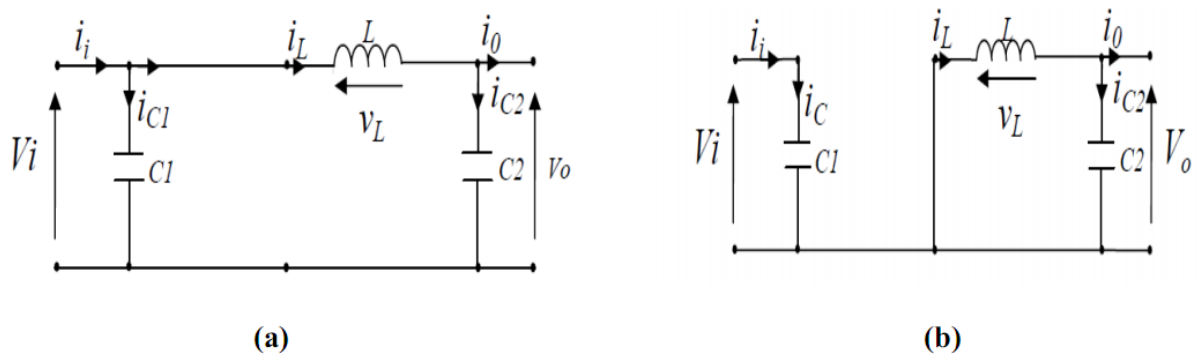


Figure III.5 schémas équivalent du hacheur dévolteur

(a) : k fermé (b) : k ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (III.5), on obtient les systèmes d'équations suivants [17]

Pour la première période dT_s

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (\text{II.1})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (\text{II.2})$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_0(t)$$

Après arrangement on obtient

$$I_0(t) = I_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt}$$

$$I_L(t) = \frac{1}{d} (I_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \quad (\text{II.3})$$

$$V_L(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_0(t))$$

III.2.2 Hacheur survolteur

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la figure (III.6). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

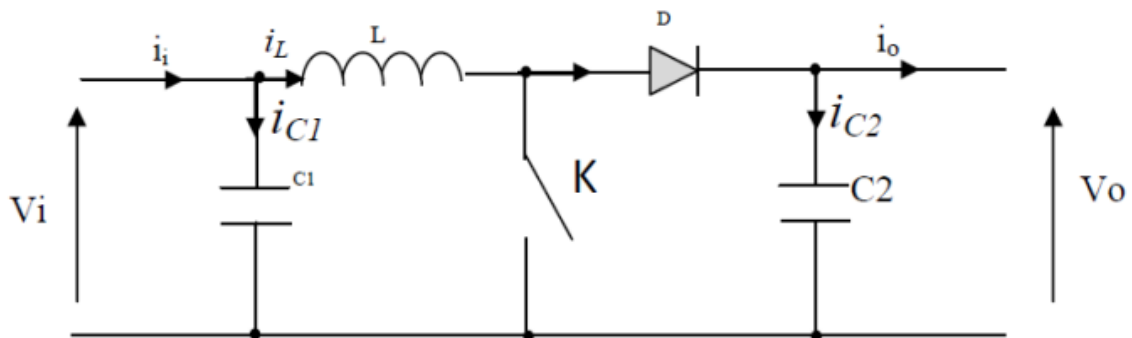


Figure III.6 Schéma de principe d'un convertisseur survolteur

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure III. 7) des deux phases de fonctionnement donne [17]

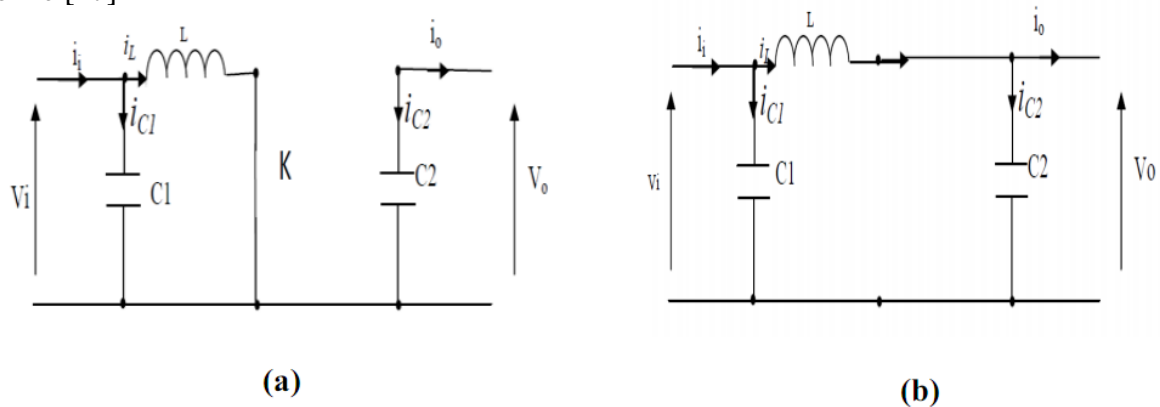


Figure III.7 schémas équivalent du hacheur survolteur

(a) : k fermé (b) : k ouvert

Pour la première période dT_s

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (II.4)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (II.5)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)$$

III.2.3 Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, son schéma de base est illustré par la figure (III.8)

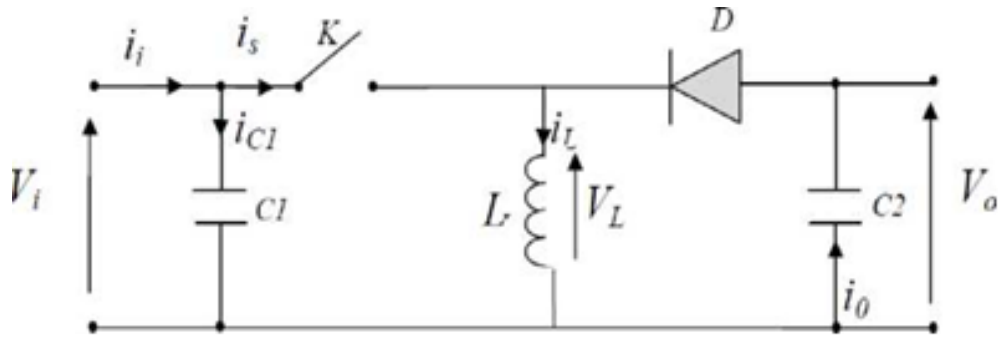


Figure III.8 Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (III.9) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnements [17].

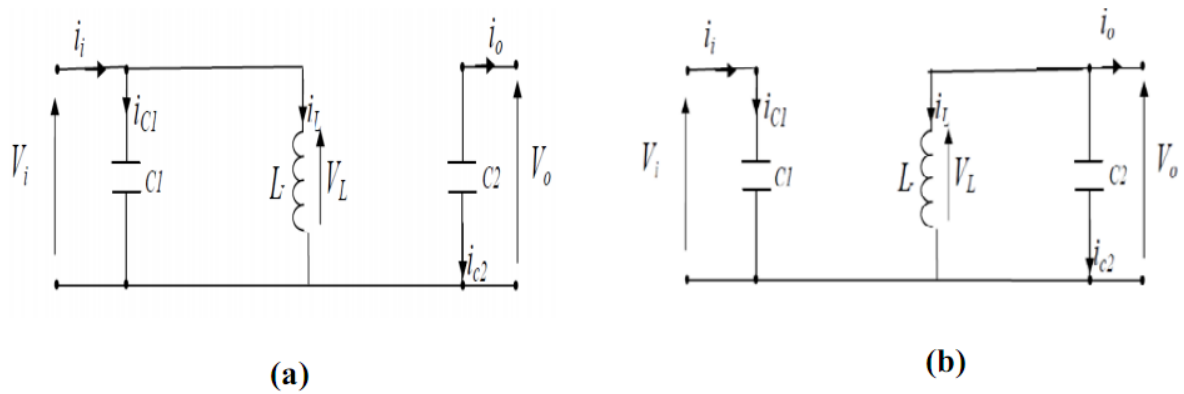


Figure III.9 Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur,

(a) : K fermé (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période dT_s

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_o(t) - I_L(t) \quad (II.6)$$

$$L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_o(t)$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_o(t) - I_L(t) \quad (\text{II.7})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_o$$

III.3 Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique, analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes.

