



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



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : *Sciences et Technologie*
Filière : *Electrotechnique*
Spécialité : *Commande Electrique*

Thème

**Modélisation et commande MPPT d'un
système photovoltaïque autonome**

Soutenu le : Septembre 2020

Dirigé par :

Dr. MAAMIR Madiha

Réalisé par :

- *AHMOUDA Taha*

- *MAAMRI Chouaib*

- *ABADLI Hamza*

Année universitaire: 2019/2020

شكر وتقدير

الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم والمعرفة وأعاننا على أداء هذا الواجب ووفقنا الى
انجاز هذا العمل

نتوجه بجزيل الشكر والامتنان الى كل من ساعدنا من قريب أو من بعيد على انجاز هذا
العمل وتذليل ما واجهنا من صعوبات ، ونخص بالذكر الأستاذة المشرفة

معامير مديحة التي لم تبخل علينا بتوجيهاتها ونصائحها القيمة التي كانت عوننا لنا في
اتمام هذا البحث .

ولا يفوتنا أن نشكر الأستاذة حكيمة جزاها الله عنا كل خير

اهداء

الى من لا يمكن للكلمات أن توفيهما حقهما . الى من لا يمكن للأرقام أن تحصي فضلهما

الى والدي العزيزين أدامهما الله لي

الى اخوتي وأخواتي

الى الأصدقاء وكل من دعمنا معنويا او ماديا

الى كل طلبة ثانية ماستر تحكم كهربائي دفعة 2020/2019

الى كل من سقط من قلبي سهوا

أهدي هذا العمل

Résumé :

Dans ce mémoire, on a présenté la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque autonome constitué de panneaux photovoltaïques et une batterie avec convertisseur bidirectionnel afin d'alimenter une charge DC. Ainsi nous avons commencé par la simulation et la modélisation de la cellule photovoltaïque et de convertisseur survolteur avec une commande MPPT basé sur la logique floue assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque, le convertisseur bidirectionnel de la batterie est contrôlé en courant assurant la répartition de l'énergie entre les deux sens.

Les résultats de simulations qui sont effectués sous MATLAB/SIMULINK ont montré le bon fonctionnement du système étudié où l'énergie produite sert uniquement de charger la batterie qui constitue notre système de stockage. La batterie va servir à compenser le manque au niveau de la charge dans le cas où le GPV ne satisfait pas cette dernière.

Mots clés : Photovoltaïque, GPV, Convertisseur boost, Commande MPPT, Modélisation, Simulation, Logique floue, Batterie

Abstract:

In this thesis, we presented the modeling and simulation of an autonomous photovoltaic system made up of photovoltaic panels and a battery with bidirectional converter to supply a DC load. So we started by, simulation and modeling of the photovoltaic cell and boost converter with an MPPT command based on fuzzy logic ensuring the pursuit of the maximum power supplied by the photovoltaic generator, the bidirectional converter of the battery is controlled in current ensuring the distribution of energy between the two directions.

The results of simulations which are carried out under MATLAB / SIMULINK have shown the correct operation of the studied system where the energy produced is used only to charge the battery which constitutes our storage system. The battery will be used to compensate for the lack of charge in the event that the GPV does not satisfy the latter.

Key words: Photovoltaic, GPV, Converter boost, Order MPPT, Modeling, Simulation, Fuzzy logic, Battery.

ملخص:

في هذه الأطروحة ، قدمنا النمذجة والمحاكاة لنظام الطاقة الكهروضوئية المستقل المكون من ألواح كهروضوئية وبطارية مع محول ثنائي الاتجاه لتزويد حمل التيار المستمر. لذلك بدأنا بمحاكاة ونمذجة الخلية الكهروضوئية والمحول المعزز باستخدام أمر MPPT استنادًا إلى منطق ضبابي يضمن السعي للحصول على أقصى طاقة يوفرها المولد الكهروضوئي ، ويتم التحكم في المحول ثنائي الاتجاه للبطارية في التيار. ضمان توزيع الطاقة بين الاتجاهين.

أظهرت نتائج عمليات المحاكاة التي يتم إجراؤها في إطار / MATLAB SIMULINK الأداء السليم للنظام المدروس حيث يتم استخدام الطاقة المنتجة فقط لشحن البطارية التي تشكل نظام التخزين لدينا. سيتم استخدام البطارية لتعويض نقص الشحن في حالة عدم إرضاء GPV للأخير.

الكلمات المفتاحية : النظام الكهروضوئي، GPV، المحول الرفع، آلية التحكم MPPT، التصميم، المحاكاة، المنطق الضبابي، البطارية.

Liste des symboles et abréviations

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point tracking.

FLC : Fuzzy Logic Controller.

DC : direct courant.

P_m : Puissance maximale (W).

I_m : Courant de point de Puissance maximale (A).

I_{pv} : Courant délivré par une cellule photovoltaïque (A).

V_{PV} :

EG : irradiation solaire.

P1, P2, P3, P4 : Paramètres.

E_{ref} : irradiation de référence 1000 W/m².

T_j : température de la cellule.

T_{ref} : température de référence 25°C.

E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

n : nombre de cellules en séries dans un module.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

q : La charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19}C$.

k : Constant de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$

Sommaire

Remerciements

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Listes des figures

Introduction Générale 1

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes autonome

I.1 Introduction.....4

I.2. Energie solaire photovoltaïque.....4

I.3. Paramètre d'une cellule photovoltaïque.....5

I.4. Technologie d'une cellule photovoltaïque.....6

I.5. Association de cellule.....7

I.5.1. Association de cellules en série.....7

I.5.2. Association de cellules en parallèle.....8

I.5.3. Association des cellules (série et parallèle).....9

I.6. Module photovoltaïque.....10

I.7. Champ photovoltaïque.....11

I.8. Système de stockage.....11

a) Batterie au Plomb-acide (Pb-acide).....12

b) Batterie au lithium-Ion (li-Ion).....12

c) Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd).....12

I.9. Caractéristiques des batteries.....13

I.10. Conclusion.....13

CHAPITRE II : Modélisation de système autonome

II.1.Introduction.....	15
II.2.Modélisation du système.....	15
II.3.Modélisation du module photovoltaïque.....	16
II.3.1 Modèle du générateur photovoltaïque.....	16
II.3.1.1.Modèle à une diode.....	16
II.3.1.2. Modèle à deux diodes.....	18
II.4. Modélisation simplifiée de la batterie.....	20
II.4.1 Equation de l'état de charge.....	21
II.5.Modèle moyen du hacheur survolteur.....	21
II.6. Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel de la batterie.....	24
II.6.1 Séquences de fonctionnement et équations d'état.....	25
II.7.Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT).....	26
II.7.1 Algorithme MPPT par la logique floue.....	28
II.8.Commande de la batterie.....	31
II.9. Régulateur de bus continu.....	32
II.10.Conclusion.....	33

CHAPITRE III :Résultat de la simulation de système autonome

III.1. Introduction	35
III.2. Caractéristique du Panneau photovoltaïque	35
III.2.1 Caractéristique I-V.....	35
III.2.2 Influence de l'éclairement et la température.....	36
III.3. Caractéristique du Générateur photovoltaïque.....	38

III.4. Profile de charge.....	40
III.5. Caractéristique de la batterie.....	40
III.6. Résultat de simulation Fonctionnement du système autonome (PV-batterie).....	41
III.6.1 Régulation de la tension de bus continu.....	43
III.7. Conclusion.....	43
Conclusion générale.....	45
Références bibliographiques	48

Liste des tableaux

I. Tableau I.1 : Comparatif des différentes technologie.....	7
II .Tableau II.1: Base de règles floues.....	29

Liste des figures

Figure I.1: effet photovoltaïque.....	5
Figure I.2 : cellule photovoltaïque.....	5
Figure I.3: Types de cellules photovoltaïques.....	6
Figure I.4 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.....	8
Figure I.5: Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle.....	9
Figure I.6: Association des cellules PV mixtes (série-parallèle).....	9
Figure I.7: Caractéristique d'un assemblage série/parallèle de n_s et n_p cellules PV identiques.....	10
Figure I.8: représente un module photovoltaïque.....	10
Figure I.9 : représente un champ photovoltaïque [1].....	11
Figure II.1: Association de l'étage d'adaptation entre le générateur et la charge.....	16
Figure(II.2): Modèle équivalent à une diode.....	17
Figure II.3: Modèle équivalent à deux diodes.....	19
Figure II.4: Cellule électrochimique de base.....	20
Figure II.5: Modèle équivalent électrique simple d'une batterie.....	21
Figure II.6: Schéma de principe d'un hacheur survolteur.....	22
Figure II.7: Circuit électrique équivalent de la première séquence de conduction.....	22
Figure II.8: Circuit électrique équivalent de la deuxième séquence de conduction.....	23
Figure II.9: Convertisseur associé aux batteries.....	25

Figure II.10 : Le schéma de principe de la première séquence de conduction....	25
Figure II.11: Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction...	26
Figure II.12: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	27
Figure II.13: Recherche et recouvrement du point de puissance maximale.....	28
Figure II.14: Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et la sortie	30
Figure II.15: Structure du contrôleur MPPT flou	31
Figure II.16: Schéma bloc de la régulation du bus continu.	33
Figure (III.01) : Caractéristiques I-V du module photovoltaïque.....	35
Figure(III.02) : Caractéristiques courant-tension pour différents éclairément....	36
Figure(III.03) : Caractéristiques puissance-tension pour différents éclairément.....	36
Figure(III.04) : Caractéristiques puissance-tension pour différent températures.....	37
Figure(III.05) : Caractéristiques courant-tension pour différents températures.....	37
Figure(III.06) : Eclairément de GPV	38
Figure(III.07) : Température de GPV.....	38
Figure (III.08) : Courant du GPV	39
Figure (III.09) : Tension du GPV	39
Figure (III.10) : Puissance du GPV.....	39
Figure (III.11) : Puissance de la charge.....	40
Figure (III.12) : Tension de la batterie.....	41
Figure (III.13) : Courant de la batterie.....	41
Figure(III.14) : Puissance de source et de la charge.....	42
Figure(III.15) : L'état de charge de la batterie.....	42
Figure (III.16) : La tension de bus continu Vdc.....	43

Introduction Générale

Introduction Générale d'étude

Introduction générale :

Avec le développement progressif de la vie moderne, les études écologiques ont démontré que la consommation énergétique croissante est accompagnée par une augmentation énorme de l'émission des gaz toxiques dans l'atmosphère, ce qui cause la pollution de l'air et de l'eau.

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

Compte tenu de cette situation, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources de production renouvelable et écologique, en exploitant les énergies propres sur la terre, comme l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, géothermie...etc. Ils visent à réduire au minimum la demande d'énergie provenant des sources classiques ; en conséquence, une ville durable et propre dans son énergie, dans son climat et même dans sa nourriture.

L'énergie solaire est générée par des moteurs thermiques ou des convertisseurs photovoltaïques par de nombreuses technologies, notamment l'utilisation de panneaux photovoltaïques, à travers lequel la lumière du soleil est exploitée, détournée et distribuée.

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, il est solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système.
- La lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au sud que dans le nord.
- L'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

Introduction Générale d'étude

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

La production journalière de l'énergie électrique issue des générateurs photovoltaïques ne coïncide pas souvent à la consommation. Dans ce cas, au moins un élément de stockage de l'énergie devient alors obligatoire pour assurer la continuité de la fourniture d'électricité au client.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés essentiellement au faire la simulation système photovoltaïque autonome, et la commande du convertisseur bidirectionnel de la batterie pour une bonne gestion d'énergie entre le panneau et la charge.

Les buts envisagés de ce travail sont :

- Des stratégies de contrôle pour les convertisseurs de puissance sont présentées afin de protéger les équipements et de gérer les échanges de flux d'énergie entre les sources et la charge.
- Assurer, malgré les fortes variations de l'énergie produite ; le besoin de la charge en énergie électrique une bonne qualité
- La Conception d'une commande MPPT basée sur la logique floue du convertisseur DC/DC connecté au GPV.

Le travail présenté ici est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur le système autonome, et notamment le système de stockage (batterie) qui leur sera relié.

Le deuxième chapitre, on procédera à une modélisation mathématique des différentes parties constituant le système dans le système de production hybride autonome à étudier, ainsi que la conception de contrôleur MPPT par la logique floue afin d'extraire son point de puissance maximale. Ensuite, nous passons à la commande de la tension du bus continu à une valeur constante.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du énergétique autonome qui constitué d'un générateur photovoltaïque et un système de stockage avec des batteries au plomb-acide.

Enfin, on terminera notre mémoire avec une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

Chapitre I
***Généralité sur les systèmes
photovoltaïques autonome***

I.1. Introduction

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et Géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les Réserves sont mal réparties et épuisables. de plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Même au sein de l'Europe occidentale de tels "sites isolés" ne sont pas exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde. Compte tenu de cette situation, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique, en exploitant les énergies propres sur la terre, comme l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, géothermie...etc.

L'énergie photovoltaïque est l'un des enjeux de la politique énergétique du notre siècle, qui résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique, au moyen d'une photopile. S'il est vrai que l'énergie issue du soleil semble sans limites, il n'est pas possible de la puiser à toutes heures de la journée ni durant toute l'année, ce qui limite le rachat du photovoltaïque. Au problème d'intermittence s'ajoute celui de la météo, souvent capricieuse, qui rend cette source d'énergie incertaine. D'où l'importance du stockage de l'énergie solaire pour couvrir les besoins énergétiques. Dans ce chapitre, nous effectuons un bref rappel sur le système photovoltaïque (cellules, modules et champs) avec le stockage de l'énergie photovoltaïque.

I.2. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. La conversion d'énergie photovoltaïque s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [1] [2].

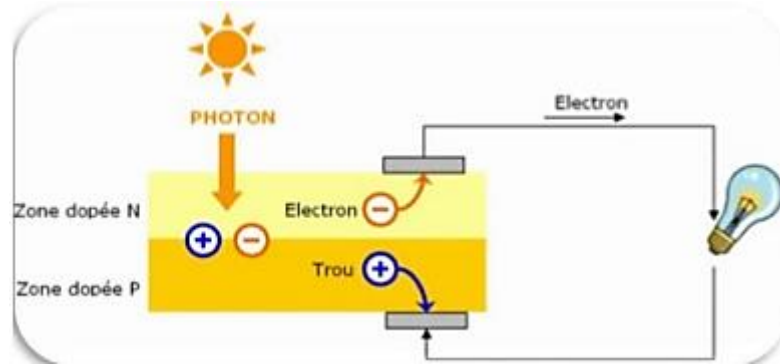


Figure I.1 : effet photovoltaïque

- La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt. Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque.

