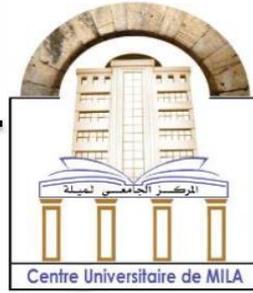


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



N ° Réf :

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila

Institut de Science et technologie

Département de Génie Mécanique et Electromécanique

**Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de
master en**

Option : Génie Mécanique et Electromécanique

**Commande Tolérante Du Système Hybride
PV-Batterie**

Préparer Par:

Merrad salah eddine .

Boutouiane taqiyeddine

Soutenu devant le jury :

Président : S.Bouchegouf

Examineur : S.Raslaine

Encadré par : Mourad.Tiar

Année Universitaire : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٣٨

REMERCIEMENT

Avant toute chose

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force et la détermination pour atteindre ce jour important de notre vie académique.

Avec notre gratitude, nous félicitons particulièrement notre professeur

Le superviseur, le Dr Murad Tayar, a participé à ce voyage, qui a joué le rôle de guide.

Nous tenons à remercier les enseignants de nous avoir aidés à réaliser cela.

Les progrès qui ont été réalisés au cours des cinq dernières années. Nous remercions également le jury pour cette discussion et la correction de la note finale.

En conclusion, nous remercions Dieu tout le temps et toujours pour la bénédiction de l'apprentissage.

Merci, nous vous souhaitons bonne chance et meilleurs vœux.

DÉDICACES

Pour tous ceux qui ont contribué au succès de notre travail.

Merci beaucoup

Je dédie cette mmoire à

mon père

Je vous dédie cet ouvrage en témoignage de ma gratitude. Que Dieu vous accorde santé
, longue vie et bonheur.

Chère maman

Aucune dédicace ne peut exprimer l'appréciation et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Mes frères

À vous, qui avez toujours été mon pilier de force et mon soutien indéfectible à travers
les hauts et les bas de ce voyage. Merci..

Je vous dédie cet ouvrage avec tous mes meilleurs vœux de bonheur, de santé et de réussite.

À tous les membres de ma famille, petits et grands, et à mes chers amis

BOUTOUIANE TAQIYEDDINE

DÉDICACES

Louange à Dieu qui m'a permis de faire ce travail. Je dédie ce travail.

à ma mère

Grâce à votre motivation et à vos prières, j'ai atteint là où je suis maintenant, alors merci, la meilleure mère du monde

A mon père

Grâce à vos efforts et à vos efforts, je termine ma carrière universitaire. Merci, le meilleur père.

À ma seule sœur

A mes oncles

Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi, chacun en son nom

À mon collègue dans ce travail, Taqi al-Din

À tous ceux qui m'ont appris une lettre au cours de mon parcours universitaire

Merci à tous Nous demandons à Dieu plus de succès.

MERRAD SALAH EDDINE

NOMENCLATEUR

AC	courant alternative
DC	courant continue
I&C	conductance incrémentale
PV	photovoltaïque
P&O	perturbation et observation
MPPT	point de puissance maximale
AsGa	l'arséniure de Gallium
CdTe	tellurure de Cadmium
InGaP	phosphore d'Indium Gallium
IncCond	conductance incrémentale
Pch	puissance de la charge
FTC	Commande tolérante aux défauts.
AFTCS	Système de commande tolérante active
PFTCS	Système de commande tolérante passiv
UPS	similaire à un système
N	dopage implique une surabondance d'électrons
P	dopage implique une surabondance de trous
SOC	état de charge
DOD	profondeur de décharge
KVL	lois de tension de kirchhoff

Vbat	tension de batterie
Ibat	courant de batterie
C	capacité
FTC	fault tolérant control
PFTCS	passive fault tolérant control de système
AFTCS	active fault tolérant control de système
FDI	fault détection et isolation
Ipv	courant de panneau
Vpv	tension de panneau
Io	courant de saturation de diode
Vth	tension thermique
Rs	resistance series
Vop	tension optimal
Iop	courant optimal
Tref	température de référence
Eref	éclairage de référence
Voc	tension en circuit ouvert
RC	réseaux de polarisation

ملخص:

يقترح العمل الحالي التحكم المتسامح مع الأخطاء في أنظمة البطاريات الكهروضوئية الذكية. تم تصميم هذا النظام الصغير للحمل المستمر والمستقر، ويتكون من ألواح كهروضوئية مدعومة بالبطارية. تم تصميم خوارزميات إدارة الطاقة لضمان التبديل الذكي بين وضعي التشغيل المتوفرين. تُستخدم تقنيات التحكم المتسامحة مع الأخطاء للحفاظ على استمرارية الخدمة عند فشل الأنظمة الفرعية. وذلك لتحديد قدرة النظام على الحفاظ على استمرارية الخدمة في حالة تعطل البطارية. يضيف هذا السيناريو أوضاعًا وظيفية إضافية لإعادة تكوين استراتيجية التحكم. لإثبات فعالية الخوارزمية المقترحة، تم عرض نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها والتعليق عليها بمنحنيات تحميل محددة.

الكلمات المفتاحية : التحكم المتسامح , أنظمة البطاريات الكهروضوئية

Résumer :

Le présent travail présente **le contrôle tolérant** aux pannes **des systèmes de batteries PV** intelligents. Ce petit système est destiné à des charges continues stables et se compose de panneaux photovoltaïques supportés par une batterie. Un algorithme de gestion de l'alimentation a été conçu pour assurer une permutation intelligente entre les deux modes de fonctionnement proposés.

La technologie de contrôle tolérante aux pannes est utilisée pour maintenir la continuité du service en cas de défaillance d'un sous-système. Il s'agit de déterminer la capacité du système à maintenir la continuité du service en cas de panne de la batterie. Ce scénario ajoute des modes fonctionnels supplémentaires pour reconfigurer la stratégie de contrôle. Pour prouver l'efficacité de l'algorithme proposé, les résultats de simulation obtenus sont présentés et commentés avec des profils de charge spécifiques.

Les mots clé : le contrôle tolérant , systèmes de batteries PV

Abstract :

This work proposes a fault-**tolerant control** of a smart **photovoltaic battery system**. This small system is designed to provide a steady continuous load and consists of photovoltaic modules supported by batteries. We develop a power management algorithm that ensures intelligent switching between the two operating modes provided.

The fault-tolerant control technique is used to maintain service continuity in the event of a subsystem failure. This is to determine the system's ability to maintain service continuity in the event of a battery failure. The scenario adds additional functional modes to reconfigure the control strategy. The obtained simulation results are presented and commented with a specific load profile in order to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: tolerant control , photovoltaic battery system ,

Table des Matières

Remerciement.....	I
Dédicaces.....	II
Dédicaces.....	III
Merrad salah eddine	III
Nomenclateur.....	IV
ملخص.....	VI
Résumer	VI
Abstract :	VII
Introduction générale.....	1

chapitre 01

I.1. Introduction.....	4
I.2. Le modèle photovoltaïque	5
I.2.1. Principe photovoltaïque	5
I.2.2. Technologies des cellules PV :	8
I.2.3. avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	9
I.2.3.1. Avantages	9
I.2.3.2. Inconvénients	10
I.3. Stockage de l'énergie	10
I.3.1. systèmes de Stockage de l'énergie.....	10
I.3.2. Systèmes de stockage.....	11
I.3.2.1. Les Batteries.....	11
I.3.2.2. Généralités sur Les Batteries.	12
I.3.2.3. Principe de fonctionnement de la batterie Lithium-Ion.	13
I.3.2.4. Paramètres de la batterie.....	14
I.3.2.4.1. La capacité (c ou Q).	14
I.3.2.4.2. Etat de charge (SOC).	15
I.3.2.5. Caractéristique de la batterie Li-Ion.....	15
I.4. Commande Tolérante du Système Hybride	16
I.4.1. Avantages et inconvénients d'un système hybride :	16
I.4.2. Architecture à bus continu :	17
I.4.3. Architecture à bus alternatif :	17
I.4.3.1. Classification des méthodes de la commande tolérante aux défauts	19
I .5. Conclusion :	22

Table des Matières

chapitre 02

II.1. Introduction	24
II.1.1. Modèle de panneau photovoltaïque	25
II.1.1.1. Le modèle de la batterie	26
II.1.1.2 Caractéristique IV	28
II.1.1.3. Influence de l'irradiation et de la température.....	31
II.1.2. Modèle de batterie (plomb-acide)	34
II.1.2.1. Modèle Thévenin.....	34
II.1.2.2. État de charge de la batterie (SoC)	36
II.2. Modélisation des convertisseurs statiques	37
II.2.1. Modélisation du Boost Converter côté PV	37
II.2.1.1. Séquences opérationnelles et équations d'état	38
II.2.1.2. Modèle moyen.....	40
II.2.2. Modélisation du convertisseur Buck-Boost de batterie (convertisseur bidirectionnel)	41
II.2.2.1. Séquences opérationnelles et équations d'état.....	41
II .3. Conclusion	43

chapitre 03

I. Introduction.....	45
II. STRATÉGIE DE GESTION DE L'ÉNERGIE.....	46
III. Mode 1 (MPPT et source d'appoint)	47
III .1 Principe générale de la commande MPPT.....	48
III .2 L'algorithme de commande MPPT	50
III .2 .1 L'algorithme Perturber et Observer (P&O)	50
III .2. 2 Conductance incrémentale.....	52
IV. Conclusion	58

chapitre 04

IV.1 Introduction	60
IV.2 RÉSULTATS DES SIMULATIONS	60
IV.3 Conclusion	65
Conclusion générale	67
Références.....	68

Table des figures

Figure I.1 Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV	5
Figure I.2 Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque.....	5
Figure I.3 Schéma de principe de la conversion photoélectrique.....	7
Figure I.4 Principe photovoltaïque	8
Figure I.5 Représentation schématique d'une batterie en charge (a) et en décharge (b). [09]	13
Figure I.6 Caractéristique de la batterie.	15
Figure I.7 configuration du système hybride à bus continu.....	17
Figure I.8 configuration du système hybride à bus alternatif.....	18
Figure I.9 Schéma de principe d'une loi de commande FTC Passive.	20
Figure I.10 Schéma de principe d'une loi de commande FTC active	21
Figure II.1 : schéma synoptique du système hybride	24
Figure II.2 : Schéma équivalent du panneau photovoltaïque.....	26
Figure II.3 Bloc de la batterie de Matlab.....	26
Figure II.4 Circuit équivalent de la batterie.....	27
Figure II.5 Le modèle de la batterie.	28
Figure II.6. Caractéristiques du panneau PV du panneau utilisé dans des conditions standards ..	30
Figure II.7. Caractéristique IV du panneau PV pour différents niveaux d'irradiation (E) à une température fixe de 25°C.....	31
Figure II.8 .Caractéristique PV du panneau PV pour différents niveaux d'irradiation (E) à une température fixe de 25°C.	32
Figure II.9 Caractéristique IV du panneau PV pour différentes valeurs de température à une irradiation fixe de 1000W/m ²	32
Figure II.10. Caractéristique PV du panneau PV pour différentes valeurs de température avec une irradiation fixe de 1000W/m ²	33
Figure II.11 : Modèle électrique simple équivalent d'une batterie	34
Figure II.12 : Modèle de batterie Thevenin [16]	36
Figure II.13 : une photo de la batterie usagée	37
Figure II.14 : Schéma descriptif du convertisseur boost	38
Figure II.15 : Circuit électrique équivalent de la première	39
Figure II.16 Circuit électrique équivalent de la deuxième séquence de conduction De la même manière	40
Figure II.17 : Convertisseur associé aux batteries	41
Figure II.18 : Le diagramme schématique de la première séquence	42
Figure II.19 Le schéma de la deuxième séquence de conduction	42
Figure III .1 contrôle tolérant aux pannes du système hybride.	46

Table des figures

Figure III.2 Configuration du système de génération hybride en mode 1	48
Figure III.3 Chaîne de conversion avec une commande MPPT	49
Figure III.4 Caractéristique de fonctionnement de la méthode de P&O	51
Figure III.5 Algorithme du MPPT perturbation et observation	52
Figure III .6 Algorithme du MPPT conductance incrémentale	53
Figure IV.1 Puissance de Batterie (w)	60
Figure IV.2 Puissance PV (w)	61
Figure IV.3 puissance nette (w).....	62
Figure IV.4 Tension PV (v)	62
Figure IV.5 Puissance de charge (w)	64
Figure IV.6 caractéristique du module PV.....	64
figure IV.7 tension de DC bus.....	65

Liste des Tableaux

Table II.1 : caractéristiques du panneau solaire utilisé	33
---	----

Introduction Générale

Introduction générale

La plus part des énergies renouvelables s'exprime à deux niveaux. Premièrement, il existe plusieurs sources « inépuisables » ou du moins possédant une capacité de régénération plus rapide que leur utilisation : mouvement terrestre, vent, soleil etc. Certaines d'entre elles sont employées depuis longtemps, comme le bois, d'autres ont été découvertes plus récemment (géothermie, hydraulique)... Deuxièmement, les possibilités de transformation de ces sources en énergie utile aux activités humaines sont variées (chauffage domestique, réfrigération industrielle, cuisson de la nourriture, électricité alimentant les ordinateurs, les véhicules.

L'énergie solaire se caractérise par la chaleur et la lumière. La chaleur peut être utilisée directement pour chauffer des bâtiments, de l'eau au moyen de capteurs, pour sécher des fourrages ou dans des installations de climatisation solaire. La chaleur solaire, comme n'importe quel type de chaleur peut aussi être convertie en énergie mécanique puis en électricité dans des centrales électriques thermiques.

La technologie photovoltaïque est en train de subir un essor sans précédent. En effet, la production d'énergie solaire dans le monde a été multipliée par 20 en dix ans. Des efforts sont en cours pour améliorer la compétitivité des panneaux solaires, aussi bien au niveau du rendement que du coût. Les matériaux utilisés à la fabrication sont en évolution, avec des panneaux possédant un rendement de plus en plus important. Le principal inconvénient de l'énergie solaire est qu'elle varie irrémédiablement en fonction des conditions climatiques. En hiver, ou la nuit, ou par temps pluvieux par exemple, la puissance fournie par les panneaux est sensiblement réduite. Ce problème doit être pallié par l'installation d'un périphérique de stockage, de type accumulateur, qui aura pour rôle d'alimenter le réseau pendant ces périodes.

Le premier chapitre présente donc sur l'étude de l'énergie photovoltaïque généralement et le stockage d'énergie par les batterie , Nous nous sommes également concentrés spécifiquement sur La batterie lithium-ion et l'étude de son rôle et de ses propriétés.

Et à la fin nous avons vu le système hybride et son avantages et inconvénients On étudie ensuite dans le deuxième chapitre la modélisation de système, modélisation de la pv et la batterie et par la suite le convertisseur boost (survolteur) DC/DC

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, nous décrivons l'approche de contrôle du système dans deux cas différents.

- Le premier cas est le cas normal dans lequel le panneau photovoltaïque (PV) fonctionne selon le programme MPPT et la batterie fonctionne normalement.
- Le deuxième cas est lorsque la batterie est endommagée, nous utilisons la limitation de puissance

Dans le dernier chapitre, nous essayons d'atteindre des résultats en utilisant la simulation à travers l'application MATLAB

Chapitre I

**Généralité sur l'énergie photovoltaïque et
stockage du système et la commande tolérante
du système hybride**

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

I.1. Introduction

Les systèmes solaires hybrides génèrent de l'énergie de la même manière qu'un système solaire conventionnel, mais utilisent des onduleurs et des batteries hybrides spéciaux pour stocker l'énergie pour une utilisation ultérieure. Cette capacité à stocker de l'énergie permet à la plupart des systèmes hybrides de fonctionner également comme une alimentation de secours en cas de panne d'électricité, similaire à un système UPS.

Traditionnellement, le terme hybride faisait référence à deux sources de production telles que l'énergie éolienne et solaire, mais dans le monde solaire, le terme «hybride» désigne une combinaison de stockage d'énergie solaire et d'énergie qui est également connectée au réseau électrique.

Un système prêt à utiliser une batterie utilise un onduleur hybride plutôt qu'un onduleur solaire à chaîne classique. La plupart des onduleurs hybrides modernes ont un chargeur de batterie et une connexion intégrés, ce qui facilite l'ajout d'une batterie beaucoup plus facilement à l'avenir. Cependant, les onduleurs hybrides sont plus chers et si vous n'ajoutez pas de batteries lors de l'installation, il peut être difficile de rechercher des batteries compatibles au bout de quelques années.

I.2. Le modèle photovoltaïque

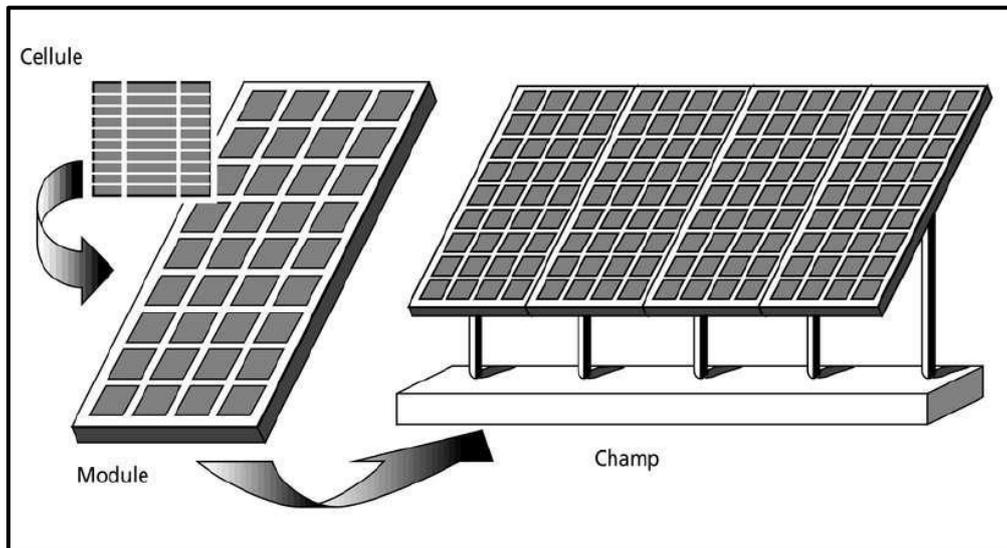


Figure I.1 Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV

I.2.1. Principe photovoltaïque

Le photovoltaïque est l'énergie solaire produite par la transformation d'une partie du rayonnement solaire à l'aide d'une cellule photovoltaïque. Différentes cellules sont connectées et constituent un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Un champ photovoltaïque est un ensemble de modules regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque. Le mot photovoltaïque peut être utilisé pour décrire soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque -, soit la technologie qui lui est liée.

