

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Khenchela
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes Électriques

Thème

**Modélisation, simulation et commande d'un système
hybride photovoltaïque-batterie**

Réalisé par : GHEDBANE Sabir

Devant le jury :

Président : Dr. AMIEUR Oualid

Université de Khenchela

Encadrant : Dr. NADJEM Abdelkader

Université de Khenchela

Examineur : Dr. DJELAILIA Okba

Université de Tébessa

Année universitaire :2025/2026

Remerciements

Nous ouvrons ces pages par une pensée reconnaissante envers **ALLAH**, dont la main nous a portés et la lumière nous a guidés durant toutes ces années d'étude et de réalisation. Et que l'honneur soit sur notre **Prophète Mohamed**, sa famille et ses compagnons, gardiens de la foi.

Notre profonde gratitude à notre encadrant, le **Dr. NADJEM Abdelkader**, qui a su croire en nous, nous guider avec sagesse et nous offrir son temps précieux. Son regard attentif, ses conseils éclairés et sa gentillesse ont été un véritable moteur tout au long de ce travail. Sans son dévouement, cette recherche n'aurait pas connu un tel aboutissement.

Nous sommes infiniment reconnaissants envers les membres du jury, **Dr. AMIEUR Oualid** et **Dr. DJELAILIA Okba** qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail. Que nos remerciements atteignent également **l'Université Abbes Laghrour de Khenchela**, plus particulièrement tous les enseignants du **Département de Génie Électrique**, pour leur accompagnement précieux tout au long de notre parcours.

Enfin, une pensée sincère va à toutes les bonnes volontés qui, chacune à sa manière, ont posé une pierre à l'édifice de ce mémoire.

Dédicaces

À mes très chers parents, dédicace infinie pour un amour sans limite. Aucune phrase ne pourrait capturer l'étendue de ma reconnaissance pour tout ce que vous avez semé sur mon chemin. Que Dieu vous préserve et vous offre une longue vie pleine de sérénité. À mes frères, mes sœurs et la douce constellation de notre famille Ghedbane. À mes amis, mes camarades, âmes croisées et cœurs fidèles. À tous ceux qui m'aiment, et à toutes les personnes que j'aime. Ce travail vous appartient.

GHEDBANE Sabir

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Notions fondamentales sur les systèmes photovoltaïques	
1.1 Introduction	3
1.2 Définition et description d'une installation photovoltaïque	4
1.3 Les composants du rayonnement solaire	4
1.4 Les cellules solaires photovoltaïques	5
1.4.1 Qu'est-ce qu'une cellule solaire ?	5
1.4.2 Principe de fonctionnement	6
1.5 Les différents types de cellules photovoltaïques	7
1.5.1 Cellule en silicium polycristallin	7
1.5.2 Cellule en silicium monocristallin	7
1.5.3 Cellule en silicium amorphe	8
1.5.4 Cellule nanocristalline	8
1.6 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque	9
1.6.1 Point de puissance maximale (PPM)	10
1.6.2 Facteur de remplissage (FF)	10
1.6.3 Rendement énergétique	10
1.7 Association des cellules photovoltaïques	11
1.7.1 Montage en série	11
1.7.2 Montage en parallèle	12
1.7.3 Association mixte (série-parallèle)	13
1.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	13
1.8.1 Les atouts (avantages)	13
1.8.2 Les inconvénients (désavantages)	14
1.9 L'effet de la variation des conditions climatiques sur les caractéristiques du générateur PV	14
1.9.1 Influence de la température	14
1.9.2 Influence de l'ensoleillement (irradiance)	15
1.10 Généralités sur les systèmes hybrides	17
1.11 Classification des systèmes hybrides	17

1.12 Structure typique d'un système photovoltaïque	18
1.13 Conclusion	19

Chapitre 2 : Les convertisseurs DC/DC

2.1 Introduction	20
2.2 Le convertisseur DC/DC comme transformateur d'impédance	20
2.3 Types de convertisseurs DC-DC	23
2.3.1 Convertisseur abaisseur (Buck)	23
2.3.2 Convertisseur élévateur (Boost)	23
2.3.3 Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)	24
2.3.4 Convertisseur Ćuk	24
2.3.5 Convertisseur SEPIC	25
2.4 Raccordement direct source-charge	25
2.4.1 Diagramme synoptique du système photovoltaïque	25
2.4.2 Configurations des convertisseurs DC/DC	27
2.4.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck) : Modèle mathématique équivalent	27
2.4.2.2 Convertisseur survolteur (Boost) : Modèle mathématique équivalent	30
2.5 La technique de poursuite du point de puissance maximale (MPPT)	34
2.5.1 Principe fondamental et justification	34
2.5.2 Efficacité du MPPT	35
2.5.3 Algorithme Perturb & Observe (P&O)	35
2.5.4 Algorithme d'Incrémentation de Conductance (IncCond)	37
2.5.5 Comparaison P&O vs IncCond	39
2.6 Résultats et discussion	40
2.6.1 Système sans MPPT	40
2.6.2 Système avec MPPT	43
2.4 Conclusion	45

Chapitre 3 : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque-batterie

3.1 Introduction	47
3.2 Généralités sur les batteries pour le stockage d'énergie	47
3.2.1 Principe de fonctionnement électrochimique	48
3.2.2 Notion de courant de surcharge (surintensité admissible)	49

3.3 Principaux types de batteries solaires	50
3.3.1 Batteries au plomb (Pb-acide)	50
3.3.2 Batteries lithium-ion (Li-ion)	51
3.4 Paramètres caractéristiques des batteries solaires	52
3.4.1 Capacité nominale et capacité utile	52
3.4.2 État de charge (SOC — State Of Charge)	53
3.4.3 Profondeur de décharge (DOD — Depth Of Discharge)	53
3.4.4 Temps de charge / décharge	54
3.4.5 État de santé (SOH — State Of Health)	54
3.5 Association de batteries (série / parallèle)	54
3.6 Modélisation électrique de la batterie	56
3.7 Convertisseur DC-DC bidirectionnel	57
3.7.1 Rôle et topologie	57
3.7.2 Stratégie de commande	58
3.8 Caractéristiques de décharge d'une batterie	59
3.9 Résultats et discussion	60
3.9.1 Influence de l'éclairement (irradiance)	60
3.9.2 Influence de la température	62
3.10 Conclusion	63
Conclusion générale	65
Références bibliographiques	67

Liste des figures

Figure 1.1 : Les composants du rayonnement solaire.	5
Figure 1.2 : Cellule solaire photovoltaïque.	5
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	6
Figure 1.4 : Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.	9
Figure 1.5 : Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série.	12
Figure 1.6 : Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle.	12
Figure 1.7 : Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique $I(V)$.	13
Figure 1.8 : Caractéristiques puissance-tension et courant-tension d'une module photovoltaïque pour une variation de température en ensoleillement constant.	15
Figure 1.9 : Caractéristiques puissance-tension et courant-tension d'une module photovoltaïque pour différent niveau d'ensoleillement constant.	16
Figure 1.10 : Exemple d'un système PV hybride.	17
Figure 1.11 : Classification des systèmes hybrides.	18
Figure 2.1 : Convertisseur abaisseur (Buck).	23
Figure 2.2 : Convertisseur élévateur (Boost).	24
Figure 2.3 : Diagramme synoptique du système photovoltaïque.	26
Figure 2.4 : Schéma de principe d'un convertisseur buck (hacheur série) – Phases de conduction avec S fermé et S ouvert.	28
Figure 2.5 : Formes d'onde d'un convertisseur Boost en conduction continue (CCM).	31
Figure 2.6 : Organigramme de l'algorithme MPPT par perturbation et observation (P&O).	36
Figure 2.7 : Organigramme de l'algorithme MPPT par conductance incrémentale (IncCond).	38
Figure 2.8 : Schéma de simulation du panneau PV et hacheur boost sans MPPT.	40
Figure 2.9 : Paramètres du panneau.	40
Figure 2.10 : Le profil de l'éclairement appliqué.	41
Figure 2.11 : La puissance à la sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT.	41
Figure 2.12 : Le courant à la sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT.	42

Figure 2.13 : La tension à la Sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT.	43
Figure 2.14 : Schéma de simulation du panneau PV et hacheur boost avec MPPT.	43
Figure 2.15. La puissance à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT.	44
Figure 2.16. Le courant à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT.	44
Figure 2.17. La tension à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT.	45
Figure 3.1 : Principe de fonctionnement d'une batterie lithium-ion : charge et décharge.	48
Figure 3.2 : Comparaison des trois principaux types de batteries plomb-acide : ouverte (Flooded), AGM et Gel.	52
Figure 3.3 : Branchement des batteries : parallèle vs série – impact sur la tension et le courant.	55
Figure 3.4 : Modélisation sous Simulink d'un système hybride PV-batterie.	60
Figure 3.5 : Variation de l'éclairement.	60
Figure 3.6 : Influence de l'éclairement ; (a) : tension, (b) : courant, et (c) : état de charge de la batterie.	61
Figure 3.7 : Variation de la température .	62
Figure 3.8 : Influence de la température ; (a) : tension, (b) : courant, et (c) : état de charge de la batterie.	63

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Comparaison des topologies de convertisseurs DC-DC non isolés.	25
Tableau 2.2 : Comparaison des algorithmes MPPT : Perturb & Observe (P&O) vs Conductance Incrémentale (IncCond).	39
Tableau 3.1 : Caractéristiques typiques d'une batterie plomb-acide.	50
Tableau 3.2 : Caractéristiques typiques d'une batterie lithium-fer-phosphate (LiFePO4).	51
Tableau 3.3 : Paramètres d'un modèle électrique équivalent de batterie (modèle RC à une branche).	57

Tableau 3.3 : Paramètres de filtre et de découpage pour un convertisseur DC-DC bidirectionnel.	58
Tableau 3.4 : Paramètres des correcteurs PI pour la gestion d'un système batterie – bus DC.	58

Introduction générale

Le XXI^e siècle est confronté à un double défi : l'épuisement des ressources fossiles d'une part, et l'urgence climatique d'autre part. Le secteur de l'énergie est responsable à lui seul de 73 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, ce qui fait de la transition vers les énergies renouvelables une nécessité, et non une option. L'énergie solaire photovoltaïque est inépuisable, disponible partout dans le monde, adaptable à grande échelle, silencieuse et ne nécessite qu'un entretien minimal. La Terre reçoit une énergie solaire équivalente à 10 000 fois la consommation mondiale annuelle, faisant de la conversion du rayonnement solaire en électricité une voie essentielle pour décarboner le secteur énergétique.

Depuis 2000, la capacité photovoltaïque installée dans le monde est passée de 1,4 gigawatts à plus de 1 200 gigawatts en 2023, soit un taux de croissance annuel supérieur à 20 %. Cette croissance s'est accompagnée d'une réduction des coûts de plus de 90 % depuis 2010, rendant l'énergie solaire moins chère que les sources d'énergie traditionnelles dans une grande partie du monde. L'énergie solaire photovoltaïque souffre d'une production irrégulière due à sa dépendance aux variations de l'ensoleillement, ce qui freine son intégration aux réseaux électriques. De plus, sa courbe courant-tension est non linéaire et influencée par l'irradiance et la température, et son point de puissance maximale (PPM) est en constante évolution. Un raccordement direct sans contrôle de ce point entraîne des pertes d'énergie pouvant atteindre 20 à 40 % de la puissance maximale disponible.

Pour pallier les problèmes d'intermittence et d'adaptation d'impédance, deux technologies intégrées sont mises en œuvre :

1. Un système de stockage d'énergie (batteries) pour dissocier la production et la consommation d'électricité.
2. Un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser le fonctionnement et extraire la puissance maximale disponible.

Ces technologies sont intégrées via des convertisseurs DC/DC qui relient le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge.

Le mémoire est organisé en trois chapitres, précédés de la présente introduction générale et suivis d'une conclusion générale.

Le Chapitre 1 présente les généralités sur les systèmes photovoltaïques. Il aborde le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque, les différents types de cellules solaires et leurs caractéristiques électriques, l'association des cellules en modules et générateurs, les avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque, l'influence des conditions climatiques sur les performances, ainsi qu'une introduction aux systèmes hybrides et à leur classification.

Le Chapitre 2 est consacré aux convertisseurs DC/DC et à la technique MPPT. Il détaille les topologies Buck et Boost avec leurs modèles mathématiques équivalents, présente le diagramme synoptique du système photovoltaïque, et expose en profondeur les algorithmes MPPT de type Perturb & Observe (P&O) et Incrémentation de Conductance (IncCond). Les résultats de simulation avec et sans MPPT sont comparés et discutés.

Le Chapitre 3 traite de la modélisation et de la simulation du système photovoltaïque-batterie complet. Il couvre les généralités sur les batteries de stockage, les technologies plomb-acide et lithium-ion, les paramètres caractéristiques (SOC, DOD, SOH), la modélisation électrique de la batterie (modèle de Thévenin), le convertisseur DC/DC bidirectionnel pour la gestion de la charge et de la décharge, et les résultats de simulation sous différents profils d'ensoleillement et de température.

Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus et propose des perspectives pour la poursuite de ce travail.

Chapitre 1 : Notions fondamentales sur les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont issues des phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [1]. Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque [2, 3].

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité , alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [4].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques ainsi le générateur solaire photovoltaïque.

1.2 Définition et description d'une installation photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » (souvent abrégé en PV) associe deux éléments : le préfixe grec photo (lumière) et le nom Volta, en hommage au physicien italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrique. Les cellules photovoltaïques, composées de matériaux semiconducteurs, ont la propriété de convertir directement la lumière en électricité. Ce phénomène porte le nom "d'effet photovoltaïque".

1.3 Les composants du rayonnement solaire

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique couvrant un large éventail de longueurs d'onde, depuis les ultraviolets jusqu'aux ondes radio, en passant par la lumière visible (voir Figure 1.1). Ce spectre inclut également des particules énergétiques, comme les rayons cosmiques. Avant d'atteindre la surface terrestre, une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone. Constitué de photons dont l'énergie dépend de leur longueur d'onde (λ), ce rayonnement est essentiel à la vie, notamment via la photosynthèse. On le divise généralement en quatre composantes principales : l'ultraviolet, le visible, l'infrarouge et les ondes radio. L'énergie lumineuse constitue à la fois la base et le cœur de nombreuses filières d'énergies renouvelables, dont le photovoltaïque.

a) Rayonnement global : Il correspond à l'ensemble du rayonnement solaire parvenant au sol sur une surface horizontale, qu'il s'agisse d'un rayonnement direct ou diffus. Il équivaut simplement à la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

b) Réflexion du rayonnement : C'est la part du rayonnement réfléchi par la surface terrestre, soit de manière directionnelle (réflexion dite spéculaire), soit de façon dispersée. En général, le sol réfléchit le rayonnement de manière diffuse et non isotrope.

c) Rayonnement direct : On appelle rayonnement solaire direct celui qui parvient à la surface de la Terre sans avoir subi de diffusion atmosphérique. Sa mesure s'effectue à l'aide d'un pyrhéliomètre.

d) Rayonnement diffus : Il s'agit du rayonnement provenant de l'ensemble de la voûte céleste. Ce phénomène lumineux résulte de l'absorption et de la diffusion d'une fraction du rayonnement solaire par l'atmosphère, ainsi que de sa réflexion par les nuages. On peut le quantifier grâce à un pyranomètre équipé d'un écran masquant le Soleil.