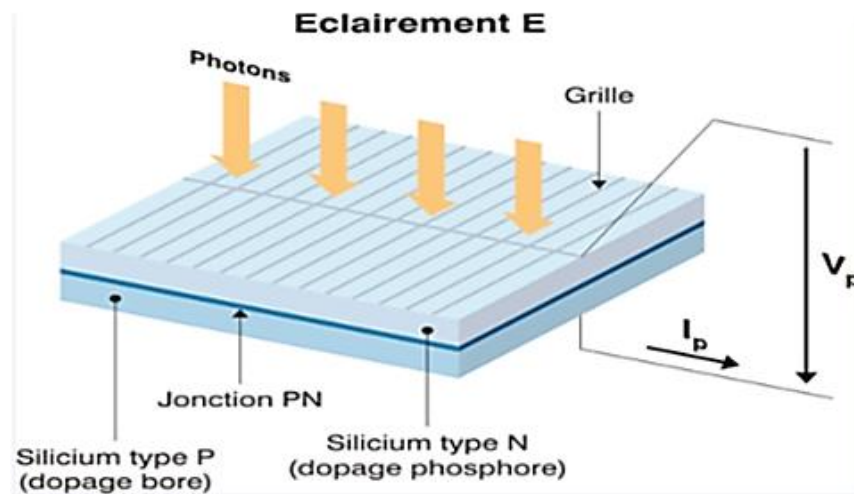


Figure I.2 : cellule photovoltaïque.

I.3. Paramètre d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

-courant de court- circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle.

-tension de circuit ouvert

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nulle.

-facteur de forme FF

Le rapport Valeur maximale de la puissance pouvant être extraite, au produit

-le rendement η

Le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement incident sur la surface S de la cellule. Pour une cellule du commerce, le facteur de forme est de l'ordre de 70% et le rendement de l'ordre de 12 à 14%. L'examen des courbes des figures montre que cette résistance influence très vite sur la puissance maximale disponible.

I.4. Technologie d'une cellule photovoltaïque

Il existe trois principaux types de cellules solaires : cellules monocristallines, polycristallines et cellules amorphes, chaque type a son propre rendement mais quel que soit leurs types, leurs rendement reste faible. [11]

Les cellules monocristallines ont le meilleur rendement mais un coût élevé, du fait d'une fabrication compliquée. Les cellules polycristallines ont une conception plus facile et leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible. Les cellules amorphes ont un faible rendement et un coût peu élevé, elles sont utilisées dans les petits produits tels que des calculatrices solaires et les montres.

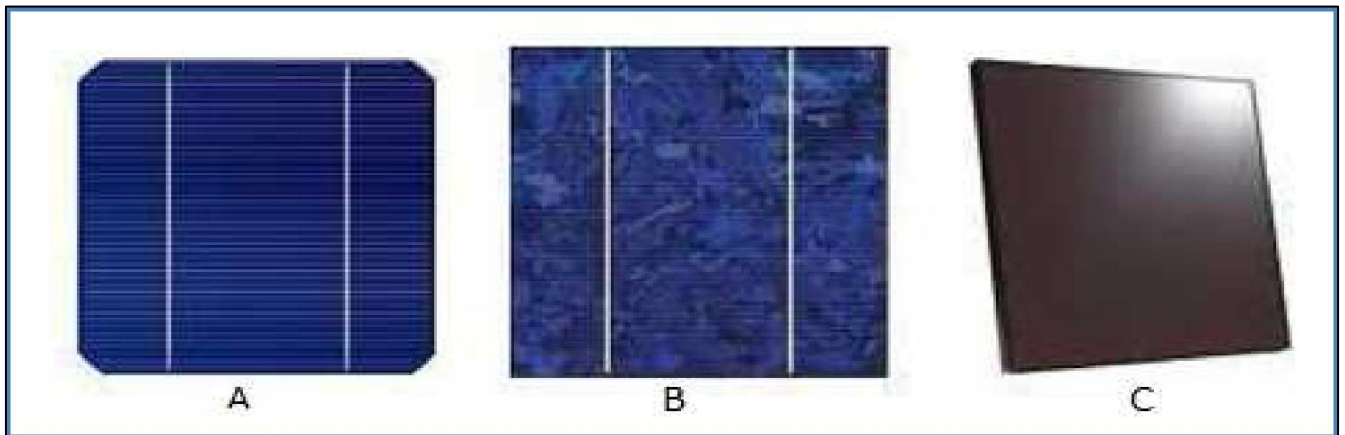


Figure I.3 : Types de cellules photovoltaïques. (A) silicium monocristallin, (B) silicium polycristallin, (C) silicium amorphe [6].

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristique	Principales Utilisations
Silicium Monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Très performant • Stabilité de production. • Méthode de production coûteuse et laborieuse. 	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté à la production à grande échelle. • Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial. 	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> • Peut fonctionner sous la lumière fluorescente • Fonctionnement si faible luminosité, si ombrage partiel • Fonctionnement par temps couvert. • La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois 	Appareils électroniques (montres, calculatrices), intégration dans le bâtiment

Tableau I.1 : Comparatif des différentes technologies.

I.5. Association de cellules

I.5.1. Association de cellules en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure I.4.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

Comme la surface de cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible [7].

$$V_{coNS} = Ns \times V_{co} \tag{I-1}$$

$$I_{cc} = I_{ccNS} \tag{I-2}$$

V_{coNS} : la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{ccNS} : courant de court-circuit de Ns cellules en série.

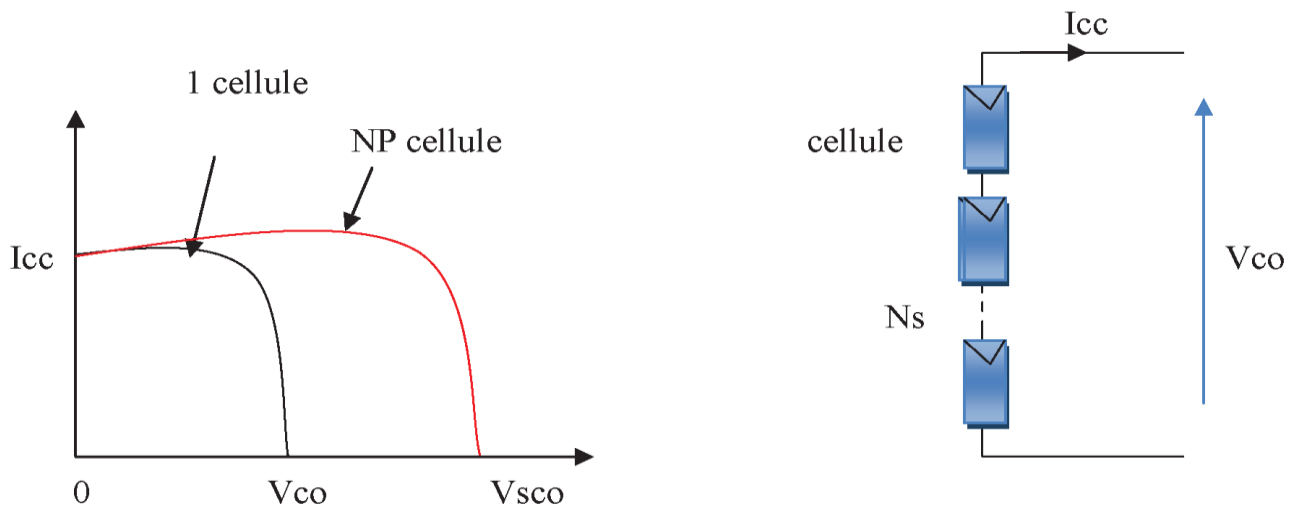


Figure I.4 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.

I.5.2. Association de cellules en parallèle

Une association parallèle de (Np) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créée. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [8].

$$I_{ccNp} = Np \times I_{sc} \tag{I-3}$$

$$V_{co} = V_{coNp} \tag{I-4}$$

I_{ccNp} : la somme des courants de cout circuit de (NP) cellule en parallèle

V_{coNp} : la tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle

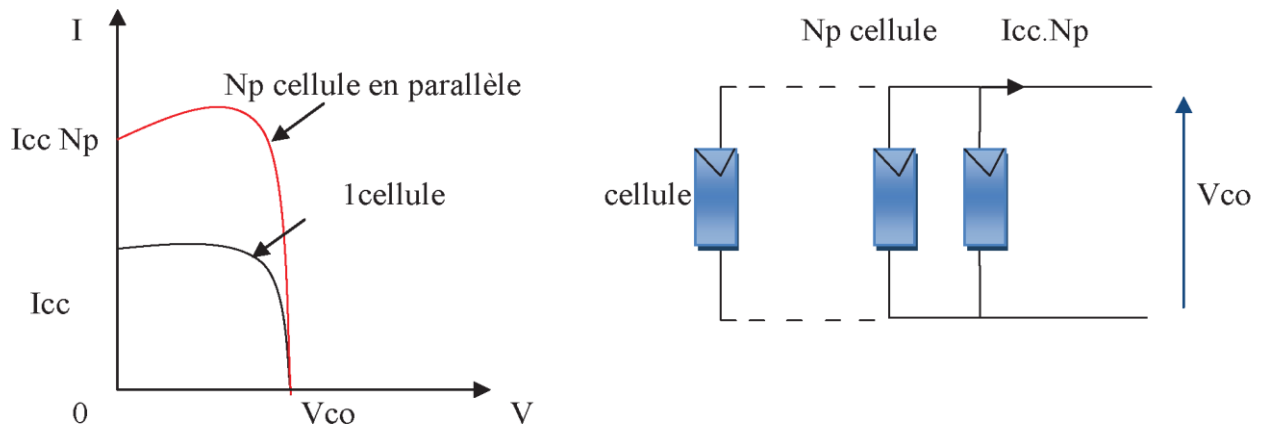


Figure I.5 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.

I.5.3. Association des cellules (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

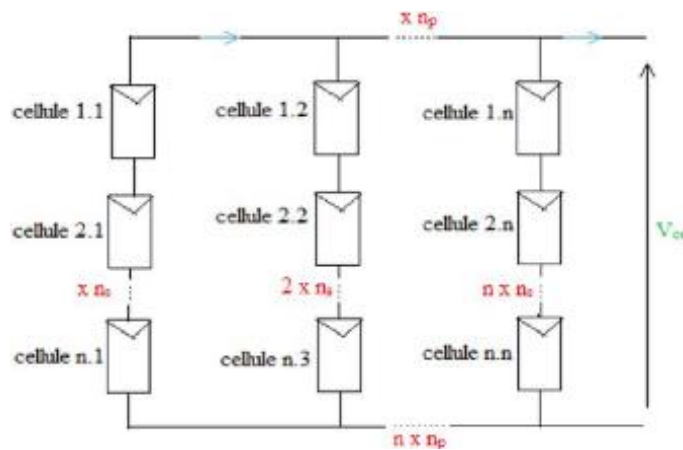


Figure I.6 : Association des cellules PV mixtes (série-parallèle).

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [9].

La caractéristique I(V) d'un générateur solaire peut être considérée comme le résultat d'une association d'un réseau de $n_s \cdot n_p$ cellules en série/parallèle (Figure I.7).

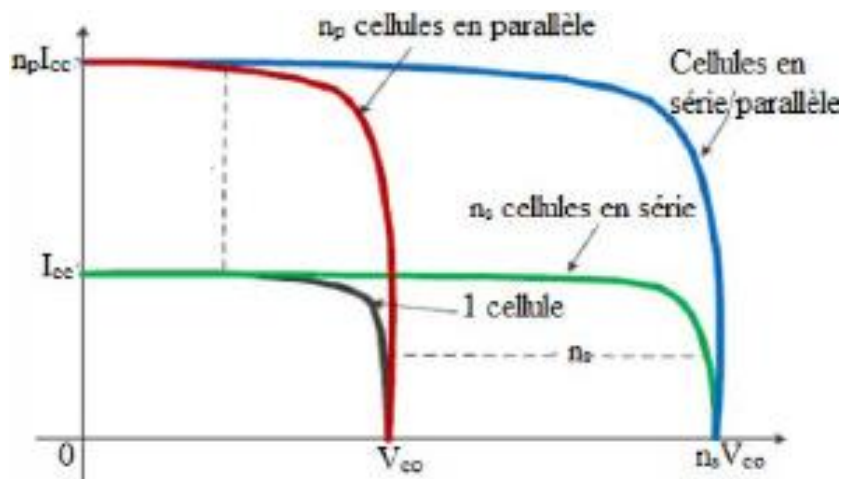


Figure I.7 : Caractéristique d'un assemblage série/parallèle de n_s et n_p cellules PV identiques.

I.6. Module photovoltaïque

Le composant le plus important de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui se compose de cellules solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux

Pour former des champs de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie



. I.8 : représente un module photovoltaïque.

Des modules de plus en plus puissants sont disponibles sur le marché, en particulier pour la connexion du réseau, mais il y'a tout de même une limite liée au poids et à la manipulation [1].

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides et minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont la longueur et la largeur sont de l'ordre du mètre, pour une surface de l'ordre du mètre carré, et une masse de l'ordre de 20 kg. Divers éléments (branchements électriques, fixations, éventuel cadre pour assurer une étanchéité) sont inclus.

I.7. Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et /ou en parallèle afin de produire la puissance requise.

Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le module PV avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure I.9 : représente un champ photovoltaïque [1].

I.8. Système de stockage

L'utilisation de sources d'ER induit le concept de stockage d'électricité en raison du caractère intermittent de ces sources (comme l'énergie solaire et éolienne...). L'utilisation du moyen de stockage d'électricité est très variée; elle dépend de la nature des besoins et du type d'applications. En particulier, les SEH géographiquement isolés et non raccordés au réseau, qui intègre au moins une source d'ER nécessitant un système de stockage.