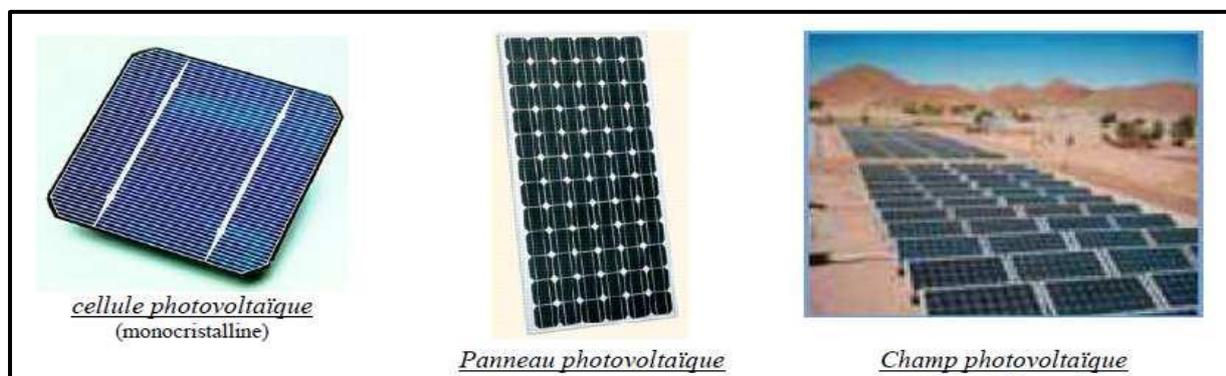


Figure I.2 Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

L'utilisation courante de la conversion photovoltaïque peut être définie de manière simple comme la conversion de l'énergie des photons en énergie électrique grâce à l'absorption de la lumière par la matière. En absorbant un photon par le matériau, une partie de son énergie est transmise par collision à un électron qui l'arrache de la matière. Comme il était auparavant à un niveau d'énergie plus bas, il se déplace alors vers un niveau d'énergie plus élevé, ce qui entraîne un déséquilibre électrique au sein de la matière, se traduisant par une paire d'électrons et de trous, avec la même énergie électrique.

La paire électron-trou retrouve généralement l'équilibre rapidement en convertissant son énergie électrique en énergie thermique. De manière similaire, le matériau absorbe toute l'énergie des photons qui ne parviennent pas à se convertir en électricité sous forme thermique. Les capteurs photovoltaïques ont donc une température interne qui augmente en fonction de l'énergie solaire reçue. Ainsi, l'effet thermique est prédominant sur la plupart des capteurs, ce qui entraîne une détérioration accrue de leurs performances [01]

Bien que le phénomène électrique soit secondaire par rapport au phénomène thermique, l'objectif principal des capteurs photovoltaïques, qu'ils soient des cellules ou des générateurs, est de récupérer l'intégralité ou une partie de l'énergie électrique. On peut réaliser cela en utilisant, par exemple, des cellules solaires fabriquées à partir d'un matériau semi-conducteur avec un dopage de type N sur une face et un dopage de type P sur l'autre face (Le dopage de type N implique une surabondance d'électrons dans le matériau, tandis que le dopage de type P implique une surabondance de trous dans le matériau). En termes électriques, l'énergie générée par l'absorption d'un photon dans un matériau se manifeste par la formation d'une paire électron-trou (Figure 1.2). L'effet photovoltaïque se produit lorsque cette réaction entraîne une variation de la répartition des charges, ce qui entraîne une variation du potentiel électrique. En combinant deux types de dopage, on peut créer une jonction qui permet de récupérer les charges avant qu'elles ne se recombinent dans le matériau, ce qui le rend alors neutre.

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

La jonction PN assure donc une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Il est important de connaître le nombre de photons par unité de longueur d'onde dans les applications photovoltaïques afin d'évaluer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde maximale des photons se situe entre 650 et 670 nm.

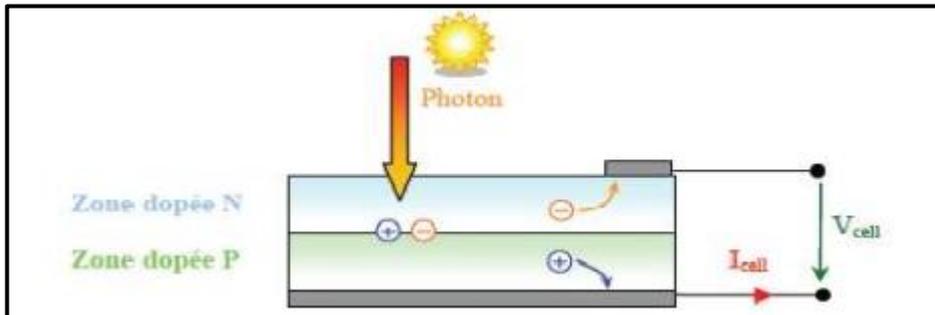


Figure I.3 Schéma de principe de la conversion photoélectrique

La majorité des panneaux solaires utilisent des semi-conducteurs afin de collecter les paires électron-trou formées par la collision des photons dans le matériau. Toutefois, en fonction du matériau employé, le nombre de photons utiles (capables d'être absorbés) varie. Effectivement, chaque matériau a sa propre consommation d'énergie (bande d'énergie interdite). Tout photon qui a une énergie inférieure à ce espacement et qui atteint la surface du matériau ne pourra pas tirer un électron de celui-ci, même s'il entre en collision avec un. Le courant généré par un capteur photovoltaïque est donc nettement inférieur à la quantité de photons qui atteignent le matériau, car plusieurs conditions doivent être remplies pour que l'énergie d'un photon se transforme réellement en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau,...). [02]

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

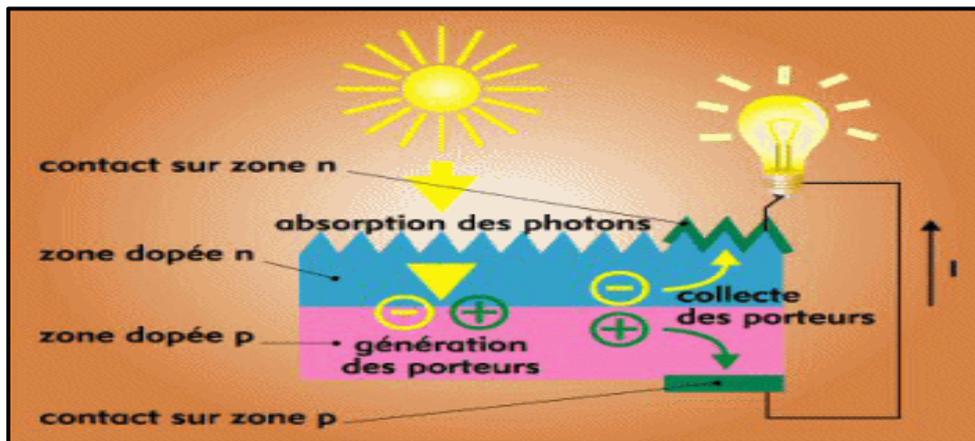


Figure I.4 Principe photovoltaïque. [02]

I.2.2. Technologies des cellules PV :

Le silicium est généralement le matériau de base utilisé dans la production des cellules photovoltaïques. Plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui est représenté par cette technologie, dont 29% pour le silicium monocristallin et 51% pour le silicium multi cristallin. Les photopiles seront plus ou moins performantes en fonction du procédé de fabrication, qu'elles soient amorphes, poly cristallines ou mono cristallines. Il est possible d'utiliser d'autres matériaux tels que l'arséniure de Gallium (AsGa), le tellure de Cadmium (CdTe), le phosphore d'Indium Gallium (InGaP), et le Cu(InGa) Se₂. Le choix entre ces diverses technologies varie en fonction du coût et de la performance énergétique. Certains rendements liés aux différentes photopiles existantes sont exposés ci-dessous. [03]

- Les cellules monocristallines font partie de la famille des photopiles de première génération. Leur rendement en laboratoire est très élevé avec 24,7% (record établi en 1999). Sun Power propose une cellule similaire avec un rendement satisfaisant pouvant atteindre 24,2%. Toutefois, leur processus de fabrication est ardu et complexe, ce qui les rend extrêmement coûteux. Pour obtenir du cristal pur, il est nécessaire d'avoir une grande quantité d'énergie.
- La production de cellules poly cristallines est moins coûteuse et utilise un procédé moins énergivore, avec un rendement de 11 à 15% (19,8% en laboratoire).

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

- La production de cellules amorphes est beaucoup plus abordable, mais malheureusement avec un rendement inférieur de 5 à 8% (13% en laboratoire). Grâce à cette technologie, il est possible d'utiliser des couches de silicium très fines mesurant seulement 0,3 à 1,0 micromillimètres (500 μ m pour les deux autres types). Pour produire la même quantité d'électricité, les panneaux amorphes nécessitent environ deux fois plus de surface et semblent se détériorer plus rapidement. Toutefois, ils présentent le bénéfice de réagir de manière plus efficace à la lumière diffusée et à la lumière fluorescente, ainsi que d'être plus efficaces à des températures élevées.
- Le rendement des cellules en composite monocristallin (AsGa) varie de 18 à 20% (27,5% en laboratoire).
- En laboratoire, les cellules en composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe₂, etc.) présentent un rendement de 8 %.

I.2.3. avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

Actuellement, les systèmes photovoltaïques sont en plein essor et leurs diverses technologies et leurs applications ont démontré leur efficacité dans de nombreux domaines. Toutefois, les études persistent afin de minimiser à zéro les inconvénients maximums qui laissent malheureusement de nombreux consommateurs encore hésitants.

I.2.3.1. Avantages

Les installations solaires électriques présentent de multiples bénéfices :

- Presque partout, ils sont dépendants d'une énergie abondante, gratuite, inépuisable et renouvelable.
- Ils ne polluent pas, restent silencieux et sont fiables.
- Ils ne demandent quasiment pas d'entretien.
- Ils offrent une grande souplesse et peuvent être élargis à tout moment afin de satisfaire les besoins en électricité.
- Ils sont lucratifs, ils ont une durée de vie supérieure à 30 ans.

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

- Chaque jour, leur coût d'investissement diminue.
- Ils confèrent une plus grande autonomie aux systèmes de secours.

I.2.3.2. Inconvénients

Les systèmes solaires présentent des limites :

- Ils sont basés sur une énergie aléatoire et irrégulière.
- Ils ne sont pas compatibles avec les consommations élevées.
- La performance des cellules est faible (entre 10% et 15%).
- La taille et le prix des installations majeures.
- La pollution visuelle altère l'atmosphère

I.3. Stockage de l'énergie

I.3.1. systèmes de Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage [04].

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

I.3.2. Systèmes de stockage

Dans une installation photovoltaïque, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques [05].

Le stockage de l'énergie électrique passe plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire quelconque, (gravitaire, de compression, électrochimique, électrostatique, électromagnétique, cinétique, thermique, etc.....) transformable en second temps en électricité. Il y a deux types de stockage à envisager :

- Stockage à court terme : (temps de stockage inférieur à 10 minutes).
- Stockage à long terme : (temps de stockage supérieur à 10 minutes).

Le choix du système de stockage se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont :

- La puissance massique (en W/kg).
- L'énergie massique (en Wh/kg).
- Le nombre de cycles de fonctionnement.
- Le coût.
- Le rendement énergétique

I.3.2.1. Les Batteries

Les Batteries utilisent dans le Stockage sous forme chimique, Il ne peut exister un système hybride sans organes de stockage dont le principal rôle est de restituer l'énergie emmagasinée et permettre ainsi au système d'opérer de manière continue et performante en fonction des conditions de fonctionnement. Le stockage de l'électricité peut se faire de plusieurs façons : mécanique (volant d'inertie), chimique (pile à combustible), électrochimique (batterie) ...etc. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à la manière la plus connue au sein de la communauté scientifique, il s'agit du stockage électrochimique via des batteries.

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

I.3.2.2. Généralités sur Les Batteries.

Les premières recherches sur les batteries commencèrent avec Benjamin Franklin qui est à l'origine même du terme « batterie » en 1748. Puis ce fut Volta en 1800 qui inventa la première pile humide produisant un courant électrique constant. Et en 1859, Gaston Planté

Réalisa le premier accumulateur à plomb rechargeable. Depuis, les recherches en vue d'améliorer ces dispositifs ne cessèrent guère.

Les batteries sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant le chargement et l'énergie chimique en énergie électrique au cours du déchargement. On peut distinguer deux sortes de batteries : les batteries primaires et les batteries secondaires. Les primaires (pile) ne sont utilisées qu'une seule fois parce que leurs réactions chimiques qui produisent le courant sont irréversibles. Les secondaires (accumulateur), au contraire, sont réutilisables car les réactions chimiques sont réversibles [6]. Plusieurs technologies ont caractérisé l'évolution des batteries. Les batteries à plomb, les plus anciennes, restent les plus convoitées car elles sont les moins chères et entièrement recyclables malgré une durée de vie faible [07]. Les batteries au nickel présentent une grande variété: Le Nickel-Zinc qui peut fournir un très grand courant mais le nombre de cycles est très réduit. A l'opposé, les batteries Nickel-Fer à grande longévité, fournissent un faible courant. Le tandem Nickel-Cadmium ou Nickel-Hydrure métallique entre dans la fabrication des batteries dont la puissance spécifique est considérable et qui peuvent s'utiliser dans une grande plage de températures (-40°C à +85°C), seulement elles sont couteuses [06]. Au cours de ces dernières décennies, la batterie au Lithium-Ion est apparue et elle a surclassé les autres technologies en raison de ses nombreux avantages qui sont [06] :

- Tension de fonctionnement élevée (> 3.5 V). Pour une tension donnée, le nombre d'éléments est réduit.
- Energie volumique élevée ($> 250\text{wh.l}^{-1}$) ce qui implique un faible poids.
- Faible autodécharge.
- Large plage d'utilisation en température (-30°C à +60°C).
- Pas de maintenance.
- Longue durée de vie (> 1000 cycles).

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

Dans cette thèse notre choix portera sur ce dernier type de batteries : Lithium-Ion dont une étude brève sera présentée.

I.3.2.3. Principe de fonctionnement de la batterie Lithium-Ion.

La batterie Lithium-Ion est essentiellement constituée d'une électrode négative qui est un composé d'insertion à base de carbone, d'une électrode positive faite d'un matériau d'insertion à base de cobalt ou de Nickel et enfin d'un électrolyte composé d'un solvant dans lequel on ajoute un sel (milieu ionisé) par exemple le lithium hexa fluor phosphate (*LIPF6*) [08].

Le principe donc, de ces éléments de stockage au lithium, repose sur l'insertion et la désinsertion d'ions lithium au sein des matériaux actifs situés à l'électrode négative et à l'électrode positive d'une cellule électrochimique comme le montre la figure I.5 [09].

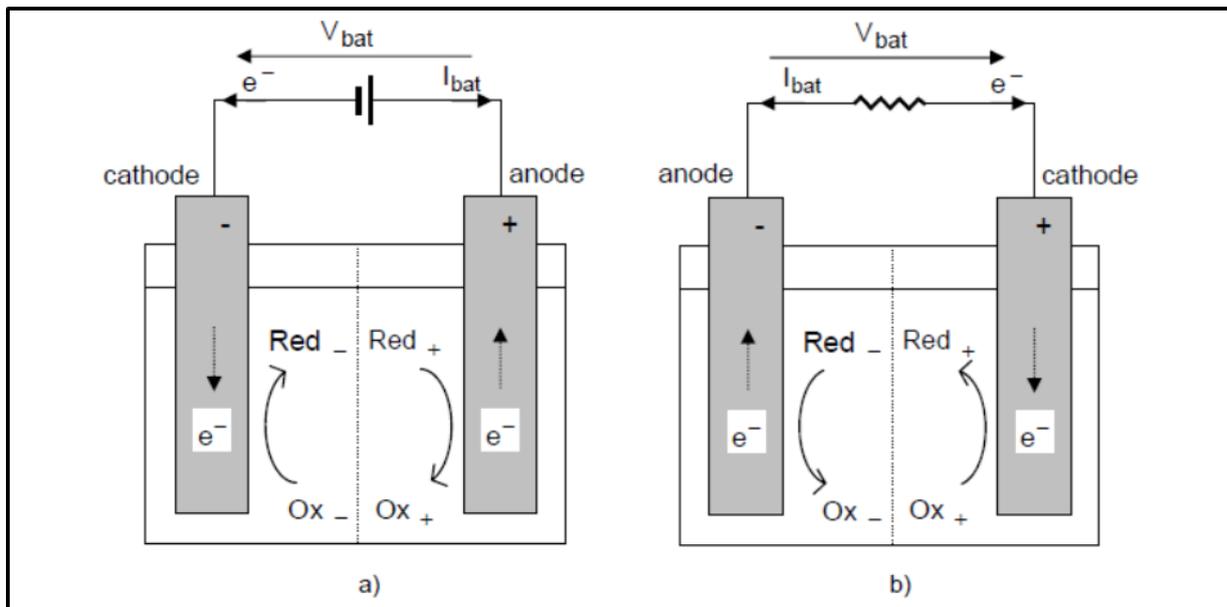


Figure I.5 Représentation schématique d'une batterie en charge (a) et en décharge (b). [09]

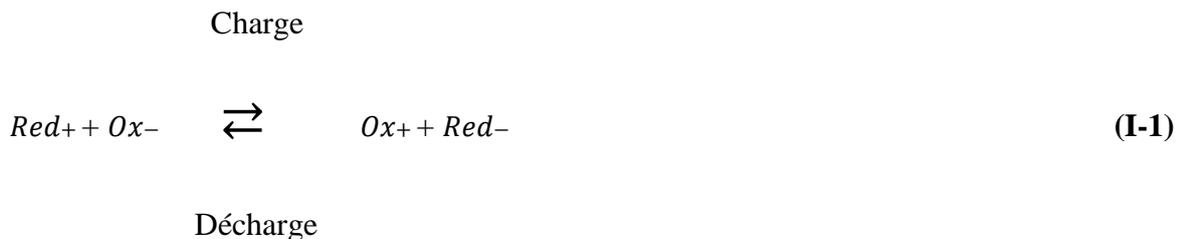
Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

Les batteries au lithium fonctionnent comme tout élément de stockage d'énergie électrochimique reposant sur les propriétés de deux couples oxydo-réducteurs notés

(Ox^- / Red^-) et (Ox^+ / ed^+), correspondant respectivement aux électrodes négatives et positives. Les potentiels d'équilibre résultant de chacun des couples oxydo-réducteurs sont :

E_{+eq} , E_{-eq} sachant que : $E_{+eq} > E_{-eq}$. Lorsque l'on relie les électrodes à travers une résistance, des électrons peuvent alors circuler de l'électrode négative vers l'électrode positive (L'électrode négative est alors l'anode et l'électrode positive la cathode) figure I.5 b. En partant de l'électrode négative, le manque d'électrons crée une réaction d'oxydation. De même, en arrivant sur l'électrode positive, les électrons vont produire une réduction à l'interface électrochimique [09].

La réaction globale du système est alors [09] :



I.3.2.4. Paramètres de la batterie.

En plus de la tension et du courant, de nombreux paramètres sont nécessaires à la caractérisation d'une batterie, nous pouvons définir les plus importants ainsi :

I.3.2.4.1. La capacité (c ou Q).

La capacité d'une batterie s'exprime en ampères heures (Ah), c'est la quantité de courant qu'elle peut fournir au cours d'un nombre d'heures précis. La capacité standard est déterminée en déchargeant la batterie à l'aide d'un courant constant pendant 10 heures, sans que la tension ne descende en dessous de la limite de décharge. On parle alors d'une capacité de batterie à $c/10$ ou $c10$ [10].

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

I.3.2.4.2. Etat de charge (SOC).

Ce facteur nous informe si la batterie est ou n'est pas chargée et de ce fait une batterie entièrement chargée a un SOC de 100% alors qu'une batterie complètement déchargée a un SOC de 0% [06].

I.3.2.5. Caractéristique de la batterie Li-Ion.

La boîte de dialogue du bloc « Battery » de Simpower, nous offre la possibilité de choisir le type de la batterie qui sera intégrée à notre système hybride.

De cette boîte on peut voir la caractéristique de la batterie choisie. C'est une caractéristique Tension – Ampère-heure, elle présente deux principales zones : la zone exponentielle et la zone nominale. Ces zones dépendent du type de la batterie.