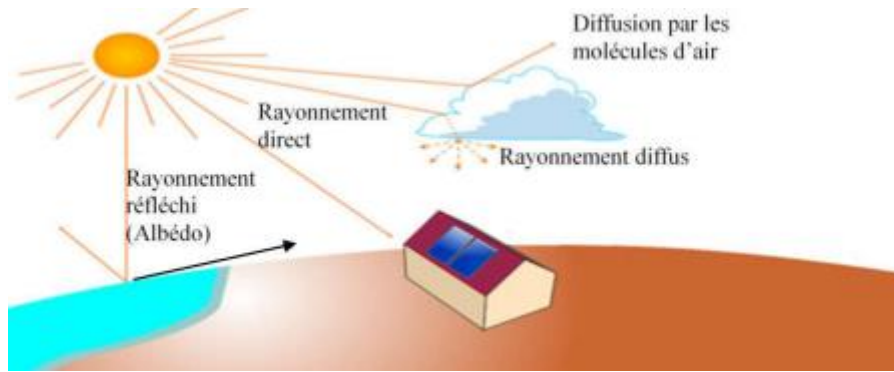


Figure 1.1 : Les composants du rayonnement solaire.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante : [5].

$$E_p = h * \frac{C}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec h : est la constante de Planck, C : est la vitesse de la lumière et λ : la longueur d'onde.

1.4 Les cellules solaires photovoltaïques

1.4.1 Qu'est-ce qu'une cellule solaire ?

Une cellule solaire photovoltaïque (illustrée à la Figure 1.2) est un composant fabriqué à partir d'un matériau semi-conducteur. Sa fonction consiste à convertir le rayonnement lumineux reçu en électricité [6]. Ce processus, appelé effet photovoltaïque, se traduit par l'apparition d'une tension électrique. Celle-ci résulte de la génération de porteurs de charge (électrons et trous) lorsqu'une lumière excite une structure proche d'une jonction PN.



Figure 1.2 : Cellule solaire photovoltaïque.

1.4.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur plusieurs étapes clés. Tout d'abord, les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite (gap) du matériau semi-conducteur sont absorbés. Cette absorption permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, ce qui se traduit par la création de paires électron-trou au sein du semi-conducteur. Ensuite, les porteurs de charge ainsi générés sont collectés au sein du dispositif. La Figure 1.3 illustre ce mécanisme.

D'une manière générale, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque exploite l'effet photoélectrique pour produire un courant continu à partir du rayonnement solaire absorbé. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité grâce à un matériau semi-conducteur qui assure le transport des charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est constituée de deux types de matériaux semi-conducteurs : l'un présente un excès d'électrons (dopage de type n), l'autre un déficit d'électrons, c'est-à-dire un excès de trous (dopage de type p). Ces deux zones sont respectivement appelées couche n et couche p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à y incorporer d'autres atomes afin d'améliorer la conductivité électrique du matériau [7].

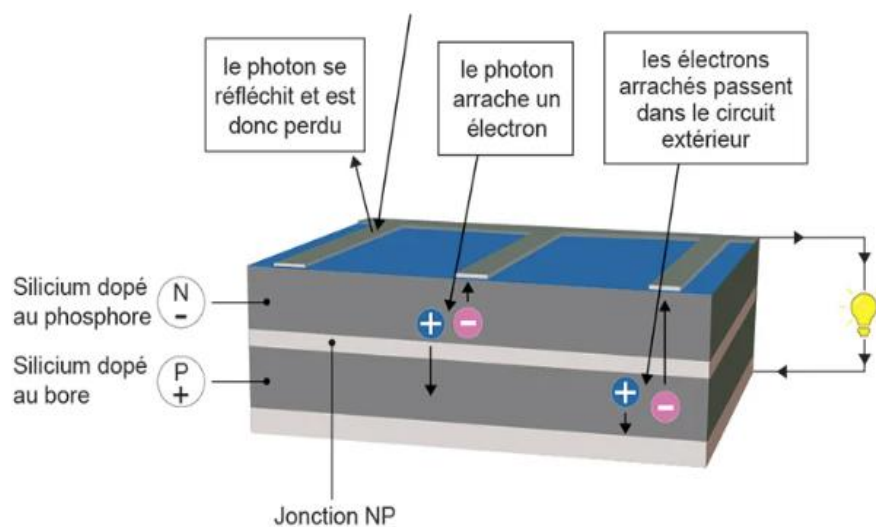


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

1.5 Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe quatre types principaux de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre.

Les principales technologies de cellules solaires photovoltaïques sont les suivantes [8]:

1.5.1 Cellule en silicium polycristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium polycristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium polycristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14% [9].

Les Panneaux poly-cristallins : Ils se reconnaissent par une couleur bleutée et non uniforme. Leur fabrication à partir de copeaux de silicium utilise toute la surface du panneau, il n'y a donc pas d'espaces d'assemblage comme dans les panneaux monocristallins [10].

Avantages :

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²)
- Longue durée de vie (environ 30 ans)
- Moins coûteux que le silicium monocristallin

Inconvénients :

- Rendement faible sous un éclaircissement réduit

1.5.2 Cellule en silicium monocristallin

Ces cellules, qui appartiennent à la première génération de cellules photovoltaïques [11], offrent un rendement exceptionnel de 12 à 16 % (23 % en laboratoire). Leur procédé de fabrication est complexe et énergivore, ce qui les rend particulièrement onéreuses. L'obtention d'un cristal pur nécessite en effet une quantité d'énergie importante.

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en un seul cristal de grande dimension, qui est ensuite découpé en fines tranches pour former les cellules. Celles-ci sont généralement d'un bleu uniforme.

Avantages :

- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²)

- Longue durée de vie (environ 30 ans)
- Inconvénients :
- Plus coûteux que le polycristallin
 - Rendement faible sous un faible éclairement

1.5.3 Cellule en silicium amorphe

Le silicium amorphe est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [10]. Les panneaux silicium amorphe ou couche mince : Apparus plus récemment, ces panneaux se reconnaissent par une couleur grise à marron foncé et uniforme avec un grain très fin. Cette uniformité est due à un procédé de fabrication de dépôt du silicium en couches minces [12].

Avantages :

- Fonctionnement possible sous un faible éclairement
- Faible coût par rapport aux autres types de cellules
- Moins sensible aux températures élevées ; souple

Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²) ; les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes performances que les cellules épaisses
- Durée de vie courte (environ 10 ans) ; les performances diminuent sensiblement avec le temps

1.5.4 Cellule nanocristalline

Les cellules nanocristallines constituent l'une des dernières avancées dans le domaine des photopiles. Leur principe de fonctionnement sépare les fonctions d'absorption de la

lumière et de séparation des charges électriques. Leur rendement global atteint 10,4 % selon des tests en laboratoire, et leur méthode de fabrication ainsi que leur coût restent encore réduits.

1.6 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Les performances d'une cellule photovoltaïque dépendent de plusieurs paramètres. Comme le montre la Figure 1.4, les propriétés électriques d'un panneau solaire présentent un comportement non linéaire. Ces caractéristiques sont notamment influencées par deux facteurs principaux : l'ensoleillement (éclairage) et la température [13].

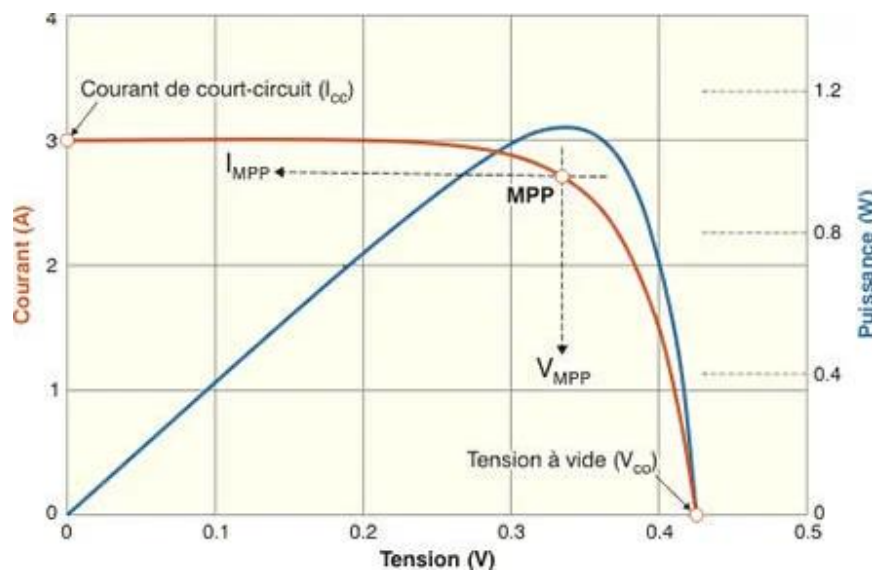


Figure 1.4 : Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque peut être divisée en trois zones distinctes. Dans la première zone (intervalle I), la cellule se comporte comme une source de courant : le courant reste relativement constant tandis que la tension varie. La deuxième zone (intervalle II) correspond à la région de coude de la courbe, située entre les deux intervalles adjacents ; c'est la zone de fonctionnement préférentielle, car le générateur peut y localiser le point de fonctionnement optimal correspondant à la puissance maximale. Enfin, dans la troisième zone (intervalle III), la cellule agit comme une source de tension : la tension demeure quasiment stable et le courant fluctue. Par ailleurs, d'autres grandeurs permettent également de décrire le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

1.6.1 Point de puissance maximale (PPM)

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I_{pv} - V_{pv}) et par une courbe tension-puissance (P_{pv} - V_{pv}). Trois grandeurs physiques définissent ces caractéristiques :

- La tension à vide : V_{co} (tension en circuit ouvert). Cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Le courant de court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Le Point de Puissance Maximal: PPM obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{ppm} , I_{ppm}) [14].

$$P_{ppm} = V_{ppm} * I_{ppm} \quad (1.2)$$

1.6.2 Facteur de remplissage (FF)

Le facteur de remplissage (Fill Factor, FF) constitue un indicateur essentiel pour évaluer les performances d'une cellule photovoltaïque ou d'un générateur photovoltaïque (GPV). Il représente le rapport entre la puissance maximale P_{PPM} que la cellule peut fournir et la puissance correspondant au produit du courant de court-circuit (I_{cc}) par la tension en circuit ouvert (V_{co}). Plus ce facteur est élevé, plus la puissance exploitable est importante [15]:

$$FF = \frac{P_{ppm}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (1.3)$$

1.6.3 Rendement énergétique

Le rendement de conversion est le paramètre le plus crucial pour une cellule solaire. Il traduit sa capacité à convertir efficacement l'énergie des photons incidents en électricité. Il se définit comme le rapport entre la puissance de sortie (P_{out}) et la puissance d'entrée (P_{in}), cette dernière correspondant à la puissance du rayonnement solaire incident :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{int}} = \frac{I_{cc} * V_{co} * FF}{P_{int}} \quad (1.4)$$

En pratique, le rendement global (rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie lumineuse reçue) varie généralement entre 10 et 17 %, selon le type de cellule utilisé.

D'autres facteurs peuvent influencer les performances du module photovoltaïque, notamment [16] :

- L'orientation du panneau : selon l'angle d'inclinaison (horizontal à 0° ou vertical à 90°). Lorsque le panneau est orienté face au ciel (soleil au zénith), les rayons solaires lui sont perpendiculaires, ce qui optimise la captation.
- L'ombrage : les cellules étant reliées en série, l'ombrage d'une seule unité entraîne une diminution significative de la puissance totale délivrée.

1.7 Association des cellules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent en dommage les cellules de façon permanente.

1.7.1 Montage en série

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à la tension du gap du semi-conducteur utilisé, c'est pour cela qu'on connecte plusieurs cellules en série afin d'augmenter la tension de sortie. Ces cellules sont traversées par le même courant et la tension du générateur est proportionnelle à leur nombre [17, 18].

En termes d'équations on aura :

$$\begin{cases} V_{CO_{ns}} = Ns V_{co} \\ ICC = ICCns \end{cases}$$

Avec

VCO_{ns} : Tension aux bornes de **Ns** cellules en série

Ns : Nombre de cellules en série

VCO : Tension aux bornes d'une seule cellule

ICC : Courant traversant une cellule

ICC_{ns} : Courant traversant **Ns** cellules en série

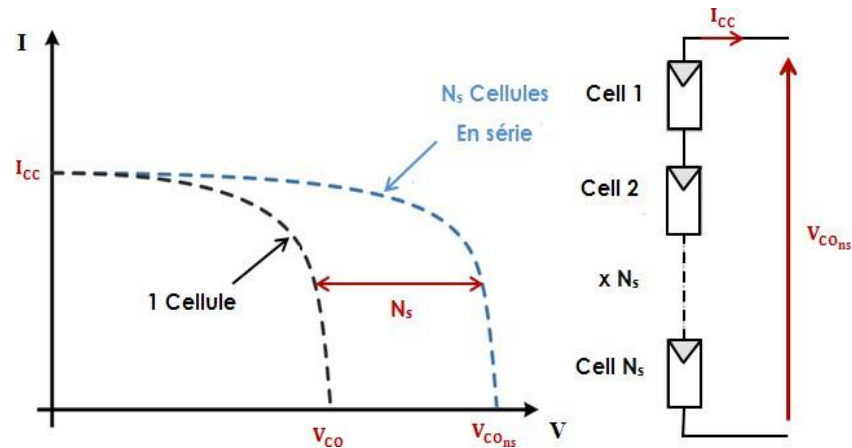


Figure 1.5 : Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série [18].

La caractéristique I-V représentée par la Figure (1.5) du groupement série est donc obtenue par addition des tensions à un courant donné.

1.7.2 Montage en parallèle

Pour l'association en parallèle, on doit vérifier que les tensions des photopiles sont identiques, et le courant obtenu représente le produit entre le courant de la cellule élémentaire et le nombre de ces cellules pour une tension qui reste la même [17, 18].

$$\begin{cases} ICC_{np} = N_p ICC \\ VOC_{np} = VOC \end{cases}$$

Avec

ICCnp : Courant traversant N_p cellules en parallèle

VOCnp : Tension aux bornes de N_p cellules en parallèle

N_p : Nombre de cellules en parallèle

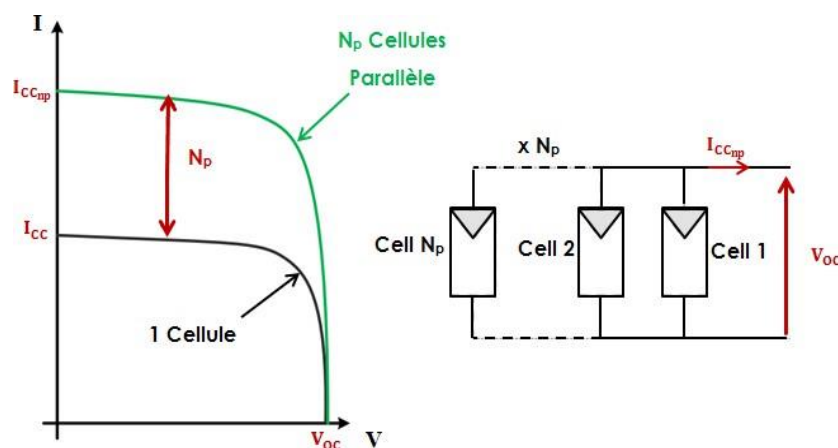


Figure 1.6 : Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle[18].