De nos jours, les technologies les plus émergentes dans les SEH sont les technologies électrochimiques et principalement les systèmes de stockage d'énergie à batterie. En particulier les trois types des batteries : plomb-acide, nickel-cadmium et lithium-ion, en raison de leurs maturités et de leurs faibles coûts. Ils présentent la propriété de pouvoir transformer de l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques en énergie électrique, sans émission de polluants.

Il existe plusieurs types d'accumulateurs électrochimiques au Pb, Ni-Cd, Li-ion, toutefois les plus anciens et les plus couramment utilisés dans le domaine solaire sont ceux réalisés au plomb car ils peuvent résister à de nombreux cycles de charge et de décharge sans être endommagés.

a) Batterie au Plomb-acide (Pb-acide)

Dans un système photovoltaïque, la puissance délivrée par le GPV est imprévisible et varie indépendamment de la demande. Ainsi, pour une installation PV autonome, l'unité de stockage est requise pour assurer un approvisionnement continu en énergie électrique. Parmi les nombreuses technologies de stockage, la batterie au plomb est la plus utilisée dans les installations PV autonomes

Elle présente plusieurs avantages, c'est la moins chère par rapport à d'autres technologies, elle est presque entièrement recyclable (plus de 90%) et leur autodécharge est faible. Cependant, ce genre des batteries sont sensibles aux décharges trop profondes conduisant à une diminution importante de leur durée de vie.

b) Batterie au lithium-Ion (li-Ion)

Les performances de ce type sont bien meilleures que les autres. Leur autodécharge est très faible

(1 % par mois), cela signifie que l'énergie massique stockée est relativement bien supérieure, caractérisée par une tension de fonctionnement élevée permettant la réduction du nombre d'éléments pour une tension donnée et leur durée de vie élevée; Mais le coût est beaucoup plus élevé à cause de leur fabrication qui nécessite un investissement bien supérieur que celui des batteries au Plomb. En plus, la batterie lithium contient un pourcentage élevé de métaux lourds et dangereux, en effet leur recyclage est compliqué et n'atteint pas la maturité.

c) Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Elle est robuste, mais souffre d'un coût élevé, d'une tension de cellule relativement faible, une autodécharge assez rapide (20% par mois). Telle la batterie lithium-Ion, leur recyclage est compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant. À cause des limites des batteries au lithium-Ion et aux alcalines, nous préférons la batterie au plomb. Dans notre travail, nous proposons un système de contrôle de la charge et de la décharge de batteries, afin de prolonger la durée de vie et éviter la dégradation due aux décharges profondes ou des surcharges. Ampères-heures (Ah). [17]

I.9. Caractéristiques des batteries

- **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 [13].

- **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 [14].

- **La durée de vie** Est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale [15].

- **Le taux d'autodécharge** L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

- **La tension d'utilisation** Dans le cas de la décharge d'une batterie, la tension minimale acceptable est appelée tension seuil de décharge. La baisse au-dessous de cette tension est appelée décharge profonde, durant laquelle la batterie peut être endommagée. Dans le cadre du photovoltaïque, la tension seuil de décharge pour une batterie au plomb de 12V est de 11,7V. En ce qui concerne la recharge d'une batterie, une tension supérieure à la tension nominale doit être appliquée. Cependant, cette tension ne doit pas dépasser une certaine valeur appelée tension de charge maximale Pour une batterie de 12V, la tension de recharge est comprise entre 12V et 14,4V [16]

I.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque et nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques.

Chapitre II
Modélisation et commande de
système photovoltaïque
autonome

II.1. Introduction :

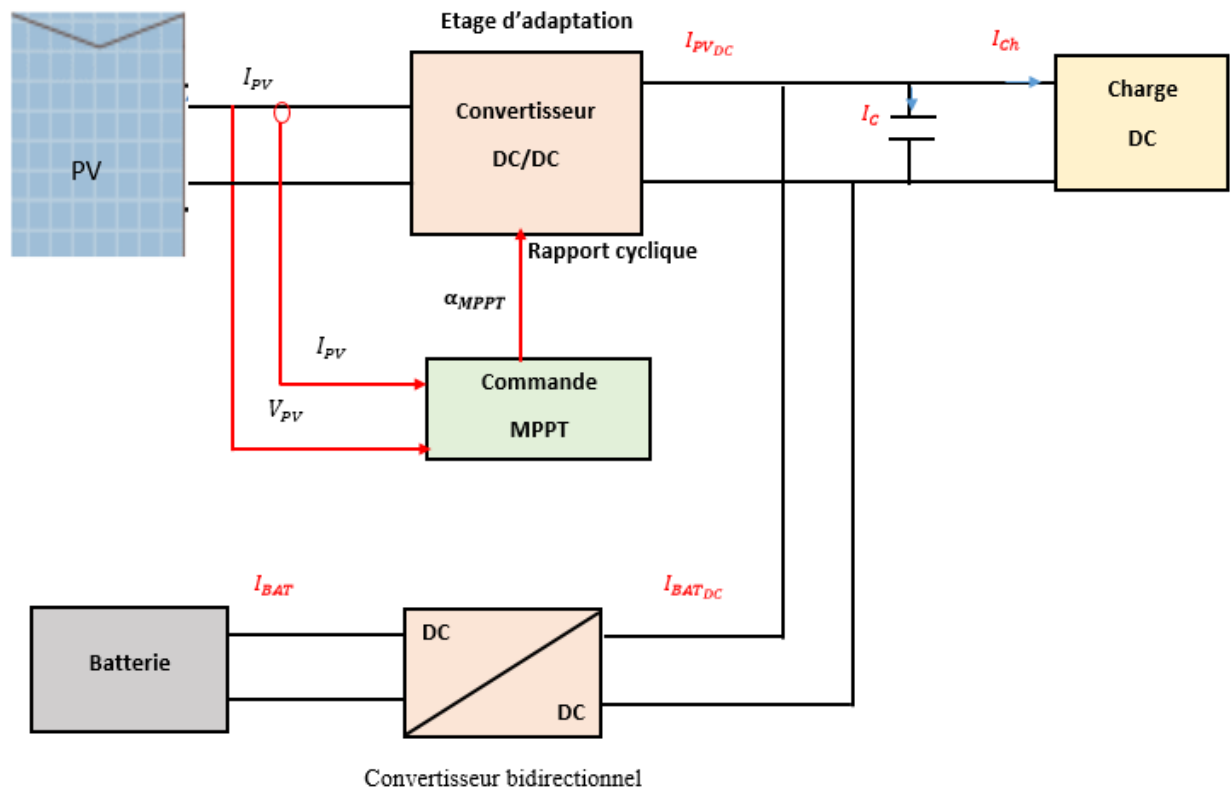
Les panneaux photovoltaïques peuvent être une bonne source d'électricité mais leur efficacité de conversion n'est pas très élevée dont le rendement est généralement entre 12% et 20% à cause de la non linéarité de la caractéristique courant-tension qui dépend de la fluctuation du rayonnement solaire selon la saison et les heures de la journée et au changement de la température de la cellule et encore de la charge sur laquelle est associé. Dans ce cas la puissance délivrée n'est pas toujours maximale et présente un seul point de fonctionnement optimal (V_{opt} , I_{opt}). L'adaptation d'impédance entre la source et la charge est importante et la connexion directe entre eux n'offre aucune optimisation, c'est pour cela qu'on doit associer un convertisseur statique DC-DC piloté par une commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » afin de faire fonctionner le générateur à son point optimal, Nous ajoutons une batterie afin de stocker de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre nous présenterons les modèles de composants du système dans le cadre de notre travail, à savoir le panneau PV, un système de stockage (batteries et convertisseur bidirectionnel) et des convertisseurs pour interconnecter la source. L'architecture complète de ce système est illustrée dans la figure (II.1).

II.2. Modélisation du système

- Architecture et Description d'un système

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est l'introduction d'un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme il est présenté la figure (II.1). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle [12]. Afin de stocker de l'énergie électrique dans une batterie pour en cas de production d'énergie surchargée ou déchargée en cas de pénurie pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens.



Figure(II.1): Association de l'étage d'adaptation entre le générateur et la charge

L'étage d'adaptation utilisé entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter soit survolteur ou dévolteur commandé en faisant varier le rapport cyclique du convertisseur selon un algorithme afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance.

II.3. Modélisation du module photovoltaïque :

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

II.3.1 Modèle du générateur photovoltaïque

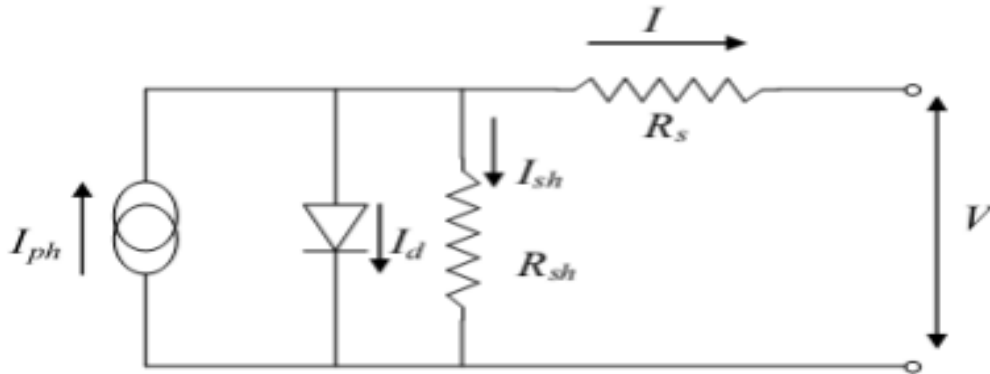
Le panneau solaire se compose de plusieurs cellules solaires de type monocristallin, permettant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Le circuit équivalent du modèle à une diode est illustré à la figure (II.2).

II.3.1.1 Modèle à une diode :

Les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque représenté sur la figure (II.2). C'est

Chapitre II Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome

le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent 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 le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s , une diode en parallèle qui modélise jonction PN.



Figure(II.2): Modèle équivalent à une diode

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

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

Avec :

I : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

Le courant I_{ph} est directement dépendant des rayonnements solaires E_G et de la température de la cellule T_j , est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = p1 \cdot E_G \cdot [1 + P2 \cdot (E_G - E_{ref}) + p3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (II.2)$$

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_j = T_a + E_G \cdot \left(\frac{Noct - 20}{800} \right) \quad (II.3)$$

Où :

T_a : Température ambiante.

$Noct$: Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k T_j}\right) \right] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$I_s = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right) \quad (\text{II.5})$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V+R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Le courant total est donné par :

$$I = P_1 \cdot E_G \cdot \left[1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref}) \right] - \left[P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- E_G : irradiation solaire.
- P_1, P_2, P_3, P_4 : Paramètres.
- E_{ref} : irradiation de référence 1000 W/m².
- T_j : température de la cellule.
- T_{ref} : température de référence 25°C.
- E_g : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.
- A : Facteur d'idéalité de la jonction.
- n : nombre de cellules en séries dans un module 72.
- R_s : Résistance série.
- R_{sh} : Résistance shunt.
- q : La charge d'électron 1,6 .10⁻¹⁹C.
- k : Constant de Boltzmann 1,38 .10⁻²³ J/K.

II.3.1.2 Modèle à deux diodes

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.3). On considère le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes en parallèles. La source de courant I_{ph} modélise le courant photo-généré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}), et le courant de

Chapitre II *Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome*

génération-recombinaison (I_{d2}). Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer [18] :

Une résistance série R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations. Une résistance parallèle R_p , modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

Le courant généré par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2} - I_{sh}) \quad (\text{II.8})$$

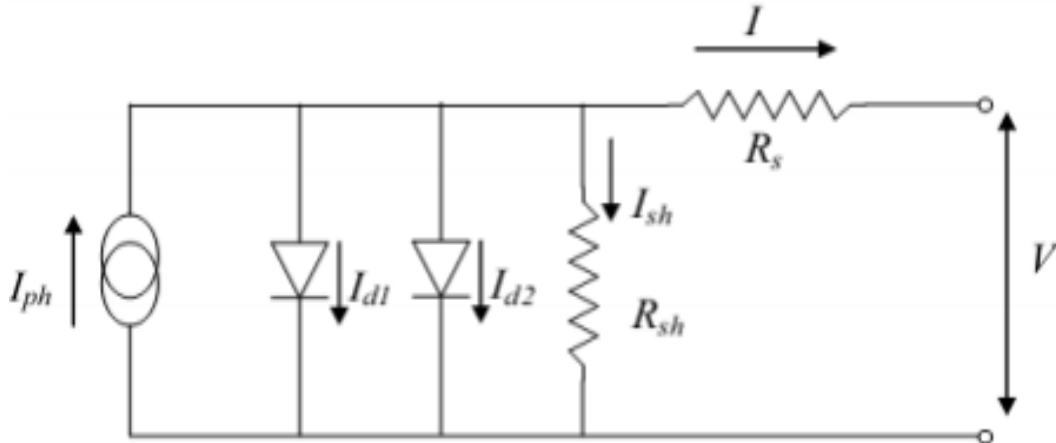
Avec

$$I_{d1} = I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.9})$$

$$I_{d2} = I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s \cdot I)}{2 \cdot n \cdot A \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right]$$

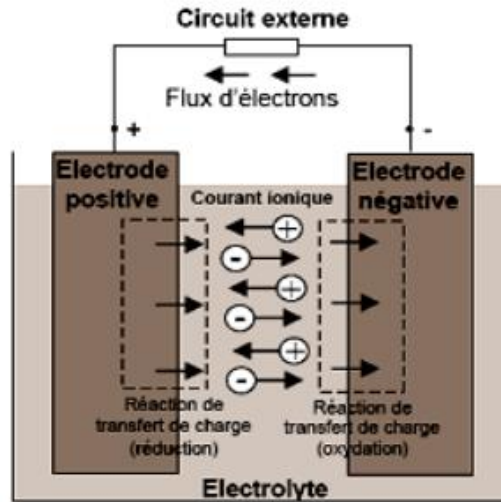
$$I_{01} = P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right) \quad (\text{II.10})$$

$$I_{02} = P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_B}{2 \cdot k \cdot T_j}\right)$$



Figure(II.3): Modèle équivalent à deux diodes.