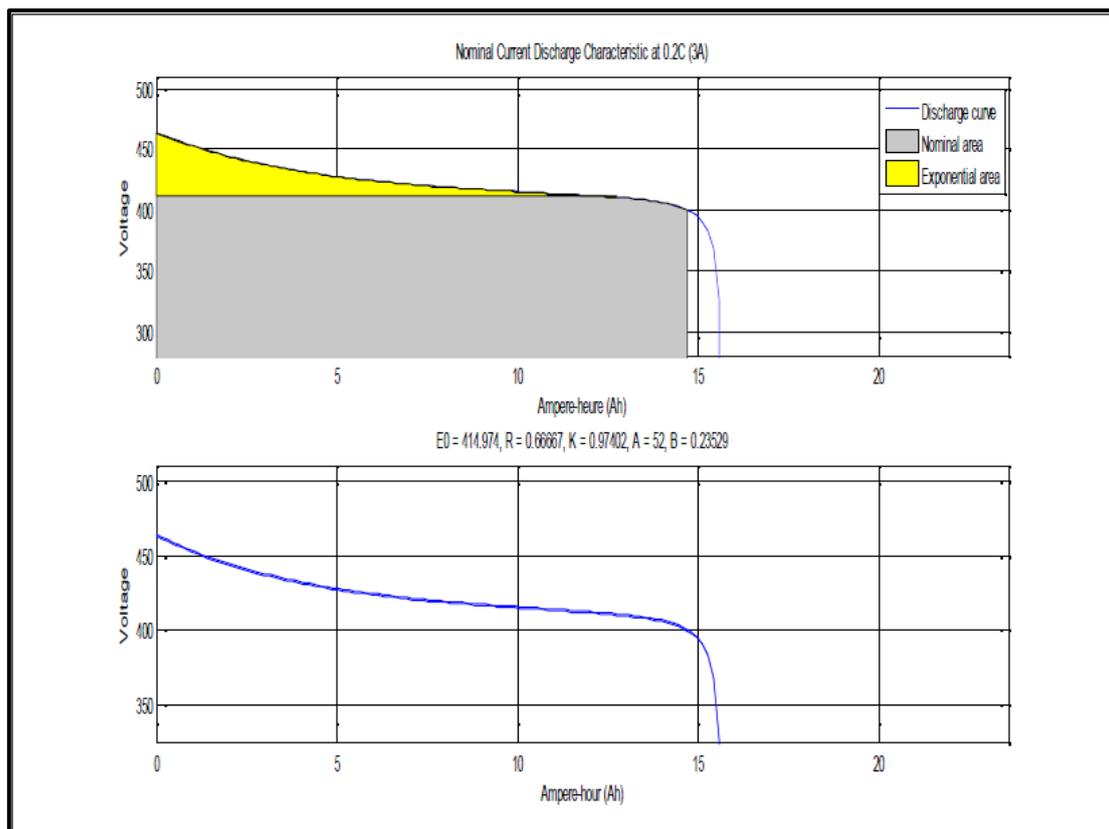


Figure I.6 Caractéristique de la batterie.

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

I.4. Commande Tolérante du Système Hybride

Dans la plupart des applications industrielles, la continuité de service est nécessaire. Généralement, afin d'assurer la sûreté de fonctionnement d'un tel système, il faut gérer le processus face à divers problèmes de fonctionnement, qu'il s'agisse de dysfonctionnements ou de pannes de capteurs et/ou d'actionneurs. Cette problématique fait appel à toutes les informations sur le procédé (qu'elles proviennent de la modélisation, des capteurs physiques ou de la commande). Ainsi, l'objectif du diagnostic est de constater l'apparition d'un défaut, d'en trouver la cause, puis d'en déduire la marche à suivre. Dans ce chapitre, nous allons entreprendre la conception d'un organe décisionnel qui permettra de maintenir la continuité de service en présence de quelques défauts sélectionnés.

L'outil qu'on cherche à concevoir, se basera sur un organe de surveillance du comportement du système, permettant la détection et le diagnostic du dysfonctionnement. Avant de procéder à l'application des algorithmes propres à la commande tolérante aux défauts du système hybride étudié, on introduit dans ce qui suit quelques notions propres à ce type de commande. Parmi, on cite : les approches passives et actives.

I.4.1. Avantages et inconvénients d'un système hybride :

Avantages :

- Non-dépendant d'une seule source d'énergie.
- Flexible, extensible ET capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance ET de révision réduits.
- Rentabilité, Faible coût lié au cycle de vie des composants du Système hybride.

Inconvénients :

- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du Stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

1.4.2. Architecture à bus continu :

Dans le système hybride présenté dans la figure suivante, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence.

Les batteries sont dimensionnées pour alimenter des pics de charge. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. La figure (I.7) montre la configuration du système hybride à bus continu.

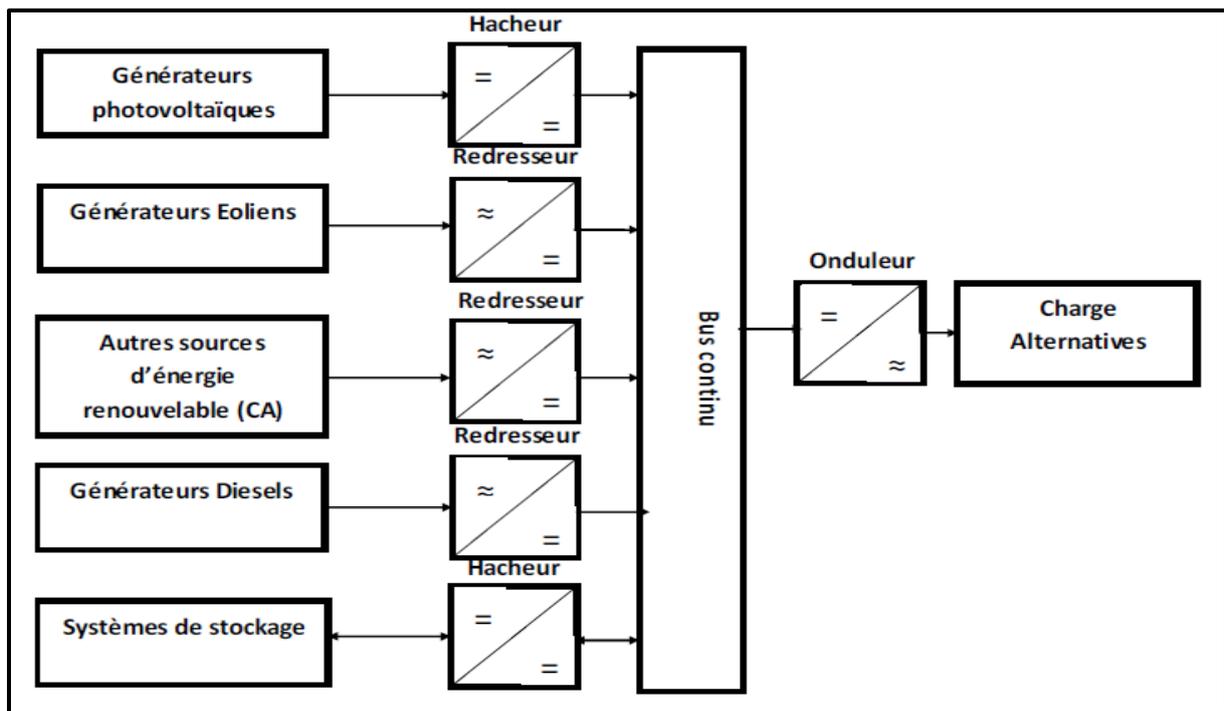


Figure I.7 configuration du système hybride à bus continu

1.4.3. Architecture à bus alternatif :

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (I.12). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs [11], Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge.

Dans le cas d'une faible demande de charge, tous les générateurs et les systèmes de stockages sont à l'arrêt sauf par exemple le générateur photovoltaïque, pour couvrir la demande de la charge. Cependant, pendant les fortes demandes de charge ou les heures de pointes les générateurs et les unités de stockage fonctionnent en parallèle pour couvrir la demande de la charge.

La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du Fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [12]. La configuration adaptée dans notre travail est celle à bus continu.

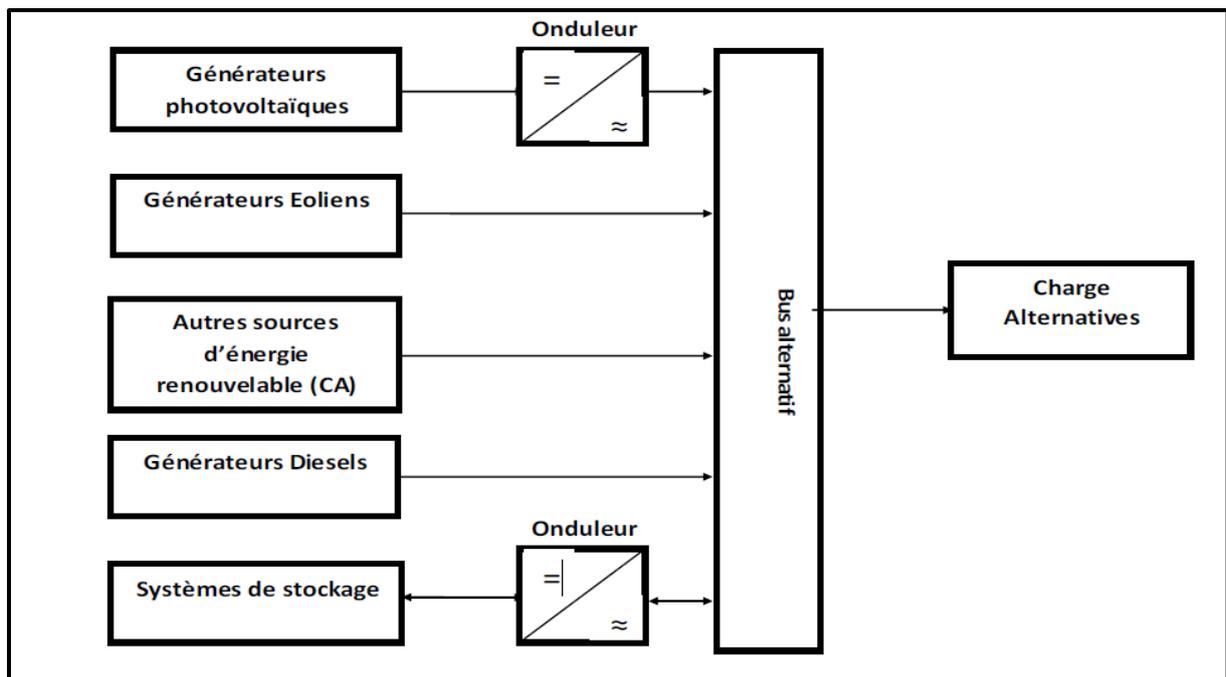


Figure I.8 configuration du système hybride à bus alternatif

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

I.4.3.1. Classification des méthodes de la commande tolérante aux défauts

Il convient de noter que la réalisation d'une commande tolérante aux défauts n'est pas un problème classique et que les conditions induites par la présence de défauts obligent à développer des stratégies particulières. La synthèse d'une classification des approches FTC (Fault tolerant control) peut se reposer sur les effets d'un défaut vis-à-vis des performances du système. En présence d'un défaut de faible gravité, une simple commande robuste peut assurer le maintien des performances nominales du système. Par contre, dans le cas d'un défaut critique, le diagnostic de ce dernier est nécessaire afin de mettre en œuvre une stratégie active de tolérance aux défauts. De façon générale, les méthodes FTC peuvent être devisées en deux grandes classes : les approches passives PFTCS (Passive Fault Tolerant Control System), et les approches actives AFTCS (Active Fault Tolerant Control System)

a/ Approches passives :

L'approche passive repose sur l'idée que les défauts représentent des perturbations sur le système et s'appuie sur les méthodes de synthèse des lois de commande robuste. Autrement dit, la loi de commande est conçue pour être robuste vis à vis d'un ensemble de défauts supposés connus. Par conséquent, aucune information en ligne sur ces défauts n'est nécessaire. C'est donc une approche implicite et prédéfini de défauts, puisqu'il n'y a pas au préalable de diagnostic. L'inconvénient majeur de ces approches réside dans le fait que la Robustesse accrue vis-à-vis de certains défauts est obtenue, et dépend d'un niveau de Performance dégradé en régime de fonctionnement sain. De plus, la classe des défauts Considérés est limitée ; il devient, alors, très risqué d'utiliser la commande passive Tolérante aux défauts seuls. Néanmoins, dans certaines applications où la classe de Défauts est connue, ces stratégies pourraient s'avérer suffisante. La figure.I.13 représente le Schéma de principe d'une telle approche

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

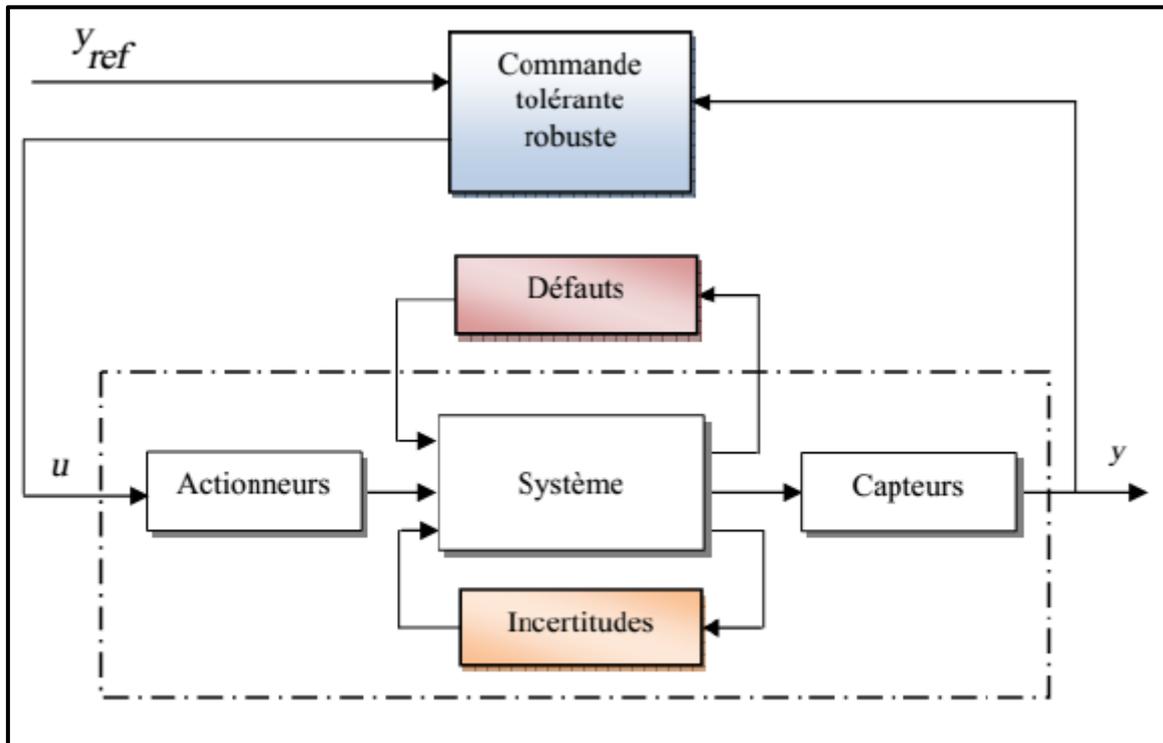


Figure I.9 Schéma de principe d'une loi de commande FTC Passive.

et En résumé, les PFTCS sont utilisés dans des systèmes pour lesquels :

- . Les défauts et leurs effets sont connus à priori.
- . Il y a de la redondance matérielle (actionneurs capteurs multiples, etc....).

b/ Approches actives :

A la différence de l'approche passive, l'approche active de la commande FTC Procède par une démarche explicite du diagnostic, permettant de détecter et de localiser Les défauts imprévus pouvant affecter le système. Une fois qu'un défaut est détecté, localisé Et identifié, la stratégie de la FTC est activée en ligne via un mécanisme de reconfiguration. La figure.I.14 représente la structure des systèmes AFTCS.

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

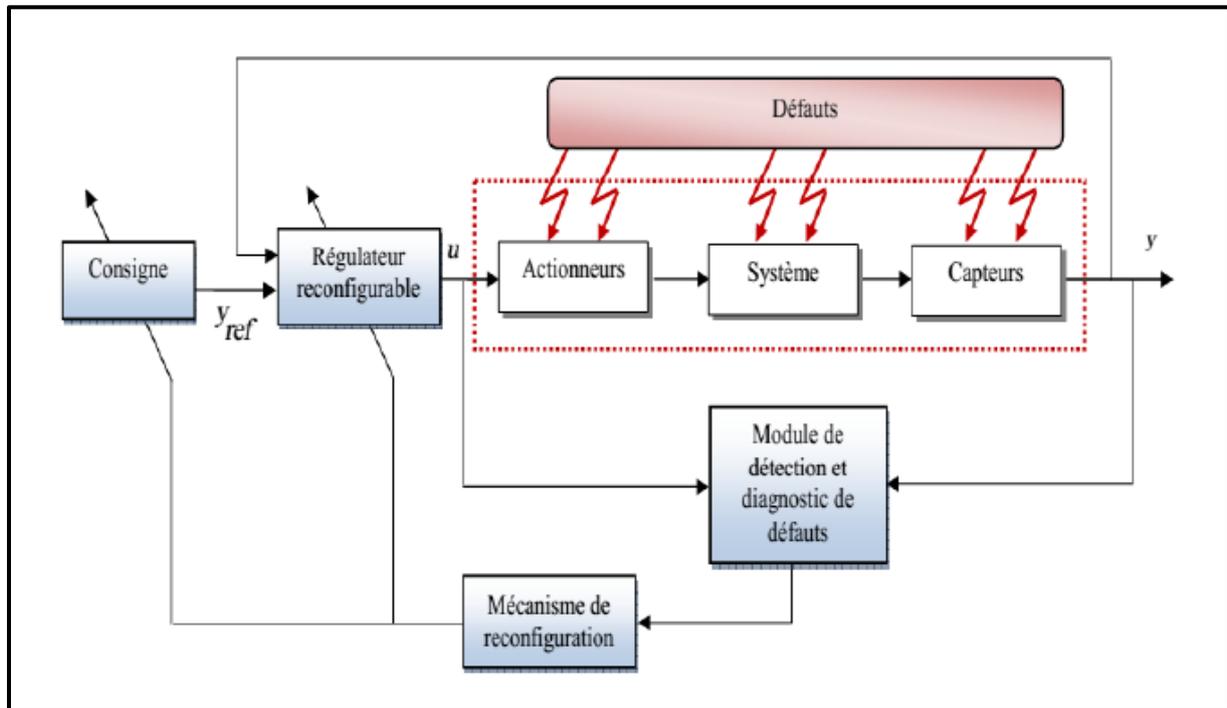


Figure I.10 Schéma de principe d'une loi de commande FTC active

L'architecture de la commande AFTC est constituée par :

- . Un régulateur reconfigurable,
- . Un module de détection et localisation des défauts (Fault Détection and Isolation, FDI)

Ayant une bonne sensibilité aux défaillances et une bonne robustesse par rapport
Aux incertitudes du modèle, aux variations des conditions d'utilisation et aux
Perturbations extérieures,

- . Un mécanisme de reconfiguration qui permet de recouvrir les performances du
Système.

Le problème des AFTC est la limite du temps disponible pour la détection,
Diagnostic et la reconfiguration des contrôleurs. De plus, en cas de défaillance, la
Stabilité, les performances du régime transitoire et permanent, la robustesse aux bruits, aux
Incertitudes et aux perturbations sont des problèmes à considérer.