La figure (III. 10) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.[16]

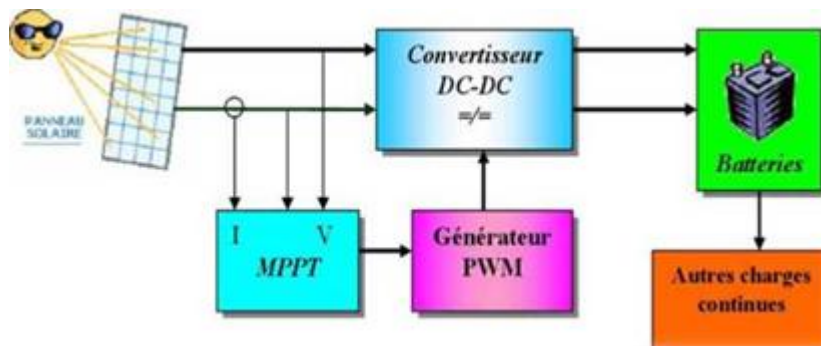


Figure III.10 schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{PV} = I_{PV} * V_{PV}$.

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel.

III.3.1 Algorithme d'incrémental de la conductance

Dans cet algorithme la dérivée de la puissance de sortie du panneau est calculée d'une autre manière. Elle est calculée en fonction de la tension V et sa différence dV et du courant I et sa différence dI [15].

Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche du point MPP et négative à droite.

La puissance du panneau solaire est donnée par

$$P = VI \quad (II.8)$$

La dérivé partielle $\frac{dP}{dV}$ est donné par

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (II.9)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} \frac{dI}{dV} \quad (II.10)$$

On définit la conductance de la source $G = \frac{1}{V}$ et l'incrémental conductance $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, les relations expliquent que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source G égale à l'incrémental conductance AG de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémental conductance AG et vice-versa, comme suit [18]

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV}$$

La figure (III. 11) présent le signe de dP pour différentes zones de fonctionnement.

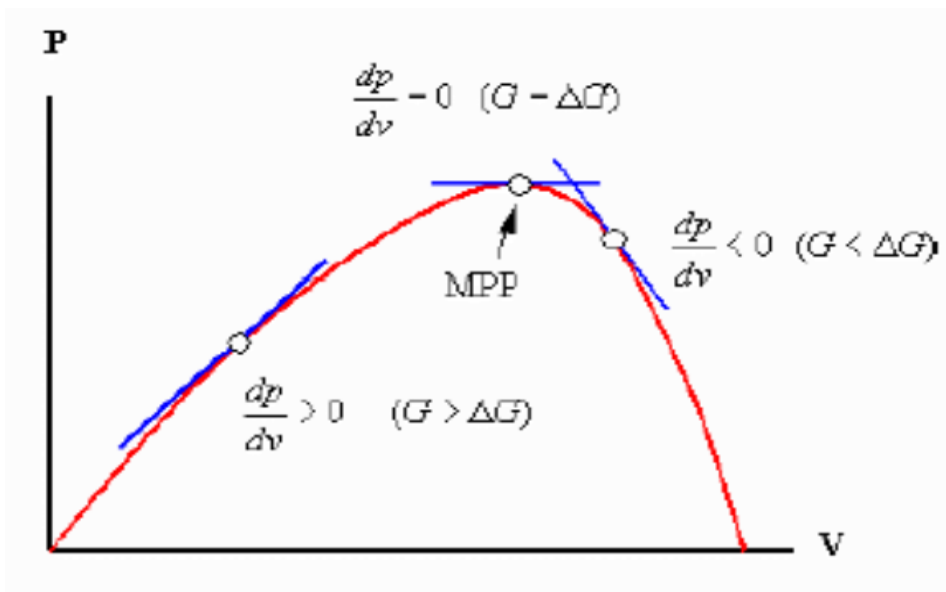


Figure III.11 Signe de dP pour différentes zones de fonctionnement

Les tensions et courants du panneau sont monitoires, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement. Cet algorithme implique un nombre important de calculs de dérivées

III.3.2 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairage et de la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{PV} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque [18].

La figure (III. 12) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent.

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentement de la perturbation. Si ce pas d'incrémentement est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [18].

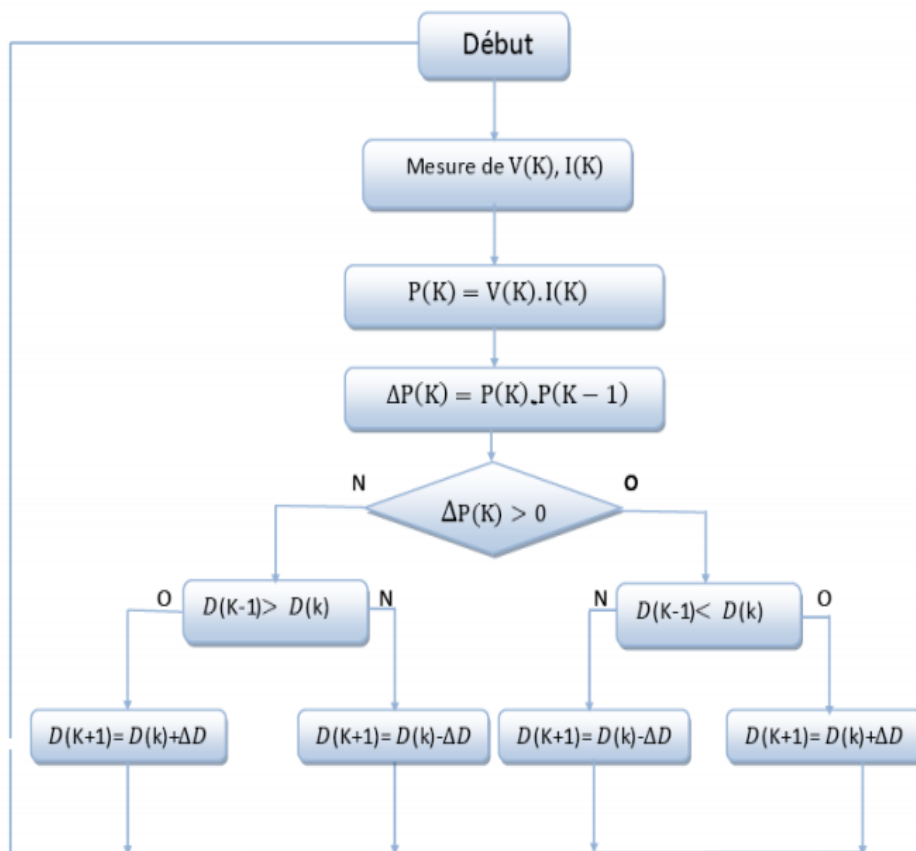


Figure III.12 organigramme de la méthode de perturbation et d'observation

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement se produit, on aura une augmentation de la puissance du panneau.