1.7.3 Association mixte (série-parallèle)

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïque en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent.

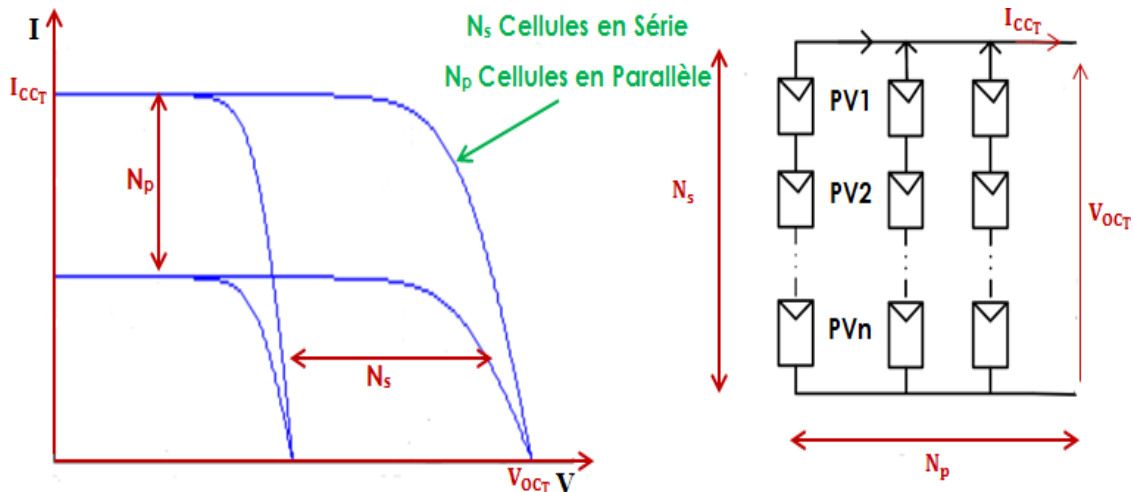


Figure 1.7 : Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique $I(V)$ [19].

La courbe de puissance d'un groupement série parallèle est analogue à celle d'un générateur photovoltaïque élémentaire tous les paramètres de celle-ci sont appliqués pour un générateur mixte, mais certaines conditions doivent être respectée [19, 20].

S'assuré que les cellules connectées en série ont le même courant de court-circuit. Il faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert **VOC**.

1.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

1.8.1 Les atouts (avantages)

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages :

- La production d'énergie photovoltaïque a été choisie en premier lieu pour sa nature non-polluante et renouvelable.
- Le montage de ces systèmes est simple et facile à adapter aux besoins énergétiques.
- Les couts de réalisation et d'installation sont minimales et les entretiens sont réduits.

- L'installation ne nécessite pas de grands investissements ni une haute expérience.
- Elle ne cause aussi aucune perturbation au niveau de troubles sonores au problème d'espace.

1.8.2 Les inconvénients (désavantages)

- La technologie photovoltaïque est la méthode de production énergétique la plus fiable pour les zones isolées.
- L'utilisation de la technologie photovoltaïque n'est pas aussi propagée que les énergies fossiles pour des raisons économiques.
- Les pays pauvres ou en cours d'évolution ne peuvent pas se permettre d'utiliser cette méthode.
- Lorsque l'énergie électrique doit être stockée sous forme chimique (batterie), cela augmente le coût du générateur.
- Il y a encore beaucoup de problèmes avec le stockage de l'énergie électrique.

1.9 L'effet de la variation des conditions climatiques sur les caractéristiques du générateur PV

1.9.1 Influence de la température

Lors du dimensionnement d'une installation photovoltaïque, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Un exemple de caractéristique ($IPV=f(VPV)$) pour une différente valeur de température est donnée par la Figure 1.8. On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte [21].

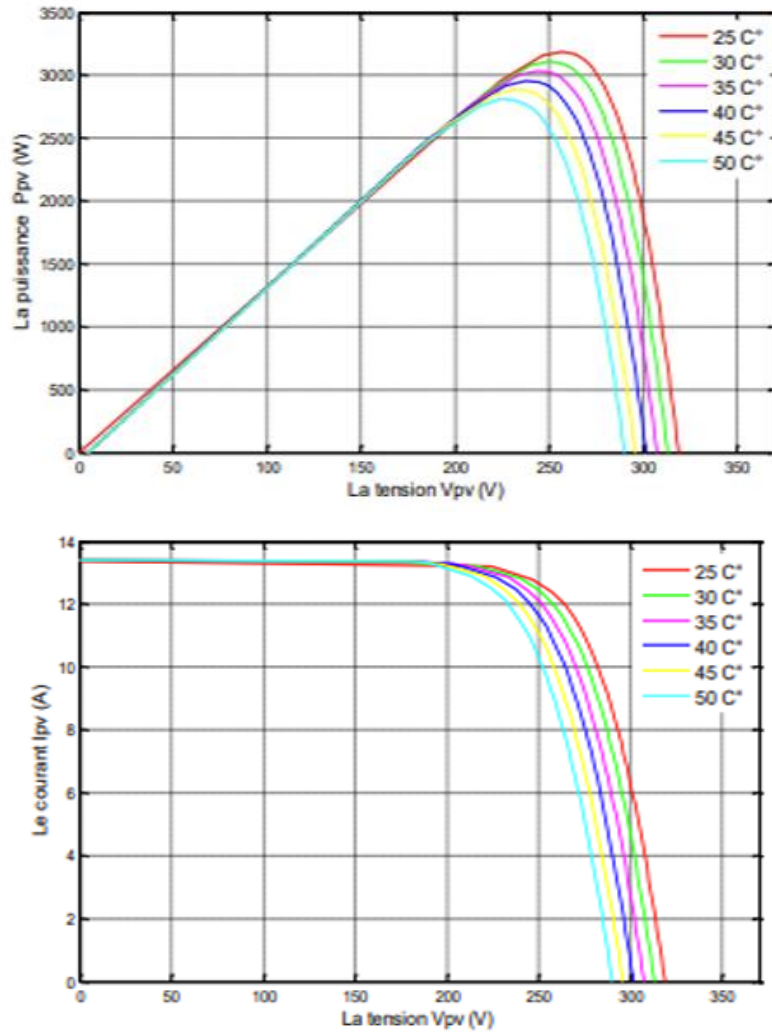


Figure 1.8 : Caractéristiques puissance-tension et courant-tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température en ensoleillement constant.

La température des cellules joue donc un rôle important dans les performances de l'installation photovoltaïque. Une bonne ventilation de la toiture photovoltaïque est donc essentielle afin de garantir une bonne qualité de l'installation.

1.9.2 Influence de l'ensoleillement (irradiance)

Un exemple de l'influence de l'ensoleillement sur la caractéristique ($I_{PV}=f(V_{PV})$) est donnée sur la Figure 1.9. On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement [22].

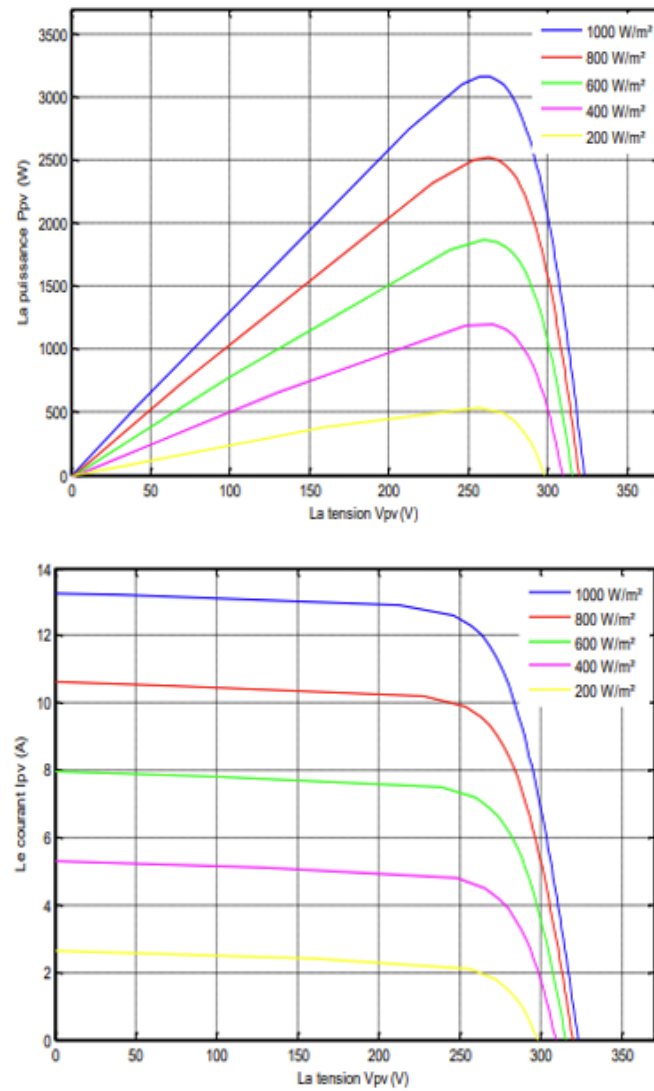


Figure 1.9 : Caractéristiques puissance-tension et courant-tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'ensoleillement constant.

Les caractéristiques des figures ci-dessous montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur la figure, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu [23].

1.10 Généralités sur les systèmes hybrides

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [23, 24].

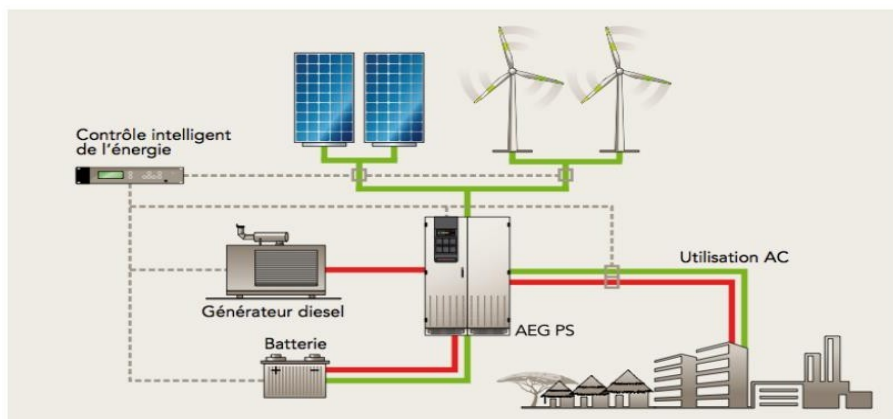


Figure 1.10 : Exemple d'un système PV hybride [23, 24].

La figure 1.10 représente un système hybride intelligent de gestion d'énergie où un générateur diesel, une batterie et un AEG PS (convertisseur électronique) sont couplés pour alimenter une charge en courant alternatif. Selon différents critères, ce système peut être classé comme hybride diesel-batterie (par type de sources), à couplage par bus continu ou alternatif via l'AEG PS (par architecture), à gestion centralisée ou décentralisée (par logique de contrôle), fonctionnant en îlotage ou en soutien au réseau (par mode d'exploitation), et piloté par un contrôleur intelligent qui optimise le rendement, la disponibilité et les émissions.

1.11 Classification des systèmes hybrides

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon différents critères,

Une généralisation des classifications les plus répandues [25] sont illustrée sur la Figure 1.11.

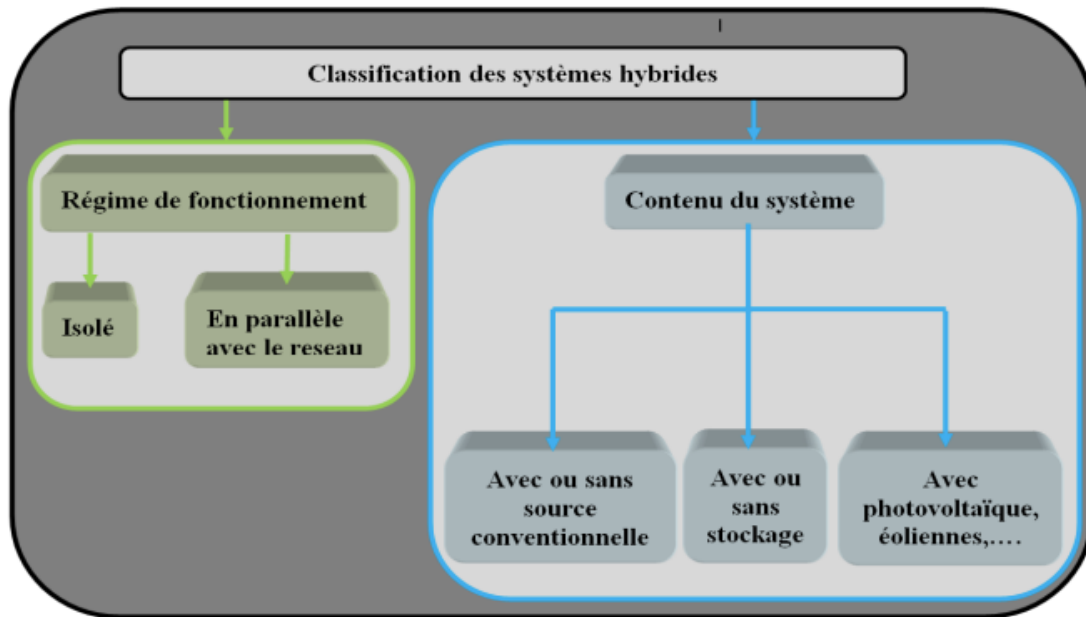


Figure 1.11 : Classification des systèmes hybrides.

1.12 Structure typique d'un système photovoltaïque

Structure typique d'un système photovoltaïque avec stockage par batterie

Le système qui fera l'objet de notre étude est un système hybride PV-Batterie à bus continu. Sa structure typique, décrite dans [Système solaire photovoltaïque (PV) avec stockage (Batterie)].

1. Générateur Photovoltaïque (GPV) : Produit du courant continu à partir du rayonnement solaire.
2. Convertisseur DC/DC avec MPPT : Adapte la tension variable du GPV à la tension du bus continu et du parc de batteries. Il intègre l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire en permanence le maximum de puissance du GPV
3. Parc de Batteries : Élément de stockage électrochimique. Il sert de "réservoir" d'énergie pour alimenter la charge lorsque la production PV est insuffisante (nuit, faible ensoleillement).
4. Convertisseur DC/AC (Onduleur) : Transforme la tension continue du bus en tension alternative (généralement 230V/50Hz) pour alimenter les charges domestiques ou industrielles standards.