I_{ph} et I_{sh} garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode. Le courant total s'écrit :



Figure(II.4): Cellule électrochimique de base

$$\begin{aligned}
 I = & P_1 \cdot E_G \cdot [1 + P_2 \cdot (E_G - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \\
 & - [P_{04} \cdot T_j^3 \cdot \exp(\frac{-E_g}{k \cdot T_j})] \cdot [\exp(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot n \cdot k \cdot T_j}) - 1] \\
 & - [P_{14} \cdot T_j^3 \cdot \exp(\frac{-E_g}{2kT_j})] \cdot [\exp(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{2 \cdot nAk \cdot T_j}) - 1]
 \end{aligned} \tag{II.11}$$

II.4. Modélisation simplifiée de la batterie :

La batterie est un ensemble d'éléments ou des cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, où le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie [19]

Actuellement, la technologie la plus largement utilisée pour les applications photovoltaïques est la technologie au Plomb (Pb) [20]. C'est encore la technologie la plus compétitive et la mieux maîtrisée. Nous présentons ici le modèle de cet accumulateur.

Le modèle de la batterie adopté est celui permettant de prédire l'autonomie du système ascenseur, c'est-à-dire permettre à chaque instant d'estimer l'énergie restante (état de charge soC_{bat} ou profondeur de décharge) dans la batterie [21].

Le modèle choisi est, par conséquent, un modèle équivalent électrique (figure (II.5)) composé d'une source de tension en série avec une résistance (résistance interne) [22], [21].

Ce modèle s'exprime, selon une convention génératrice, par la relation :

$$VV = E_{batt} + R_{batt}I_{batt}$$

Chapitre II *Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome*

Les grandeurs E_{batt} et R_{batt} correspondent à des données de fournisseurs déterminées expérimentalement. Elles sont fonction de l'état de charge de la batterie, du sens du courant et de la température. Si en multipliant les deux membres de cette égalité par I_{batt} , nous pouvons déduire facilement les pertes Joules ($R_{batt}I_{batt}^2$) engendrées par la résistance interne de la batterie R_{batt} , [34]

Soit :

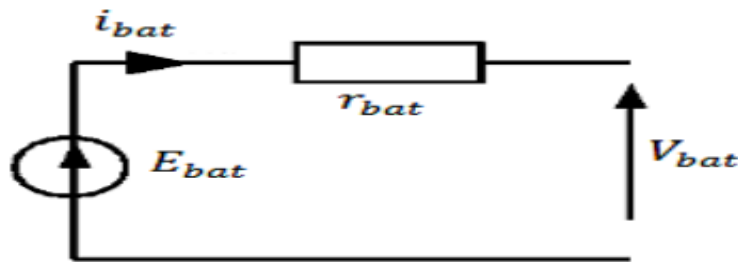
$$P_{batt} = VI_{batt} = E_{batt}I_{batt} + R_{batt}I_{batt}^2 \quad (II.12)$$

II.4.1 Equation de l'état de charge

L'état de charge de la batterie est un paramètre estimé pendant que la batterie est traversée par un courant électrique. Le SOC_{batt} est donné par le rapport entre la capacité actuelle disponible et la capacité totale effective disponible à l'instant qui précède l'utilisation [23].

$$SOC_{batt} = SOC_{bint} - \frac{100}{C_N} \int i(t) dt \quad (II.13)$$

II.5. Modèle moyen du hacheur survolteur :



Figure(II.5): Modèle équivalent électrique simple d'une batterie

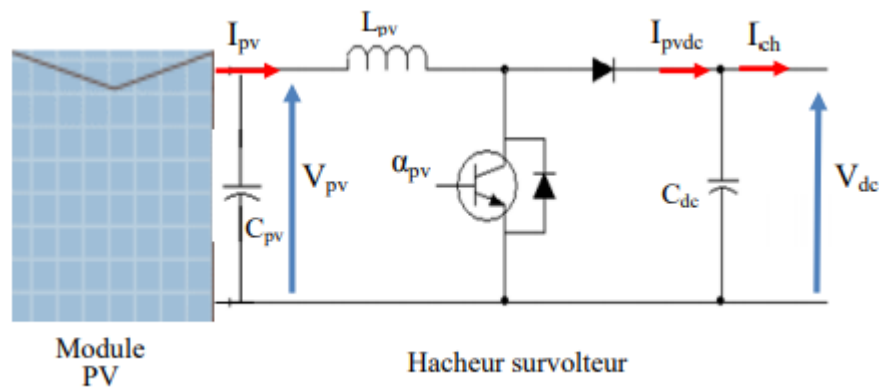
Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est un convertisseur statique qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

Sur la figure (II.6) est illustré le schéma du hacheur boost à liaison directe, composé de l'interrupteur commandé S, de la diode d'anti-retour D, et du dipôle de stockage (L_{pv} , C_{dc}). L'évolution en fonction du temps est basée sur les équations des éléments de stockage (L_{pv} , C_{dc}), et peut être représenté par une écriture d'état linéaire (2-17), ayant comme paramètre le rapport cyclique α

$$X = Ax + Bu \quad (II.14)$$

Chapitre II Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome

Pour la synthèse de la matrice de transition A, et du vecteur B, les deux séquences de commutation sont considérées :

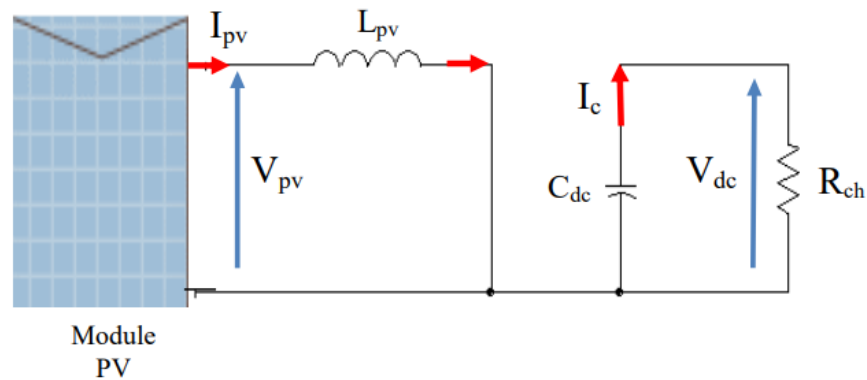


Figure(II.6): Schéma de principe d'un hacheur survolteur.

Où : x : vecteur d'état ; $X = \begin{bmatrix} I_{pv} \\ L_{dc} \end{bmatrix}$ et u : entrée de commande ; $u = V_{pv}$

Remarque:

$$L_{PV} = \frac{\alpha_{MPPT} V_{PV}}{\Delta I_{PV} f_{PWM}}$$



Figure(II.7): Circuit électrique équivalent de la première séquence de conduction.

L'inductance disponible dans laboratoire utilisée pour les expérimentations a une valeur de 300mH et possède une résistance série (R_{pv}) de 1.7 Ω .

Séquences de fonctionnement et équations d'état :

➤ Première séquence de conduction $[0 \text{ à } \alpha T]$:

Dans cette séquence, l'interrupteur S est fermé, et alternativement la diode D est bloquée. Cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance et le stockage d'une quantité d'énergie sous forme magnétique, alors que la charge se trouve déconnecté (figure II.7).

Le comportement dynamique du circuit est régi par les équations :

$$V_{pv} - L_{pv} \frac{dI_{pv}}{dt} - R_{pv} I_{pv} = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II.16})$$

En considérant le courant I_{pv} et la tension de sortie V_{dc} comme variables d'état, l'équation (II.17) modélise la première séquence, et qui peut être réécrite implicitement dans (II.18)

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{pv}}{L_{pv}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{ch}C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (\text{II.17})$$

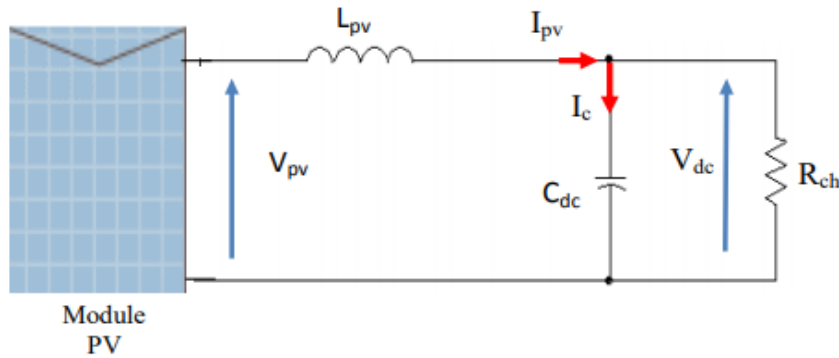
$$\begin{cases} \dot{X} = A_1 X + B_1 V_{PV} \\ y = D_1 X \end{cases} \quad \text{Avec : } D_1 = [0 \quad 1] \quad (\text{II.18})$$

Dans la suite du manuscrit, R_{ch} représente l'impédance d'entrée du côté du deuxième étage de conversion ; identifiée par :

$$R_{ch} = \frac{V_{dc}}{I_{ch}} \quad (\text{II.19})$$

Deuxième séquence de conduction :

Dans cette phase, l'interrupteur S est bloqué. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans la bobine vers le condensateur C_{dc} (figure II.8). De manière analogue les équations (II.21), (II.19) définissent le comportement dynamique du convertisseur pour cette séquence :



Figure(II.8): Circuit électrique équivalent de la deuxième séquence de conduction.

$$L_{pv} \frac{dI_{pv}}{dt} = V_{pv} - R_{pv} I_{pv} - V_{dc} = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$C_{pv} \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{pv} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II.21})$$

Ou :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{pv}}{L_{pv}} & -\frac{1}{L_{pv}} \\ \frac{1}{C_{dc}} & -\frac{1}{R_{ch}C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (\text{II.22})$$

Qui peut être écrit implicitement, comme :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_2 X + B_2 V_{PV} \\ y = D_2 X \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Modèle moyen

A partir des équations (II.22) et (II.19), on peut déduire l'équation d'état pour toute la période, qui consiste en fait, à une sommation des deux écritures d'état, pondérées par le rapport cyclique α :

$$\begin{cases} \dot{X} = (A_1 X + B_1 V_{PV})\alpha + (A_2 X + B_2 V_{PV})(1 - \alpha) \\ V_{dc} = (D_1 \alpha + D_2 (1 - \alpha))X \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

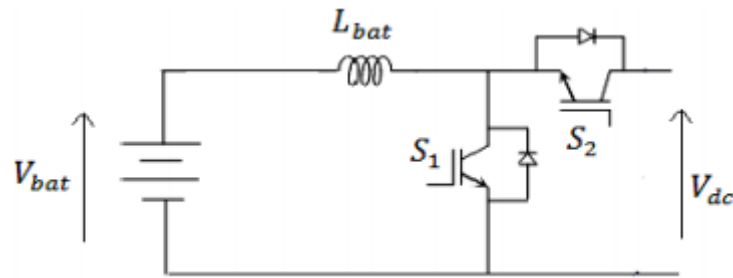
Qui se met en définitif, sous:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{1-\alpha}{L_{pv}} X_2 + \frac{1}{L_{pv}} u \\ \dot{X}_2 = \frac{1-\alpha}{C_{dc}} X_1 - \frac{1}{R_{ch}C_{dc}} X_2 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II.6. Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel de la batterie

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus continu.

Dans le cas du Hacheur utilisé pour la charge/décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés comme l'indique la Figure (II.9) [24].



Figure(II.9): Convertisseur associé aux batteries

II.6.1 Séquences de fonctionnement et équations d'état :

De même, le modèle moyen du convertisseur réversible en courant de la batterie est adopté. Ce dernier permettra de tester les algorithmes de commande dans des modèles continus du système global. On distingue les deux phases de commutation des IGBT, représentés par un fil lorsqu'ils sont fermés et l'absence de connexion lorsqu'ils sont ouverts. Ainsi, la période de découpage (T_{pwm}) est scindée en deux [21], [25].

- Première séquence de conduction $t \in [\alpha_{bat}, T_{PWM}; T_{PWM}]$:

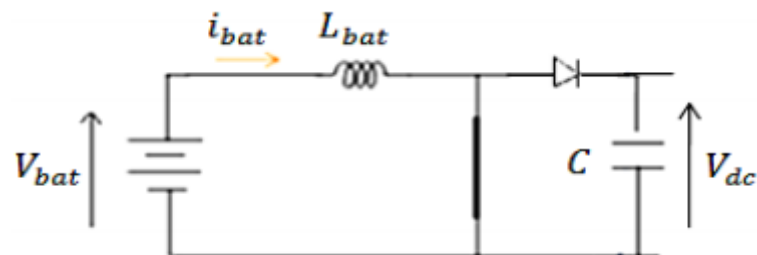


Figure (II.10): Le schéma de principe de la première séquence de conduction

L'équation dynamique du courant de la bobine s'écrit :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} \tag{II.26}$$

- Deuxième séquence de conduction $t \in [\alpha_{bat}, T_{PWM}; T_{PWM}]$:

La relation dynamique reliant tension de la batterie et le bus est donnée par :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + V_{dc} \tag{II.27}$$

Chapitre II Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome

La moyenne temporelle de ces deux équations donne ainsi un modèle moyen de ce convertisseur :

$$bat \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha)V_{dc} \quad (II.27)$$

Le modèle de l'équation (II.27) reproduit le comportement de la batterie en cas de charge ($i_{bat} < 0$) et en décharge ($i_{bat} > 0$)

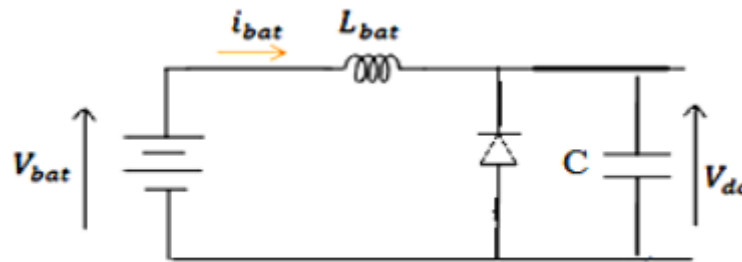


Figure (II.11): Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction

II.7. Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT)

Il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale.