L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance.

III.4 Simulation du fonctionnement du convertisseur survolteur

Pour l'étude du convertisseur DC-DC, on a choisi de travailler avec le convertisseur survolteur, dit aussi hacheur boost. On a choisi ce type de convertisseur car c'est celui pour lequel on a opté pour l'utiliser dans l'association avec le panneau photovoltaïque. On va, donc, procéder à la présentation du montage du convertisseur sous SymPowerSyst puis simuler son fonctionnement pour deux valeurs du rapport cyclique α . L'objectif est de mettre en évidence l'évolution du point de fonctionnement (V, I) à l'entrée et à la sortie du convertisseur.

III.4.1 Présentation du modèle à simuler :

La figure ci-dessous représente le modèle du convertisseur survolteur à simuler. On a opté pour une tension d'alimentation continue, et on désire voir l'évolution des grandeurs tension, courant et puissance à l'entrée et la sortie du convertisseur pour deux valeurs de rapport cyclique (d) et cela pour alimenter une résistance électrique d'une valeur $R=100\Omega$.

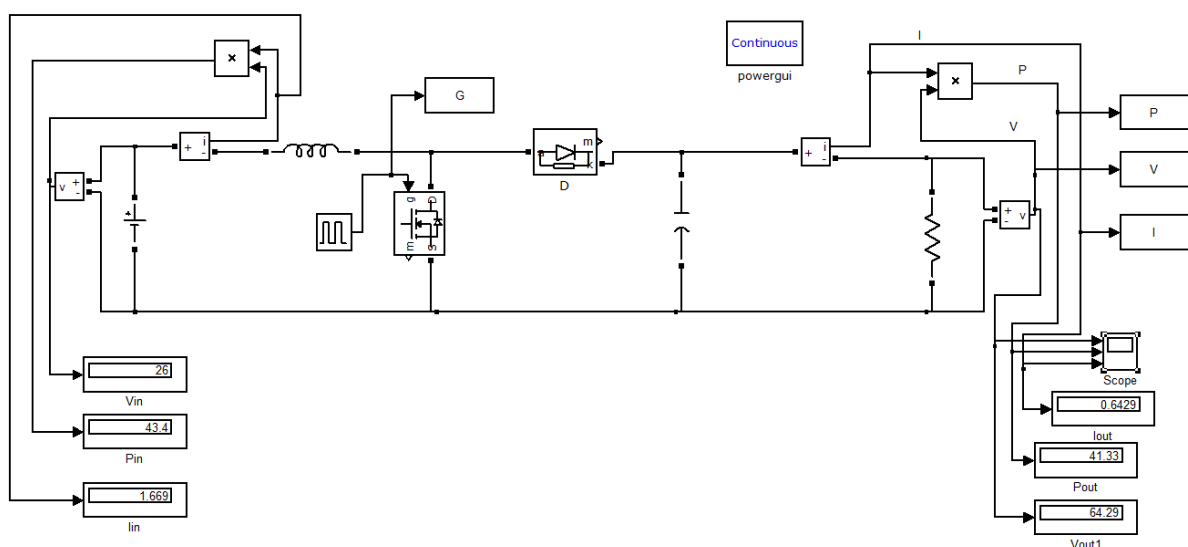


Figure III.13 Le modèle du convertisseur à simuler

III.4.2 Les résultats de simulation

On a commencé par choisir deux valeurs pour le rapport cyclique d , ($d=70\%$ et $d=40\%$) :

➤ Pour $d=0,70$:

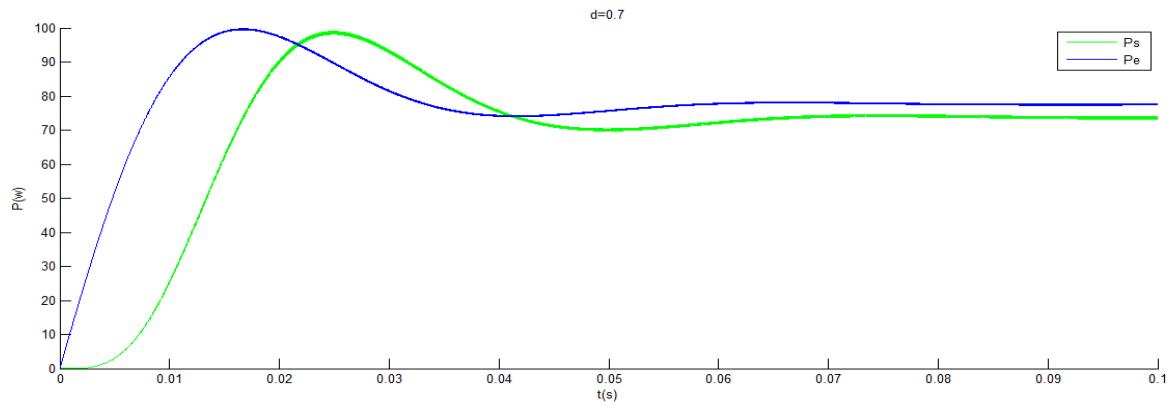


Figure III.14 L'évolution de la puissance à l'entrée et à la sortie du convertisseur

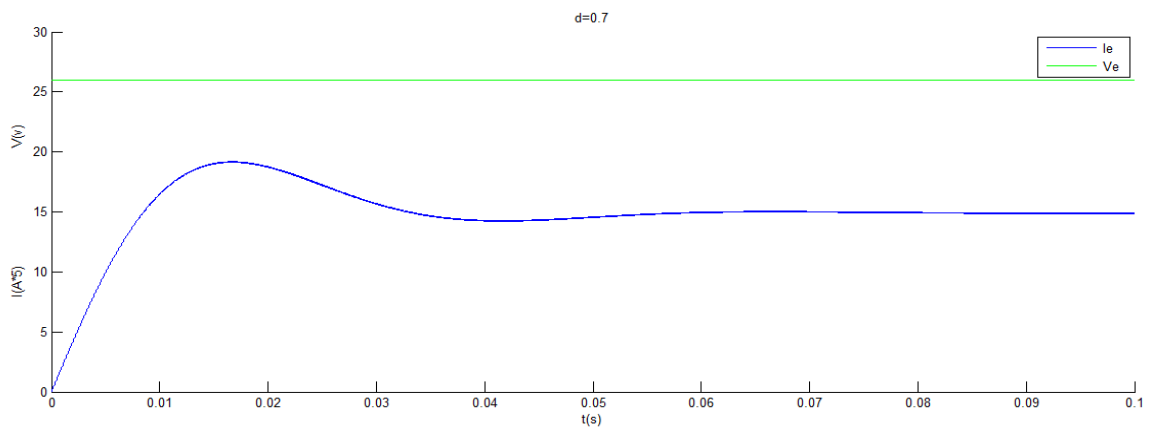


Figure III.15 L'évolution du courant et de la tension à l'entrée du convertisseur