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque et stockage du système et la commande tolérante du système hybride

I .5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté le système photovoltaïque, le principe photovoltaïque, la technologie de cellule PV, Nous avons également réalisé une étude de stockage d'énergie avec l'utilisation des batteries surtout la batterie Lithium-ion, Et à la fin, nous avons tiré une conclusion sur le système hybride (avantages et inconvénients...).

Chapitre II

Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

II.1. Introduction

Des stratégies de gestion efficaces nécessitent une compréhension du comportement d'un système en réponse aux données d'entrée, et cette compréhension est obtenue grâce à une simulation numérique préalable, basée sur une modélisation explicite du processus. Dans ce chapitre, nous commençons d'abord par modéliser les sources impliquées, qui sont le panneau PV et la batterie au plomb, puis nous passons de manière analogique à une représentation mathématique des convertisseurs statiques, des types de boost DC-DC et convertisseurs buck -boost DC-DC. Les modèles acquis sont essentiels pour comprendre et améliorer les performances globales du système afin d'exploiter tout son potentiel et d'assurer la stabilité dans des scénarios du monde réel.

Dans le cadre de cette étude, un système hybride PV-batterie, qui alimente une charge stationnaire est présenté dans la figure (II.1). Pour permettre un contrôle et une gestion efficace de l'énergie du système, chaque source est équipée d'un côté DC-DC. Convertisseur. Un fonctionnement optimal du panneau photovoltaïque est garanti via un ajustement précis du cycle de service associé. Dans le même point de vue, le convertisseur côté batterie est un convertisseur DC-DC bidirectionnel, qui permet de charger et de décharger le courant de la batterie.

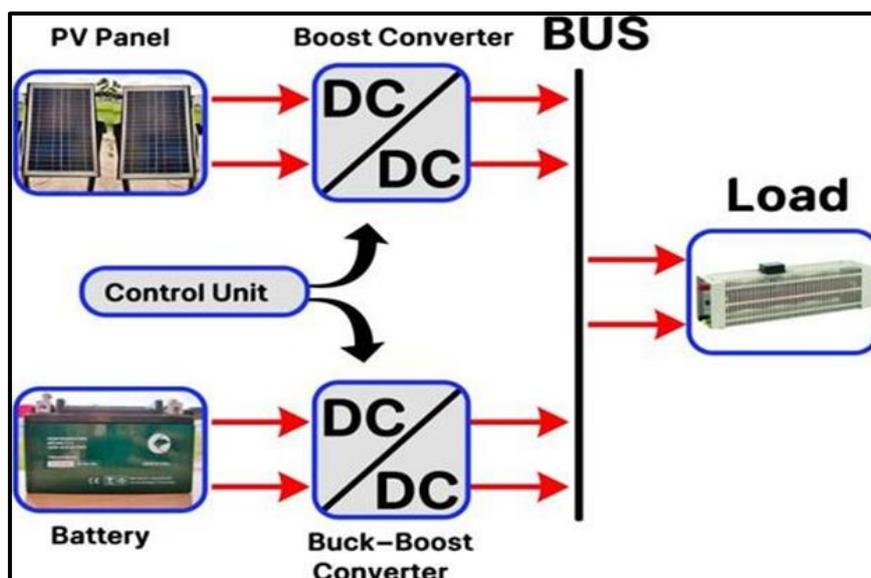


Figure II.1 : schéma synoptique du système hybride

II.1.1. Modèle de panneau photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques (PV) convertissent la lumière du soleil directement en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La modélisation des panneaux photovoltaïques est essentielle pour prédire leurs performances dans diverses conditions environnementales et opérationnelles.

La gamme de modèles PV varie des modèles simples à diode unique aux modèles complexes à plusieurs diodes. La sélection d'un modèle approprié dépend de la précision requise et de l'effort de calcul. Le modèle à diode unique, en raison de son équilibre entre complexité et précision, est largement utilisé dans la conception et la simulation de systèmes photovoltaïques. [13].

Les panneaux photovoltaïques ne sont considérés ni comme des sources de tension ni de courant, mais ils peuvent être estimés comme des générateurs de courant contrôlés en tension, où le modèle implicite à quatre paramètres (I_{pv} , R_s , V_{th} et I_0) reflète la caractéristique courant-tension avec une précision notable :

$$I_{pv} = I_{CC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + R_s \cdot I_{PV}}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

Cette caractéristique peut être illustrée par le schéma équivalent (figure II.2) [14-15]; constitué d'un générateur de courant variable, monté en parallèle d'une diode D caractérisant la jonction et d'une résistance R_s (résistance série) représentant les pertes par effets Joule.

La tension thermique V_{th} et le courant de saturation de diode I_0 sont identifiés par :

$$I_0 = \left(I_{CC} - I_{op} \right) \cdot \exp\left[\frac{V_{op} - R_s \cdot I_{op}}{V_{th}}\right] \quad (\text{II.2})$$

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc}}{\log\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{CC}}\right)} \quad (\text{II.3})$$

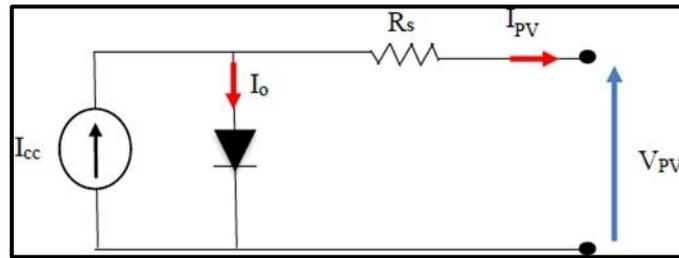


Figure II.2 : Schéma équivalent du panneau photovoltaïque

II.1.1.1. Le modèle de la batterie .

Dans la littérature, on peut rencontrer une variété de modèles, du plus simple au plus complexe : le modèle chimique, le modèle empirique ou le modèle par circuit électrique équivalent. C'est surtout ce dernier modèle qui est largement utilisé avec plusieurs configurations répondant à des besoins et à des fins bien déterminés (le modèle simple, le modèle de Shepherd...etc)

Le modèle, qui sera le notre dans ce manuscrit, est celui de la bibliothèque Simpowers de Matlab Simulink. La figure I.6 expose son bloc dans la dite bibliothèque. Ce modèle a fait ses preuves dans plusieurs travaux, c'est le cas des travaux [16, 17, 18, 19].

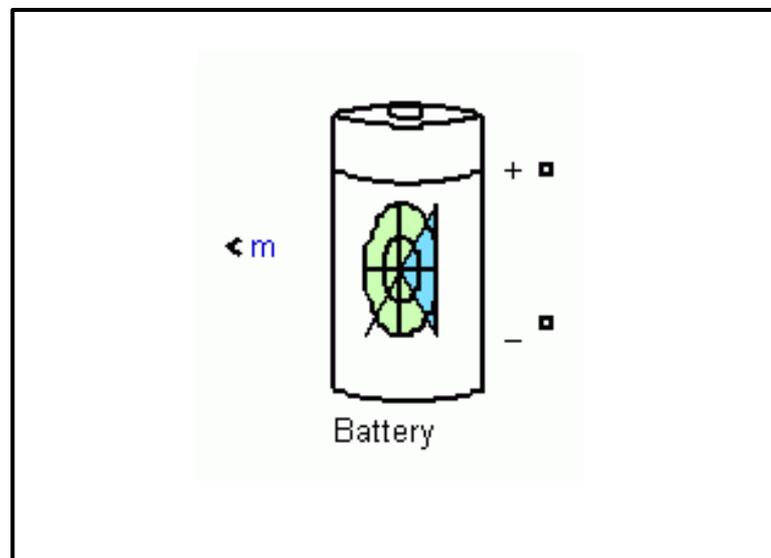


Figure II.3 Bloc de la batterie de Matlab.

Chapitre II : Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

Le modèle en question a été développé par Tremblay, O et Dessaint L.A en 2009. Il est basé sur un circuit équivalent simple montré dans la figure I.7. Dans ce modèle, la batterie est modélisée par une source de tension contrôlée V_c en série avec une résistance constante R_i . Il reprend les mêmes caractéristiques de charge et de décharge. La tension terminale de la batterie est calculée à l'aide d'une équation non linéaire sur la base du SOC réel de la batterie. Cette équation est donnée par [20], [21] :

$$V(t) = V_o - R_i I_b - K \frac{Q}{Q - \int I_b dt} + M e^{-B \int I_b dt} \quad (\text{II-4})$$

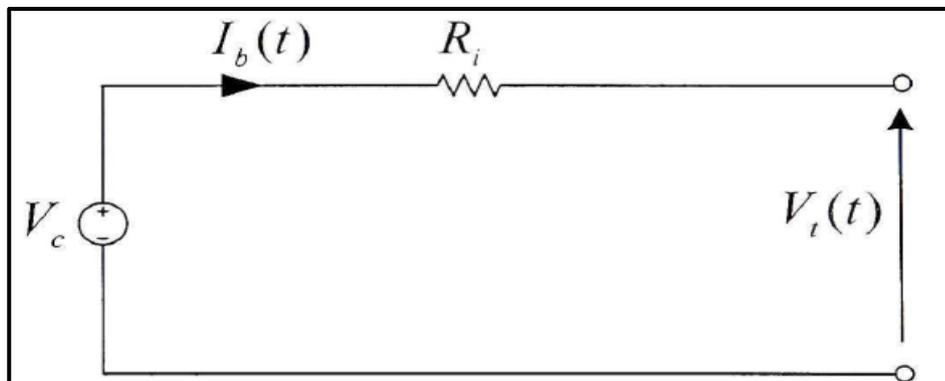


Figure II.4 Circuit équivalent de la batterie.

La source de tension contrôlée est décrite par l'équation suivante [26] :

$$V_c = V_o - K \frac{Q}{Q - \int I_b dt} + M e^{-B \int I_b dt} \quad (\text{II-5})$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$V(t) = V_c - R_i \cdot I_b \quad (\text{II-6})$$

La figure II.4 montre le modèle de la batterie d'une manière explicite.

Chapitre II : Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

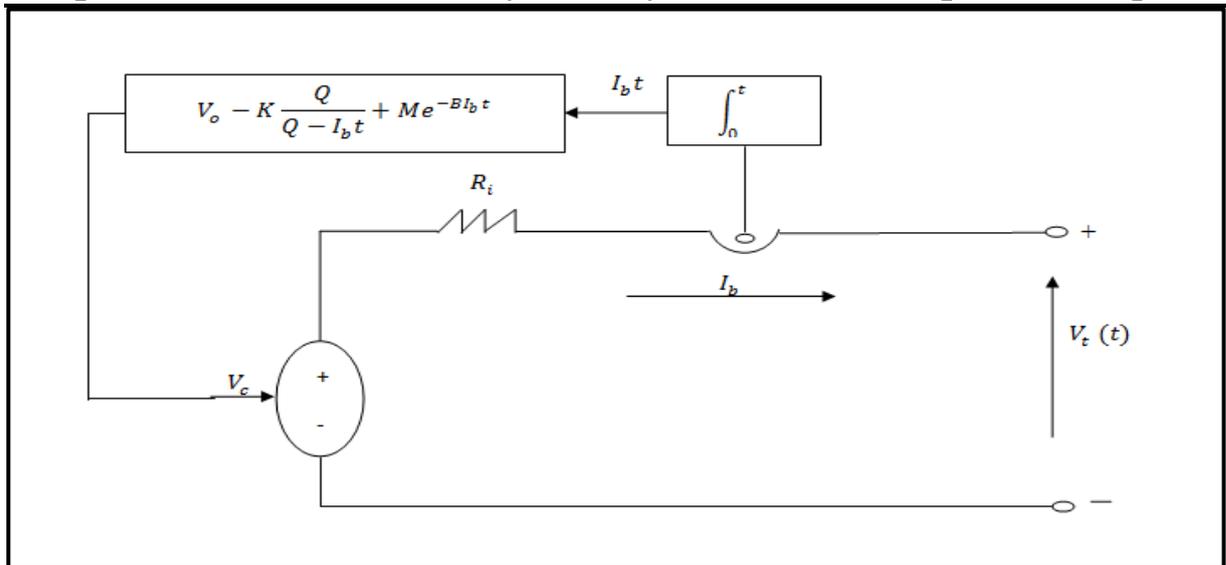


Figure II.5 Le modèle de la batterie.

Avec :

- $\int I_b dt$: Charge actuelle de l'accumulateur (Ah).

- B : Facteur de charge (Ah).

Notons que l'état de charge de la batterie est défini selon l'expression suivante [26] :

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^{t_1} I_b(\tau) d\tau}{Q} \quad (\text{II-7})$$

- SOC_0 : Etat de charge initial.

$w = \int_{t_0}^{t_1} I_b(\tau) d\tau$: charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle).

Il est nécessaire de signaler que le modèle ainsi élaboré est développé sous un ensemble d'hypothèses énumérées dans Matlab Help.

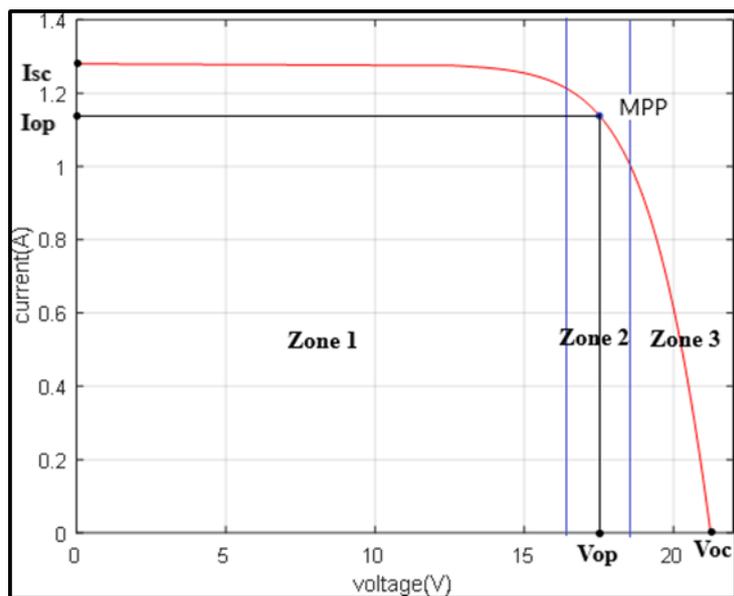
II.1.1.2 Caractéristique IV

La caractéristique IV d'un panneau photovoltaïque (PV) est un paramètre essentiel qui décrit la relation entre le courant (I) et la tension (V) produite par le panneau dans diverses conditions de fonctionnement. Il montre comment un panneau photovoltaïque se comporte comme une source de courant à différents niveaux d'irradiation et de température. Le point de puissance maximale (MPP), où le panneau fonctionne à son efficacité la plus efficace, est souvent représenté par un point de coude sur la courbe IV. La conception et l'optimisation du système photovoltaïque dépendent largement de la compréhension de la caractéristique IV.

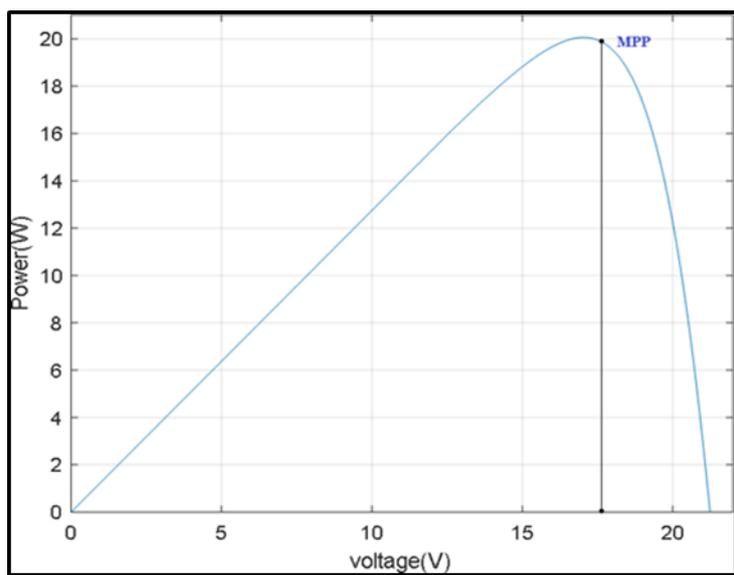
Chapitre II : Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

Les figures(II.3.a) et (II.3.b) illustrent respectivement les caractéristiques de courant et de puissance sous la forme d'une cloche. Sur ces caractéristiques, trois zones de fonctionnement sont distinguées :

- Zone 1 : elle est assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation. Le fonctionnement dans cette zone fournit de faibles puissances, des courants élevés et des tensions faibles.
- Zone 2 : elle correspond au genou de cette caractéristique, où le fonctionnement du panneau dans cette zone fournit des puissances élevées à des valeurs de courant et de tension modérées. Un point de puissance optimal « MPP » (maximum power point) peut être identifié au point (V_{op}, I_{op}) , permettant une exploitation optimale de la ressource solaire.
- Zone 3 : elle est comparable à un générateur de tension, où le fonctionnement dans cette zone fournit de faibles puissances, de faibles courants et des hautes tensions.



(a): Caractéristique courant-voltage.



(b) : Caractéristique de puissance.

Figure II.6. Caractéristiques du panneau PV du panneau utilisé dans des conditions standards

II.1.1.3. Influence de l'irradiation et de la température

Le courant et la tension du générateur photovoltaïque sont essentiellement affectés par la variation de deux paramètres principaux : l'irradiation et la température du panneau. L'adaptation de l'équation (II.1) pour différents niveaux d'irradiation et de température peut être manipulée par les équations suivantes [26] :

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta I = \gamma \cdot \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \cdot \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) \cdot I_{sc} \quad (\text{II.9})$$

$$\Delta V = -\beta \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (\text{II.10})$$

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (\text{II.11})$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (\text{II.12})$$

Où, E_{ref} et T_{ref} représentent les valeurs standards d'irradiation et de température (1000 W/m², 25°C).

La figure II.7 montre les caractéristiques IV pour différents niveaux d'irradiation. On constate que le courant de court-circuit varie proportionnellement au niveau d'irradiation, tandis que la tension du circuit est légèrement affectée. Par conséquent, la puissance extraite augmente de façon monotone, comme le montre la figure II.4.

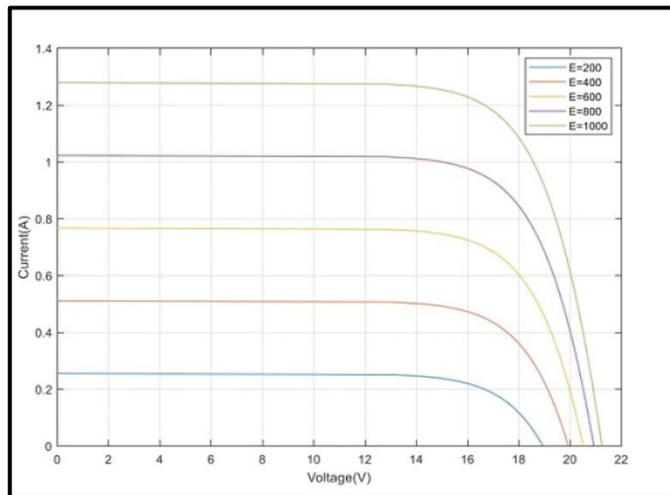


Figure II.7. Caractéristique IV du panneau PV pour différents niveaux d'irradiation (E) à une température fixe de 25°C

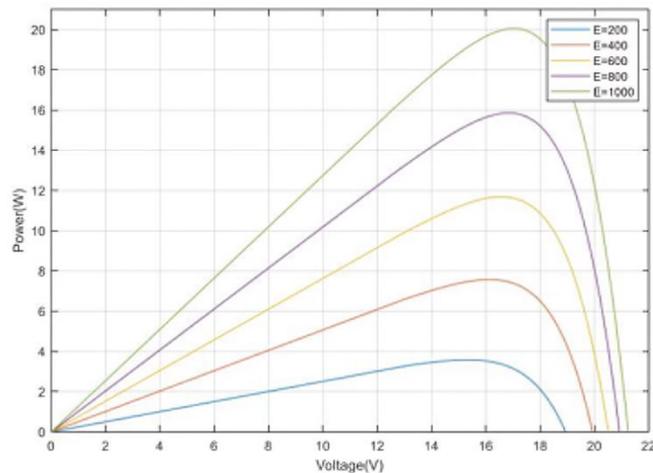


Figure II.8 .Caractéristique PV du panneau PV pour différents niveaux d'irradiation (E) à une température fixe de 25°C.