5. Charge (Consommateurs) : Représente l'ensemble des appareils électriques alimentés par le système.
6. Système de Gestion de l'Énergie (SGE) : C'est le "cerveau" du système. Il supervise les flux de puissance en contrôlant les interrupteurs et les convertisseurs en fonction de l'état de charge (SOC) des batteries, de la puissance PV disponible et de la demande de la charge. Il assure la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes

1.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux de la cellule photovoltaïque : son modèle mathématique, son schéma électrique équivalent ainsi que les différentes technologies existantes. Nous avons également décrit les composants d'un système photovoltaïque, en mettant l'accent sur le module photovoltaïque et ses performances, sans oublier ses avantages et ses limites.

L'énergie solaire se révèle être une source propre, accessible, abondante et inépuisable, offrant de réelles perspectives de développement. Nous avons ensuite analysé les différents types de systèmes hybrides, leurs modes de couplage, ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs.

De nombreux pays, en particulier les nations développées, encouragent aujourd'hui l'adoption massive de l'énergie solaire dans les secteurs industriels, agricoles et résidentiels.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la technique MPPT, une méthode essentielle pour le contrôle des systèmes photovoltaïques, ainsi que les convertisseurs associés.

Chapitre 2 : Les convertisseurs DC/DC

2.1 Introduction

Dans un système photovoltaïque, le générateur PV délivre une tension continue qui varie significativement en fonction des conditions d'ensoleillement, de la température et du point de fonctionnement sur sa caractéristique I-V. Or, la charge à alimenter (qu'il s'agisse d'un bus DC régulé, d'une batterie, ou d'un onduleur) requiert généralement une tension stable et de valeur spécifiée [26, 27].

Le raccordement direct du générateur PV à la charge — sans étage d'adaptation — conduirait à un point de fonctionnement déterminé par l'intersection de la caractéristique I-V du générateur et de la caractéristique I-V de la charge. Ce point de fonctionnement n'a aucune raison de coïncider avec le point de puissance maximale (MPP) du générateur, sauf coïncidence fortuite et temporaire. Il en résulte une perte d'énergie considérable, pouvant atteindre 20 % à 40 % de l'énergie disponible selon les conditions.

Le convertisseur DC/DC remplit précisément cette fonction d'adaptation : intercalé entre le générateur PV et la charge, il modifie les niveaux de tension et de courant de manière à ajuster le point de fonctionnement du générateur, tout en fournissant à la charge une tension régulée [26, 28].

2.2 Le convertisseur DC/DC comme transformateur d'impédance

La fonction fondamentale du convertisseur DC/DC peut être comprise en termes d'adaptation d'impédance [26, 27]. Considérons un convertisseur idéal (sans pertes) connecté entre une source de tension V_e et une charge de résistance R_{charge} . La conservation de la puissance impose :

$$P_{in} = P_{out} \quad (1)$$

$$V_e \cdot I_e = V_s \cdot I_s \quad (2)$$

Pour un convertisseur abaisseur (Buck) où la relation de conversion est $V_s = \alpha \cdot V_e$, la puissance absorbée par la charge est :

$$P_{out} = \frac{V_s^2}{R_{charge}} = \frac{(\alpha V_e)^2}{R_{charge}} \quad (3)$$

La résistance apparente vue par la source, appelée résistance d'entrée ou impédance réfléchie, est donc :

$$R_{in} = \frac{V_e}{I_e} = \frac{V_e^2}{P_{in}} = \frac{V_e^2}{P_{out}} = \frac{V_e^2}{\left(\frac{(\alpha V_e)^2}{R_{charge}}\right)} \quad (4)$$

$$R_{in} = \frac{R_{charge}}{\alpha^2} \quad (5)$$

Cette relation montre que le convertisseur Buck « réfléchit » l'impédance de charge côté source avec un facteur multiplicatif de $\frac{1}{\alpha^2}$. Puisque $0 < \alpha < 1$, on a $R_{in} > R_{charge}$: le convertisseur Buck fait apparaître une résistance plus élevée que la charge réelle.

Pour le convertisseur élévateur (Boost), avec $V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)}$, un calcul analogue donne [26, 27] : $R_{in} = R_{charge} \cdot (1 - \alpha)^2$.

Puisque $0 < \alpha < 1$, on a $R_{in} < R_{charge}$: le convertisseur Boost fait apparaître une résistance plus faible que la charge réelle.

Ainsi, en faisant varier le rapport cyclique α entre 0 et 1, le convertisseur DC/DC permet de balayer une large plage d'impédance d'entrée, ce qui permet de « déplacer » le point de fonctionnement du générateur PV sur sa caractéristique I-V et de le positionner précisément au MPP [29].

• Principe de la Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM)

La commande du rapport cyclique des convertisseurs DC/DC est réalisée par modulation de largeur d'impulsion (PWM — Pulse Width Modulation) [26, 28, 30]. Le principe est le suivant :

- Une onde porteuse périodique (généralement en dent de scie ou triangulaire) de fréquence fixe f_{sw} est générée.
- Cette porteuse est comparée à un signal de commande continu (modulante) $V_{control}$.
- Lorsque $V_{control}$ dépasse la porteuse, l'interrupteur de puissance est commandé à l'état passant (ON) ; dans le cas contraire, il est bloqué (OFF).

Le rapport cyclique instantané est défini comme :

$$\alpha = \frac{t_{ON}}{T_{sw}} \quad (6)$$

où t_{ON} est la durée de l'état passant et $T_{sw} = \frac{1}{f_{sw}}$ la période de commutation.

Le rapport cyclique maximum est limité par le temps de commutation minimum des interrupteurs de puissance, typiquement $\alpha_{max} \approx 0,90$ à $0,95$ pour les fréquences usuelles.

La fréquence de commutation est un paramètre de conception critique : une fréquence élevée permet de réduire la taille des composants passifs (L, C) et d'améliorer la réponse dynamique, mais augmente les pertes par commutation. Les convertisseurs de notre étude fonctionnent à $f_{sw} = 20$ kHz, un compromis acceptable pour des puissances de l'ordre du kW [26, 27].

- **Conduction continue et conduction discontinue**

Avant d'aborder l'étude détaillée des convertisseurs, il est essentiel d'introduire la distinction entre les deux modes de conduction possibles [26, 30] :

- **Conduction continue (CCM — *Continuous Conduction Mode*)** : Le courant dans l'inductance ne s'annule jamais durant un cycle de commutation. L'énergie stockée dans L n'est jamais intégralement transférée. Ce mode est préféré pour la plupart des applications car il offre de meilleures performances dynamiques et un rendement supérieur. Les relations tension d'entrée-sortie sont indépendantes de la charge.
- **Conduction discontinue (DCM — *Discontinuous Conduction Mode*)** : Le courant dans l'inductance s'annule pendant une partie du cycle. Ce mode apparaît lorsque la charge est faible ou que l'inductance est insuffisante. Les relations tension d'entrée-sortie deviennent dépendantes de la charge, et la dynamique du système s'en trouve modifiée.

Dans notre étude, les convertisseurs seront dimensionnés pour fonctionner en CCM dans les conditions nominales de fonctionnement, condition garantie par un choix approprié des inductances selon le critère [26, 27] : $L > L_{critique} = R_{charge} \cdot \frac{(1 - \alpha)^2}{(2 \cdot f_{sw})}$ pour le Boost

$L > L_{critique} = R_{charge} \cdot \frac{(1 - \alpha)}{(2 \cdot f_{sw})}$ pour le Buck.

2.3 Types de convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC peuvent être classés en deux grandes familles selon la relation entre la tension de sortie et la tension d'entrée [26-28] :

2.3.1 Convertisseur abaisseur (Buck)

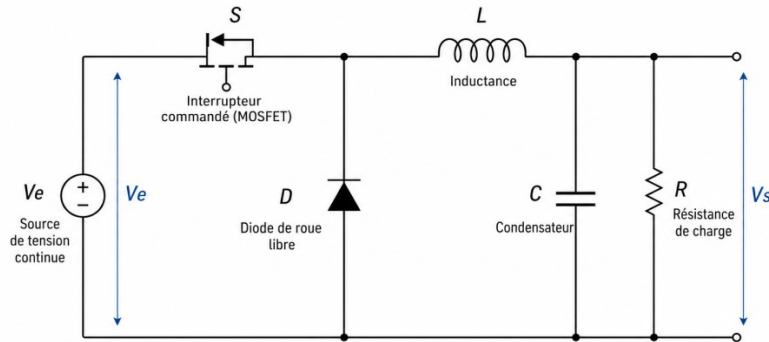


Figure 2.1 : Convertisseur abaisseur (Buck).

Le convertisseur Buck fournit une tension de sortie V_s inférieure ou égale à la tension d'entrée V_e . La relation de conversion en régime permanent CCM est [26, 27] :

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad (7)$$

avec $0 < \alpha < 1$.

Le convertisseur Buck est constitué d'un interrupteur commandé (MOSFET ou IGBT), d'une diode, d'une inductance L et d'un condensateur C . L'inductance assure le lissage du courant, et le condensateur réduit l'ondulation de la tension de sortie.

2.3.2 Convertisseur élévateur (Boost)

Le convertisseur Boost fournit une tension de sortie V_s supérieure ou égale à la tension d'entrée V_e . La relation de conversion en CCM est [26, 27] :

$$V_s = \frac{V_e}{(1 - \alpha)} \quad (8)$$

Pour α proche de 1, le gain en tension peut théoriquement devenir très grand. En pratique, les pertes résistives et les limitations des composants imposent un gain maximal de l'ordre de 4 à 6.

C'est la topologie retenue dans notre système pour élever la tension du générateur PV ($V_{mp} \approx 92 \text{ V}$) vers le bus DC (150 V), nécessitant un rapport cyclique de :

$$\alpha = (1 - V_e) / V_s = (1 - 92) / 150 \approx 0,387.$$

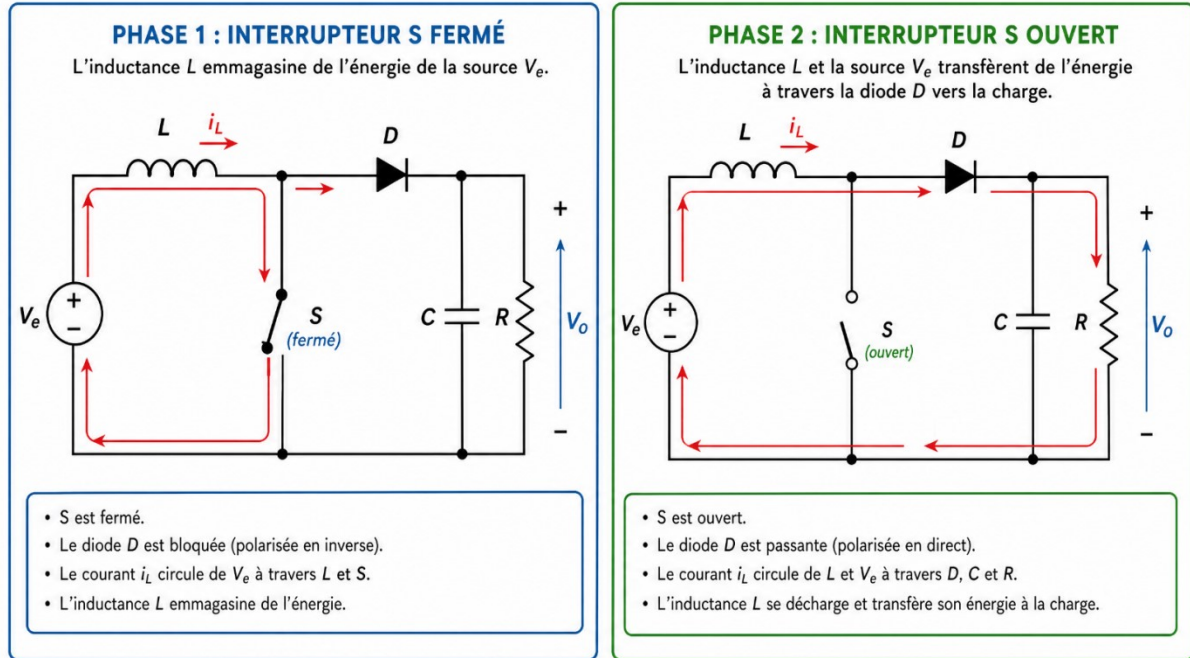


Figure 2.2 : Convertisseur élévateur (Boost).

2.3.3 Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)

Le convertisseur Buck-Boost combine les deux fonctions, la tension de sortie pouvant être inférieure ou supérieure à la tension d'entrée, avec une inversion de polarité [27] :

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

L'inversion de polarité (tension de sortie négative) est un inconvénient pour de nombreuses applications.

2.3.4 Convertisseur Ćuk

Le convertisseur Ćuk, basé sur le principe du transfert capacitif d'énergie, présente l'avantage d'un courant d'entrée et d'un courant de sortie continus [30] :

$$V_s = \frac{-V_e \cdot \alpha}{(1 - \alpha)} \quad (10)$$

avec une ondulation de courant réduite, ce qui minimise les interférences électromagnétiques.

2.3.5 Convertisseur SEPIC

Le convertisseur SEPIC (*Single Ended Primary Inductor Converter*) permet une tension de sortie supérieure ou inférieure à la tension d'entrée sans inversion de polarité [30] :

$$V_s = \frac{V_e \cdot \alpha}{(1 - \alpha)} \quad (11)$$

Son principal avantage pour les applications photovoltaïques est la capacité d'opérer avec une tension d'entrée fluctuant autour de la tension de sortie souhaitée.

Tableau 2.1 : Comparaison des topologies de convertisseurs DC-DC non isolés.

Topologie	V_s / V_e	Courant entrée	Courant sortie	Complexité	Rendement
Buck	α	Discontinu	Continu	Faible	$\geq 95 \%$
Boost	$1/(1-\alpha)$	Continu	Discontinu	Faible	$\geq 95 \%$
Buck-Boost	$-\alpha/(1-\alpha)$	Discontinu	Discontinu	Moyenne	$\geq 90 \%$
Cuk	$-\alpha/(1-\alpha)$	Continu	Continu	Élevée	$\geq 90 \%$
SEPIC	$\alpha/(1-\alpha)$	Continu	Discontinu	Élevée	$\geq 92 \%$

Pour notre application, le convertisseur Boost est le choix optimal car il répond simultanément à deux exigences : élever la tension PV au niveau du bus DC (150 V) et offrir une impédance d'entrée variable permettant d'ajuster le point de fonctionnement du générateur PV pour le MPPT [26, 29].