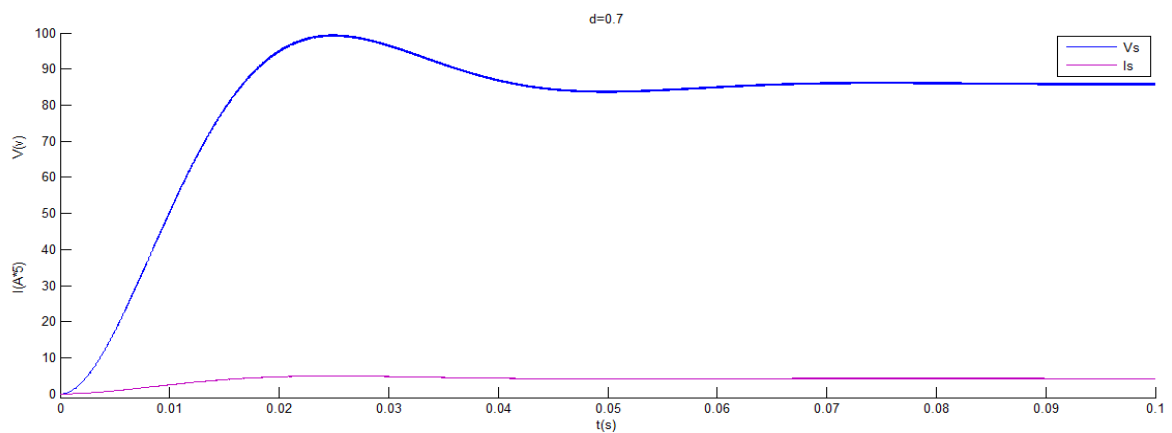


Figure III.16 L'évolution du courant et de la tension à la sortie du convertisseur

➤ Pour $d=0,4$:

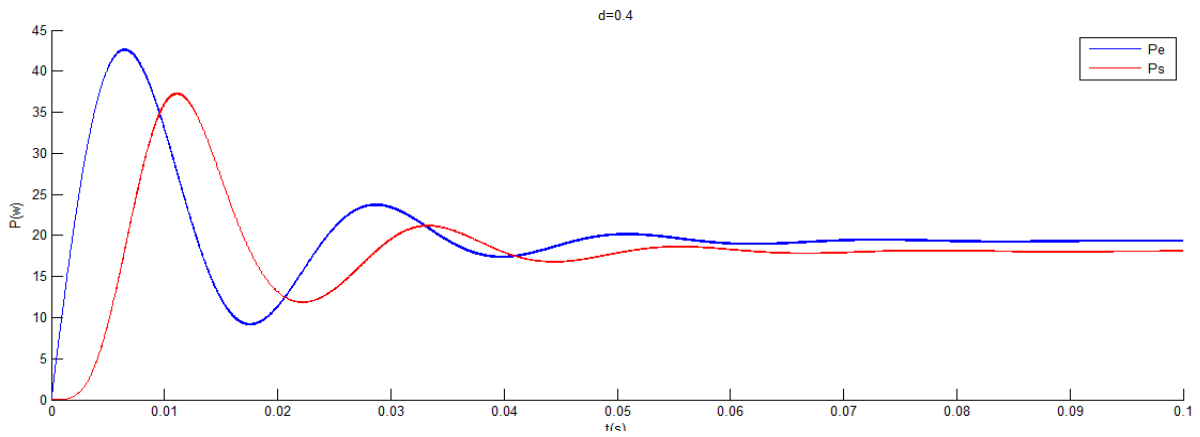


Figure III.17 L'évolution de la puissance à l'entrée et à la sortie du convertisseur

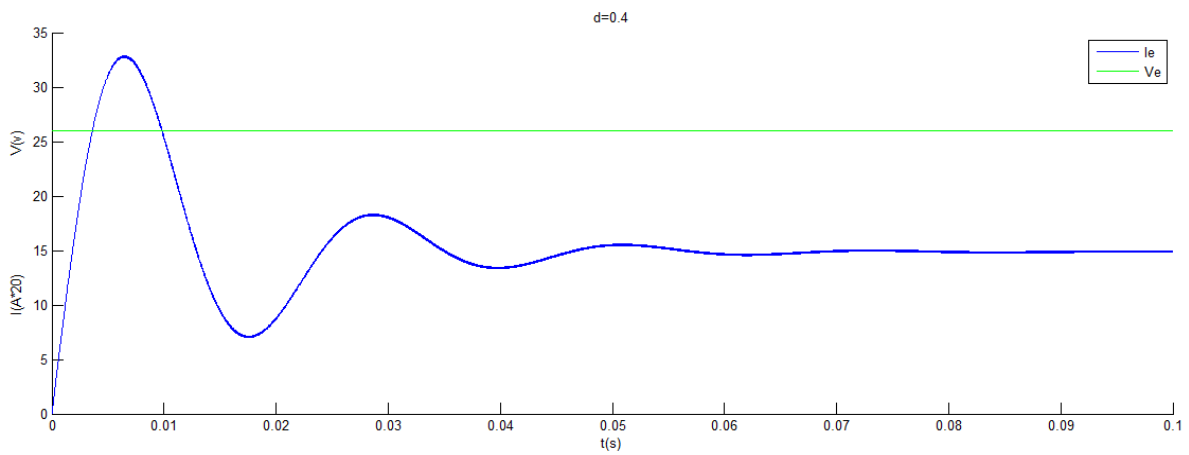


Figure III.18 L'évolution du courant et de la tension à l'entrée du convertisseur

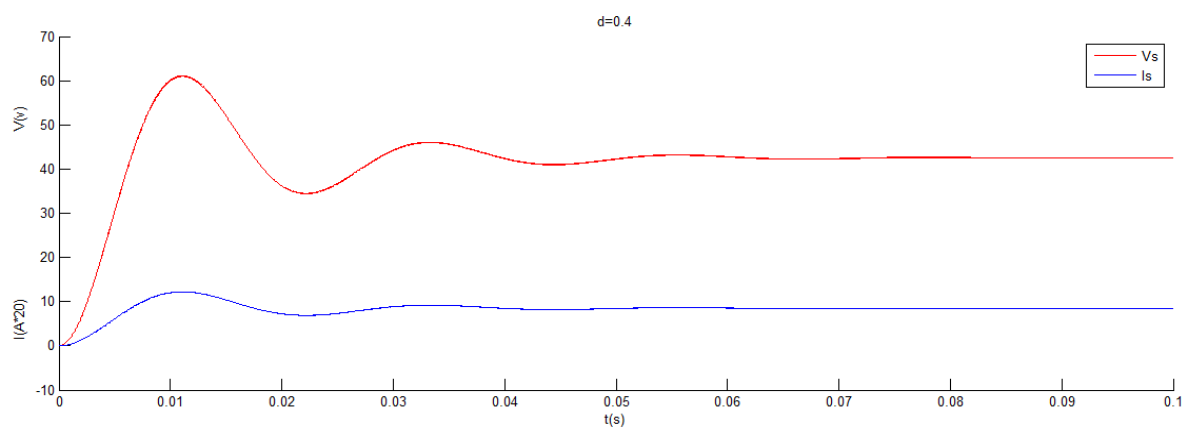


Figure III.19 L'évolution du courant et de la tension à la sortie du convertisseur

III.4.3 Interprétation des résultats de simulation

La résistance alimentée par le convertisseur DC-DC est $R=100\Omega$. Pour la valeur du rapport cyclique $d=0.7$, On remarque que la puissance dissipée dans la résistance est de l'ordre de 80Watt, voir figure III.14. En comparant cette valeur à la valeur de la puissance à l'entrée du hacheur on constate que les deux puissances sont très proches, ce qui signifie que les pertes de puissance dans le hacheur sont très faibles.