L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en générale à l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'une générateur de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur.

Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

La figure (II.12) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, dans le cas de la conversion solaire. L'adaptateur peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge [27] [28] [29].[26]

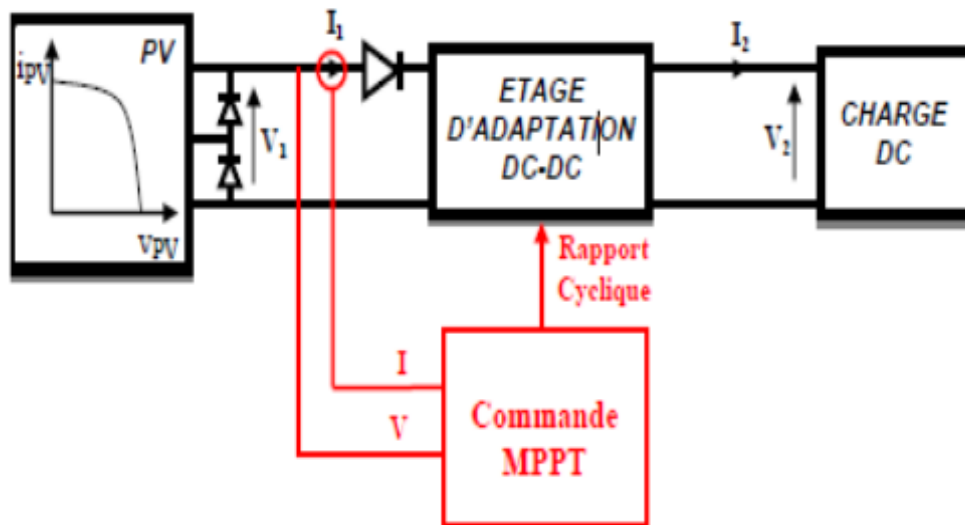


Figure (II.12): Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (II.13) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a).

Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

- Variations de température de fonctionnement du G PV (cas b).

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande

- Pour une variation de charge (cas c).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumé, le suivi du PPM : est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [28] [29] [30].

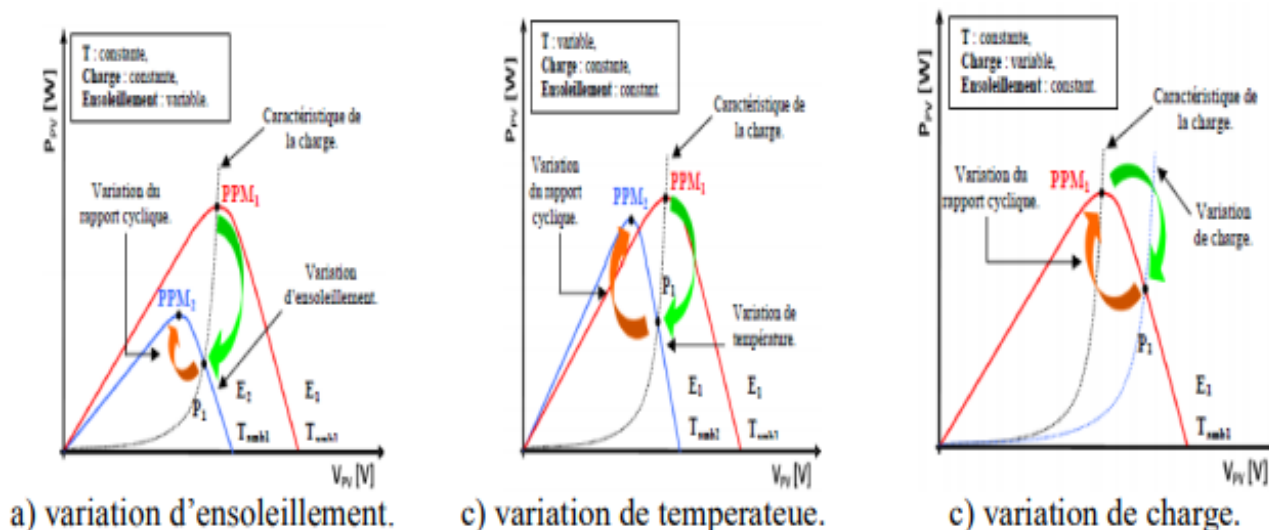


Figure (II.13): Recherche et recouvrement du point de puissance maximale

II.7.1 Algorithme MPPT par la logique floue :

Ces dernières années, les contrôleurs par logique floue (FLC) sont largement utilisés pour la recherche du point MPP. La théorie de la logique floue permet la modélisation et le traitement rigoureux d'information imprécise, incertaine et subjective, permettant d'approximer des fonctions non linéaires. C'est donc une théorie tout à fait adaptée au problème d'optimisation que nous avons à traiter dans ce paragraphe. En revanche, la connaissance parfaite et complète du système PV par l'opérateur pour l'établissement des règles d'inférences est très nécessaire. [31]

Logique floue basée sur des variables floues dites variables linguistiques à valeurs linguistiques dans l'univers du discours U . Chaque valeur linguistique constitue alors un ensemble flou de l'univers du discours.

En logique classique

- Si p Alors q
- p vrai Alors q vrai

En logique floue

- Si (X est A) Alors (Y est B)
- La variable floue X appartient à la classe floue A avec un degré de validité $\mu(x_0)$

Chapitre II *Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome*

• La variable floue Y appartient à la classe floue B à un degré qui dépend du degré de validité $\mu(x_0)$ de la prémisse [32].

$$\text{Méthode de Mamdani : } \mu_{\text{conclusion}}(y) = \text{Min} \mu_{\text{premise}}(x_0), \mu_{\text{conclusion}}(y)$$

La valeur de $e(t)$ montre, si le point de fonctionnement pour la charge utilisée à l'instant t se situe du côté gauche ou du côté droit du point de puissance maximale sur la caractéristique P-V. La valeur $\Delta e(t)$ exprime le sens de déplacement de ce point. La méthode choisie pour l'inférence, dans notre travail, est celle de Mamdani. Quant à la défuzzification, c'est la méthode du centre de gravité qui a été préférée pour le calcul de l'incrément du rapport cyclique $\Delta\alpha$ [33].

La matrice des règles que nous utilisons est représentée par le tableau (3.1), alors que la variable d'erreur (e) est transformée en termes de variable linguistique à l'aide de cinq sous-ensembles flous qui sont désignés par NG (négatif grand), NP (négatif petit), ZE (zéro), PP (positive petite), et PG (positif grand) avec NG et PG fonctions d'appartenance sous forme trapézoïdale et NP, ZE et PP sous forme triangulaire.

$\Delta e \backslash E$	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	PG	PG	PG	PP	ZE
NP	PG	PG	PP	ZE	NP
ZE	PG	PP	ZE	NP	NG
PP	PP	ZE	NP	NG	NG
PG	ZE	NP	NG	NG	NG

Tableau (II.01): Base de règles floues.

La variable linguistique assignée à $\Delta\alpha$, dépend des différentes combinaisons entre e et Δe . Par exemple, si les variables d'entrée (e et Δe), ont comme valeur PG et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta\alpha$ est NG, ce qui implique une forte variation négative du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et le point optimum. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta\alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La

Chapitre II *Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome*

figure (3.5) est illustrée respectivement les sous-ensembles flous de l'erreur et de la variation d'erreur, ainsi que de la variable de sortie

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées.

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification.

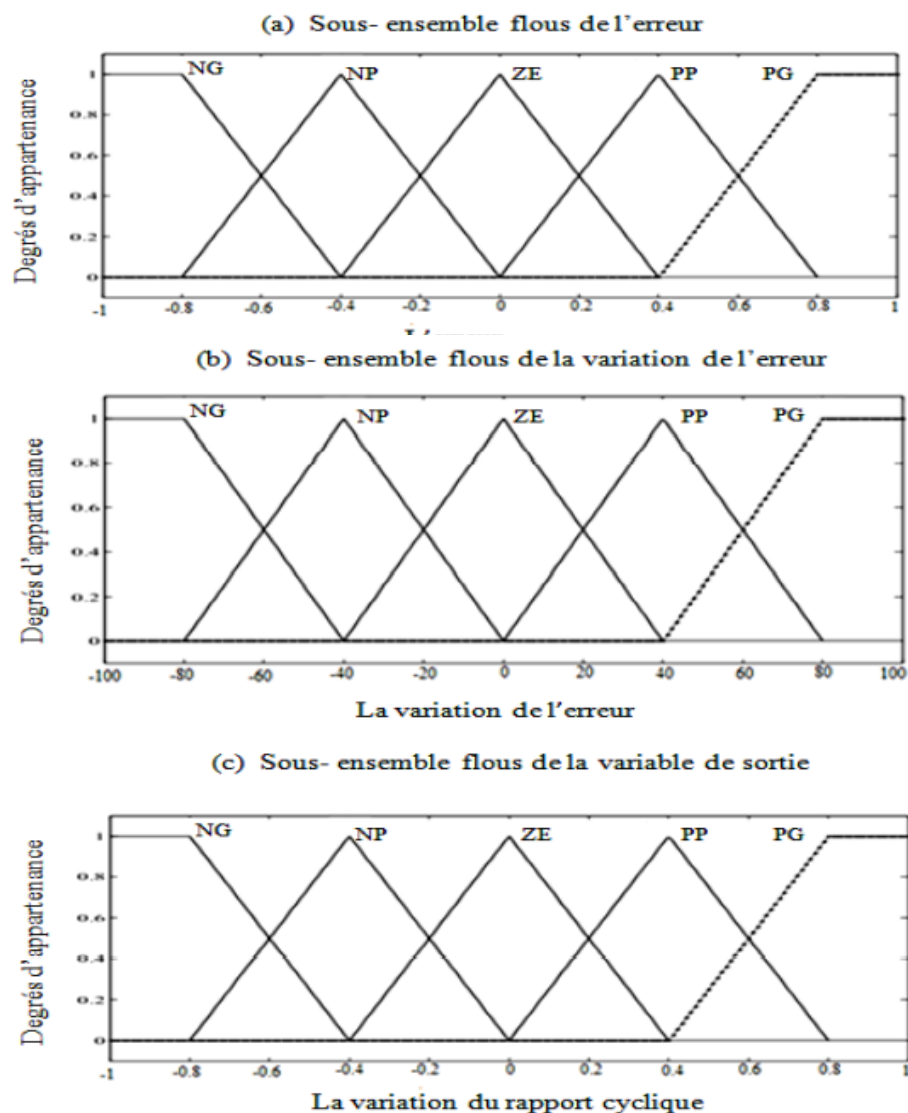


Figure (II.14): Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et la sortie

La conception du régulateur flou, type Mamdani, utilisé comme algorithme MPPT, passe par la synthèse de quatre étapes : fuzzification, base des règles, inférence floue et défuzzification, comme le montre la figure (II.15):

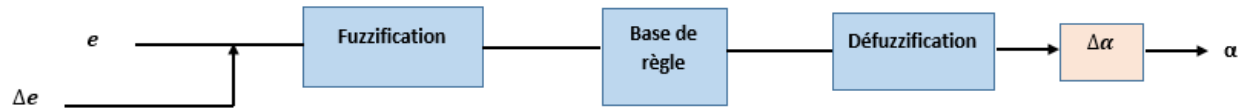


Figure (II.15): Structure du contrôleur MPPT flou.

Le contrôleur MPPT flou proposé, possède deux entrées et une sortie. Les deux variables d'entrées du FLC sont l'erreur e et la variation de l'erreur (Δe) prélevées à chaque pas d'échantillonnage, et la sortie ($\Delta\alpha$) représente l'incrément du rapport cyclique.

$$e = \frac{dp}{dv} \quad (\text{II.28})$$

II.8. Commande de la batterie

L'hacheur réversible en courant est contrôlé à l'aide d'un correcteur basé sur la théorie de Lyapounov, dont le SGE génère le courant de référence $I_{bat\ ref}$. En fait, la régulation en courant de la batterie permet de verrouiller les deux interrupteurs du convertisseur bidirectionnel.

On définit l'erreur du courant de la batterie comme suit :

$$e = i_{bat} - I_{bat\ ref} \quad (\text{II.29})$$

La dérivée de l'erreur est alors :

$$\dot{e} = i_{bat} - I_{bat\ ref} \quad (\text{II.30})$$

On choisit une fonction de Lyapunov quadratique :

$$V = \frac{1}{2} e^2 \quad (\text{II.31})$$

Une condition suffisante de stabilité est d'assurer la dérivée de V définie négative :

$$\dot{V} = \dot{e}e \quad (\text{II.32})$$

Choisissons une dérivée de V de forme exponentielle :

$$\dot{V} = -K_3 e^2 \quad (\text{II.33})$$

D'où, on aura:

$$\dot{e} = -K_3 e \quad (\text{II.34})$$

Chapitre II Modélisation et commande de système photovoltaïque autonome

On choisit une constante positive K_3 pour assurer la négativité de V , et faire converger l'erreur vers zéro. Dans cette condition, on détermine la commande (la tension aux bornes de la bobine V_L) à partir de l'équation dynamique de la bobine de l'hacheur :

$$V_L = L_{bat} \frac{di_t}{dt} \quad (\text{II.35})$$

En remplaçant l'équation (3.26) dans (3.28), on obtient :

$$V_L = L_{bat}(-K_3 e + I_{bat_{ref}}) \quad (\text{II.36})$$

Par conséquent, la tension à l'entrée de l'interrupteur V_e se déduit par

$$V_e = V_{bat} - V_L \quad (\text{II.37})$$

Et le rapport cyclique α_{bat} se met sous :

$$\alpha_{bat} = 1 - \frac{V_e}{V_{dc}} \quad (\text{II.38})$$

II.9. Régulateur de bus continu :

La tension du bus continu V_{dc} est influencée par les variations du courant de sortie du convertisseur DC/DC I_{pvs} qui est l'image des changements du rayonnement solaire (température, ensoleillement).