2.4 Raccordement direct source-charge

2.4.1 Diagramme synoptique du système photovoltaïque

Le système étudié dans ce mémoire suit une architecture de couplage DC, dont le diagramme synoptique fonctionnel est présenté ci-dessous [26, 27, 29] :

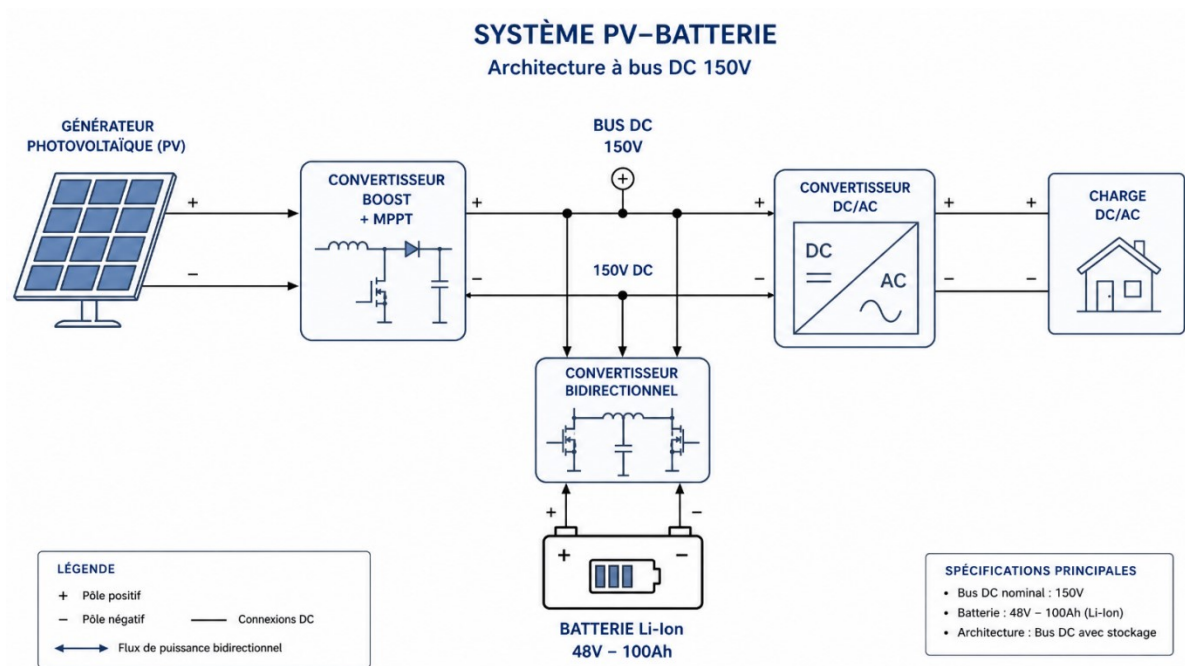


Figure 2.3 : Diagramme synoptique du système photovoltaïque.

Chaque bloc remplit une fonction spécifique [27 ,29] :

1. **Générateur PV** : Source d'énergie primaire, dont la caractéristique I-V est gouvernée par l'ensoleillement $G(t)$ et la température $T(t)$.
2. **Convertisseur Boost avec MPPT** : Adapte la tension PV au bus DC tout en assurant la poursuite du point de puissance maximale. Le MPPT calcule la tension de référence V_{ref} qui maximise la puissance, et le régulateur de tension ajuste le rapport cyclique α du Boost en conséquence.
3. **Bus DC** : Nœud capacitif ($C_{bus} = 2200 \mu F$) maintenant une tension régulée $V_{bus} = 150$ V, servant d'interface commune entre production, stockage et consommation.
4. **Convertisseur bidirectionnel** : Permet le transfert bidirectionnel de puissance entre le bus DC et la batterie. En mode charge, il fonctionne en Buck (abaisseur) ; en mode décharge, il fonctionne en Boost (élevateur).
5. **Batterie** : Stockage électrochimique Li-ion LFP, 48 V nominal, capacité 100 Ah, assurant l'équilibre énergétique du système.
6. **Système de contrôle** : Orchestre l'ensemble via des correcteurs PI :
 - Régulateur de tension du bus DC ;

- Régulateur de courant batterie;
- Régulateur de SOC.

2.4.2 Configurations des convertisseurs DC/DC

2.4.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck) : Modèle mathématique équivalent

Topologie et composants

Le convertisseur Buck comprend [26, 27] :

- Un interrupteur commandé S (MOSFET à canal N)
- Une diode de roue libre D (Schottky rapide)
- Une inductance de filtrage L
- Un condensateur de filtrage C
- Une charge résistive R (représentant l'équivalent du circuit aval)

Analyse des phases de fonctionnement en CCM

Le cycle de commutation se décompose en deux phases distinctes :

Phase 1 — Interrupteur passant ($0 \leq t < \alpha \cdot T_{sw}$)

L'interrupteur S est fermé, la diode D est bloquée (polarisée en inverse). Le circuit équivalent est constitué de V_e en série avec L, le condensateur C et la résistance R en parallèle.

La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = V_e - V_s \quad (12)$$

Le courant dans l'inductance croît linéairement :

$$L \frac{di}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (13)$$

L'ondulation de courant crête-à-crête pendant cette phase est :

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_e - V_s}{L} \cdot \alpha \cdot T_{sw} \quad (14)$$

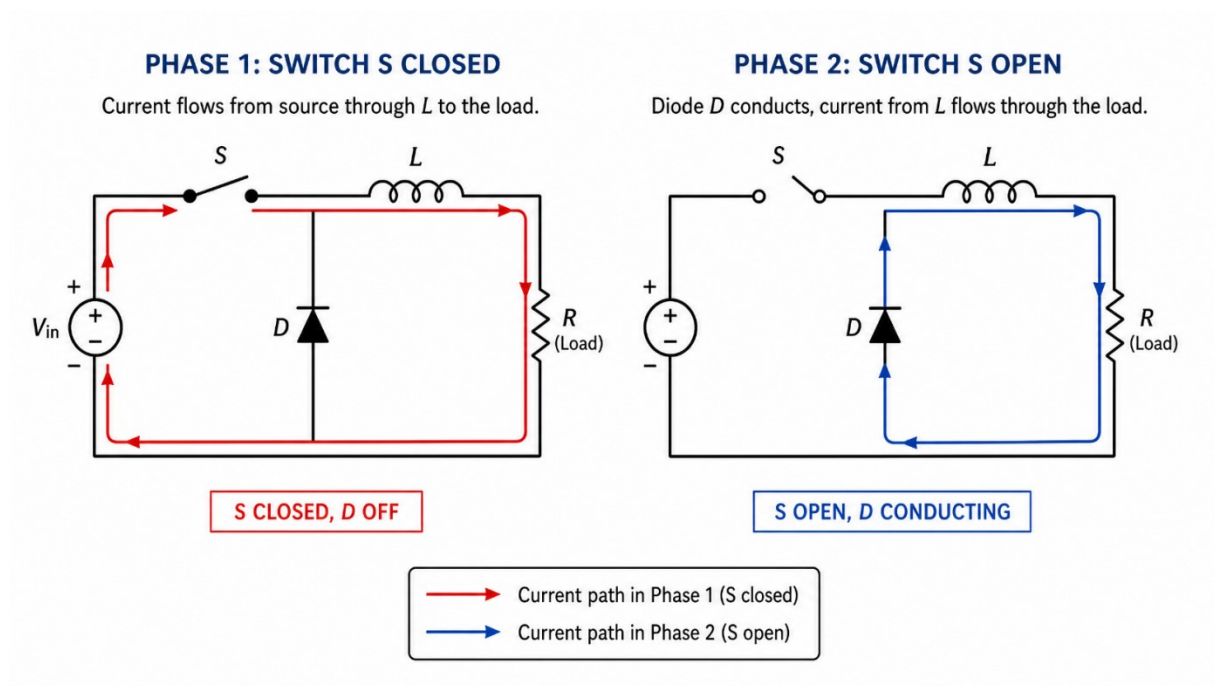


Figure 2.4 : Schéma de principe d'un convertisseur buck (hacheur série) – Phases de conduction avec S fermé et S ouvert.

Phase 2 — Interrupteur bloqué ($\alpha \cdot T_{sw} \leq t < T_{sw}$)

L'interrupteur S est ouvert. La diode D entre en conduction pour assurer la continuité du courant dans L (diode de roue libre). La tension aux bornes de l'inductance est :

$$V_L = -V_s \quad (15)$$

Le courant dans l'inductance décroît :

$$L \frac{di}{dt} = \frac{-V_s}{L} \quad (16)$$

L'ondulation de courant pendant cette phase est :

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{-V_s}{L} \right) \cdot (1 - \alpha) \cdot T_{sw} \quad (17)$$

Équilibre Volt-Seconde et tension de sortie

En régime permanent, la variation nette du courant dans l'inductance sur un cycle complet est nulle (principe de l'équilibre Volt-Seconde) :

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (18)$$

En substituant les expressions des ondulations :

$$[(V_e - V_s) \cdot \alpha - V_s \cdot (1 - \alpha)] \cdot \left(\frac{T_{sw}}{L}\right) = 0 \quad (19)$$

Ce qui conduit à la relation fondamentale du convertisseur Buck en CCM :

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad (20)$$

Ondulations

L'ondulation du courant dans l'inductance est donnée par [26, 27] :

$$\Delta I_L = \frac{V_e \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)}{f_{sw} \cdot L} \quad (21)$$

L'ondulation crête-à-crête est maximale pour $\alpha = 0,5$:

$$\Delta I_{L,max} = \frac{V_e}{4 \cdot f_{sw} \cdot L} \quad (22)$$

L'ondulation de la tension de sortie est principalement due à la charge et décharge du condensateur par la composante alternative du courant de l'inductance [27] :

$$\Delta V_s = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_{sw} \cdot C} = \frac{V_e \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)}{8 \cdot f_{sw}^2 \cdot L \cdot C} \quad (23)$$

Dimensionnement

Les valeurs minimales de L et C assurant le fonctionnement en CCM et une ondulation acceptable sont [26, 30] :

$$L_{min} = \frac{R_{charge} \cdot (1 - \alpha)}{2 \cdot f_{sw}} \quad (24)$$

$$C_{min} = \frac{(1 - \alpha)}{8 \cdot L \cdot f_{sw}^2 \cdot \left(\frac{\Delta V_s}{V_s}\right)} \quad (25)$$

où $\frac{\Delta V_s}{V_s}$ est l'ondulation relative de tension tolérée (typiquement 1 à 5 %).

Fonction de transfert

Le modèle dynamique petits signaux du convertisseur Buck, obtenu par linéarisation autour d'un point de fonctionnement, conduit à la fonction de transfert « rapport cyclique → tension de sortie » [26, 27] :

$$\frac{\hat{v}_s(s)}{\hat{\alpha}_s(s)} = \frac{V_e}{1 + \frac{L}{R}s + LCs^2} \quad (26)$$

Cette fonction de transfert du second ordre présente deux pôles complexes conjugués dont la fréquence propre est :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (27)$$

et le facteur d'amortissement :

$$\zeta = \frac{1}{2R} \cdot \sqrt{LC} \quad (28)$$

L'absence de zéro dans le demi-plan droit (contrairement au Boost) rend le Buck plus facile à stabiliser.

2.4.2.2 Convertisseur survolteur (Boost) : Modèle mathématique équivalent

Topologie et composants

Le convertisseur Boost, topologie centrale de notre système côté PV, est constitué de [26, 27, 30] :

- Une inductance L en série avec l'entrée
- Un interrupteur commandé S connecté entre l'inductance et la masse
- Une diode D entre l'inductance et la sortie
- Un condensateur C en parallèle avec la charge

La position de l'inductance côté entrée confère au Boost sa propriété de courant d'entrée continu (faible ondulation), avantageuse pour la connexion à un générateur PV.

Analyse des phases de fonctionnement en CCM

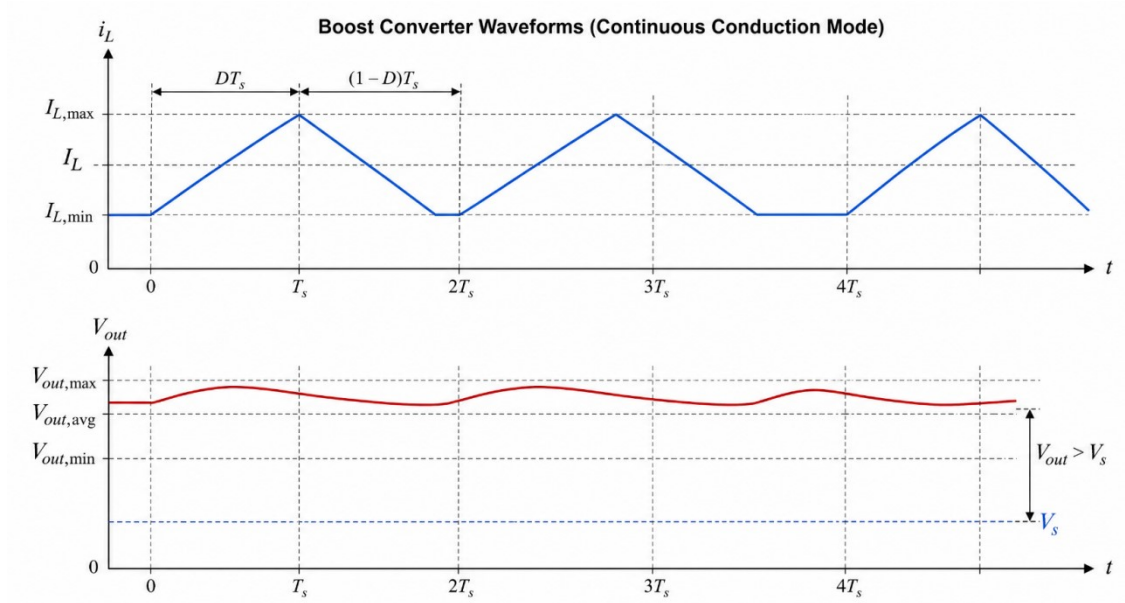


Figure 2.5 : Formes d'onde d'un convertisseur Boost en conduction continue (CCM).

Phase 1 — Interrupteur passant ($0 \leq t < \alpha \cdot T_{sw}$)

L'interrupteur S est fermé, la diode D est bloquée (l'anode est à la masse, la cathode à $V_s > 0$). L'inductance L est soumise à la tension d'entrée :

$$V_L = V_e \quad (29)$$

Le courant dans L croît linéairement :

$$L \frac{di}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad (30)$$

L'énergie magnétique s'accumule dans l'inductance. Le condensateur C, isolé de la source par la diode bloquée, alimente seul la charge.

Phase 2 — Interrupteur bloqué ($\alpha \cdot T_{sw} \leq t < T_{sw}$)

L'interrupteur S est ouvert. Pour assurer la continuité du courant inductif, la diode D entre en conduction. La tension aux bornes de L devient :

$$V_L = V_e - V_s \quad (31)$$

Le courant dans L décroît (car $V_s > V_e$ en mode Boost) :

$$L \frac{di}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (32)$$

L'énergie accumulée dans L est transférée vers le condensateur et la charge.