Le point de fonctionnement du système, à son entrée, est donné par la figure III.15. Le courant d'entrée (I_e) est légèrement supérieur à la valeur de 3A et la tension $V_e=26V$ alors qu'à la sortie, voir figure III.16, le point de fonctionnement est donné par $I_s= 1A$ et $V_s=80V$.

On ne constate que le convertisseur a bien pu porter la tension de sortie à une valeur supérieure à celle qui a été fixée à son entrée. Le convertisseur fonctionne bien en survolteur.

Pour l'autre valeur du rapport cyclique, $d=0,4$, La puissance dissipée aux bornes de la charge a bien diminuée et que l'écart entre la puissance d'entrée et de sortie est très faible, comme pour $d=0,7$, voir figure III.17.

Toujours pour $d= 0,4$, on remarque aussi que les deux points de fonctionnement à l'entrée et à la sortie changent, par rapport à $d=0,7$. Le convertisseur fonctionnant en survolteur, la tension à la sortie est bien supérieure à la tension à l'entrée.

Pour les deux valeurs du rapport cycliques (d), le courant à la sortie du convertisseur est toujours inférieur au courant à l'entrée. Pour un convertisseur DC-DC, fonctionnant en survolteur, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension à l'entrée. Et pour que la puissance se maintienne constante, à quelques pertes près, il faut bien que le courant à la sortie diminue.

Vu le comportement du convertisseur, l'intérêt qu'il suscite pour son utilisation dans les systèmes photovoltaïque est bien justifiée.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques topologies de base des alimentations à découpage, qui ne sont rien d'autres que des convertisseurs continu-continu. Comme le convertisseur survolteur, convertisseur dévolteur et convertisseur dévolteur-survolteur.

On a présenté aussi la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur la contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémention de la conductance et la méthode de perturbation et observation.

On a terminé le chapitre en procédant à la simulation du convertisseur DC-DC fonctionnant en survolteur.

Chapitre IV

Simulation du système GPV-Batterie

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on abordera le système GPV-Batterie, pour cela, on va procéder à la simulation des panneaux photovoltaïques dont le modèle a été présenté au chapitre II. Puis on présentera le modèle des batteries photovoltaïques, avant de procéder à la simulation de l'ensemble sous Matlab/Simulink.

Il est intéressant de comprendre le comportement de la batterie, en charge et décharge pour trancher la question du dimensionnement de cette dernière et l'adapter à la charge. De même pour que le courant de charge que doit fournir le GPV pour pouvoir charger la batterie durant un temps limité, le temps durant lequel l'énergie photovoltaïque est disponible, soit connu. Et

c'est la valeur de ce courant qui sera utilisé pour qualifier la puissance de la batterie comme étant suffisante.

L'utilisation des méthodes de poursuite des puissances maximale peut, évidemment, permettre l'optimisation du dimensionnement du système.

IV.2 Simulation du générateur PV

IV.2.1 Présentation du modèle simulé

Nous présentons ci-après la simulation d'un générateur photovoltaïque d'abord dans des conditions standard puis avec l'influence de deux paramètres qui sont l'éclairement et la température.

Le modèle simulé sous Matlab/Simulink est présenté par la figure ci-après. On a comme paramètre d'entrée, la température et l'éclairement. On s'intéresse à l'évolution des caractéristiques I(V) et P(V) du module à l'état standard : ($T=25C^{\circ}$ et $E =1000W/m^2$) puis pour un éclairement qui varie entre 200 et $1000W/m^2$ et enfin pour température qui change entre 0 et $60^{\circ}C$. Ces paramètres seront introduit dans Matlab-fonction (f), Voir annexe, Puis pour considérer les résistances séries et parallèles, on a utilisé un générateur de courant contrôlé. Pour récupérer les grandeurs de sortie, il suffit d'effectuer des mesures dans le bloc puissance.

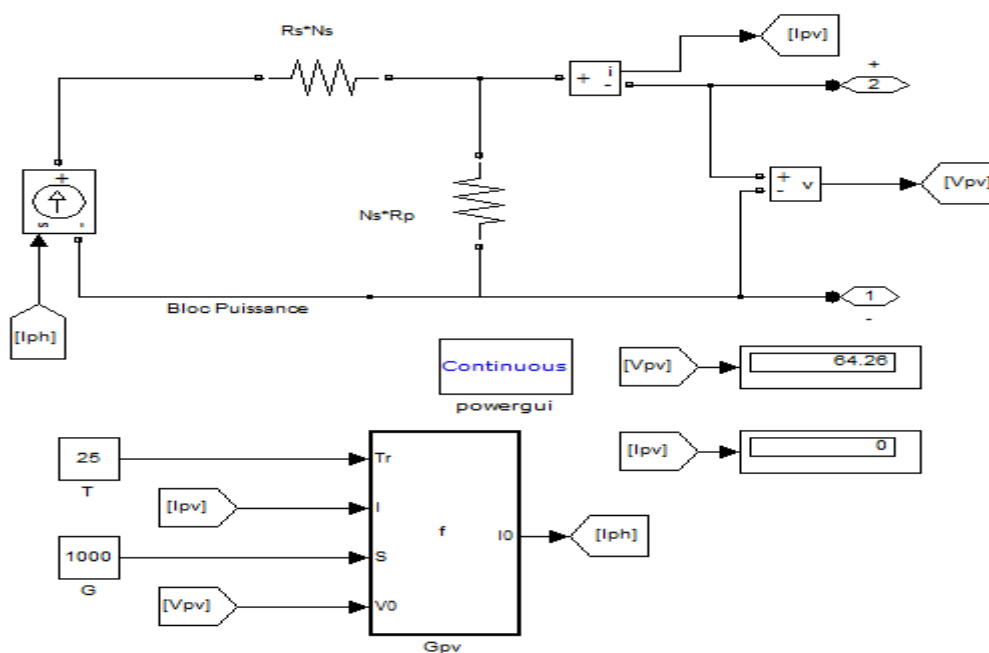


Figure IV.1 model de panneau photovoltaïque sous Matlab

IV.2.2 Les résultats de simulation

Le résultat obtenu lors de la simulation sous MATLAB peut être représenté comme suit :

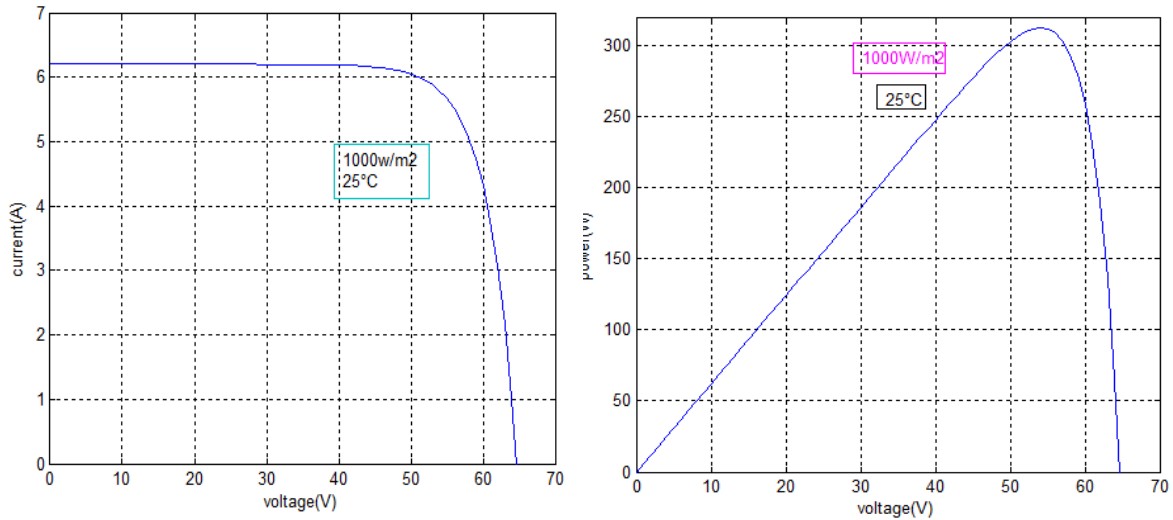


Figure IV.2 caractéristique I(V) et P(V) dans les conditions standard $T=25^\circ\text{C}$ $E=1000 \text{ W/m}^2$