Pour identifier les paramètres de contrôle et de perturbation ; c'équation exprime l'état de la tension du bus :

$$i_{PV_{dc}} + i_{bat_{dc}} = i_c + i_{ch} \quad (\text{II.39})$$

$$i_c = i_{PV_{dc}} + i_{bat_{dc}} - i_{ch} \quad (\text{II.40})$$

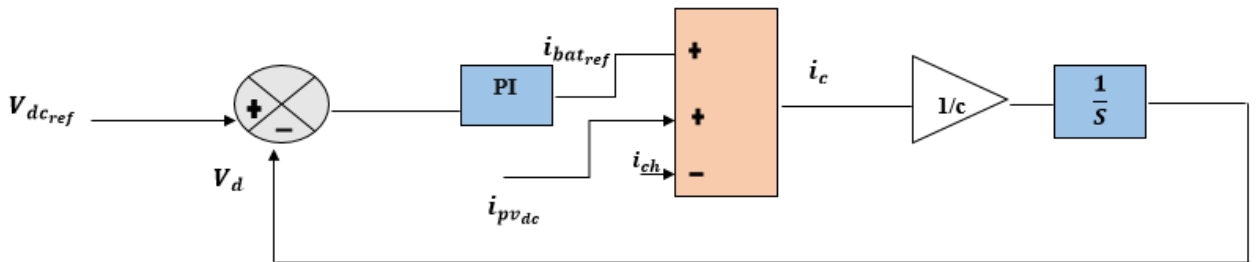


Figure (II.16): Schéma bloc de la régulation du bus continu.

II.10. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons modélisé notre système qui constituée par des panneaux photovoltaïques, une batterie de stockage et des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC) en étudiant leurs principes de fonctionnement, qui considèrent la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Cette modélisation nous permettra de prédire les performances du système une fois les approches de commande suggérées au chapitre suivant sont appliquées. Nous consacré dans ce chapitre à l'explication de principe de recherche du MPP et enfin l'algorithme MPPT basé sur la logique floue qui est un algorithme robuste et efficace.

Chapitre III
Résultat de la simulation de
système autonome

III.1. Introduction :

Ce chapitre décrit les résultats de simulation d'une source autonome composée d'un générateur PV (en tant que source principale) avec une batterie (en tant que source auxiliaire) et une charge DC sont connectés via des convertisseurs de puissance et une liaison CC. L'objectif principal est de concevoir un système de commande pour contrôler efficacement la puissance des différentes sources. Pour tester l'efficacité des différentes techniques de contrôle impliquées, les résultats de la simulation sont tracés et commentés.

III.2. Caractéristique du Panneau photovoltaïque :

III.2.1 Caractéristique I-V

Les caractéristiques $I_{PV}(V_{PV})$ et $P_{PV}(V_{PV})$ sont représentées dans les figures suivantes :

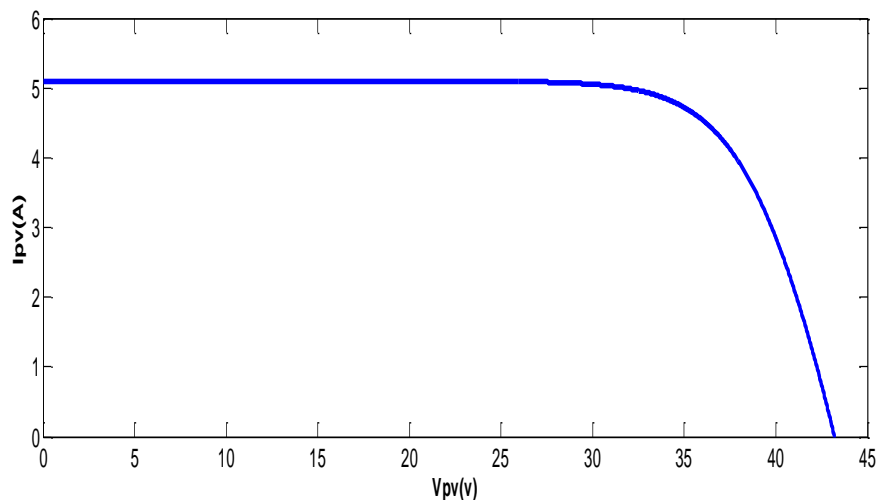


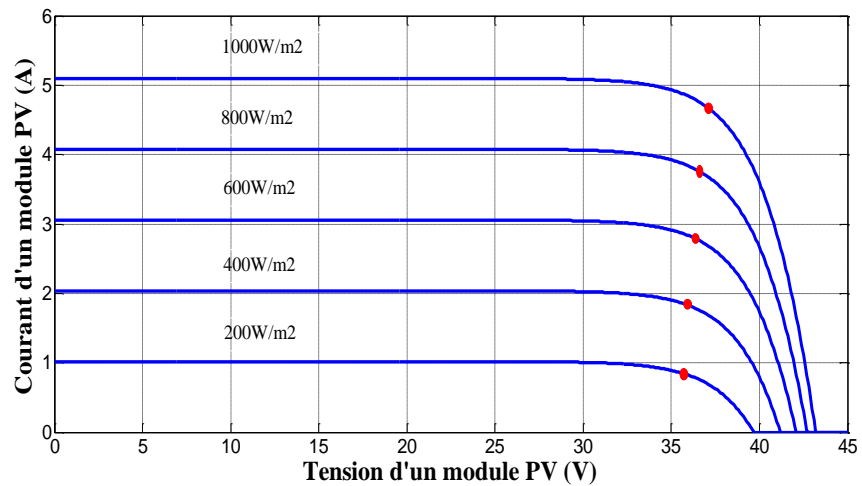
Figure (III.01) : Caractéristiques I-V du module photovoltaïque

La figure (III.01) représente la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque pour les conditions standards d'ensoleillement et de température.

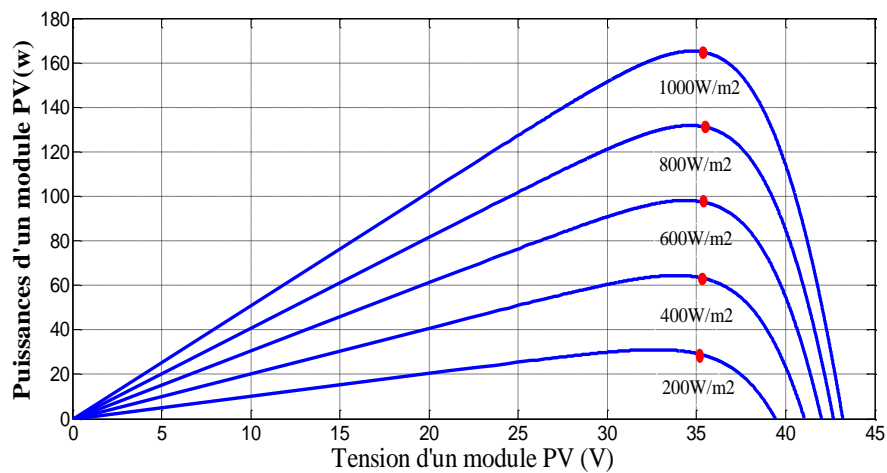
On constate que la caractéristique I-V se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension dans la partie verticale. On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale, située sur le coude de la caractéristique.

III.2.2 Influence de l'éclairement et la température

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module PV en fonction de l'ensoleillement et de la température sont représentées respectivement dans les figures 3.2 et 3.4.



Figure(III.02) : Caractéristiques courant-tension pour différents éclaircements

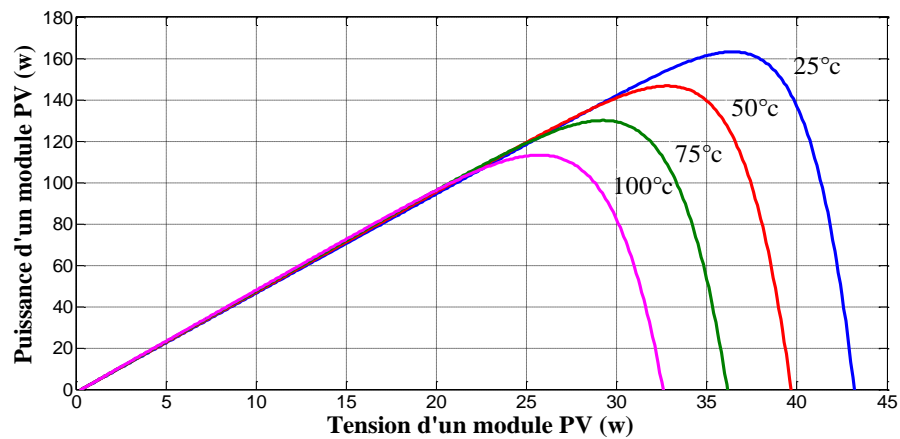


Figure(III.03) : Caractéristiques puissance-tension pour différents éclaircements

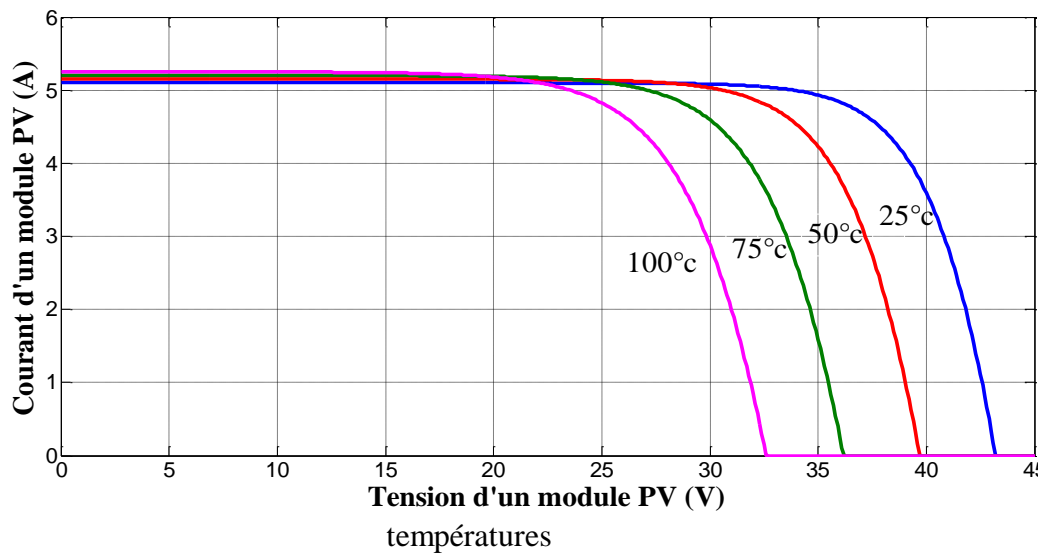
Afin de visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante à $T=25^{\circ}\text{C}$, et on fait varier l'éclairement de $G=200\text{W/m}^2$ à $G=1000\text{W/m}^2$ avec un pas de 200W/m^2

D'après les résultats donnés par la figures 2.4, nous remarquons que les valeurs du courant de court-circuit et de la puissance sont directement proportionnelles avec l'intensité d'éclairage ; tandis que la tension en circuit ouvert est légèrement variée.

Pour une température qui change de de 25°C à 100°C avec un pas 25 et Pour un éclairage constant, on peut voir que la variation de la tension est plus grande que celle du courant. La tension d'un module solaire est inversement proportionnelle avec la température.



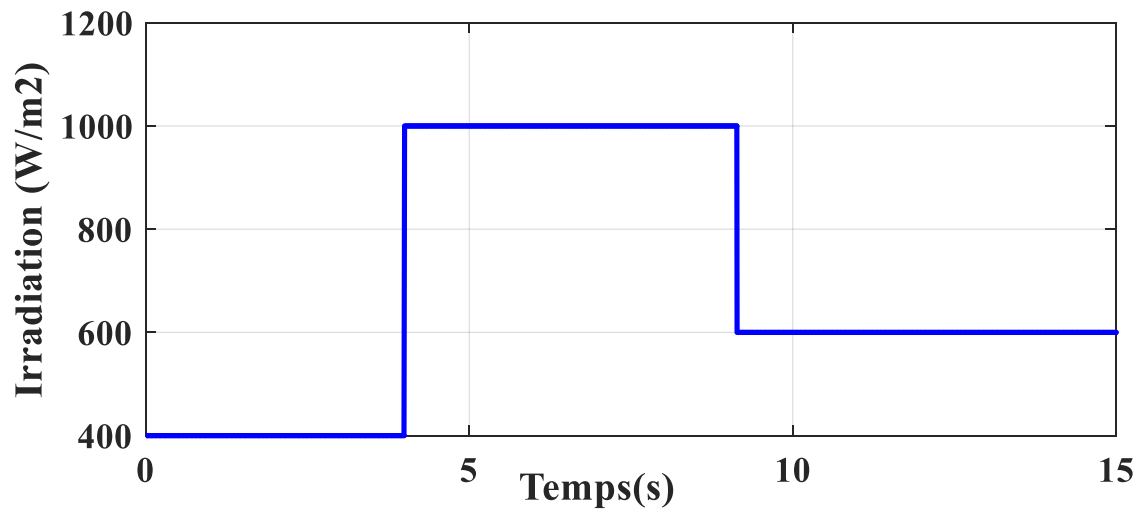
Figure(III.04) : Caractéristiques puissance-tension pour différent



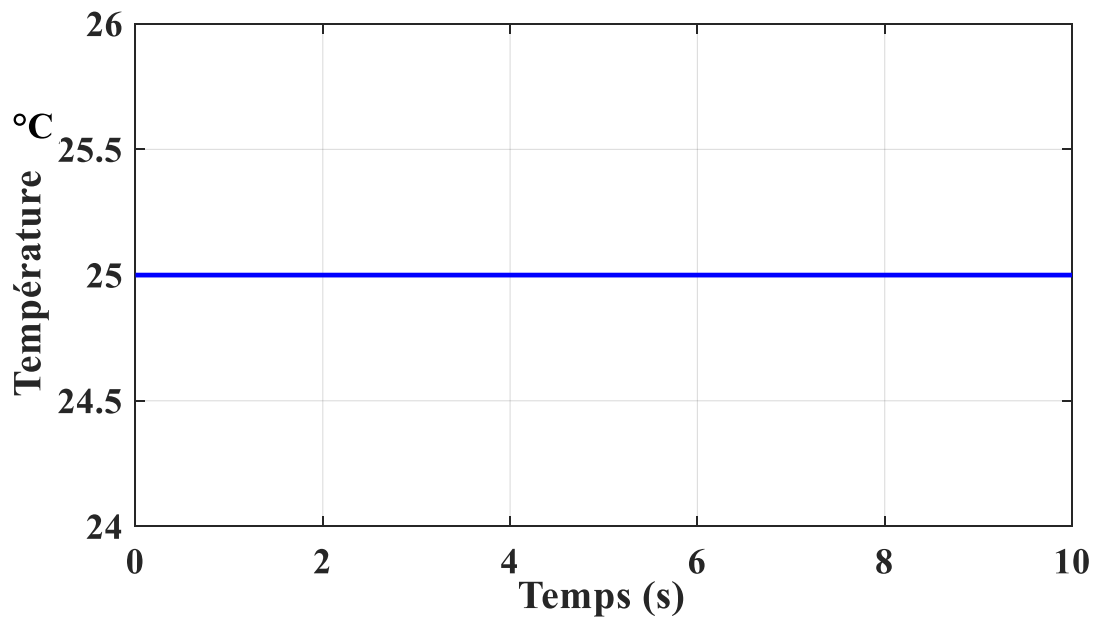
Figure(III.05) : Caractéristiques courant-tension pour différents températures

III.3. Caractéristique du Générateur photovoltaïque

Pour cet essai, la température est gardée constante à 25°C, seul l'éclairage varie comme on peut le voir dans les figures (III.06 et III.7).