Équilibre Volt-Second

La tension moyenne aux bornes de l'inductance sur un cycle complet est nulle en régime permanent [26] :

$$V_L = \alpha \cdot V_e + (1 - \alpha) \cdot (V_e - V_s) = 0 \quad (33)$$

$$V_e - (1 - \alpha) \cdot V_s = 0 \quad (34)$$

Ce qui donne la relation fondamentale du Boost en CCM :

$$V_s = \frac{V_e}{(1 - \alpha)} \quad (35)$$

Ondulations

Ondulation du courant d'entrée (inductance) [27] :

$$\Delta I_L = \frac{V_e \cdot \alpha}{f_{sw} \cdot L} \quad (36)$$

Ondulation de la tension de sortie [27] :

$$\Delta V_s = \frac{V_s \cdot \alpha}{f_{sw} \cdot R \cdot C} = \frac{I_s \cdot \alpha}{f_{sw} \cdot C} \quad (37)$$

Dimensionnement

Inductance minimale pour le CCM [26, 30] :

$$L_{min} = \frac{R_{charge} \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)^2}{2 \cdot f_{sw}} \quad (38)$$

Condensateur minimal pour une ondulation relative $\frac{\Delta V_s}{V_s}$ donnée [27] :

$$C_{min} = \frac{\alpha}{f_{sw} \cdot R_{charge} \cdot \left(\frac{\Delta V_s}{V_s}\right)} \quad (39)$$

Pour notre système, avec $V_e = 92$ V, $V_s = 150$ V, $\alpha = 0,387$, $f_{sw} = 20$ kHz, et une charge nominale correspondant à $P_{nom} = 750$ W ($R_{charge} = V_s^2 / P = 150^2 / 750 = 30 \Omega$) :

$L_{min} \approx 5$ mH (valeur retenue pour notre simulation) $C_{min} \approx 470$ μ F (valeur retenue).

Fonction de transfert et problème du zéro dans le demi-plan droit

Le modèle dynamique petits signaux du Boost est plus complexe que celui du Buck en raison de la présence d'un zéro dans le demi-plan droit (RHPZ — Right Half Plane Zero) [26, 27, 30] :

$$\frac{\hat{v}_s(s)}{\hat{a}_s(s)} = \frac{V_e}{(1-\alpha)^2} = \frac{1 - \frac{L}{R(1-\alpha)^2}s}{1 + \frac{L}{R(1-\alpha)^2}s + \frac{LC}{(1-\alpha)^2}s^2} \quad (40)$$

Le numérateur contient un terme « $1 - s/\omega_z$ », avec le zéro dans le demi-plan droit à la pulsation :

$$\omega_z = \frac{R \cdot (1-\alpha)^2}{L} \quad (41)$$

La présence de ce RHPZ introduit un déphasage supplémentaire de -90° tout en augmentant le gain, ce qui rend la stabilisation du Boost plus délicate que celle du Buck. La bande passante de la boucle fermée doit être limitée à environ $\omega_z / 3$ pour garantir une marge de phase suffisante [26, 27].

Rendement

Le rendement d'un convertisseur Boost réel est inférieur à 100 % en raison des pertes [27, 30] :

- **Pertes par conduction** : résistances à l'état passant de l'interrupteur ($R_{ds(on)}$ du MOSFET) et de la diode (V_f), résistance série de l'inductance (DCR — DC Résistance)
- **Pertes par commutation** : énergie dissipée à chaque transition (ON→OFF, OFF→ON) de l'interrupteur, proportionnelles à la fréquence de commutation
- **Pertes magnétiques** : pertes dans le noyau de l'inductance (hystérésis, courants de Foucault)

Le rendement d'un Boost bien conçu se situe typiquement entre 92 % et 97 % à pleine charge [27, 29].

2.5 La technique de poursuite du point de puissance maximale (MPPT)

2.5.1 Principe fondamental et justification

La caractéristique puissance-tension P-V d'un générateur photovoltaïque présente un maximum unique, le point de puissance maximale (MPP), dont la position varie en fonction de l'ensoleillement G et de la température T [29, 31]. Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique d'optimisation temps réel qui ajuste automatiquement le point de fonctionnement électrique du générateur PV pour qu'il coïncide en permanence avec le MPP, quelles que soient les variations des conditions climatiques [31, 32].

Le principe repose sur la condition mathématique nécessaire d'optimalité [32] :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{au MPP} \quad (42)$$

En développant la dérivée du produit $P = V \cdot I$:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (43)$$

Cette équation fournit le critère fondamental :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V} \quad \text{au MPP} \quad (44)$$

Trois situations sont possibles :

- $\frac{dP}{dV} > 0$: le point de fonctionnement est à gauche du MPP ($V < V_{mp}$) — il faut augmenter V
- $\frac{dP}{dV} < 0$: le point de fonctionnement est à droite du MPP ($V > V_{mp}$) — il faut diminuer V
- $\frac{dP}{dV} = 0$: le MPP est atteint — maintenir le point de fonctionnement.

La mise en œuvre pratique du MPPT consiste à ajuster le rapport cyclique α du convertisseur DC/DC, ce qui modifie l'impédance d'entrée vue par le générateur PV, et donc le point (V, I) de fonctionnement sur la caractéristique I-V [29, 31].

2.5.2 Efficacité du MPPT

L'efficacité d'un algorithme MPPT est évaluée selon plusieurs critères [31-33] :

- a) Rendement de poursuite (Tracking Efficiency) :** défini comme le rapport entre l'énergie effectivement extraite sur une période et l'énergie maximale théoriquement extractible : $\eta_{\text{MPPT}} = (\int_0^T P_{\text{réel}}(t) dt) / (\int_0^T P_{\text{max}}(t) dt) \times 100 \%$

Un bon algorithme MPPT doit atteindre $\eta_{\text{MPPT}} > 98 \%$ en régime permanent.

- b) Rapidité de convergence :** temps nécessaire pour atteindre le MPP à partir d'un point de fonctionnement arbitraire, ou pour retrouver le MPP après un changement des conditions climatiques.
- c) Amplitude des oscillations en régime permanent :** les algorithmes basés sur une perturbation périodique (P&O) génèrent intrinsèquement des oscillations autour du MPP. L'amplitude de ces oscillations doit être minimisée (typiquement $< 2 \%$ de P_{max}) par un choix judicieux du pas de perturbation.
- d) Robustesse :** capacité à fonctionner correctement sous des variations rapides de l'ensoleillement (passages nuageux) sans divergence.

2.5.3 Algorithme Perturb & Observe (P&O)

Principe de fonctionnement

L'algorithme Perturb & Observe (Perturbation et Observation) est le plus répandu en raison de sa simplicité conceptuelle et de sa facilité d'implémentation [30-32].

Le principe est le suivant : 1. Mesurer la tension $V(k)$ et le courant $I(k)$ du générateur PV à l'instant k . 2. Calculer la puissance $P(k) = V(k) \cdot I(k)$. 3. Perturber la tension de fonctionnement d'un petit incrément ΔV : $V(k+1) = V(k) \pm \Delta V$. 4. Mesurer la nouvelle puissance $P(k+1) = V(k+1) \cdot I(k+1)$. 5. Comparer $P(k+1)$ et $P(k)$: - Si $P(k+1) > P(k)$ (la puissance a augmenté) : la perturbation était dans la bonne direction. Continuer dans cette direction pour la prochaine itération. - Si $P(k+1) < P(k)$ (la puissance a diminué) : la perturbation était dans la mauvaise direction. Inverser la direction pour la prochaine itération.

Organigramme de l'algorithme P&O

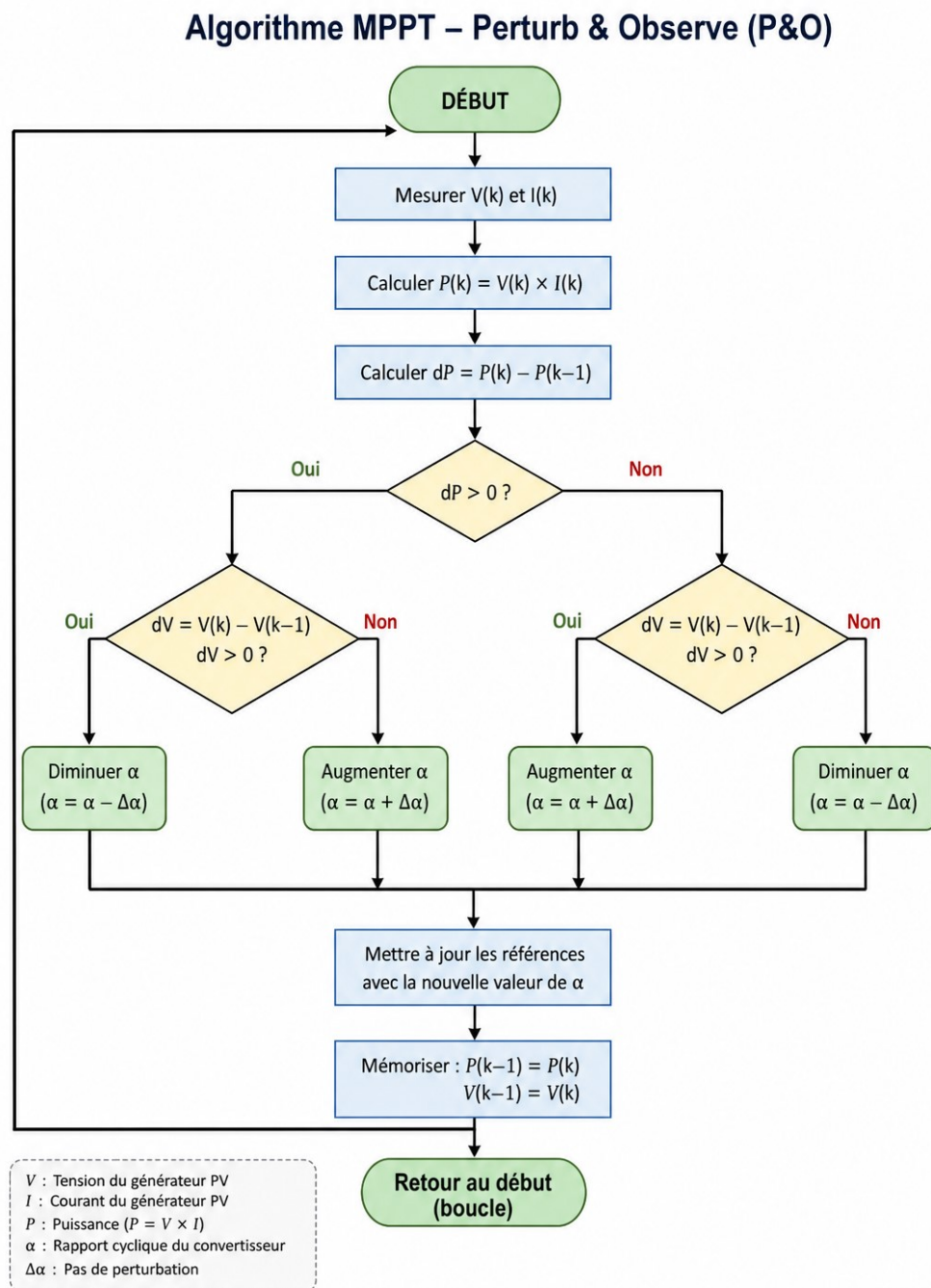


Figure 2.6 : Organigramme de l'algorithme MPPT par perturbation et observation (P&O).

Avantages du P&O :

Simplicité d'implémentation (quelques lignes de code) - Faible coût calculatoire - Indépendance vis-à-vis des paramètres du générateur PV [29, 31].

Inconvénients du P&O

Oscillations permanentes autour du MPP (compromis vitesse-précision pour le choix de ΔV) - Risque de divergence sous variations rapides de l'ensoleillement (le P&O peut interpréter une variation de puissance due à un changement d'irradiance comme une conséquence de sa perturbation) - Performances dégradées sous faible ensoleillement (faible rapport signal/bruit) [29, 32].

Choix du pas de perturbation ΔV :

Le choix de ΔV résulte d'un compromis : Un grand ΔV améliore la vitesse de convergence mais augmente les oscillations en régime permanent (perte d'énergie) - Un petit ΔV réduit les oscillations mais ralentit la réponse dynamique

Une approche adaptative (ΔV variable) peut offrir le meilleur des deux mondes : grand ΔV lors des transitoires, petit ΔV près du MPP [29, 31].

2.5.4 Algorithme d'Incrémentation de Conductance (IncCond)

Principe de fonctionnement

L'algorithme d'Incrémentation de Conductance (IncCond) surmonte certaines limitations du P&O en exploitant la dérivée de la puissance pour déterminer la direction de la perturbation [29, 31-33].

La condition d'optimalité au MPP est : $\frac{dP}{dV} = 0$.

En exprimant $P = V \cdot I$:

$$\frac{d(V.I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (45)$$

Soit au MPP :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V} \quad (46)$$

Organigramme de l'algorithme IncCond

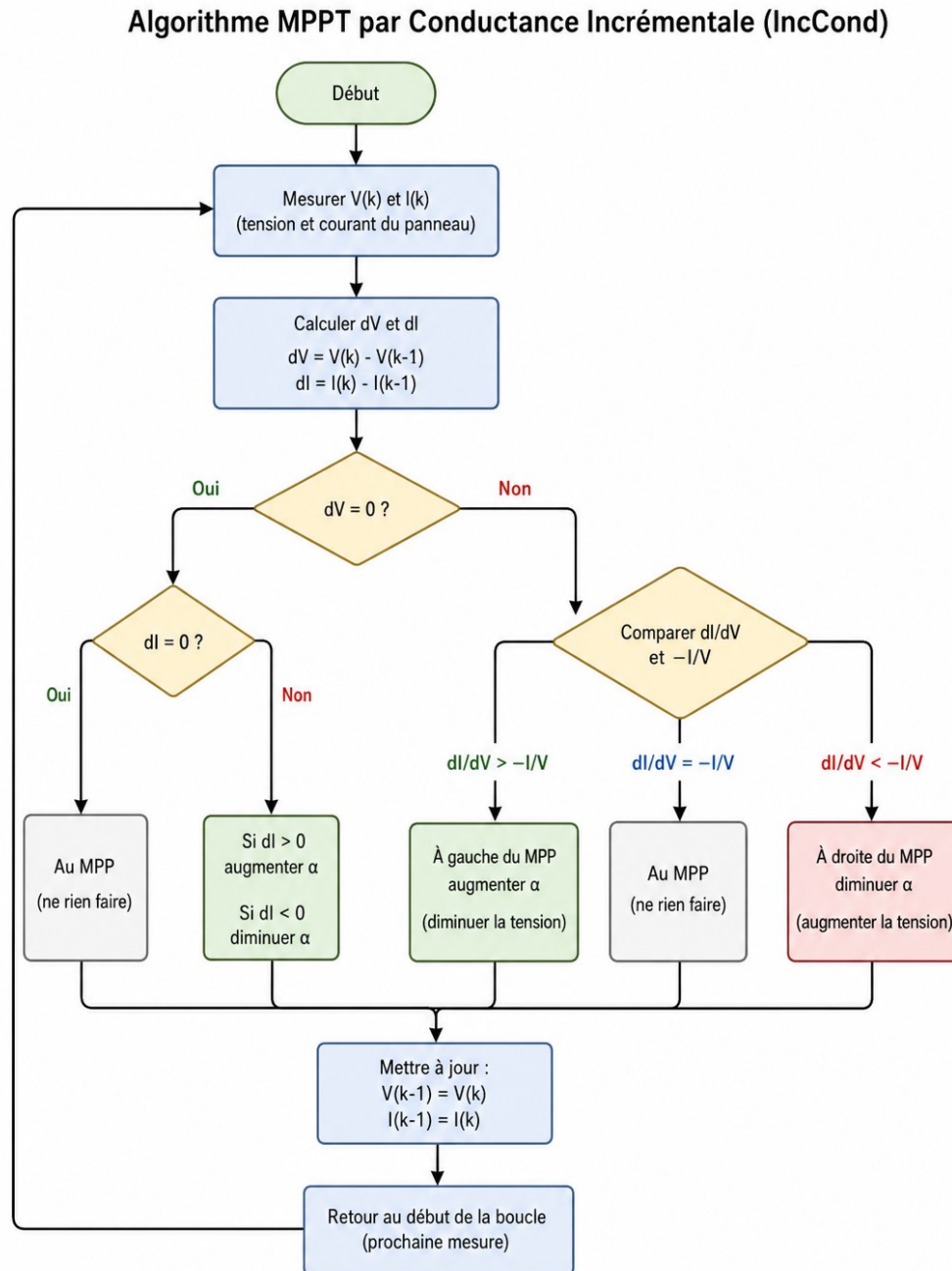


Figure 2.7 : Organigramme de l'algorithme MPPT par conductance incrémentale (IncCond).