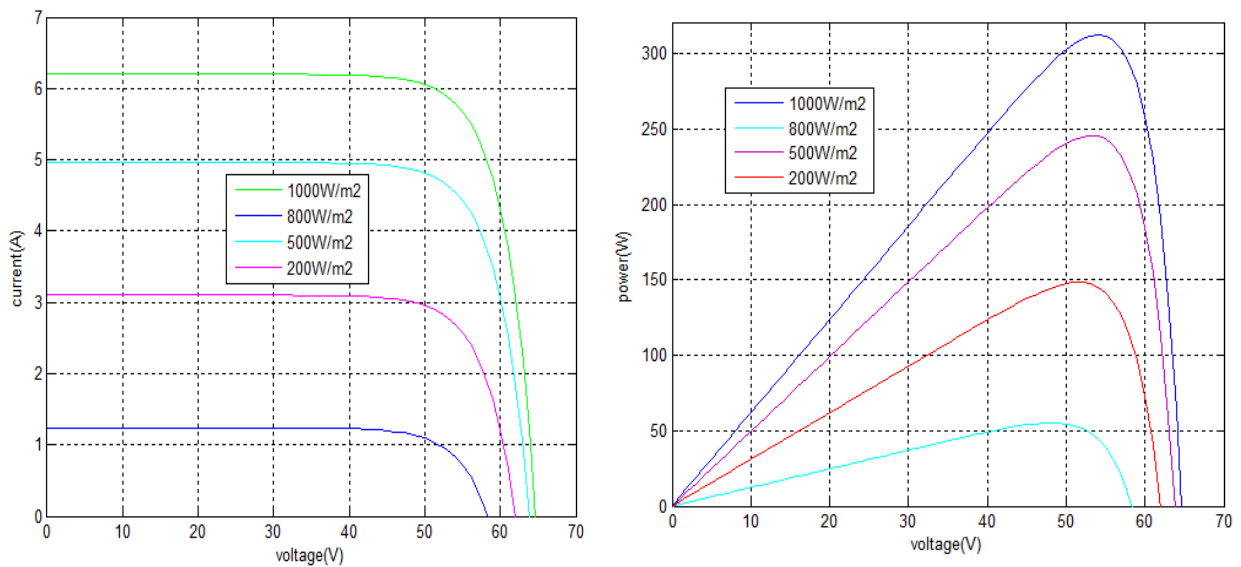


Figure IV.3-a influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

Figure IV.3-b influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)

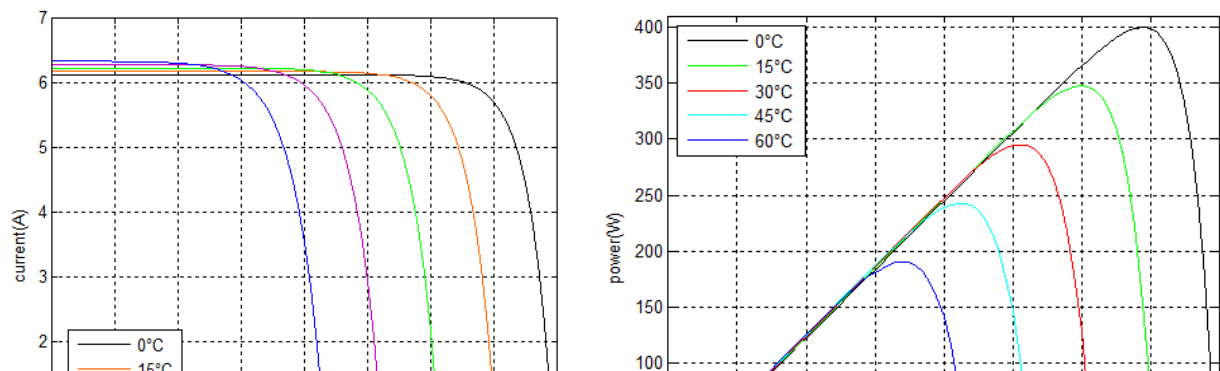


Figure IV.4-a influence de la température sur la caractéristique I(V)

Figure IV.4-b influence de la température sur la caractéristique P(V)

IV.2.3 Interprétation des résultats de simulation

La simulation du panneau photovoltaïque dans les conditions standard a permis de reproduire les courbes caractéristiques de ces derniers. Disponible abondamment dans la littérature, il est facile de conclure que le modèle utilisé est bien valide. D'après la figure IV.1, le G_{pv} simulé fournit une puissance maximale légèrement supérieure à 300W et, approximativement, comme courant de court-circuit $I_{scr} = 6.2$ A et $V_{oc} = 65$ V.

Influence des paramètres sur les caractéristiques est représenté par les figures IV.2 et IV.3. On voit bien que pour chacune des valeurs de l'éclairement correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir le panneau solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à une chute d'éclairement. La simulation a été faite pour les valeurs de l'éclairement suivantes : ($W = 1000$ W/m², 800W/m², 500W/m², 200W/m²) et à une température de $T = 25$ C°.

Comme on constate, aussi, que la courbe courant tension évoluant au fil du soleil ainsi que l'illustre la figure IV.2 dans laquelle le courant de court-circuit diminue avec l'éclairement, alors que la valeur de la tension à vide reste la même et le point de fonctionnement optimale se déplace sur une droite à peu près constante. Toujours pour une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

Pour la température, voir les figures IV.3, Pour les différentes températures, correspond, pour chacune d'elle, une puissance maximale que peut fournir le panneau photovoltaïque. Plus la température est élevée, moins cette puissance est importante.

Concernant, le courant de court-circuit, c'est l'inverse qui est constaté. Plus la température est élevée plus ce courant I_{scr} augmente légèrement. Contrairement au I_{scr} , ce qui est constaté pour la tension à circuit ouvert V_{oc} , c'est que à chaque fois que la température augmente, V_{co} baisse et sensiblement, voir figure IV.3.b.

IV.3 Principe de la connexion directe source PV- charge

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque GPV et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du GPV. Cette énergie est dépendante comme on a vu précédemment fortement de l'éclairement, de la température. La connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre.

Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. Il faut s'assurer, auparavant, que la charge accepte bien la connexion directe au générateur photovoltaïque : c'est le problème de dimensionnement.

Le principe du couplage direct GPV-Charge repose sur le transfert de la puissance de sortie de la source photovoltaïque vers l'équipement à alimenter, sans aucun système intermédiaire.