Figure(III.06) : Eclairage de GPV



Figure(III.07) : Température de GPV

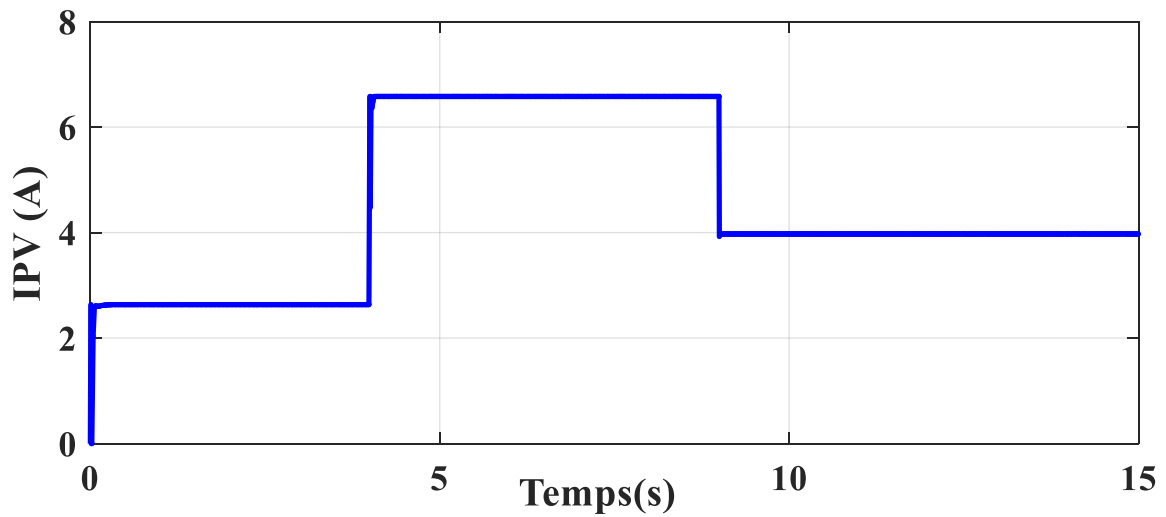


Figure (III.08) : Courant du GPV

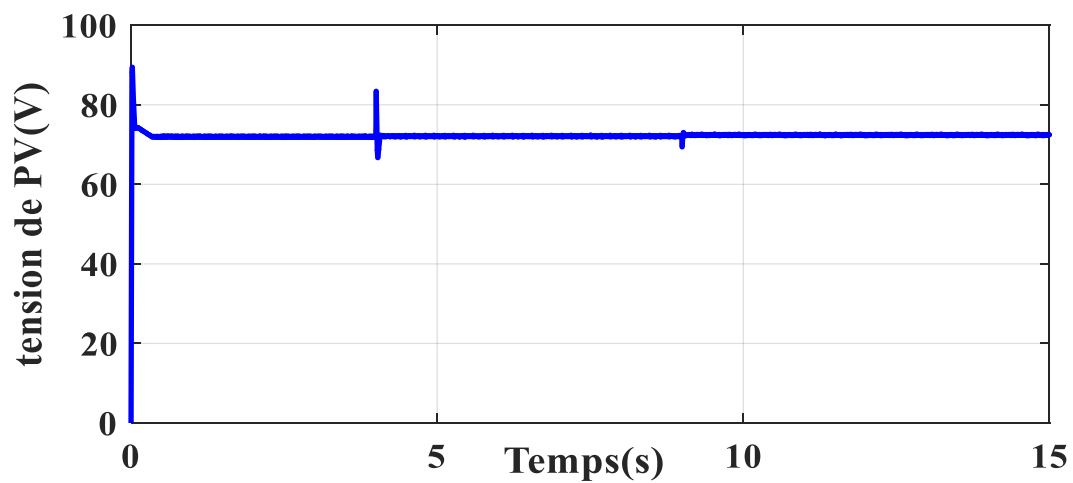


Figure (III.09) : Tension du GPV

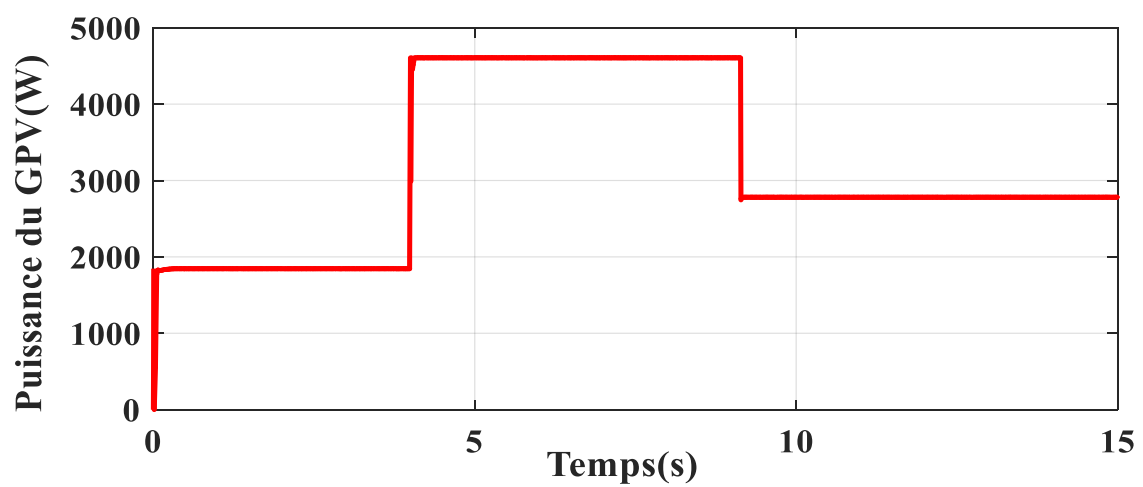


Figure (III.10) : Puissance du GPV

D'après les figures (III.8 ; III.9 et III.10) On constate que le module PV fonctionne à puissance maximale (P_{max}) correspondant à une valeur maximale du courant ($I_{mppt} = 6.5 \text{ A}$) et de tension ($V_{mppt} = 70 \text{ V}$) recherchée par l'algorithme de type MPPT flou (voir chapitre 3).

III.4. Profile de charge

La demande est choisie variable en créneaux de façon aléatoire, où la charge demande 3000W entre 0 et 4s ; 1400 entre 4 et 6s ; 4600W entre 6 et 12s ; et enfin 1800W entre 12s et 15s, comme illustré sur la figure.III.11.

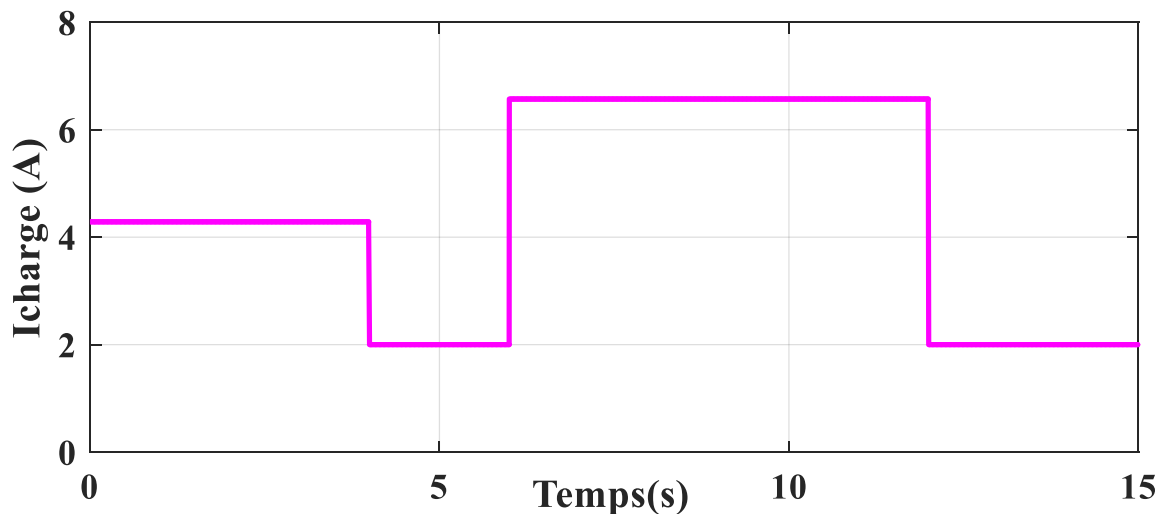


Figure (III.11) : Puissance de la charge

III.5. Caractéristique de la batterie

La tension de la batterie augmente lorsque la batterie est en charge, diminue quand la batterie se décharge et reste constante lorsque le courant est constant, comme il est illustré dans la figure III.12.

La figure (III.13) présente le courant de la batterie avec leurs références. On peut distinguer un bon suivi de consignes des courants et une rapidité notable, ce qui prouve l'efficacité des régulateurs robustes incorporés.

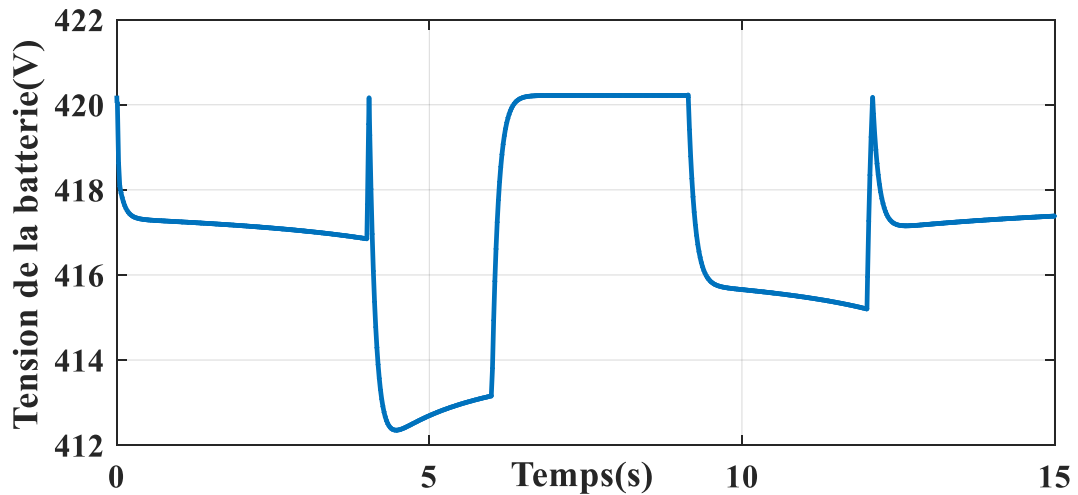


Figure (III.12) : Tension de la batterie

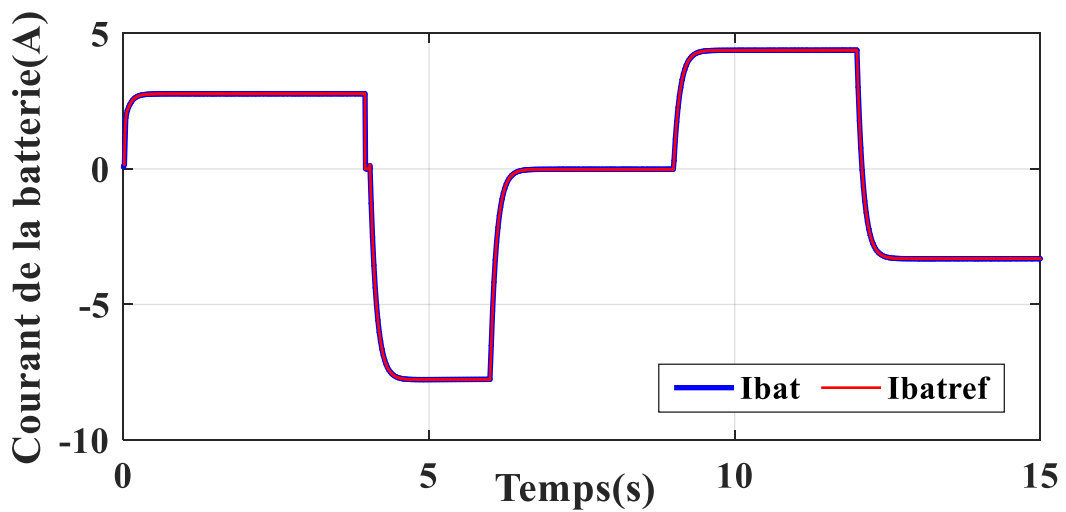


Figure (III.13) : Courant de la batterie

III.6. Résultat de simulation Fonctionnement du système autonome (PV-batterie)

D'après la figure III.14 et la figure III.15 ;

De (t=0-4s) : on remarque que la puissance fournie par charge est supérieur à la puissance de GPV, alors dans ce cas la batterie se décharge de 0.6% à 0.3% afin de couvrir la demande da la charge.