De même, la Figure II.7. et la Figure II.8 .illustrent les mêmes comportements du panneau PV, pour une augmentation progressive de la température des cellules, tandis que le niveau d'irradiation est maintenu constant à sa valeur standard de 1000 W/m².

Le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, ce qui est dû à une absorption accrue de la lumière. Cependant, à mesure que la température augmente, la tension en circuit ouvert a tendance à diminuer, par conséquent, la puissance extraite a alors tendance à diminuer.

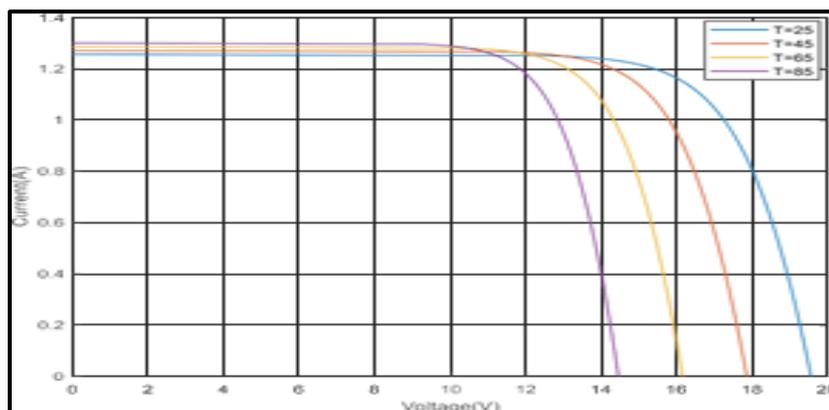


Figure II.9 Caractéristique IV du panneau PV pour différentes valeurs de température à une irradiation fixe de 1000W/m²

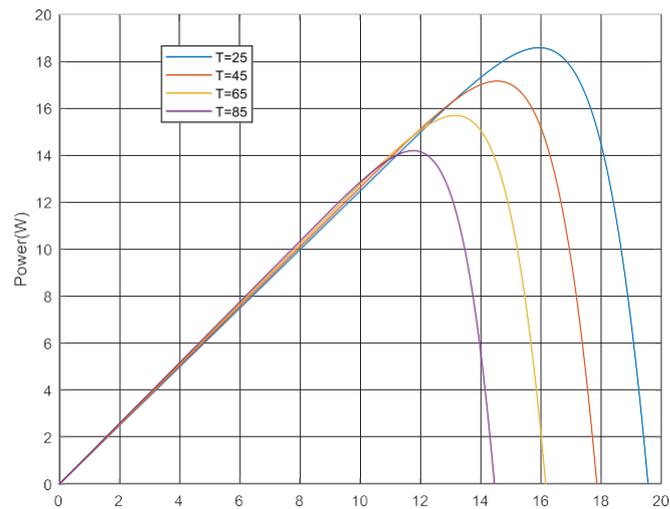


Figure II.10. Caractéristique PV du panneau PV pour différentes valeurs de température avec une irradiation fixe de 1000W/m^2 .

Dans notre étude, un petit panneau cristallin de 20 W est utilisé, qui présente les caractéristiques suivantes dans des conditions standards d'irradiation et de température :

Table II.1 : caractéristiques du panneau solaire utilisé .

Module photovoltaïque	
Puissance maximal (P_{maximum})	38W
Tension alimentation maximal	17.4V
Courant de puissance maximal	2.2A
Tension en circuit ouvert	22.4V
Courant de court-circuit	2.4A
Tolérance de puissance	$\pm 3\%$

II.1.2. Modèle de batterie (plomb-acide)

En raison de leur fiabilité, de leur technologie éprouvée et de leur prix abordable, les batteries au plomb sont couramment utilisées dans diverses applications. Ils fonctionnent en utilisant des réactions chimiques réversibles qui permettent le stockage et la libération d'énergie. La tension en circuit ouvert (V_{oc}), la résistance interne et la capacité sont tous des facteurs importants incorporés dans le modèle mathématique d'une batterie au plomb. Les données issues d'études empiriques sont fréquemment utilisées pour décrire le V_{oc} , qui est lié à l'état de charge (SoC). La résistance interne, qui varie en fonction du SoC, de la température et du vieillissement, est cruciale pour l'alimentation électrique. Afin de comprendre le comportement dynamique des batteries au plomb et comment ils affectent les performances du système, il est crucial de prendre en compte ces éléments.

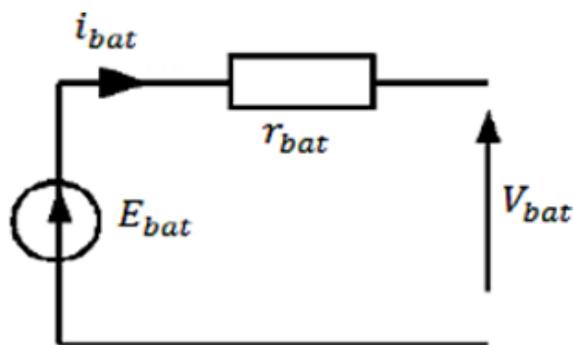


Figure II.11 : Modèle électrique simple équivalent d'une batterie

II.1.2.1. Modèle Thévenin

Une méthode populaire pour simuler le comportement dynamique des batteries, en particulier des batteries au plomb, est le modèle Thevenin. Ce modèle représente les propriétés dépendant du temps de la batterie via une tension en circuit ouvert (V_{oc}), une résistance série (R) et un réseau de polarisation RC parallèle. L'équation (II.13) détermine la tension aux bornes (V_b) dans ce modèle, où i représente le courant et R_{int} la résistance interne, et V_{oc} la tension en circuit ouvert. Les batteries lithium-ion et plomb-acide ont toutes deux été étudiées en profondeur à l'aide du modèle Thevenin afin de comprendre leurs performances et d'améliorer la conception des systèmes. Dans le cadre de l'étude, le modèle le plus simple, représenté sur la figure II.10, est adopté, dans lequel la tension en circuit ouvert E est proportionnellement liée à l'état de charge (SOC) dans une large plage :

$$V_b = E_b(SOC) - R_{int}.I_b \quad (\text{II.13})$$

$$E_b = K_1 SOC + K_2 \quad (\text{II.14})$$

Où K_1 et K_2 sont identifiés grâce à une décharge intensive à courant constant.

Actuellement, la technologie la plus utilisée pour les applications photovoltaïques est la technologie au Plomb (Pb). [23].

C'est toujours la technologie la plus compétitive et la mieux maîtrisée, pour des applications stationnaires, comme la nôtre.

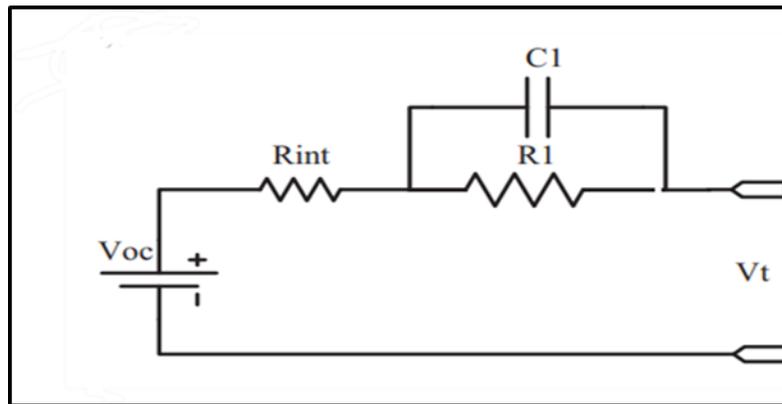


Figure II.12 : Modèle de batterie Thevenin [16]

II.1.2.2. État de charge de la batterie (SoC) :

Dans les systèmes de gestion de batterie, l'état de charge (SoC) et la profondeur de décharge (DoD) sont des paramètres très importants. En tant que « jauge de carburant », le SoC reflète la capacité restante de la batterie. Elle est décrite comme le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité totale. Les méthodes les plus courantes pour estimer le SoC sont le comptage de Coulomb et les approches basées sur la tension. Toutefois, ces techniques présentent des inconvénients tels que les erreurs de mesure et la sensibilité aux facteurs environnementaux. [24]:

$$SOC(t) = soc(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_2}^{t_1} I_{bat}(t) dt \quad (\text{II.15})$$

Où $SoC(t_0)$ est l'état de charge initial, $I_b(t)$ représente le courant circulant dans la batterie et C_n est la capacité nominale de la batterie exprimée en Ah ($1Ah = 3600C$) [25].

D'autre part, le DoD mesure la quantité d'énergie extraite d'une batterie, exprimée en pourcentage de la capacité totale. Il complète le SoC, puisque $SoC + DoD$ équivaut à 100 %.

$$DoD_{bat}(t) = 1 - SoC_{bat}(t) \quad (\text{II.16})$$

Chapitre II : Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

Des décharges plus profondes, qui entraînent des niveaux de DoD plus élevés, peuvent avoir un impact négatif sur la durée de vie de la batterie. La relation entre DoD et la durée de vie est non linéaire et varie en fonction de la technologie spécifique de la batterie. Dans la modélisation des batteries pour les systèmes hybrides PV-batteries, le modèle Thevenin est couramment utilisé pour représenter le comportement dynamique des batteries. L'estimation précise du SoC et du DoD est cruciale pour une gestion efficace de l'énergie dans les systèmes hybrides. Dans notre cas, la méthode coulombienne est utilisée.

Dans cette étude, un plomb-acide AGM de 7 Ah, 12 V est utilisé.



Figure II.13 : une photo de la batterie usagée

II.2. Modélisation des convertisseurs statiques

II.2.1. Modélisation du Boost Converter côté PV :

Puisqu'ils augmentent la tension d'entrée jusqu'à une tension de sortie plus élevée, les convertisseurs élévateurs DC-DC sont des éléments essentiels d'un système de batterie PV hybride car ils facilitent l'intégration de panneaux PV. L'analyse de tels dispositifs est simplifiée au moyen du modèle moyen, en prenant en compte son comportement en mode de conduction continue (CCM). Ce comportement moyenné dans le temps est basé sur le courant/tension des éléments de stockage. En utilisant ce modèle, la complexité du système est minimisée, ce qui simplifie la conception des commandes et l'analyse de la stabilité.

Chapitre II : Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

Le modèle dynamique moyen est utilisé pour évaluer efficacement les convertisseurs statiques, permettant une représentation sous forme canonique continue. Les systèmes commutés présentent des difficultés dans la création de lois de contrôle car ils alternent entre des états continus. Ce modèle moyen offre un aperçu du comportement du convertisseur élévateur et aide au développement de stratégies de contrôle pour une gestion efficace de l'énergie dans les systèmes de batteries photovoltaïques hybrides.

La figure (II.14) montre le convertisseur élévateur, qui se compose d'un interrupteur commandé S, d'une diode flyback D et de composants de stockage (L, C). [20].

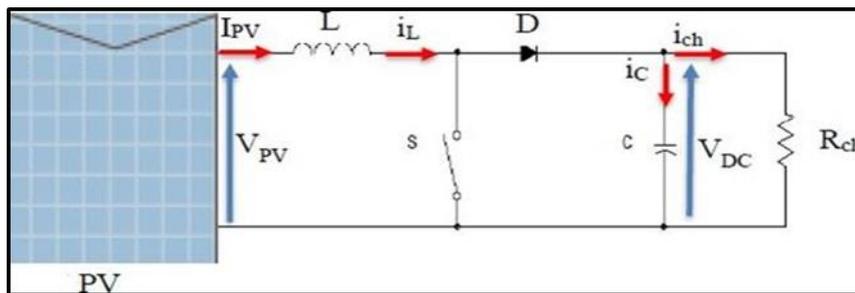


Figure II.14 : Schéma descriptif du convertisseur boost

Une fonction de transfert Y/X est fournie autour des valeurs opérationnelles par le modèle moyen, qui est représenté par une expression d'état linéaire (II.13).

$$X = Ax + Bu \quad (\text{II.17})$$

Pour la synthèse de la matrice de transition A et du vecteur B, les deux séquences de commutation sont considérées [26]:

$$\text{Ou : } x : \text{vecteur d'état ; } x = \begin{bmatrix} I_L \\ V_{dc} \end{bmatrix}$$

u : l'entrée de commande; $u = V_{PV}$

II.2.1.1. Séquences opérationnelles et équations d'état

On utilise les lois de tension et de courant de Kirchhoff (KVL et KCL) pendant les phases fermées et ouvertes du transistor pour obtenir les équations moyennes du modèle.

❖ Première séquence de conduction [0 à αT] :

Chapitre II : Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

Dans cette séquence, l'interrupteur S est fermé, et alternativement la diode D est bloquée. Il en résulte une augmentation du courant dans l'inductance et permet le stockage d'une quantité d'énergie sous forme magnétique, tandis que la charge est déconnectée (Figure II.15).

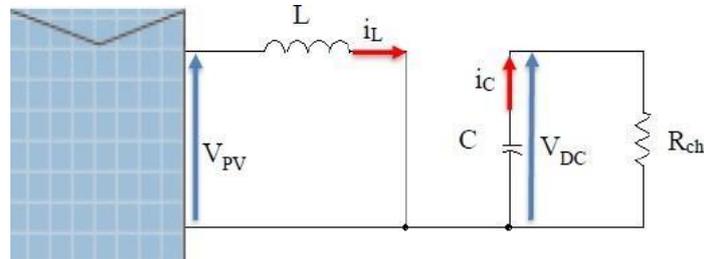


Figure II.15 : Circuit électrique équivalent de la première

séquence de Conduction Le comportement dynamique du circuit est donné par :

$$V_{pv} - L \cdot \frac{di_L}{dt} - r_L \cdot i_L = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \cdot \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II.19})$$

Compte tenu de l'actuel i_L et la tension de sortie V_{dc} comme variables d'état, l'équation (II.20) modélise la première séquence.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r_L}{L} \\ 0 & \frac{1}{R_{ch} \cdot C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{PV} \quad (\text{II.20})$$

Cela peut s'écrire sous la forme

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 \cdot \dot{x} + B_1 \cdot V_{PV} \\ y = D_1 \cdot x \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec: $D1 = [0 \ 1]$

❖ 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 (Figure II.16).

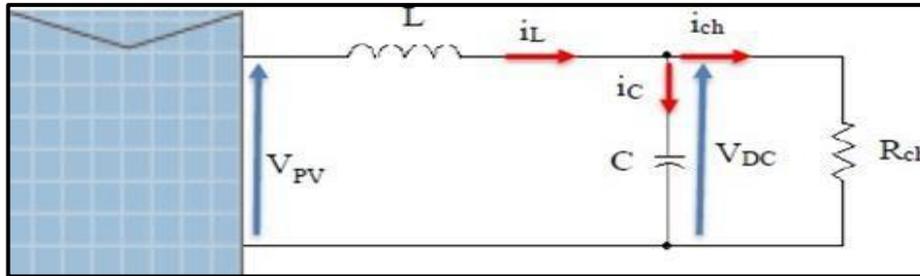


Figure II.16 Circuit électrique équivalent de la deuxième séquence de conduction De la même manière les équations (II.22), (II.23) et (II.24) définissent le comportement dynamique du convertisseur pour cette séquence :

$$L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_{PV} - r_L \cdot i_L - V_{dc} \quad (\text{II.22})$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = I_L - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II.23})$$

Où:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_{ch} \cdot C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{PV} \quad (\text{II.24})$$

Qui peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 \cdot x + B_2 \cdot V_{PV} \\ Y = D_2 \cdot x \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II.2.1.2. Modèle moyen

À partir d'équations (II.20) et (II.24) on peut en déduire l'équation d'état pour toute la période, qui consiste en fait en une somme des deux équations d'état, pondérée par le rapport cyclique α :

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_1 \cdot x + B_1 \cdot V_{pv})\alpha + (A_2 \cdot x + B_2 \cdot V_{pv})(1 - \alpha) \\ V_{dc} = [D_1 \cdot \alpha + D_2 \cdot (1 - \alpha)] \cdot X \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Qui est finalement classé sous :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-\alpha}{L} \cdot x_2 + \frac{1}{L} \cdot V_{PV} \\ \dot{x}_2 = -\frac{1-\alpha}{L} \cdot x_1 - \frac{1}{R_{ch}} \cdot x_2 \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Pour ce convertisseur, les paramètres sont :

$C=2200 \mu\text{F}$, $L=15 \text{ mH}$, $r=2.8 \Omega$

II.2.2. Modélisation du convertisseur Buck-Boost de batterie (convertisseur bidirectionnel)

Les convertisseurs DC-DC bidirectionnels, tels que le convertisseur Buck-Boost, jouent un rôle essentiel dans les applications nécessitant un stockage et une récupération d'énergie, telles que les systèmes de batteries photovoltaïques hybrides. Ces convertisseurs permettent à l'énergie de circuler dans les deux sens, permettant un transfert d'énergie efficace entre différentes sources d'énergie et systèmes de stockage. Le convertisseur abaisseur-élevateur peut augmenter ou diminuer la tension en fonction du mode de fonctionnement.[27]

En intégrant le convertisseur Buck-Boost dans le système, l'énergie peut être gérée efficacement entre le stockage de la batterie et le bus continu. Cette configuration permet un contrôle et une utilisation efficaces de l'énergie dans le système hybride de batterie photovoltaïque, garantissant des performances optimales et une gestion fiable de l'énergie. .[28]

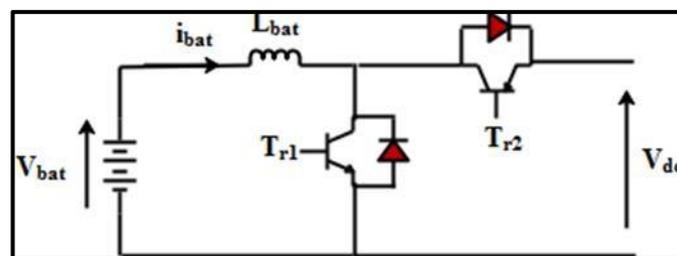


Figure II.17 : Convertisseur associé aux batteries

II.2.2.1. Séquences opérationnelles et équations d'état

De la même manière que le convertisseur boost, le modèle moyen du convertisseur buck-boost pour la batterie est adopté. Cela nous permettra de tester les algorithmes de contrôle en mode continu de l'ensemble du système. Nous utilisons les lois de tension et

Chapitre II : Modélisation du système hybride de batterie photovoltaïque

de courant de Kirchhoff (KVL et KCL) pendant les phases fermées et ouvertes des transistors pour obtenir les équations moyennes du modèle.