Ce fonctionnement est reconnu sous la nomination : fonctionnement au fil du soleil. Le point de fonctionnement est particulièrement dominé par plusieurs facteurs à savoir :

- ✓ la charge.
- ✓ les conditions de fonctionnement : éclairement et température.
- ✓ les types de connexions établies des modules photovoltaïques (parallèle, série, mixte).

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique courant-tension $I-V$ du GPV et celle de la charge. Les caractéristiques électriques d'un GPV peuvent changer rapidement en fonction de l'éclairement solaire, la température et, à long terme, du vieillissement des cellules.

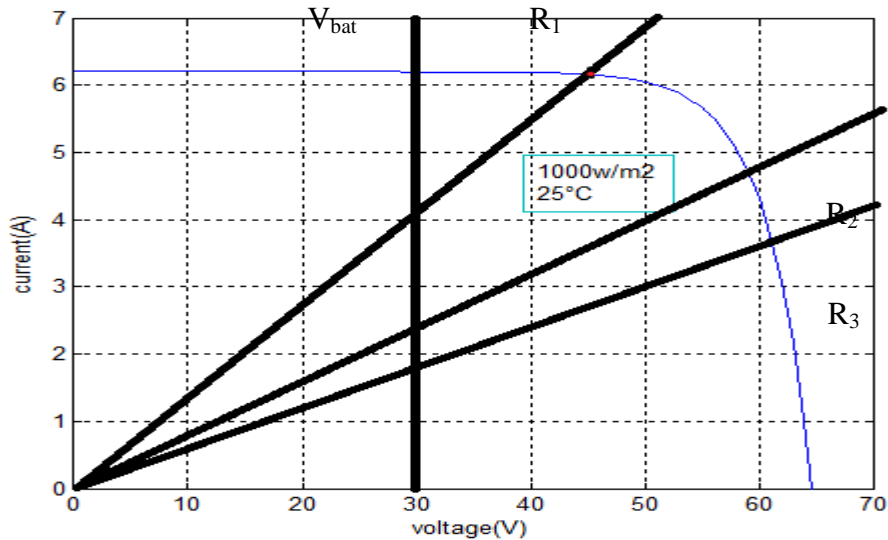


Figure IV.5 Caractéristique GPV-Charge

La figure ci-dessus représente les caractéristiques du GPV et différentes charge. Le point de fonctionnement est toujours le point de l'intersection entre la caractéristique du GPV et de la charge (Résistance, Batterie). Quand la charge est adapté, on peut avoir un fonctionnement avec une puissance optimale.

IV.4. La batterie de stockage

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur du système de batterie. Il permet aussi de résoudre le choix de la taille du système à installer.

IV.4.1 Modélisation de stockage

Dans ce travail, on a utilisé un modèle qui permet de suivre l'évolution de la tension de la batterie et du courant de charge ainsi que la paramètre SOC (State Of Charge : l'état de charge)

Quand la tension du générateur PV est plus grande que celle des batteries, ces dernières sont à l'état de charge, quand c'est le contraire, la batterie va se décharger à travers la charge branchée à ces bornes.

IV.4.1.1 Modèle de la charge de la batterie

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Le schéma électrique de la batterie est représenté dans la figure IV.4, qui suit :

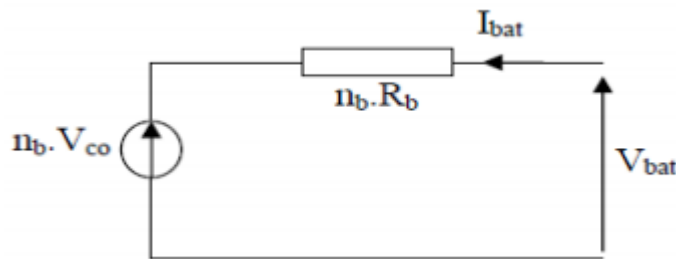


Figure IV.6 Le modèle électrique équivalent de la batterie

La figure IV.4 représente la batterie en situation de charge. En situation de décharge, c'est le courant qui change de sens.

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation qui donne l'évolution de la tension de la batterie V_{bat} , comme suit :

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t)$$

Où :

- $V_{bat}(t)$ est la tension de circuit ouvert au temps t ;
- $R_{bat}(t)$ est la résistance interne de batterie.

La tension de circuit ouvert V_{co} est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge, tel que :

$$V_{co}(t) = V_f + b \cdot \log(\text{SOC}(t))$$

Où :

- V_f est la force électromotrice ;

- b est une constante empirique.

La variation de la résistance interne d'une batterie, $R_{bat}(t)$ est principalement dû à deux composants, à savoir, la résistance de l'électrode, et la résistance de l'électrolyte. On peut donc écrire la résistance de la batterie comme suit :

$$R_{bat}(t) = R_{electrode} + R_{electrolyte}$$

La variation de R électrode et R électrolyte en fonction de l'état de charge SOC peuvent être exprimées par les relations suivantes :

$$R_{electrode} = r_1 + r_2 \cdot (SOC(t))$$

$$R_{electrolyte} = [r_3 - r_4 \cdot (SOC(t))]^{-1}$$

Où r_1 , r_2 , r_3 et r_4 sont des constants empiriques, ces constantes ont des valeurs différentes pour le mode de charge et décharge. Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètres	Mode de charge	Mode de décharge
v_f	13.250 V	12.662 v
b	0.810	0.724
r_1	0.062 ohms	0.055ohms
r_2	0.046 ohms	-0.010 ohms
r_3	95.638 ohms ⁻¹	4.270 ohms ⁻¹
r_4	52.671ohms ⁻¹	-100.730 ohms ⁻¹

Tableau représentant les caractéristiques empiriques de la batterie

IV.5 Simulation de la charge de la batterie avec le GPV

IV.5.1 Présentation du modèle à simuler

Le modèle du GPV et de La batterie étant développés, on va procéder à la simulation de la charge de la batterie avec le générateur.

La figure ci-dessous représente le bloc GPV-Batterie sous Simulink, pour plus de détail voir annexe.

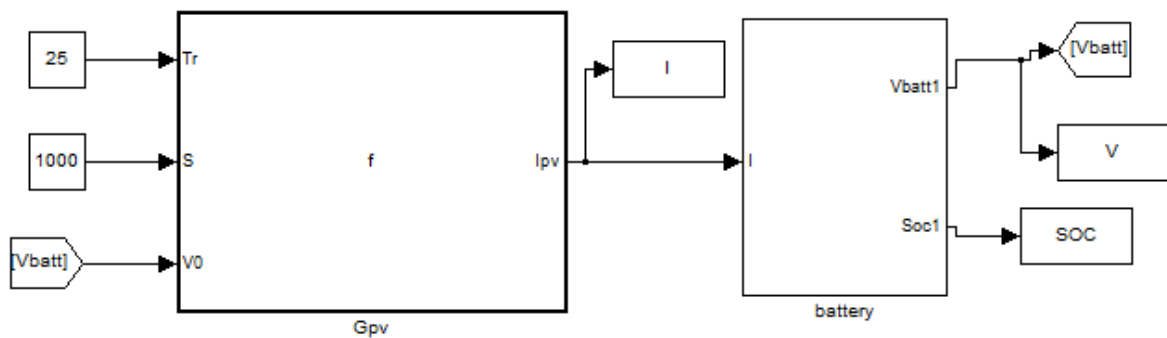


Figure IV.7 Le système GPV-Batterie sous simulink

Considérant le point de fonctionnement optimal du panneau photovoltaïque, on peut dire que la batterie est adaptée au panneau si la tension V_f de celle-ci est aux voisinages de la tension qui correspond à la puissance maximale débitée par le panneau.