Le terme $\frac{dI}{dV}$ est l'incrément de conductance (variation de conductance autour du point de fonctionnement), et $\frac{I}{V}$ est la conductance instantanée (inverse de la résistance statique). L'algorithme IncCond compare ces deux grandeurs :

- Si $\frac{dI}{dV} > \frac{-I}{V}$: le point de fonctionnement est à gauche du MPP — augmenter V

- Si $\frac{dI}{dV} < \frac{-I}{V}$: le point de fonctionnement est à droite du MPP — diminuer V
- Si $\frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V}$: le MPP est atteint — maintenir V constant

En pratique, introduisant les variations discrètes $\Delta I = I(k) - I(k-1)$ et $\Delta V = V(k) - V(k-1)$:

- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I = 0$: MPP atteint, pas de changement
- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I > 0$: augmenter V (l'irradiance a augmenté)
- Si $\Delta V = 0$ et $\Delta I < 0$: diminuer V (l'irradiance a diminué)
- Si $\Delta V \neq 0$, comparer $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ et $\frac{-I}{V}$

Avantages de l'IncCond :

Meilleure précision que le P&O (l'algorithme s'arrête effectivement lorsque le MPP est atteint, alors que le P&O oscille) - Meilleure réponse aux variations rapides de l'ensoleillement - Pas de divergence en cas de changement brusque des conditions [31-33].

Inconvénients de l'IncCond :

Complexité de calcul supérieure (divisions, comparaisons supplémentaires) - Sensibilité au bruit de mesure (les dérivées discrètes amplifient le bruit) - Nécessité d'un pas d'échantillonnage suffisamment fin et d'une précision de mesure adéquate [31-33].

2.5.5 Comparaison P&O vs IncCond

Tableau 2.2 : Comparaison des algorithmes MPPT : Perturb & Observe (P&O) vs Conductance Incrémentale (IncCond).

Critère	P&O	IncCond
Complexité d'implémentation	Faible	Modérée
Précision en régime permanent	Bonne (oscillations)	Très bonne (stabilité)
Vitesse de convergence	Rapide	Rapide
Robustesse aux variations rapides	Limitée (risque divergence)	Bonne
Sensibilité au bruit	Faible	Modérée à élevée
Ressources calculatoires	Minimales	Modérées
Efficacité de poursuite (η_{MPPT})	96–99 %	97–99,5 %

2.6 Résultats et discussion

2.6.1 Système sans MPPT

Dans cette section, nous simulons le comportement du système lorsque le convertisseur Boost fonctionne avec un rapport cyclique fixe ($\alpha = \text{constante}$), sans algorithme de poursuite du point de puissance maximale.

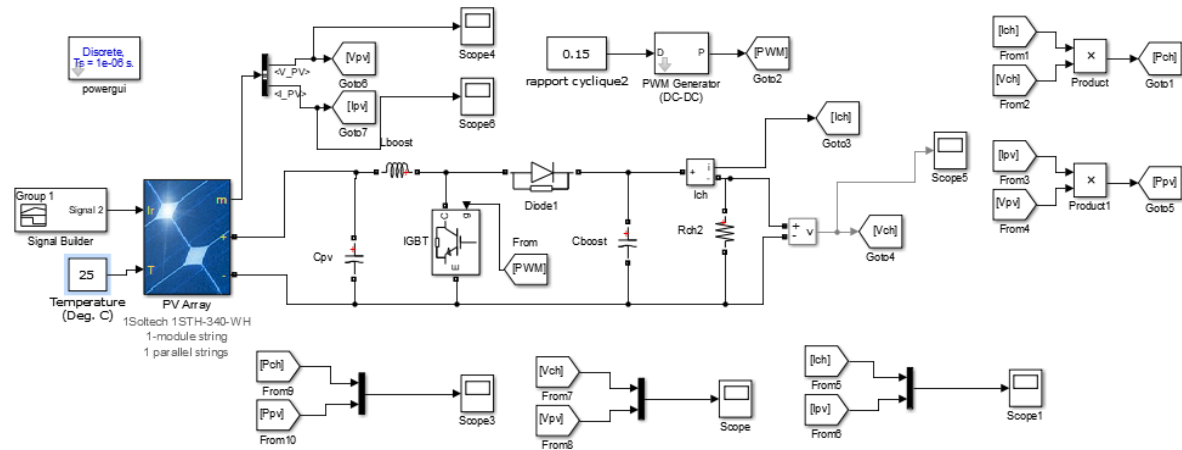


Figure 2.8 : Schéma de simulation du panneau PV et hacheur boost sans MPPT.

Les Paramètres du panneau utilisé.

Array data	
Parallel strings	1
Series-connected modules per string	1

Module data	
Module:	1Soltech 1STH-340-WH
Maximum Power (W)	339.78
Cells per module (Ncell)	80
Open circuit voltage Voc (V)	51.1
Short-circuit current Isc (A)	9.12
Voltage at maximum power point Vmp (V)	42
Current at maximum power point Imp (A)	8.09
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.36
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.09

Model parameters	
Light-generated current IL (A)	9.1647
Diode saturation current IO (A)	3.1652e-10
Diode ideality factor	1.0358
Shunt resistance Rsh (ohms)	66.7455
Series resistance Rs (ohms)	0.32744

Figure 2.9 : Paramètres du panneau.

Le profil de l'éclairement appliqué.

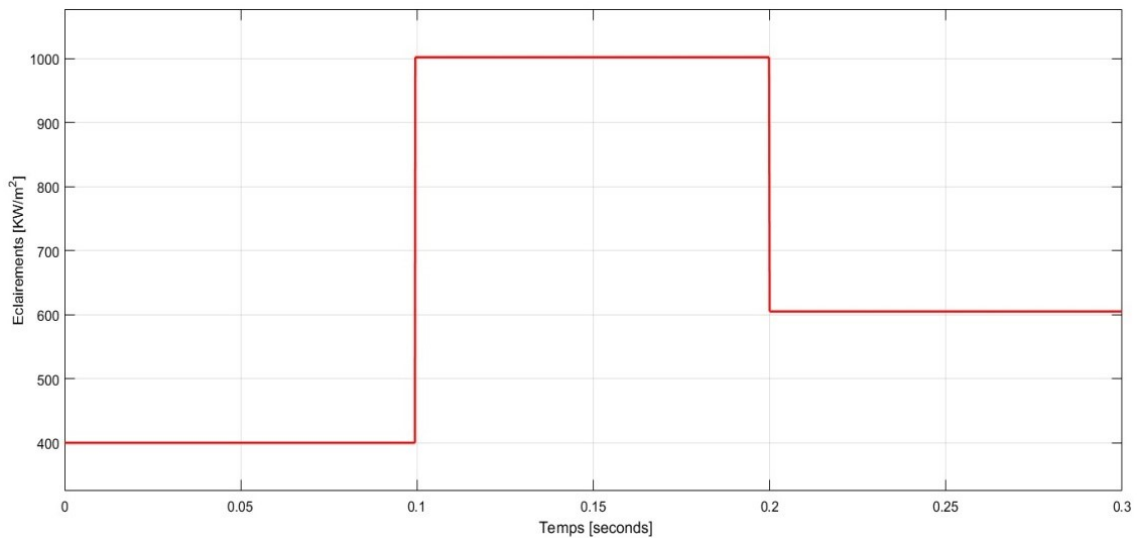


Figure 2.10 : Le profil de l'éclairement appliqué.

Pour présenter l'effet de l'éclairement sur la puissance, on maintient la température à une valeur constante $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et on fait varier l'éclairement plusieurs fois (400 W/m^2 , 600 W/m^2 , 1000 W/m^2).

La puissance à la sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT :

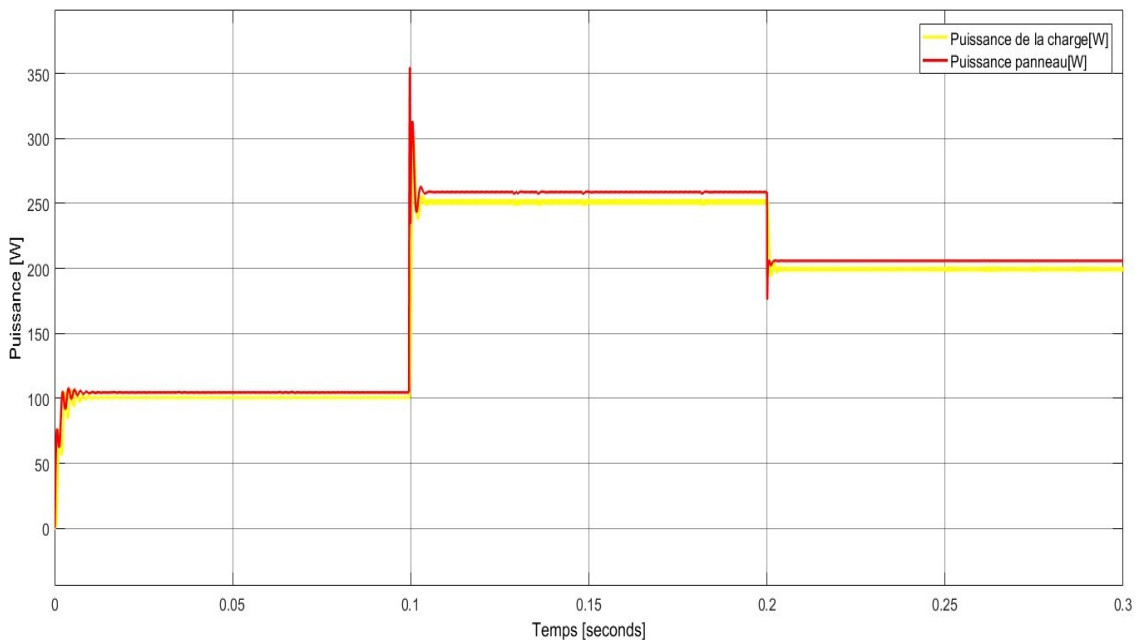


Figure 2.11 : La puissance à la sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT.

La Figure 2.11 représente l'évolution de la puissance à la sortie du panneau (sous les conditions d'éclairement et de température actuelles) et aux bornes de la charge sans la commande MPPT (sans optimisation). La puissance aux bornes de la charge est nettement inférieure à la puissance à la sortie du panneau, ce qui révèle une mauvaise adaptation d'impédance entre le panneau photovoltaïque et la charge. En l'absence d'un algorithme MPPT qui ajusterait dynamiquement le point de fonctionnement, le système ne peut ni extraire ni transférer efficacement l'énergie du panneau vers la charge, ce qui sous-exploite la capacité du panneau solaire [34, 35].

Le courant à la sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la command MPPT :

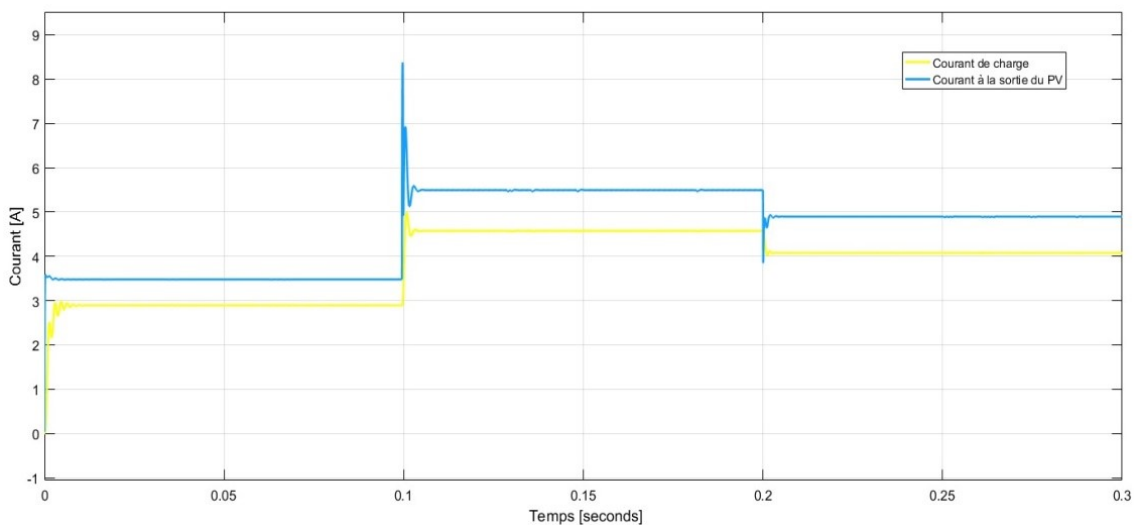


Figure 2.12 : *Le courant à la sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT.*

La Figure 2.12 représente l'évolution du courant de sortie du panneau. Les faibles valeurs de courant suggèrent que le panneau photovoltaïque ne fonctionne pas à son point de puissance maximale (MPP), ce qui pourrait être dû à des conditions d'ensoleillement non optimales, à des pertes internes ou à l'absence d'une commande MPPT pour ajuster la charge en temps réel ; par conséquent, le courant mesuré aux bornes de la charge est similaire ou inférieur à celui du panneau, car l'énergie n'est pas transférée efficacement, ce qui réduit l'efficacité globale du système.

La tension à la sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT :

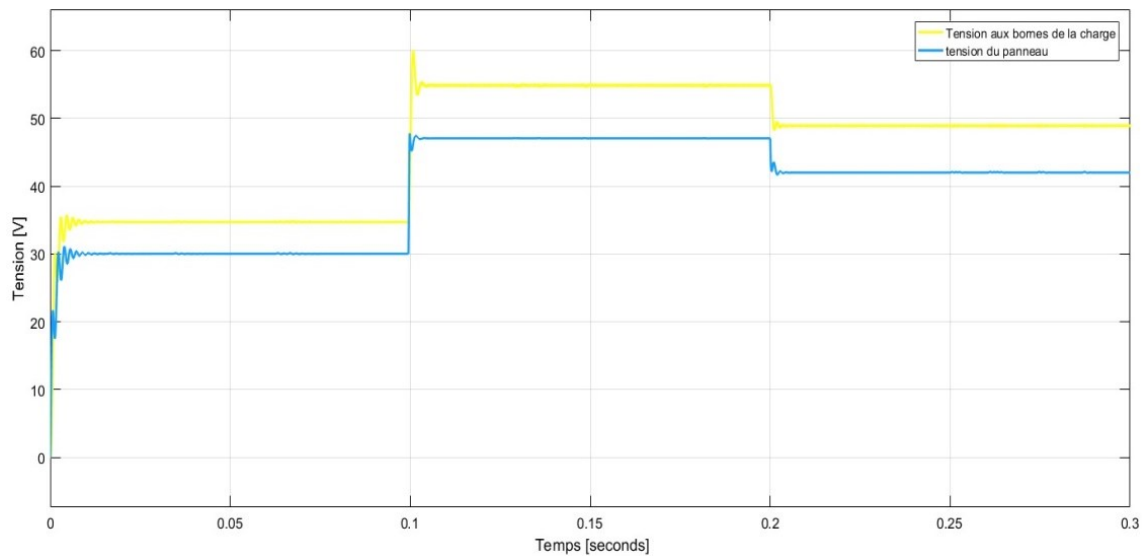


Figure 2.13 : La tension à la Sortie du panneau et aux bornes de la charge sans la commande MPPT.