❖ Première séquence de conduction

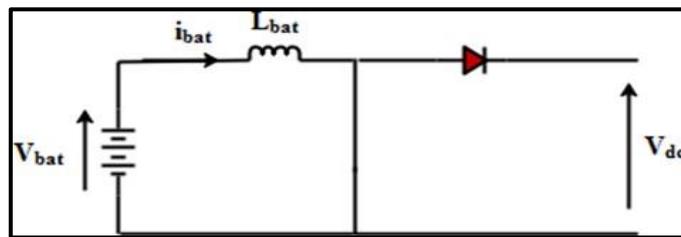


Figure II.18 : Le diagramme schématique de la première séquence

De conduction L'équation dynamique du courant de bobine s'écrit :

$$V_{bat} = L_{bat} \cdot \frac{di_{bat}}{dt} \quad (\text{II.28})$$

❖ Deuxième séquence de conduction

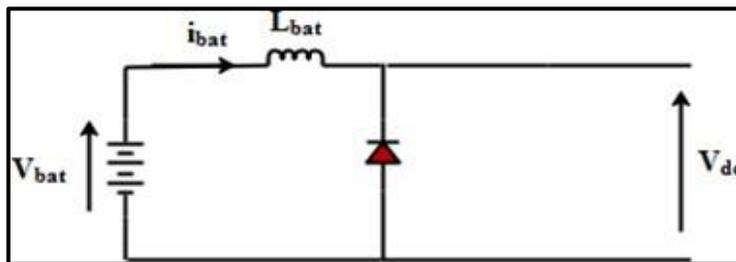


Figure II.19 Le schéma de la deuxième séquence de conduction

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

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.29})$$

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

$$L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha_{bat}) V_{dc} \quad (\text{II.30})$$

Pour ce convertisseur, les paramètres sont :

$$C=2200 \mu\text{F}, L=12.21 \text{ mH}, r= 2.6\Omega$$

Le modèle d'équation (II. 30) reproduit le comportement de la batterie en cas de charge ($i_{bat} < 0$) et de décharge ($i_{bat} > 0$). Il convient de noter ici que les commutateurs Tr1 et Tr2 sont accordés de manière complémentaire et que les cycles de service correspondants sont liés par l'équation suivante :

$$\alpha_{Tr1} + \alpha_{Tr2} = 1 \quad (\text{II.31})$$

Dans ce cas, lorsque la batterie est en mode décharge, α_{bat} donné en (II.30) représente en fait le rapport cyclique du commutateur Tr1, qui fait office de convertisseur boost. Alternativement, en cas de modèle de tarification, basé sur (II.31), le terme $(1-\alpha_{bat})$ représente le rapport cyclique de Tr2, qui fonctionne comme un convertisseur abaisseur.

II .3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur la modélisation des principaux composants du système hybride PV-batterie : panneaux PV, batteries et convertisseurs DC-DC. La modélisation explicite de la chaîne de conversion photovoltaïque et des convertisseurs statiques pose les bases de la prévision des performances du système. Ces modèles servent de base pour mettre en œuvre les approches de contrôle suggérées et les intégrer dans le bloc de gestion de l'énergie du chapitre suivant. Grâce à une gestion efficace du flux d'énergie, le système hybride photovoltaïque-batterie peut répondre à la demande de la charge.

Chapitre III : Description approche de commande De système

I. Introduction

Le système hybride étudié dans cette mémoire est destiné à alimenter une charge DC et consiste d'un panneau photovoltaïque comme source primaire et d'une batterie comme source auxiliaire. Quand cela en ce qui concerne la gestion de l'énergie, deux aspects sont communément discutés. Qui sont:

Du côté photovoltaïque, l'application d'un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour garantir extraction de puissance maximale.

Côté batterie, un algorithme d'approche de partage de puissance, basé sur le backstepping Un concept est proposé pour régler le convertisseur Buck-Boost. Ceci vise à maintenir le bus continu tension stable ainsi que pour fournir la puissance requise à la charge dans le cas où le PV est insuffisant à lui seul. La stratégie permet également de charger la batterie en cas de panne d'énergie excès ou une charge déconnectée.

Ensemble, ces techniques permettent de gérer le courant du convertisseur DC/DC comme ainsi que la régulation de la tension du bus continu. En faisant cela, la puissance extraite est efficacement injecté dans la charge tout en assurant un flux de puissance fluide. La batterie photovoltaïque hybride le système peut s'adapter aux circonstances et aux besoins changeants en combinant efficacement différents approches de contrôle, aboutissant à une utilisation optimale de l'énergie et à une efficacité énergétique

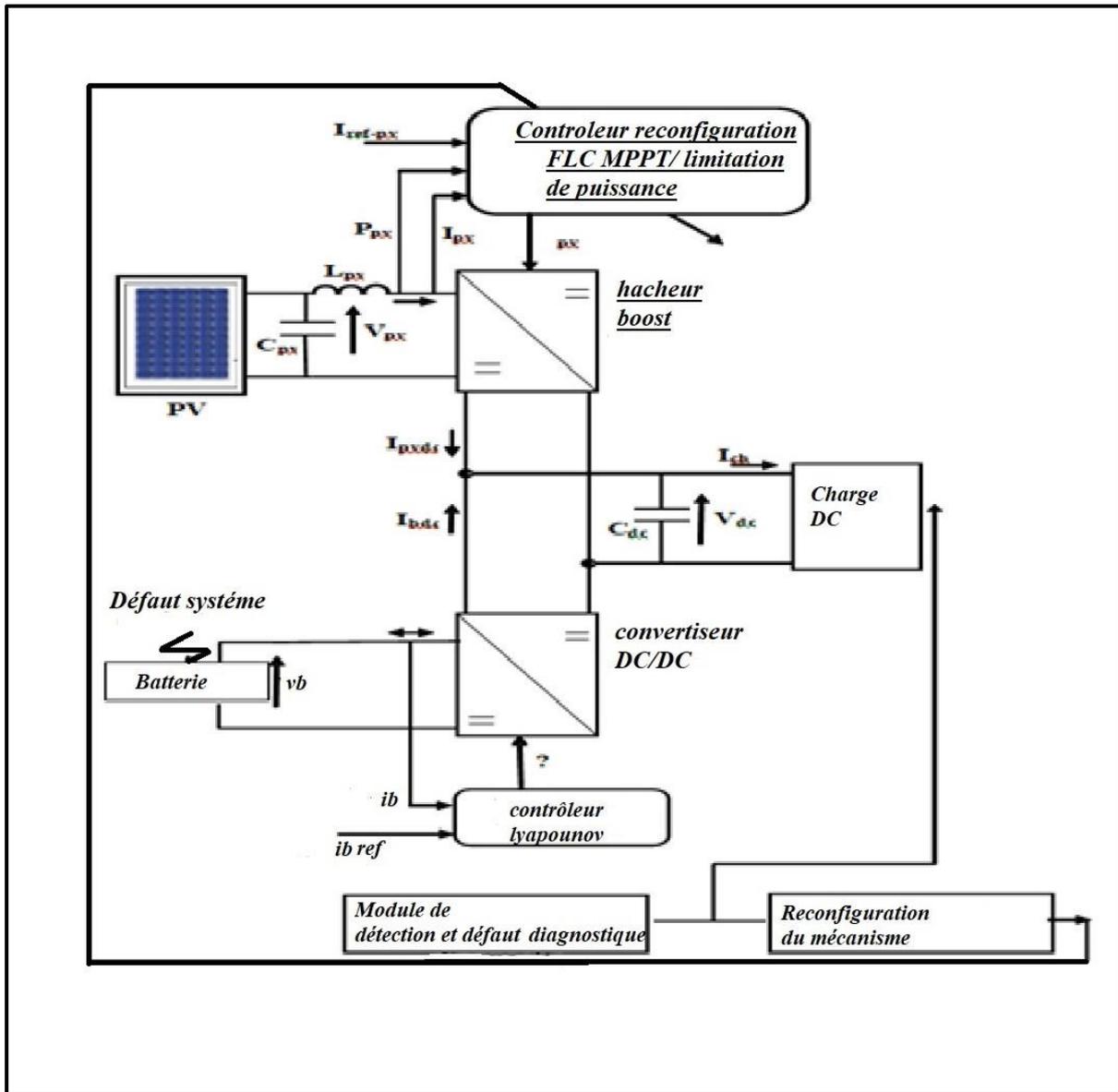


Figure. III.1 contrôle tolérant aux pannes du système hybride.

II. STRATÉGIE DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Pour gérer correctement le système [29], la gestion de la puissance est décidée pour une permutation douce entre deux modes de fonctionnement, liés à la variation de puissance nette P_{net} .

La puissance nette (P_{net}), quantifiée comme la différence entre la demande de charge et la quantité PV générée :

$$P_{net} = P_{ch} - P_{pv} \quad (III.1)$$

La routine de gestion de l'énergie décidera de la nature de la source de support dans chaque mode de fonctionnement via l'activation/désactivation de la batterie de contrôle tandis que le contrôleur de tension du circuit intermédiaire fournit la quantité de puissance de référence fournie.

La routine de gestion de l'alimentation permet au système de commuter efficacement entre les modes de fonctionnement suivants.

- **En mode 1**, la puissance nette P_{net} est positive et un manque de puissance est alors constaté. Le module PV est incapable de répondre à la demande de puissance et, par conséquent, la batterie intervient pour compenser le manque.
- **En mode 2**, P_{net} est négatif, ce qui signifie que la demande de charge est modérée, un excès est constaté. Cette puissance générée est ensuite rechargée dans la batterie via le convertisseur abaisseur DC/DC ou si la batterie est chargée, la reconfiguration de la commande est orientée vers la limitation de puissance sans délestage de charge.

III. Mode 1 (MPPT et source d'appoint) :

Dans ce mode de fonctionnement, le générateur photovoltaïque fournit la puissance maximale (fonctionnement en MPPT) ; cette puissance est insuffisante pour satisfaire la demande de la charge, et la pile à combustible complète la puissance exigée par la charge. Une fois la puissance fournie par le générateur dépasse la puissance totale demandée par la charge, le superviseur fait passer le système au mode 2.

La figure (3-3) montre le schéma général du système PV- USEH (unité de stockage d'énergie à base hydrogène) fonctionnant en mode 1 et où le générateur PV et la pile à combustible PEM sont actifs.[23] Dans cette configuration deux convertisseurs DC/DC sont utilisés : - Un hacheur survolteur lié au générateur photovoltaïque concrétise le fonctionnement en MPPT, alors que le deuxième hacheur survolteur lié à la pile produit le supplément d'énergie demandée par la charge, tout en maintenant la tension du bus continu constante ($V_{bus}=400v$). - Une charge alternative variable connectée au bus continu à travers l'onduleur monophasé.

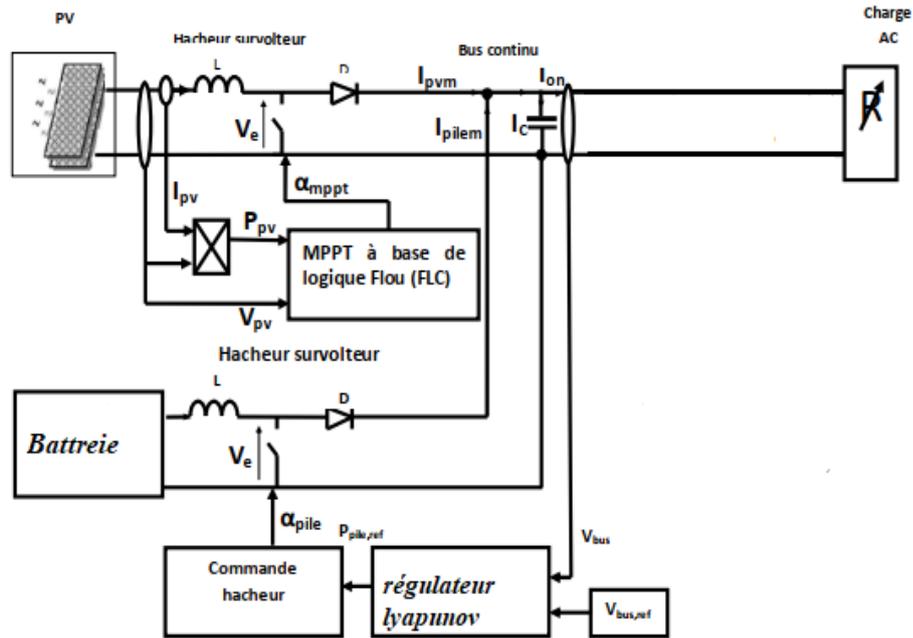


Figure III.2 Configuration du système de génération hybride en mode 1

III -1 Principe générale de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{ppm} , I_{ppm}) [30]. L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur CC / CC. L'algorithme de commande MPPT utilise, selon son type, des paramètres captés du GPV. La figure III.3 montre ce schéma de principe, la vitesse de convergence, le coût, le rendement et le domaine d'application.[31]

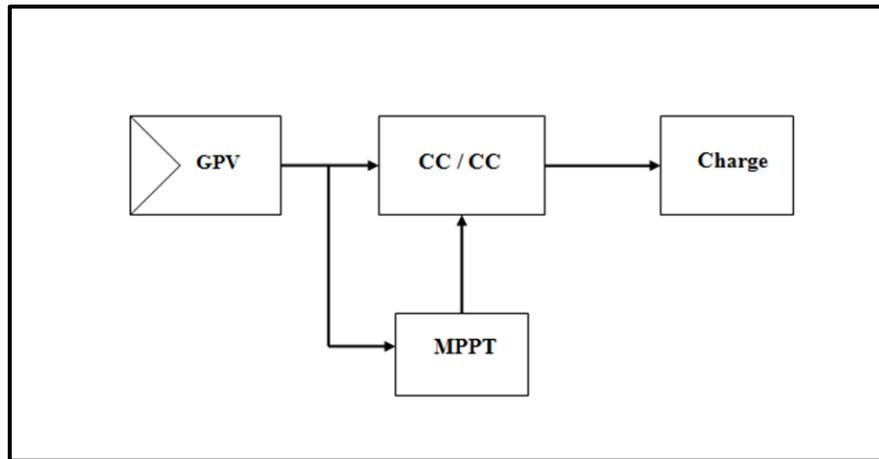


Figure. III.3- Chaîne de conversion avec une commande MPPT

Dans notre étude, on a opté pour l'algorithme « Perturber et Observer » car c'est le plus utilisé de par sa simplicité. Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les premières utilisations du MPPT datent de 1968. Les différentes techniques du MPPT. Le MPPT est le point clé du montage. Il s'agit d'un genre de contrôleur qui va forcer le générateur à travailler à sa puissance maximale (MPP). En effet, cette opération permet d'obtenir le meilleur rendement de puissance de la cellule. Il existe différentes méthodes pour obtenir ce point. Les algorithmes de programmation de contrôleurs MPPT sont relativement simples, du fait des limitations technologiques dans les microprocesseurs disponibles. Il peut donc être facilement implémenté sur un ordinateur ou un microprocesseur. Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique $I = f(U)$ est non linéaire. En conséquence, pour un même éclairage, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge. Il existe différents types de contrôleurs MPPT.

Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- le rendement global du système désiré par le constructeur;
- le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DCDC, DC-AC), ou à un réseau électrique;
- l'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux.);
- les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse;
- le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux).

III .2 L'algorithme de commande MPPT

Le principal souci dans une installation photovoltaïque c'est de poursuivre le point maximum de puissance et de permettre ainsi au système d'être le plus rentable du possible. C'est dans ce sens que plusieurs techniques ont vu le jour depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type, pour commander l'étage d'adaptation en vue de pousser le système à fonctionner au point (V_{ppm}, I_{ppm}).

Les techniques les plus abordées dans la littérature sont :

Hill Climbing Algorithms :

- Perturb & Observ.
- dp/dV Feedback Control.
- Incremental Conductance.
- Algorithms Adaptive.
- Fuzzy Logic Control.
- Neural networks.
- Current Sweep Method.
- Direct Method.

Le principe de chacune de ces méthodes a été explicité dans les documents [32] et [33]. Ce qui différencie ces techniques les unes des autres c'est la complexité, le nombre de capteurs re

III .2 .1 L'algorithme Perturber et Observer (P&O) :

Comme son nom l'indique, cet algorithme est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de la tension ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur CC-CC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau, voir Figure. III .4.

Le principe de cette commande consiste à perturber la tension V d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la Figure. III .4. On peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V engendre un accroissement de la puissance P , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [34].

Dès que le PPM est atteint, la tension oscille autour de la tension idéale V_{ppm} . Cette oscillation cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas de la perturbation. Un compromis devrait être trouvé entre les pertes en puissance et la rapidité de réponse de l'algorithme. Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues. Si la largeur du pas est très petite les pertes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement. [31]

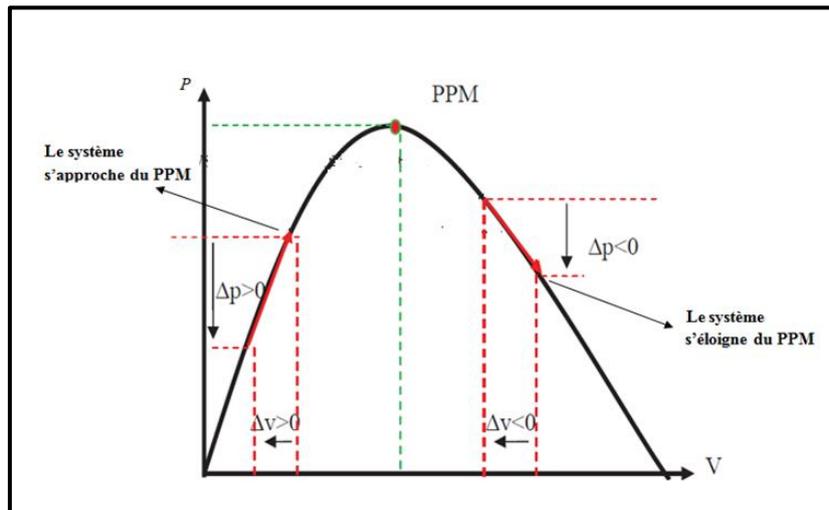


Figure. III .4 - Caractéristique de fonctionnement de la méthode de P&O. [31]

L'organigramme de la méthode P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle est montré dans la Figure III .5 .