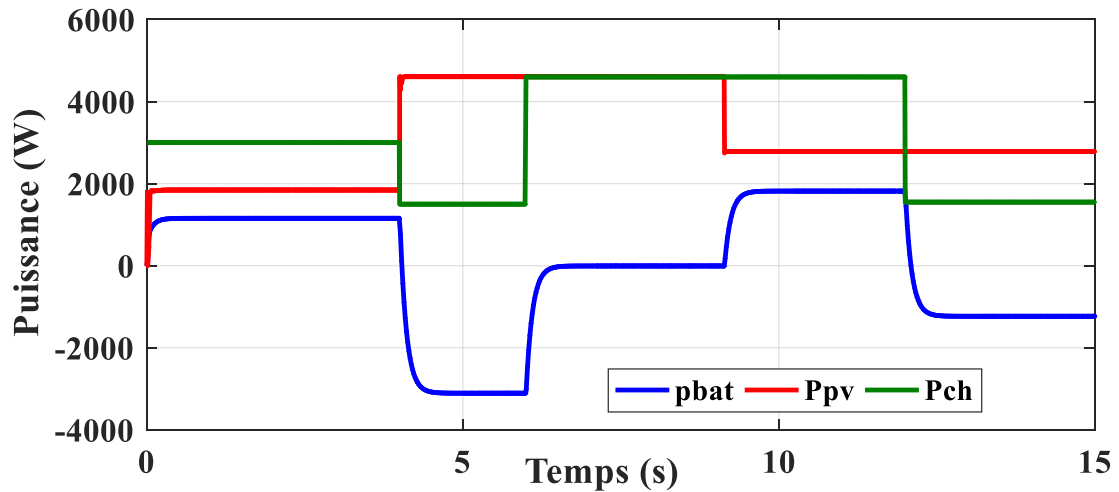
De (t=4-6s) : La demande de la charge est inférieur à la puissance délivrée par le GPV. L'excès alors est utilisé pour charger les batteries, à cet effet le courant de la batterie devient négatif.

De (t=6-9s) : On voit bien que la charge est alimentée seulement par le GPV, car la demande de la charge égale à la puissance délivré par de GPV. Donc le courant de la batterie sera constant.

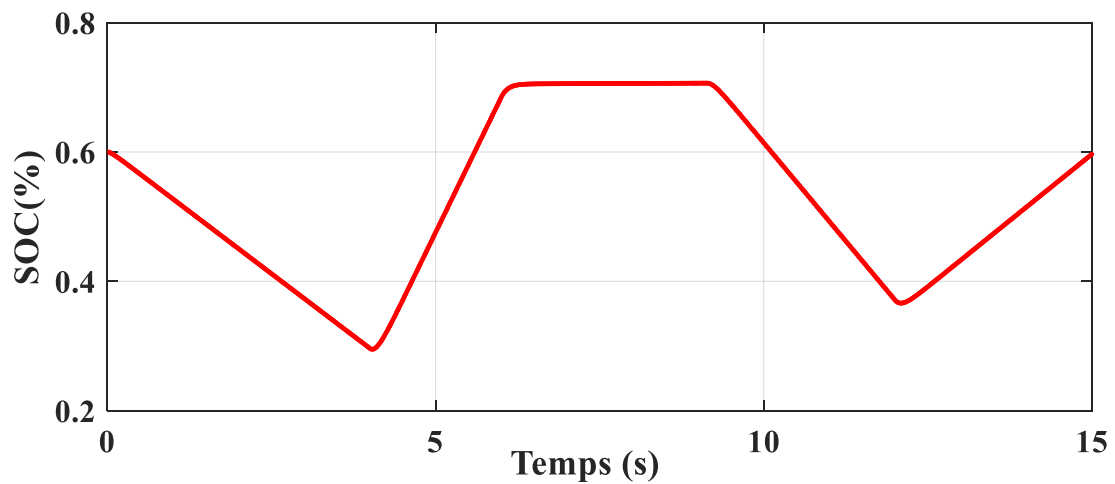
De ($t=9-12s$) : Ce cas est similaire à l'état de ($t=0-4s$), où la puissance fournie par le GPV est inférieure à celui demandé par la charge, dans ce cas le manque sera compensée par la batterie.

De ($t=12-15s$) : C'est le même cas qu'elle est dans l'intervalle de ($t=4-6s$).

La figure (III.15) présente l'état de charge des batteries. On constate bien que l'état de charge augmentent en cas de charge et diminuent en cas de décharge.



Figure(III.14) : Puissance de source et de la charge



Figure(III.15) : L'état de charge de la batterie

III.6.1 Régulation de la tension de bus continu

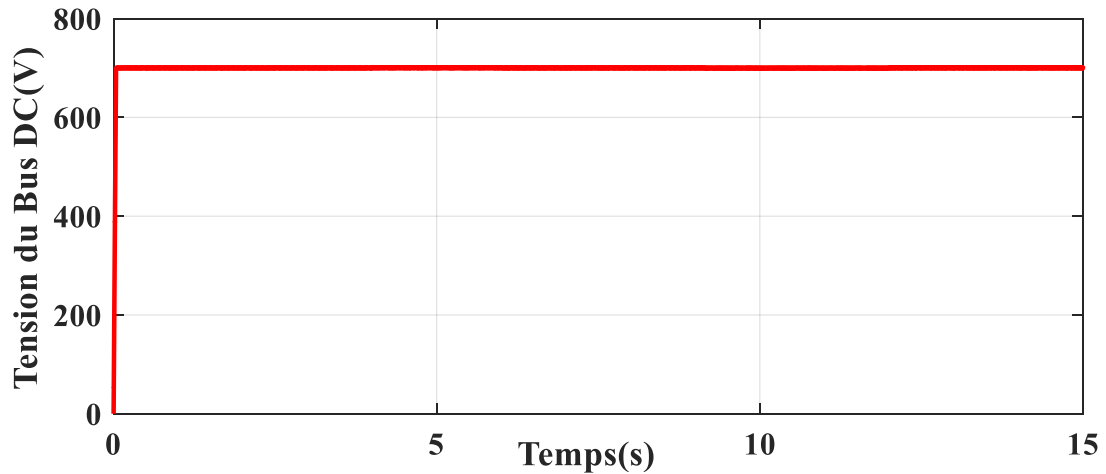


Figure (III.16) : La tension de bus continu Vdc

La figure (III.16) montre l'allure de la tension du bus continu. On constate que cette tension est bien régulée et que la réponse suit sa référence sans dépassement, ni erreur statique (avec un temps de réponse de 0.001s), ce qui prouve l'efficacité du contrôleur choisi.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats de simulation pour un système énergétique autonome qui est constitué d'un générateur photovoltaïque et un système de stockage avec des batteries au plomb-acide. Le contrôleur MPPT à logique floue introduit est autorisé d'extraire la puissance PV maximale disponible avec moins d'oscillation autour de l'optimum, quelle que soit la variation de la charge ou la variation de l'éclairement. La stratégie proposée distribue la régulation de la tension du bus DC entre les différentes sources en fonction des besoins de la charge.

Les résultats de simulations ont montré le bon fonctionnement du système étudié où l'énergie produite sert uniquement de charger la batterie qui constitue notre système de stockage. La batterie va servir à compenser le manque au niveau de la charge dans le cas où le GPV ne satisfait pas cette dernière.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était de développer la modélisation et la simulation d'un système hybride autonome : photovoltaïque et une batterie afin d'alimenter une charge de type DC. Dans ce projet nous avons traité les points suivants :

➤ 1- Nous avons étudié, modélisé et simulé le générateur photovoltaïque avec les batteries, l'étude est portée sur le principe de l'effet photovoltaïque et les équations mathématiques du schéma équivalent du générateur. A partir des équations mathématiques un modèle en Simulink a été développé. La simulation du modèle Simulink nous a permis d'étudier les caractéristiques courant -tension et puissance-tension en tenant compte des variations brutales des conditions météorologique.

➤ 2- Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur élévateur (BOOST) après l'analyse mathématique des différentes configurations des convertisseurs DC-DC nous a facilité la tâche de développement un modèle de recherche du MPPT en Simulink. La simulation du modèle Simulink du MPPT flou assemblé avec le modèle du générateur photovoltaïque on a obtenu les caractéristiques de la variation du MPPT en fonction de la variation brusque des conditions atmosphérique.

Afin de tester l'efficacité des différentes commandes appliquées aux sous-systèmes distincts du SEH, nous considérons quelques tests de simulation sous environnement Matlab. De ce fait, quelques conclusions ont été déduites:

➤ Le régulateur MPPT flou donne un suivi adéquat de la puissance maximale du générateur photovoltaïque, avec une oscillation moindre autour de sa référence et permet la poursuite du point optimum lors d'une variation brusque de l'éclairement ou de la charge.

➤ La tension du bus DC du système est bien régulée et que la réponse suit sa référence sans dépassement.

➤ Le processus de la charge/décharge de la batterie est contrôlé à travers un hacheur réversible en courant, ce dernier est commandé par un régulateur de Lyapunov pour stabiliser la tension sur le bus continu, sur lequel sont connectées les différentes sources et la charge.

Ainsi, le présent travail ouvre un ensemble de perspectives à citer :

➤ Augmentation de la taille du système, tout en ajoutant d'autres sources.

➤ Considérer un ombrage partiel du module solaire, et utiliser en conséquence, d'autres méthodes, telles que par exemple la méthode « ESM » (extremum seeking méthode) pour la poursuite du point optimum.

CONCLUSION GENERALE

➤ Dimensionnement des composants du système hybride par un logiciel approprié spécialisé dans le calcul technique et économique pour une diminution des coûts de revient

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1]: BOUZID Kheir eddine « Etude et Réalisation d'un système photo voltaïque à base d'une carte Arduino uno » 5 Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
- [2]: TOUIL Nacer Eddine '« Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhderd El-Oued, 2015.
- [3]: BOUKHERS DJAMAL « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [4] : Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 48). Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 24(7) :905–913, July 2016. 1, 2, 14, 15, 16, 17, 89, 90, 110, 11
- [5] : Photovoltaïque.info Centre de ressources sur les panneaux solaires et la production d'électricité Les technologies de cellules solaires photovoltaïques. 15
- [6] : L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.
- [7] : S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009
- [8] : S.Moussa, A.Kaabèche et M. Belhamel, 'Evaluation des Performances d'un Système Hybride de Production d'Electricité', Revue. Energie Renouvelable, 1999, pp 247-250.
- [9] : H. BELGHITRI et H. ' Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister, 2009
- [10] : Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome. I .VECHIU . Thèse doctorat de l'université du HAVRE, 2005
- [11] : Anas el Atmi « Conception et réalisation d'un régulateur solaire sous Labview à base de microcontrôleur » Pour l'obtention du diplôme de Master, Systèmes Microélectroniques, de Télécommunications et de l'Informatique Industrielle 2014.
- [12] : M.Belerbi « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome » thèse de doctorat Es-sciences, Université Mohamed Boudiaf-Oran 10.09. 2015

Références bibliographiques

[13] : Baghdadi Fazia, «Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, Soutenu le 26 /09 /2011.

[14] : Bendjamâa Ibrahim, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque», Mémoire de Magister de l'Université de Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen, 2012.

[15] : M.boukli-hacene Omar, «Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Mini d'un Convertisseur MPPT Pour Une Meilleure Gestion Energétique», Mémoire de Magister de l'Université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEN, décembre 2011.

[16] : Boukhers Djamil, «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage», Mémoire de Magister de l'Université de Mentouri de Constantine, 28 / 11 / 2007.

[17]: Maamir Madiha, « Gestion d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents», Mémoire de Magister de l'Université, 2014.

[18] : Z. Roumila « commande d'un système hybride photovoltaïque-éolien-diesel » Mémoire de magister en génie électrique université de bejaia, 2009.

[19] : M.boukli-hacene Omar, «Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Mini d'un Convertisseur MPPT Pour Une Meilleure Gestion Energétique», Mémoire de Magister de l'Université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEN, décembre 2011.

[20] : Yann Riffonneau, «gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau – Application à l'habitat », Thèse de doctorat de l'Université de JOSEPH FOURIER, soutenue le 23 octobre 2009.

[21] : Damien Paire, «Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides : application à un ascenseur avec récupération d'énergie», Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, soutenue le 6 décembre 2010.

[22] : Olivier Gergaud, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'École Normale Supérieure de Cachan, Soutenu le 9 décembre 2002.

Références bibliographiques

[23] : Redha Sadoun, «Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage », Thèse de doctorat de l'ECOLE CENTRALE DE LILLE, soutenue publiquement le 03/06/2013.

[24] : Ionel Vechiu, «modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat de l'université du Havre, Soutenue le 15 décembre 2005.

[25] : M. Becherif, M.Y. Ayad et A. Miraoui, « Modeling and Passivity-Based Control of Hybrid Sources: Fuel Cell and Supercapacitors», ISA 2006, vol.3, USA, Oct 2006.

[26] : Cédric CABAL «Thèse "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque"», préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS . UNIVERSITE TOULOUSE III , 2008.

[27] : A. B. learreta réalisation de commandes MPPT numériques ”, Projet fin d'études universitat rovir/virgili.

[28] : C. Cédric “optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque ”, Thèse de doctorat université de Toulouse 2008.

[29] : K. Kassmi, M. Hamlaoui et F. Olivier Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique ”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462.

[30] : T. Mrabti, M. El Ouariachi, K. Kassmi, F. Olivie et F. Bagui Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 567 – 575.

[31]: P. E. Kakosimos and A. G. Kladas, "Implementation of photovoltaic array MPPT through fixed step predictive control technique," Renewable energy, vol. 36, pp. 2508- 2514, 2011.

[32] : AYACHE Ismaïl et CHIKHAOUI Ahmed “Optimisation des intégrations des énergies renouvelables dans les réseaux de transport”, Mémoire de Master de l'Université de Larbi Tebessi,2018-2019.

[33] : Said Chikha, «Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques», Mémoire de Magister de l'Université de LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 2010/2011.

Références bibliographiques

[34] : DJELLOUL Houria et MOKRI Abdelmalek, « Dimensionnement du moteur électrique d'un véhicule hybride parallèle » Mémoire de Magister de l'Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Soutenu le 10 /07/2019