C'est obéissant à cette logique que le nombre de batteries n_{bat} est pris égale à 4. C'est pour cela que les autres paramètres de la batterie seront aussi adapté au nombre de batterie élémentaires considérée.

IV.5.2 Les résultats de simulation :

Comme résultats de simulation, on a visualisé l'évolution de I_{bat} , V_{bat} et l'état de charge, SOC.

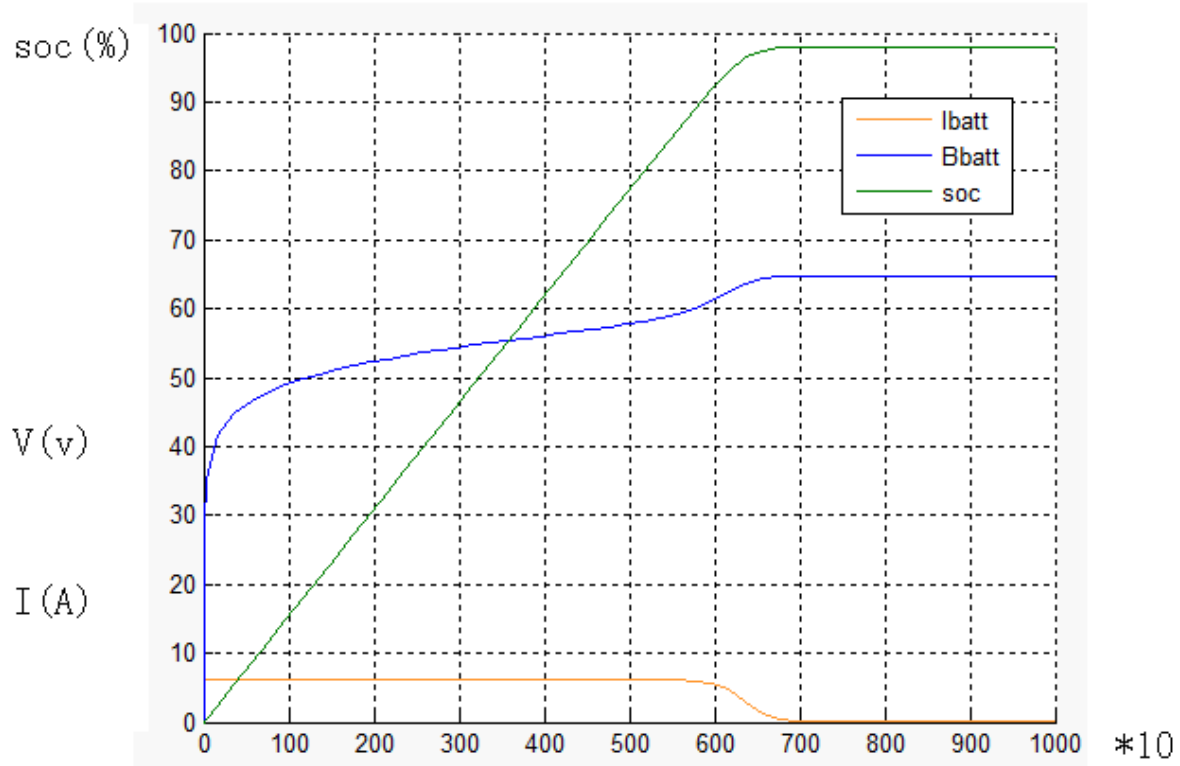


Figure IV.8 Courbes caractéristiques de la recharge de la batterie

IV.5.1.1 Interprétation des résultats de simulation

La figure IV.6 représente les différentes caractéristiques de la batterie en état de recharge. Au premier lieu, on l'évolution du paramètre de l'état de charge, SOC, qui évolue jusqu'à presque 100% pour indiquer que la batterie est bien chargée. Au deuxième lieu, on relève aussi l'évolution de la tension aux bornes de la batterie, V_{bat} qui atteint la tension maximale de 65 V, avec une évolution de la tension assez rapide aux derniers instants de la recharge. Cela est dû au courant qui s'annule.

L'évolution du courant est aussi intéressante à suivre. On constate que ce courant est au voisinage de 6A, au départ, et cela correspond au courant que fournit le panneau photovoltaïque quand la tension aux bornes de la batterie, qui est aussi celle aux bornes du GPV est inférieure à la tension optimale de ce dernier. Au final, le courant va baisser assez rapidement, quand la tension aux bornes de la batterie atteint puis dépasse la tension optimale du GPV. La rapidité avec laquelle cette dernière baisse correspond à la pente assez raide avec laquelle le courant dans la caractéristique $I(V)$ du panneau, diminue.

IV. 6 Conclusion

Dans ce chapitre on a procédé à la présentation de la simulation du GPV pour valider le modèle utilisé, et ainsi l'utiliser pour simuler la recharge d'une batterie.

La tension V_f de la batterie utilisée est au voisinage la tension optimale du GPV, ce qui permet une recharger correcte. Les résultats qu'on a obtenus concernant l'évolution de l'état de charge ainsi que le courant de charge sont acceptables.

Quand pour certaines batteries le courant de charge est maximisé, des dispositions supplémentaires doivent être prises pour protéger la batterie. Certain régulateur peuvent prendre en charge cette fonctionnalité.

Conclusion generale

Le travail qu'on a présenté porte une modélisation et simulation de fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) utilisé pour recharger une batterie. Dans un premier temps, on a abordé des généralités sur les systèmes de stockage électrochimiques leurs fonctions ainsi que leur utilité.

On a présenté, dans un deuxième temps des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV. Ainsi que le générateur photovoltaïque et ses performances.

Comme, on a, aussi, étudié quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on a aussi abordé les différentes méthodes utilisées pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement, On a présenté, par exemple, les méthodes MPPT basées sur la contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrémentatation de la conductance et la méthode de perturbation et observation. Cette dernière méthode est celle qu'on a mis en avant dans ce travail à cause de sa simplicité, et par le fait qu'elle n'exige seulement que des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque.

Par la suite, on s'est intéressé à la modélisation du système photovoltaïque. Pour cela, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV puis celui de la batterie. Cette dernière représente la charge à connecter au GPV.

Après les modélisations, on a effectué les simulations d'abord le convertisseur survolteur, puis le panneau photovoltaïque (GPV) et finalement le panneau photovoltaïque associé à la batterie.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut mettre en évidence le rôle que peut jouer le convertisseur DC-DC. D'abord, ce dernier fonctionne bien en survolteur, et en ayant la possibilité de moduler la puissance qui s'écoule il peut permettre au système GPV de fonctionner à une puissance optimale.

Concernant le GPV, on a constaté que ses performances se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m².

La taille de la batterie utilisée permet au système de fonctionner avec un point de fonctionnement (I, V) proche du point de fonctionnement optimal. Cela permet de charger la batterie plus rapidement. Il faut relever que quand le courant de charge dépasse celui que peut supporter la batterie, il faut prévoir un régulateur de charge qui protégera contre la surchauffe de la batterie.

On peut mentionner, aussi, que l'utilisation d'un convertisseur DC-DC survolteur commandé en utilisant l'une des différentes commandes MPPT permettra au panneau de fournir le maximum de puissance dans différentes conditions, par conséquent améliorations du rendement de GPV. Cela permet d'éviter le surdimensionnement des panneaux photovoltaïque, donc minimisé le cout de l'installation.