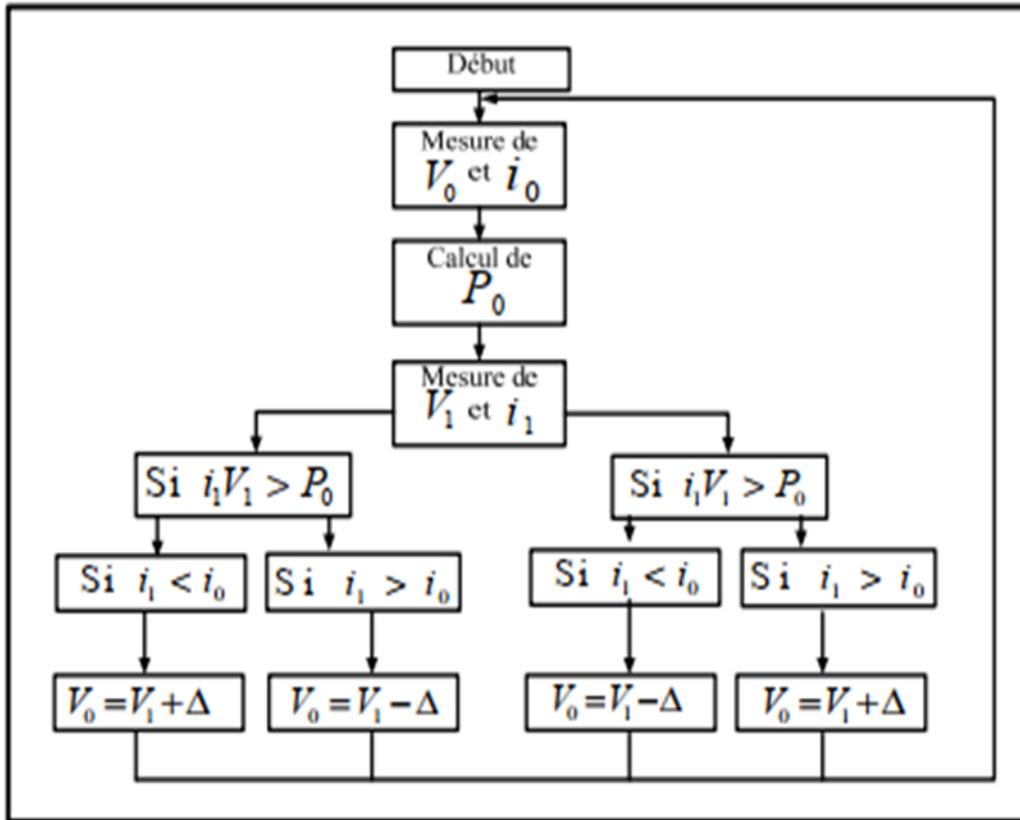


Figure III .5 Algorithme du MPPT perturbation et observation

III .2. 2 Conductance incrémentale

La méthode basée sur la conductance incrémental est également très utilisée. Cet algorithme est basé, comme le précédent, sur une considération de la dérivée de la puissance par rapport à la tension. Effectivement, nous savons qu’au point de puissance maximale, cette dérivée est égale à zéro. Dans l’équation :

$$\frac{dp}{dv} = 0 \Leftrightarrow \frac{dUI}{dU} = 0 \Leftrightarrow \frac{dU}{dU} I + \frac{dI}{dU} U \quad \text{(III.2)}$$

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad \text{(III.3)}$$

L’algorithme calcule donc le rapport I/U, et le compare à la dérivée de I par rapport à U. Quand les deux membres de cette équation sont exactement opposés, nous avons atteint le point de puissance maximale. Cela nécessite une conservation en mémoire de la tension et du courant précédents. A travers ce tableau, on résume le fonctionnement de l’algorithme Inc & Cond : Voici l’organigramme de l’algorithme Inc &Cond :

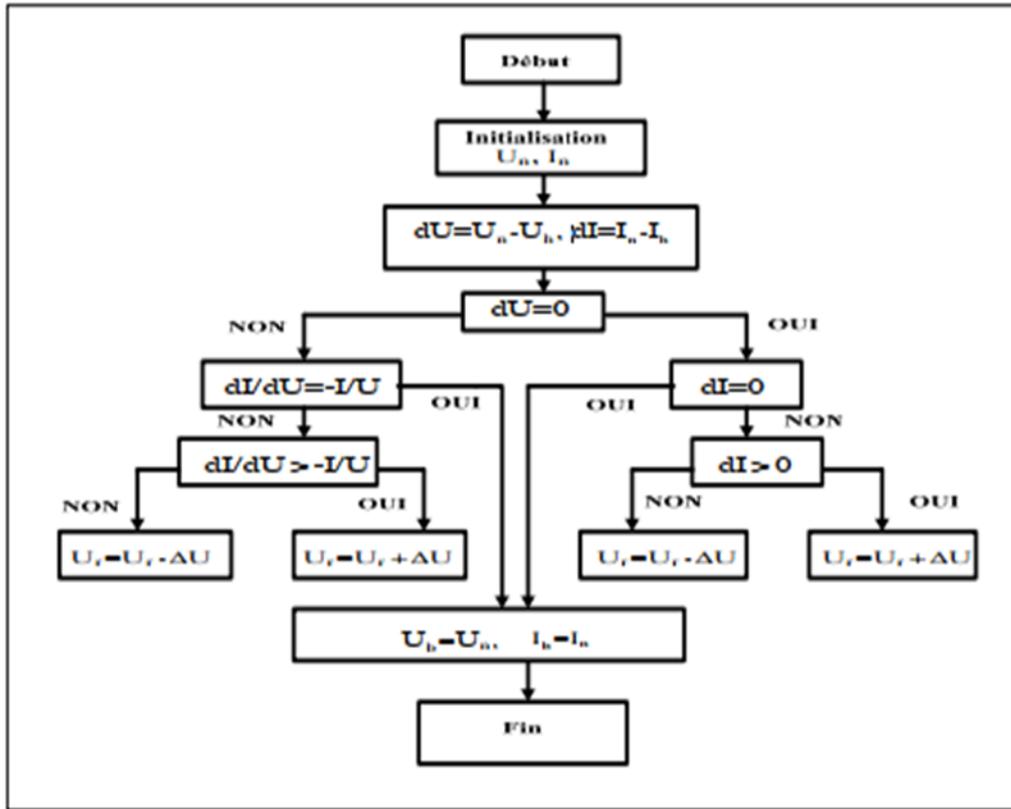


Figure III .6 Algorithme du MPPT conductance incrémentale

III .3.3 la commande de l'hacheur boost de la batterie :

1- boucle externe : tension vdc :

On a :
$$I_c = c \frac{dvdc}{dt} \tag{III.4}$$

Donc :

$$c \frac{dvdc}{dt} = ipvc + ibs - il = ipvs + ibs - \frac{vdc}{R} \tag{III.5}$$

• Soit la fonction de Lyapunov:

$$V_1 = \frac{1}{2} e^2 \tag{III.6}$$

$$e = \overline{vdc} - vdc_{ref} \tag{III.7}$$

$$vdc_{ref} = 35v \tag{III.8}$$

$$v_1^\circ = e e^\circ = -k^1 e^2 \tag{III.9}$$

$$e^\circ = -k_1 e \tag{III.10}$$

$$e^\circ = vdc^\circ - vdc^\circ_{ref} = vdc^\circ = \frac{1}{c} (ipvc + ibs - il) \tag{III.11}$$

$$= \frac{1}{c} \left(ipvc + ibs - \frac{vdc}{R} \right) = -k_1 e \quad (\text{III.12})$$

$$ibs = -k_1 ce + \frac{vdc}{R} - ipvs \quad (\text{III.13})$$

$$c = 2200\mu f$$

- Dédution de ib_{ref} :

conservation de puissance :

$$vb \cdot ib = vdc \cdot ibs \quad (\text{III.14})$$

$$ib_{ref} = \frac{vdc \cdot ibs}{vb} \quad (\text{III.15})$$

2- boucle interne

- Model moyen de l'hacheur boost de la batterie

$$vb = L \frac{dib}{dt} + (1 - \alpha b)vdc \quad ib = \frac{dib}{dt} = \frac{1}{L} vb \frac{1 - \alpha b}{L} vdc$$

soit une deuxième fonction de lyapunov :

$$v_2 = \frac{1}{2} e_2^2 \quad ; \quad e_2 = ib - ib_{ref} \quad (\text{III.16})$$

$$v_2^\circ = e_2 e_2^\circ = -k_2 e_2^2 \quad (\text{III.17})$$

$$e_2^\circ = -k_2 \cdot e_2 \quad (\text{III.18})$$

$$e_2^\circ = ib^\circ - ib_{ref}^\circ = \frac{1}{L} vb - \frac{1 - \alpha b}{L} vdc - ib_{ref}^\circ = -k_2 e_2 \quad (\text{III.19})$$

$$(-k_2 e_2 + ib_{ref}^\circ) L = vb - (1 - \alpha b) vdc \quad (\text{III.20})$$

$$[-k_2 e_2 + ib_{ref}^\circ] L + (1 - \alpha b) vdc = vb \quad (\text{III.21})$$

$$1 - \alpha b = \frac{[vb - [-k_2 e_2 + ib_{ref}^\circ] L]}{vdc} \quad (\text{III.22})$$

$$1 - \alpha b = \frac{vb - [-k_2 e_2 + ib_{ref}^\circ] L}{vdc} \quad (\text{III.23})$$

$$\alpha b = 1 - \frac{vb - [-k_2 e_2 + ib_{ref}^\circ] L}{vdc} \quad (\text{III.23})$$

$$k_2 > k_1$$

$$k_1 = 300 \quad ; \quad k_2 = 500$$

III .4 MODE 2 (en cas de défaut de batterie)

Dans ce mode un commande tolérante aux défauts du system hybride est considéré. L'anomalie considérée dans cet article réside dans un défaut de la batterie [35]. Dans cette situation, seul le module PV de puissance finie de 38W ne peut pas couvrir la demande. Par conséquent, une reconfiguration du contrôle est conçue pour remplacer le contrôle basé sur la gestion de l'énergie adopté dans l'état sain . L'idée consiste en un délestage pour alimenter uniquement les charges critiques. Cela est réalisé pratiquement en mettant hors service les charges non critiques via un contrôle doux de quelques relais introduits

L'étape de reconfiguration du contrôle consiste à couvrir uniquement la demande après le délestage, en ajoutant un mode opératoire supplémentaire appelé "limitation de puissance", qui commute le contrôle du hacheur côté PV de l'algorithme MPPT à conductance incrémentale vers celui de couverture de la puissance requise, comme représenté respectivement dans les figures (2a) et (2b). Il est important de noter que la puissance de la charge DC connectée décide s'il y aura un délestage et une stratégie de limitation de puissance, ou seulement une limitation de puissance.

1. Limitation de puissance $P_{net} < 0$ à faible demande sans délestage si la batterie est chargée
2. Demande notable $P_{net} > 0$ limitation de puissance avec délestage.

III .4.1 la commande de l'hacheur boost de pv :

Afin d'assurer à la fois un flux de puissance total des sources hybrides et de maintenir la tension continue constante dans une valeur de référence, quelles que soient les perturbations du système. Pour ce faire, la conception du le contrôleur de bus est basé sur la théorie directe de Lyapunov Figure III..7 et Figure III..8 [35].

On peut définir une fonction définie positive quadratique liée à l'erreur de suivi : [36]

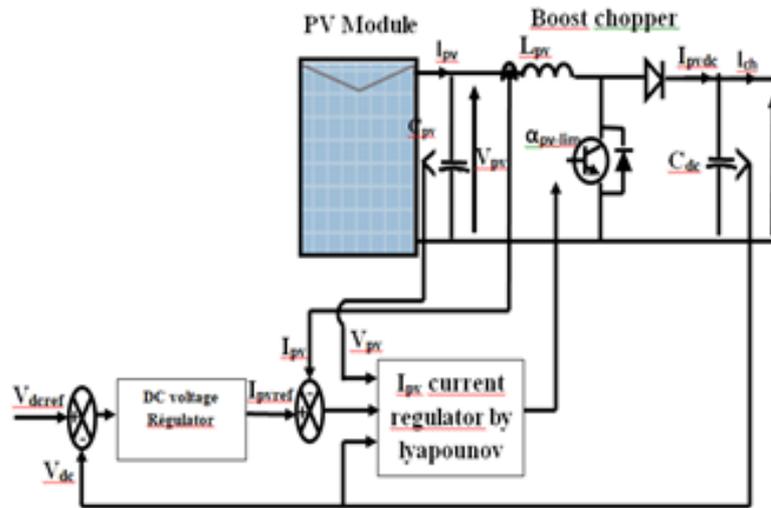


Figure III.7 Contrôle du sous-système PV en mode limitation de puissance

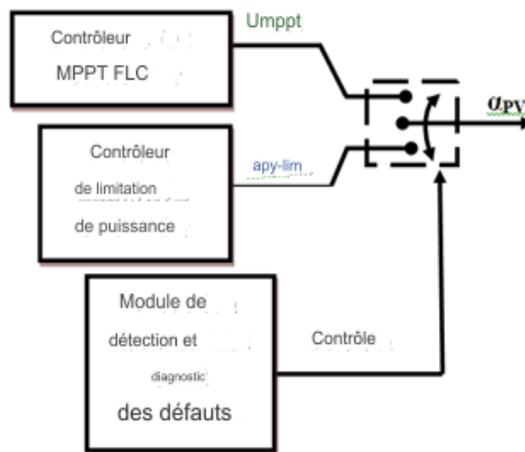


Figure III.8 Reconfiguration du contrôle en cas de défaillance du système.

- Dans le cas de la batterie en panne

1/boucle externe : tension vdc :

$$\text{On a :} \quad I_c = c \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (\text{III.24})$$

$$\text{Donc} \quad c \frac{dv_{dc}}{dt} = ip_{vc} - il = ip_{vs} - \frac{v_{dc}}{R} \quad (\text{III.25})$$

Soit la fonction de Lyapounov :

$$V_1 = \frac{1}{2} e^2; \quad (\text{III.26})$$

$$e = \overline{v_{dc}} - v_{dc_{ref}} \quad (\text{III.27})$$

$$v_{dc_{ref}} = 35v$$

$$v_1 \circ = e e^\circ = -k_1 e^2 \quad (\text{III.28})$$

$$e^\circ = -k_1 e \quad (\text{III.29})$$

$$e^\circ = vdc^\circ - vdc^\circ_{ref} = vdc^\circ = \frac{1}{c}(ipvc - il) \quad (\text{III.30})$$

$$= \frac{1}{c} \left(ipvc - \frac{vdc}{R} \right) = -k_1 e$$

$$ipvs = -k_1 ce + \frac{vdc}{R}$$

Déduction de ipv_{ref} :

- conservation de puissance :

$$Vpv \cdot ipv_{ref} = vdc \cdot ipvs \quad (\text{III.31})$$

$$ipv_{ref} = \frac{vdc \cdot ipvs}{Vpv} \quad (\text{III.32})$$

2/boucle interne

Moyen de l'hacheur boost de la batterie

$$Vpv = l \frac{dipv}{dt} + (1 - apv)vdc \quad (\text{III.33})$$

$$ipv = \frac{dipv}{dt} = \frac{1}{L} v - \frac{1-apv}{L} vdc \quad (\text{III.34})$$

soit une deuxième fonction de lyapunov :

$$v_2 = \frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{III.35})$$

$$e_2 = ipv - ipv_{ref} \quad (\text{III.36})$$

$$v_2^\circ = e_2 e_2^\circ = -k_2 e_2^2 \quad (\text{III.37})$$

$$e_2^\circ = -k_2 \cdot e_2 \quad (\text{III.38})$$

$$e_2^\circ = ipv^\circ - ipv_{ref}^\circ = \frac{1}{L} vpv - \frac{1-ab}{L} vdc - ipv_{ref}^\circ = -k_2 e_2 \quad (\text{III.39})$$

$$(-k_2 e_2 + ipv_{ref}^\circ) L = vpv - (1 - apv) vdc \quad (\text{III.40})$$

$$[-k_2 e_2 + ipv_{ref}^\circ] L + (1 - apv) vdc = vpv \quad (\text{III.41})$$

$$\alpha_{pv} = 1 - \frac{v_{pv}[-k_2 e_2 + i_{pv} v_{ref}^{\circ}]L}{v_{dc}} \quad (\text{III.42})$$

$$k_2 > k_1$$

$$k_1 = 7 \quad ; \quad k_2 = 1000$$

IV. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'exposé de l'ensemble d'algorithmes et les différentes approches permettant de commander le système de génération photovoltaïque .cela a été fait en allant de la représentation macroscopique à celle microscopique selon les modes de fonctionnement proposés.

Chapitre IV

Résultats de Simulations

IV.1 Introduction :

Dans le présent chapitre ,on va mettre en exergue les performances du système de module photovoltaïque issues des modes de fonctionnement et des lois de commande présentées au chapitre précédent .en fait le chapitre présente des résultats de simulation et interprétations .

IV.2 RÉSULTATS DES SIMULATIONS :

La simulation prend 1,5 s et la perte de batterie est programmée pendant la fenêtre de temps

[0,5 s-1 s], comme le montre de la Figure III.7 Cette situation est choisie pour évaluer la robustesse du système pour prendre en charge le pire des cas, lorsque la source de support impliquée (la batterie) est perdu.

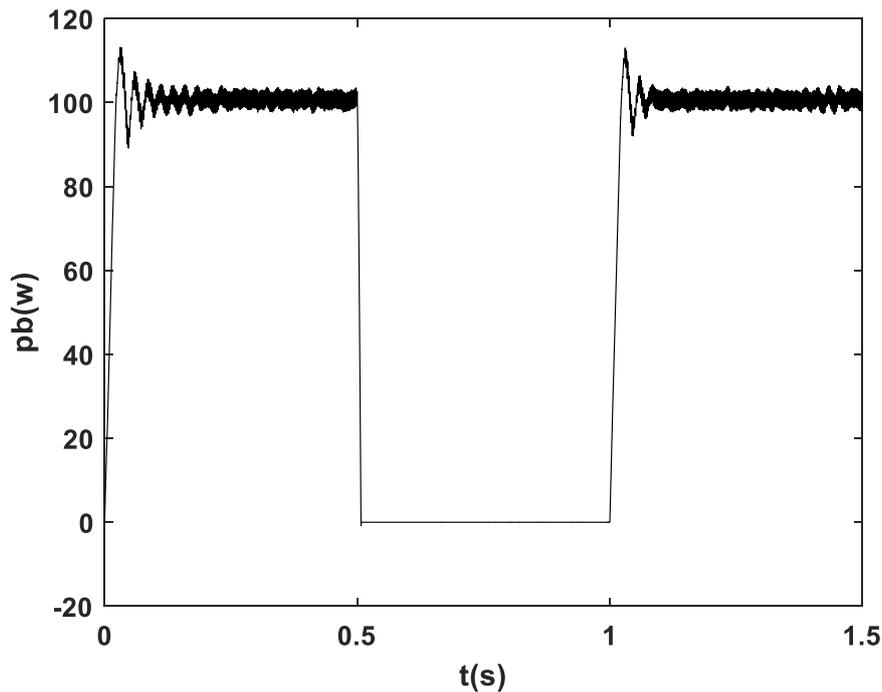


Figure IV.1 Puissance de Batterie (w)

Lors de cette simulation, la demande de charge appelle 101 W pendant (0-0,5s) et 22w entre (0,5-1) figure IV.4, tandis que le module solaire est exposé à un éclairage modéré (FigureIV.2).

- Pendant l'intervalle de temps [0s-0,5s], le système fonctionne normalement, où la puissance nette décrite dans la Figure IV.3 est positive, c'est-à-dire un fonctionnement en mode 1. La charge est alors alimentée par les deux sources (la batterie et le panneau), où ce dernier délivre un maximum de 38W, sous une tension optimale de 17,5V, comme le montrent respectivement les Figure IV.1 et Figure IV.3, via la technique de conductance incrémentale [38]. La batterie fournit alors la quantité non couverte pour satisfaire la demande .

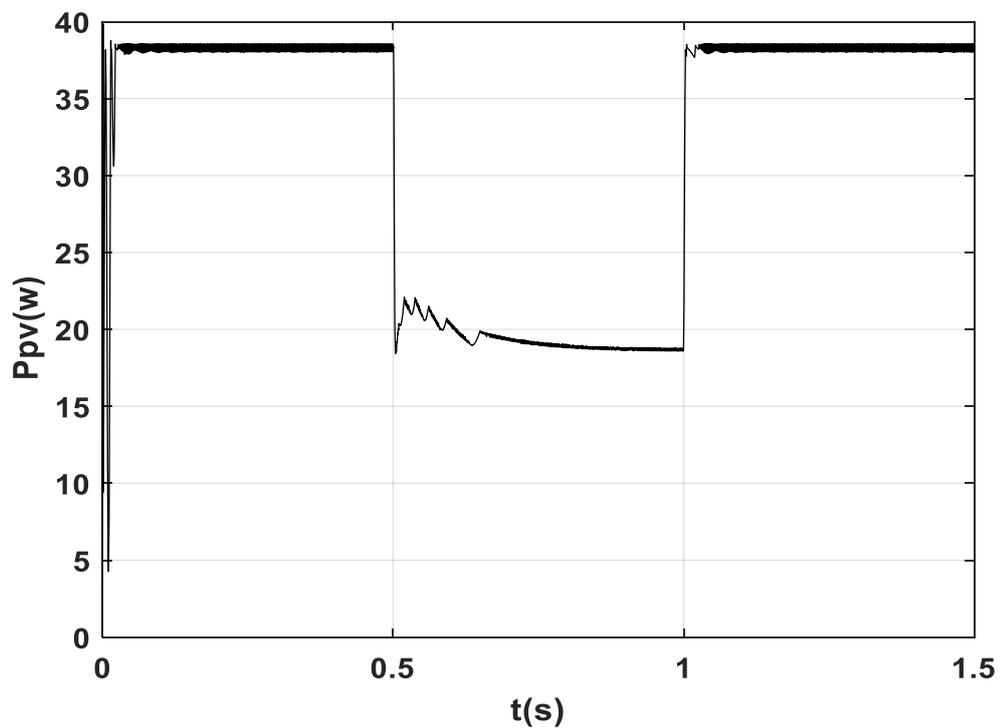


Figure IV.2 Puissance PV (w)

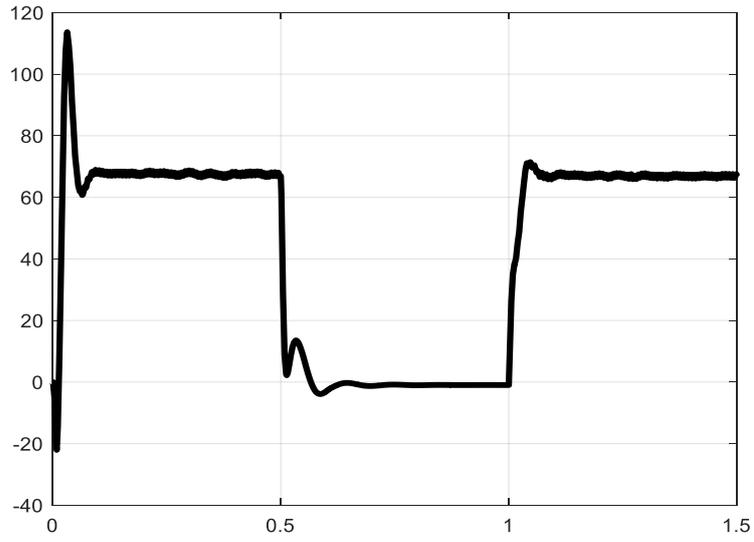


Figure IV.3 puissance nette (w)

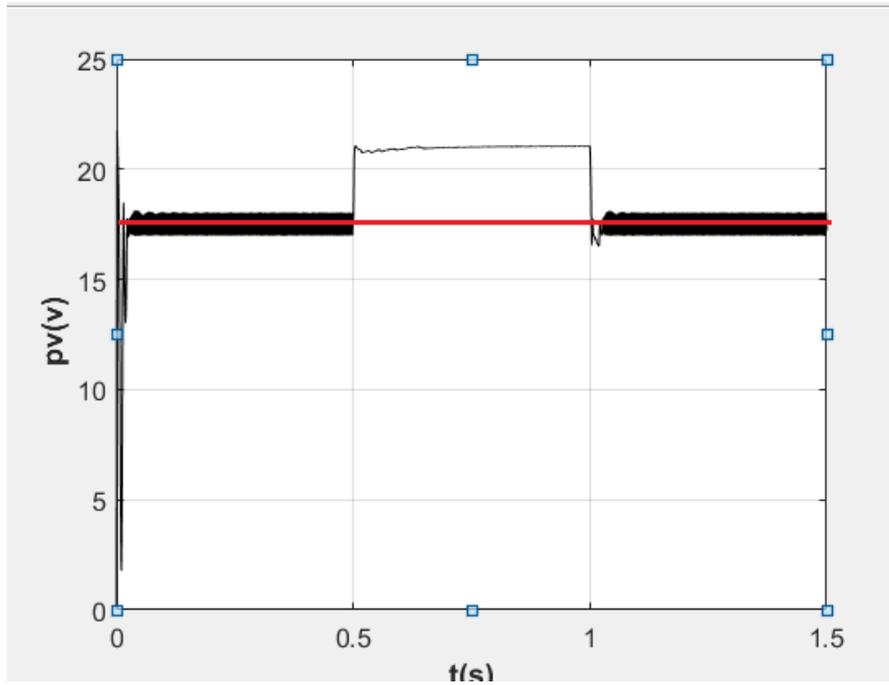


Figure IV.4 Tension PV (v)

- Pendant le deuxième intervalle [0,5 s-1s], une batterie est en panne Figure IV.1 , la puissance nette décrite à la Fig. IV. 3 est négatif, c'est-à-dire qu'un fonctionnement en mode 2, ce qui signifie que la demande de charge est modérée, un excès est constaté . La reconfiguration de la commande est orientée à la limitation de puissance sans délestage. Dans ce cas, les performances proposées en mode limitation de puissance sont affichées et commentées via les courbes suivantes. Sur la Figure. IV. 1 est affichée la courbe de puissance de la batterie. On remarque qu'en cas de perte de batterie, cette quantité reste égale à zéro. Comme le montre la figure IV.2, la puissance photovoltaïque diminue considérablement par rapport à son maximum, où le panneau ne fournit que la demande de puissance critique sur la liaison CC. Cette quantité est d'environ 22 W. Pour faire le point de vue sur le comportement PV en mode limitation de puissance, la figure IV. 4 illustre la tension du module PV sur une période de temps. Comme on peut le remarquer, la tension PV augmente légèrement jusqu'à 22 V, ce qui est supérieur au point optimal (17,5 V). En conséquence, le point de fonctionnement du côté PV se déplace vers la droite du point MPP (point B sur la figure IV.6 , fournissant uniquement la demande requise. Comme l'ont prouvé certains travaux antérieurs [38,39] , le nouveau point de fonctionnement obtenu, respectivement A ou B, délivrant la même puissance, dépend étroitement de la nature du convertisseur DC-DC côté PV. Il a été montré que le positionnement sur le côté droit du point optimal (point B) garantit un fonctionnement stable lorsqu'un hacheur boost est utilisé.

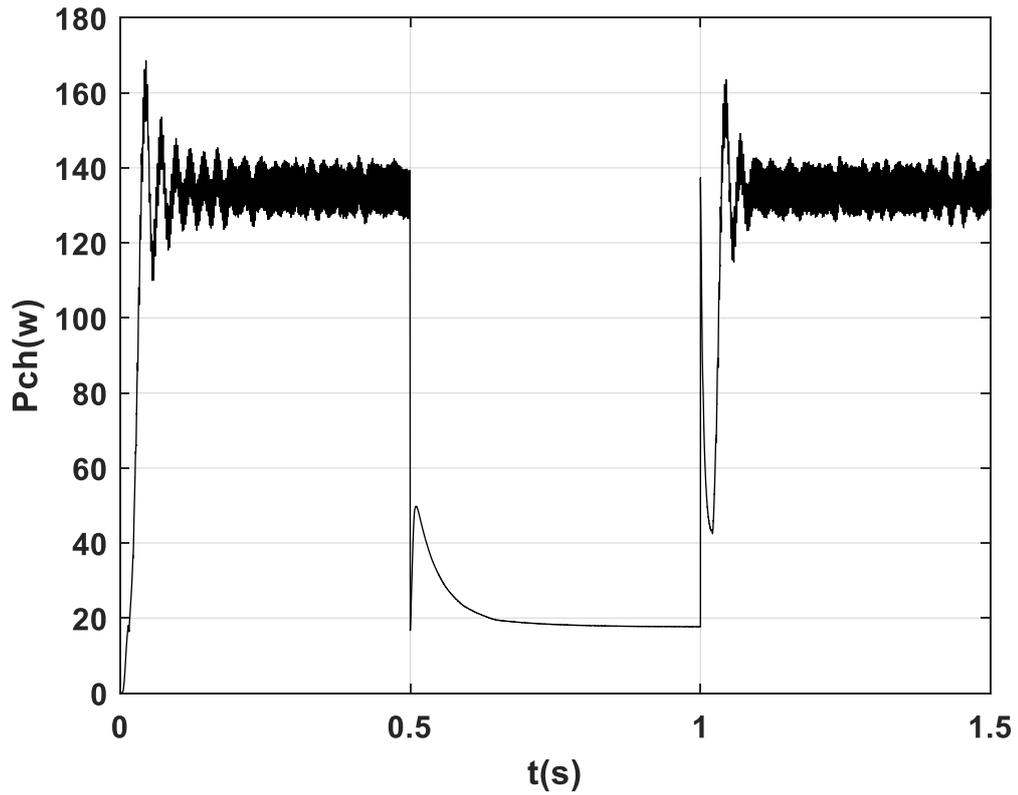


Figure IV.5 Puissance de charge (w)

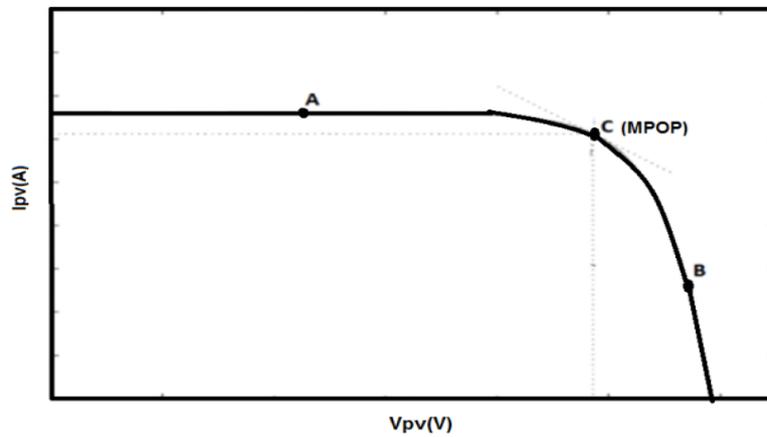


Figure IV.6- caractéristique du module PV.

- Pendant l'intervalle de temps restant [1 s-1,5 s], la batterie réapparaît et toute la charge est active, s'établissant à sa valeur précédente (101 W). La puissance nette, décrite sur

- la Fig. IV.3 augmente, et le système fonctionne à nouveau en mode 1, où la puissance PV augmente jusqu'à sa valeur maximale, permettant, sous support batterie, d'alimenter toute la charge Figure. IV.5.

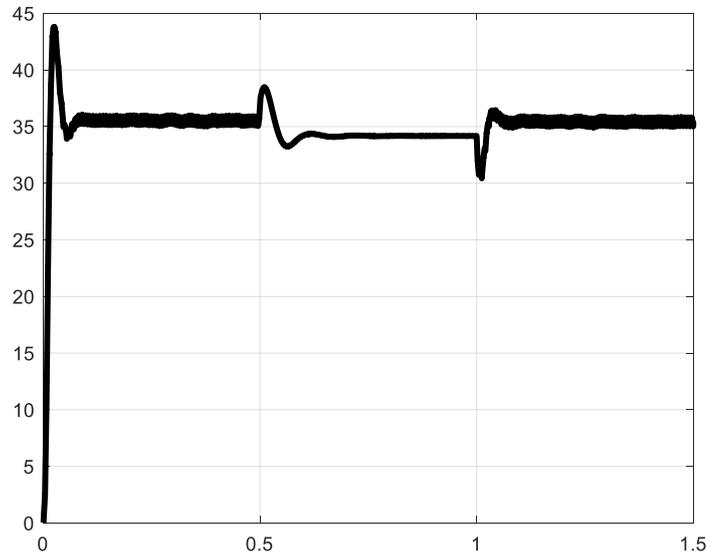


figure IV.7 tension de DC bus

Enfin, la figure. IV. 7 montre l'évolution de la tension du circuit intermédiaire sur toute la durée du test, lors du passage du mode MPPT au mode limitation de puissance et inversement. On constate clairement que la tension du bus DC est maintenue constante à sa référence.

IV.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les performances du système issues des lois de commande proposées. Les résultats de simulation sont satisfaisants, et permettent un contrôle adéquat d'un tel système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le présent travail, on a présenté un contrôle tolérant aux pannes d'un système PV/batterie intelligent à petite échelle. L'objectif principal des stratégies de contrôle proposées est d'évaluer la capacité du système à maintenir son fonctionnement normal en tant qu'architecture du système dans son pire des cas, Les résultats de simulation obtenus prouvent l'efficacité de ces techniques de contrôle, où une opération de commutation en douceur entre les états sains et défectueux du système est remarquée, et une alimentation en charge continue est garantie de manière intelligente.

De ce fait, un ensemble de conclusion ont été déduites :

- Le superviseur d'énergie proposé a prouvé une efficacité notable, et ce par la permutation souple des différents modes de fonctionnement.
- Le régulateur MPPT basé sur la méthode incrémental conductance a permis un suivi adéquat de la puissance maximale du module photovoltaïque, avec une oscillation moindre autour de sa référence.
- Les régulateurs par lyapounov a démontré une robustesse notable vis-à-vis la variation des modes de fonctionnement et de la charge.

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

- ❖ Réalisation d'un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour compléter le travail et concrétiser ce projet sur site.
- ❖ Envisager une inclinaison variable des panneaux, permettant de maximiser la production du champ selon le mois considéré.
- ❖ Considération autre défauts de système avec l'utilisation autre commande intelligentes.

Références

- [01] AkassewaTchapo SINGO , le 3 février 2010 par ‘ Système d’alimentation photovoltaïque avec stockagehybride pour l’habitat énergétiquement autonome ’ Mémoire de doctorat de l’UniversitéHenri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique. Soutenue publiquement
- [02] Fabien CASSORE Guillaume, ORLANDI Maxime RAU : ‘ Cellule photovoltaïque àcolorant ’ Rapport de stage .Département de physique Université de Nice Sophia antipolis
- [03] O. Gergaud, 09 décembre 2002. "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’ENS de Cachan (France) .
- [04] Mr : Mazouz Karim , Université Abderrahmane-Mira-Bejaia, 2012. « Etude D’une Batterie De Stockage Dans Un Système Photovoltaïque », mémoire master
- [05] E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte et al. , 2005, Modelling,« Ni-mH battery using Causer and Foster structures», Journal of Power Sources, Vol. 158, Issue 2, Pages 1490-1497
- [06] Majid Zandi : ‘ Contribution au pilotage des sources hybrides d’énergie électrique ’ .Thèse de doctorat de, Institut National polytechnique de Lorraine.
- [07] Bendjamâa Ibrahim : ‘ Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque .’ Mémoire de magister, , Université ABOU-BAKR BELKAID –Tlemcen.
- [08] G. Marlair - L. Dupont - J. Lejosne : ‘ Données de base sur les différentes technologies de stockage d’énergie. ’ INERIS. Rapport d’étude
- [09] Reynaud Jean-François : ‘ Recherches d’optimums d’énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques. ’ Thèse de doctorat. Université de Toulouse.
- [10] Tutorial : ‘ Energie solaire et électricité photovoltaïque. ’ CIPCSP 2006 – 2011.
- [11] Abou El-MaatyMetwallyMetwallyAlyAbd El-Aal. 2005.«Modelling and simulation of a photovoltaic fuel cellhybrid system », Thèse de doctorat del’Université de Kassel, Germany.
- [12] I.Vechiu. 2005. « Modélisation et analyse de l’intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de doctorat de l’université du Havre.
- [13] De Soto, W., Klein, S. A., &Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance.Solar Energy, 80(1), 78-88.
- [14] ArisVourvoulias, 2023 “ How Efficient Solar Panels Are in the UK? Which Factors Determine the Efficiency of Solar Panels?”, green mach,
- [15] A. Betka and A. Attali, 2010. "Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory," Solar Energy, vol. 84, pp. 1273-1283.

Références

- [16] YachanaChandrakar : ‘ Comparison of Open Loop and Closed Loop Models for Dual Input DC-DC Boost Converter . ’, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: www.ijetae.com.
- [17] S. Ramya, A.Napolean : April-2013 1520. ‘ Open Loop Control of a Novel Power Converter for FuelCell assisted Photovoltaic Power Systems. ’ International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 4,
- [18] M.Mahalakshmi : ‘ Modeling; simulation and sizing of photovoltaic/Wind/Fuel cell hybrid generation system. ’ Research Scholar, Department of EEE.
- [19] Author(s) Musavi, F. Eberle, W. ;Dunford, W.G . 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE. ‘ ‘ A phase shifted semi-bridgeless boost power factor corrected converter for plug in hybrid electric vehicle battery chargers ‘ ‘ Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),
- [20] DekkicheAbdelillah : ‘ Modèle de batterie générique et estimation de l’état de charge .’ mémoire de Maitrise. Ecole de technologie supérieure, Université du Québec Montréal.
- [21] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, Abdel-AllahDekkiche : ‘ A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. ’ Ecole de TechnologieSupérieure.
- [22] S.M. Mousavi G., M. Nikdel, 2014 "Various battery models for various simulation studies and applications "
- [23] Abadlia, 2016. I., T. Bahi, and H. Bouzeria, "Energy management strategy based on fuzzy logicfor compound RES/ESS used in stand-alone application". International Journal of Hydrogen Energy, 41(38): p. 16705-16717.
- [24] Wu, Z., &Popović, M. B. (2008). A Simple Method for State-of-Charge Estimation of Lead-Acid Batteries.IEEE Transactions on Power Electronics, 23(4), 2209-2215.
- [25] Glavin, M. and W. Hurley, , 2012.86(10): p.30093020.
"Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitorhybridenergy storage system". Solar energy
- [26] C. W. Tan and M. Jamri , 2010. "Modeling and control of a photovoltaic energy system using the state-space averaging technique," American Journal of Applied Sciences, vol. 7,pp.682- 691
- [27] Erickson, R. W., &Maksimovic, D. (2001).Fundamentals of Power Electronics.Springer Science+Business Media.
- [28] T. V. (2016). Journal of Electrical and Computer Engineering, 6(6), 2538 , An optimal energy management system for PV/battery standalone system.International

Références

- [29] KivancBasaran, NumanSabit Cetin, SelimBorekci, 2017.’’ Energy management for on-grid and off-grid wind/PV and battery hybrid systems’’, IET Renewable Power Generation, Vol. 11 Iss. 5, pp. 642-649.
- [30] David SanzMorales , . Espoo 14.12.2010
‘ Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications. ‘ Faculty of Electronics.
- [31] SLAMA Fateh ‘ Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. ’ Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbes-Sétif
- [32] BOUALEM, DENDIB ‘ Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des application photovoltaïque : étude comparative. Mémoire de Magister .UniversitéFerhat Abbes-Sétif .
- [33] Stefan Moring : ‘ Maximum Power Point Tracking: Algorithm and Software Development. ’ Bachelor Thesis.Delft University of Technology.
- [34] FalinirinaF , The Ohio State University 2011
‘ Study of Photovoltaic System. ’ Thesis Degree Master . Graduate School
- [35] A.Benaissaa, B. Rabhib, M. F. Benkhorisc, L.Zelloumad, 2015’’ An adaptive Linear Quadratic Regulator for Three-phase UPS system Powering Nonlinear Loads’’, Energy Procedia 74, pp: 1100 – 1111
- [36] Mourad.Tiar , 2016. et all “Optimal energy control of a PV-fuel cell hybrid system’’, International journal of HYDROGEN ENERGY.
- [37] O. Ulleberg, Trondheim, 12/1998. “Stand alone power systems for the future: optimal design, operation and control of solar-hydrogen energy systems’’, Ph. D. dissertation, Norwegian University of Science and Technology,