La Figure 2.13 représente l'évolution de la tension de sortie du panneau. Comme le montre la Figure 2.13, la tension de sortie du panneau chute sans algorithme MPPT, ce dernier ne pouvant pas ajuster la tension pour atteindre le point de puissance maximale, la charge étant inadaptée au point de fonctionnement optimal.

2.6.2 Système avec MPPT

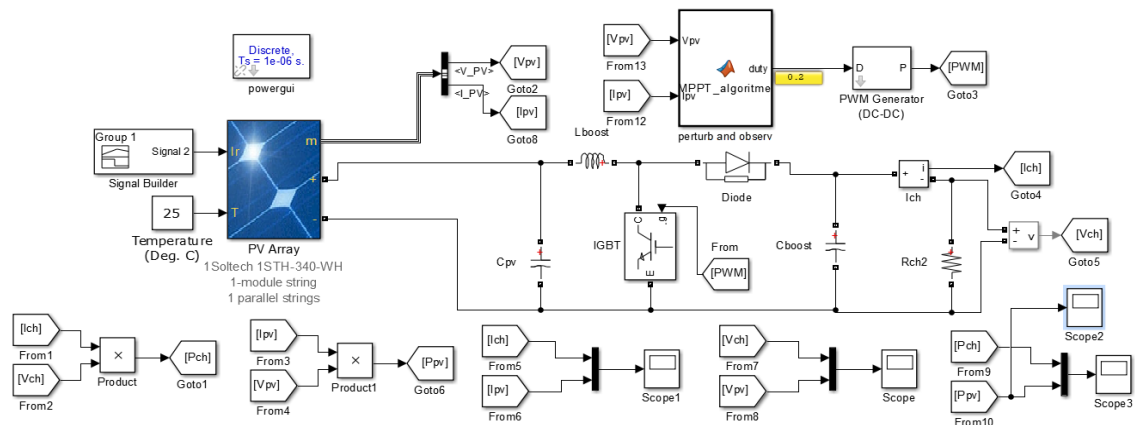


Figure 2.14 : Schéma de simulation du panneau PV et hacheur boost avec MPPT.

La puissance à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT :

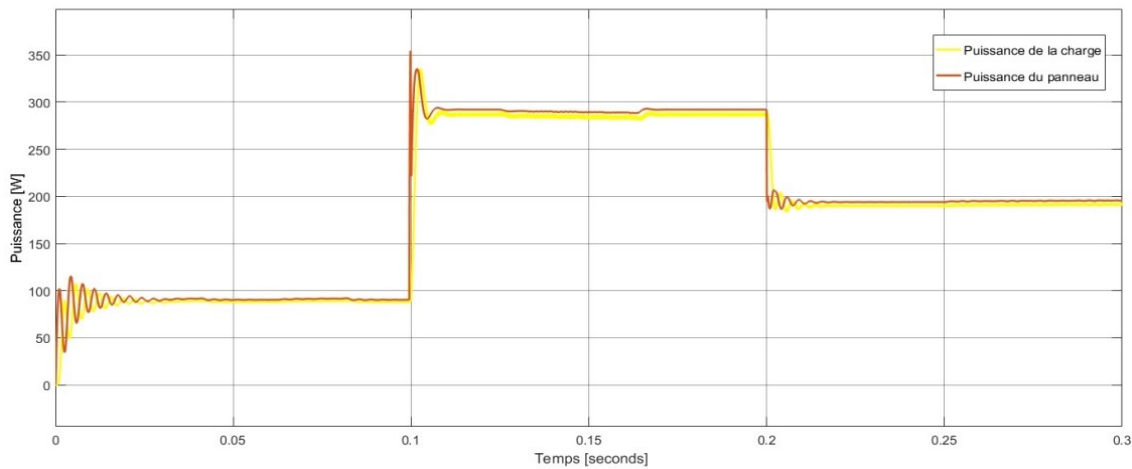


Figure 2.15. La puissance à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT.

La Figure 2.15 représente l'évolution de la puissance à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT. Contrairement au cas sans MPPT, on observe une nette amélioration du transfert de puissance. La puissance aux bornes de la charge se rapproche significativement de celle délivrée par le panneau, ce qui témoigne d'une bonne adaptation d'impédance entre le panneau photovoltaïque et la charge. Grâce à l'algorithme MPPT qui ajuste dynamiquement le point de fonctionnement, le système parvient à extraire et à transférer efficacement l'énergie du panneau vers la charge, optimisant ainsi l'exploitation de la capacité du panneau solaire [34, 35].

Le courant à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT :

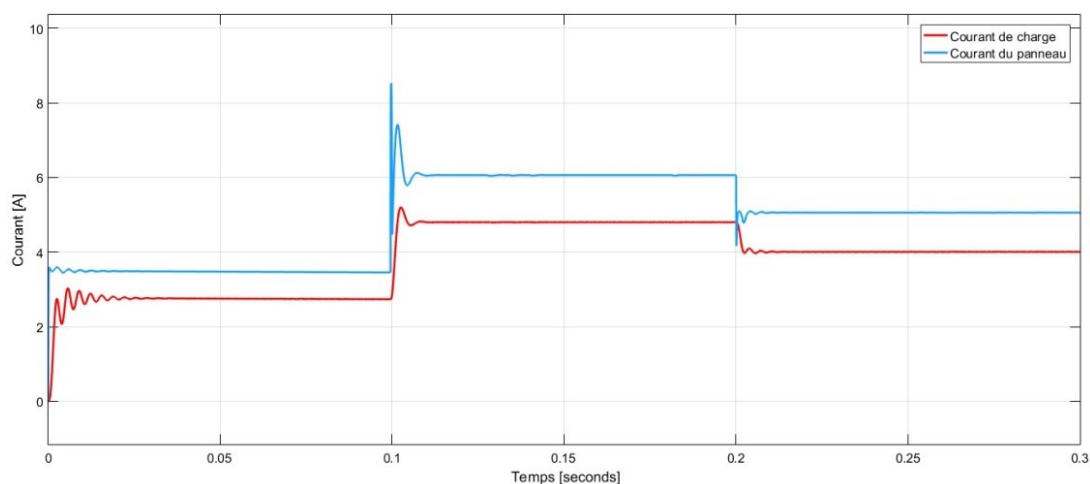


Figure 2.16. Le courant à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT.

La **Figure 2.16** représente l'évolution du courant à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT. Les valeurs de courant sont plus élevées que dans le cas sans MPPT, ce qui indique que le panneau photovoltaïque fonctionne au voisinage de son point de puissance maximale (MPP).

La tension à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT :

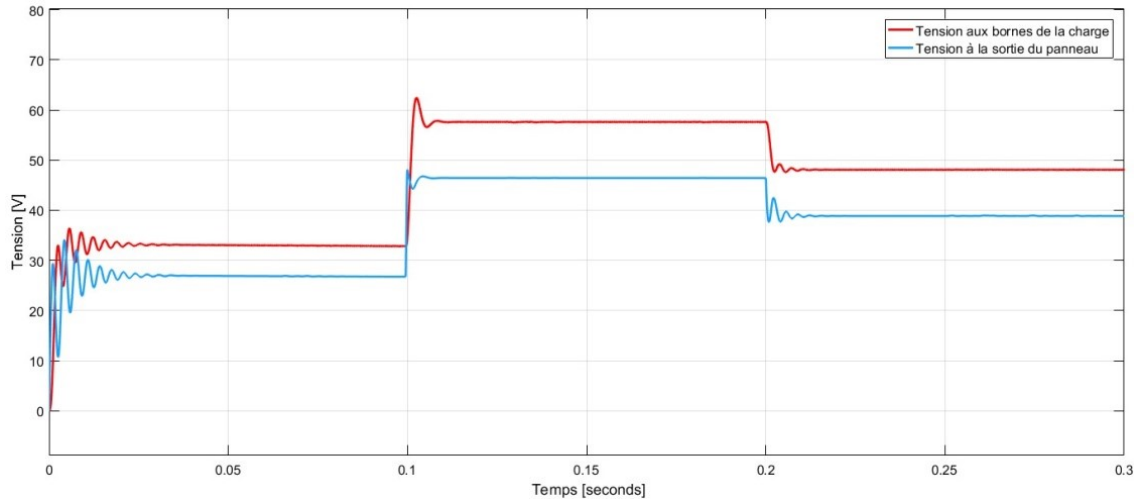


Figure 2.17. La tension à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT.

La Figure 2.17 représente l'évolution de la tension à la sortie du panneau et aux bornes de la charge avec la commande MPPT. Comme le montre la Figure 2.17, la tension de sortie du panneau se stabilise à une valeur optimale grâce à l'algorithme MPPT, qui ajuste continuellement la tension pour maintenir le point de fonctionnement au niveau du point de puissance maximale. La tension aux bornes de la charge suit étroitement celle du panneau, confirmant que la charge est désormais adaptée au point de fonctionnement optimal du panneau.

Les trois courbes (Figures 2.15, 2.16, et 2.17) présentent une cohérence qui témoigne du bon fonctionnement du système : l'énergie solaire est efficacement convertie en électricité disponible pour la charge. L'écart entre la tension du panneau et celle de la charge, représentant les pertes inévitables de la conversion DC-DC, se maintient dans des limites acceptables pour ce type d'installation.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a démontré le rôle fondamental du convertisseur DC/DC dans l'adaptation d'impédance entre un générateur photovoltaïque et sa charge. En se comportant comme un

transformateur d'impédance contrôlé par le rapport cyclique, il permet de déplacer le point de fonctionnement du générateur sur sa caractéristique I-V. Les modèles mathématiques établis en conduction continue ont fourni les relations de conversion, les expressions des ondulations et les critères de dimensionnement des composants passifs. Les algorithmes MPPT, notamment P&O et IncCond, ont été présentés et comparés théoriquement. Les résultats de simulation montrent qu'avec un rapport cyclique fixe (sans MPPT), la puissance transférée à la charge est nettement inférieure à la puissance disponible du panneau, traduisant une mauvaise adaptation d'impédance. En intégrant un algorithme MPPT, le système ajuste dynamiquement le point de fonctionnement, ce qui améliore significativement le transfert de puissance et stabilise la tension du panneau autour de son point optimal.

Le chapitre 3 complétera cette étude en intégrant le stockage par batterie et le convertisseur bidirectionnel, pour aboutir à la modélisation et la simulation complète du système hybride photovoltaïque-batterie.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque-batterie

3.1 Introduction

Les deux chapitres précédents ont posé les bases théoriques des systèmes photovoltaïques (Chapitre 1) et des convertisseurs DC/DC avec commande MPPT (Chapitre 2). Cependant, un générateur photovoltaïque, même équipé d'un MPPT performant, reste tributaire de la disponibilité de la ressource solaire — intermittente par nature. Pour transformer cette source d'énergie variable en une alimentation fiable et contrôlable, l'intégration d'un dispositif de stockage est indispensable [36, 37].

Ce troisième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation du système hybride complet, associant le générateur photovoltaïque à une batterie lithium-ion via un convertisseur DC/DC bidirectionnel. Nous aborderons successivement les généralités sur les batteries, leurs paramètres caractéristiques, leur modélisation électrique, et l'étude du convertisseur bidirectionnel assurant l'interface entre le bus DC et la batterie. Enfin, des simulations sous diverses conditions climatiques permettront d'évaluer les performances globales du système hybride.

3.2 Généralités sur les batteries pour le stockage d'énergie

La figure 3.1 illustre le principe de fonctionnement d'une batterie lithium-ion. Lors de la décharge (fourniture d'énergie), l'anode (l'électrode négative) subit une oxydation : le lithium libère des ions Li^+ et des électrons e^- . Les ions traversent l'électrolyte vers la cathode (l'électrode positive) tandis que les électrons empruntent le circuit externe pour produire du courant. Pendant la charge (stockage d'énergie), le processus s'inverse : la cathode s'oxyde, envoyant les ions Li^+ et les électrons vers l'anode grâce à une source externe.

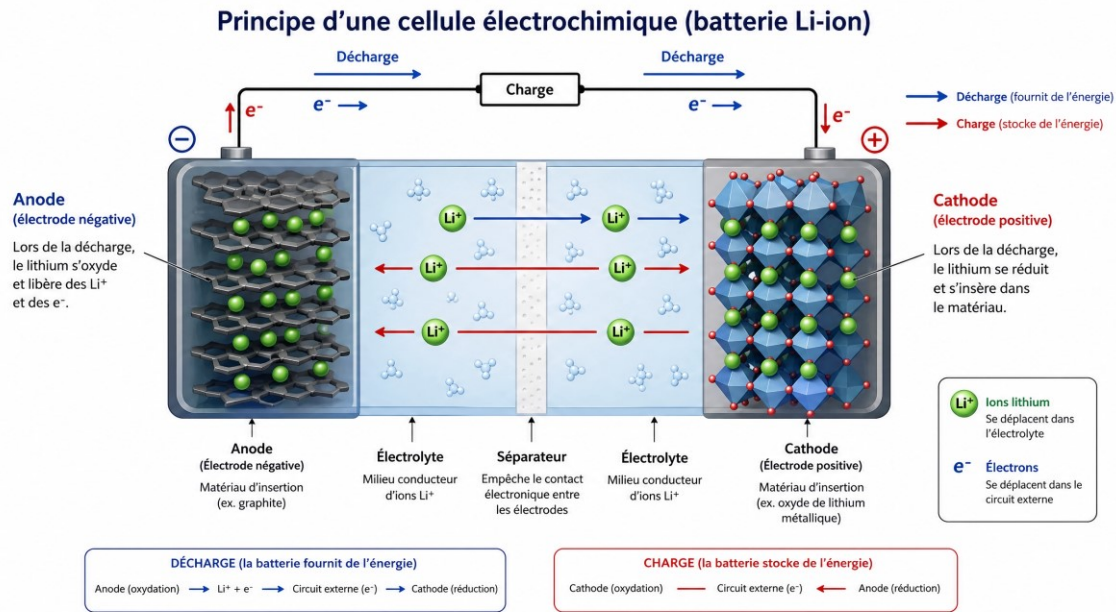


Figure 3.1 : Principe de fonctionnement d'une batterie lithium-ion : charge et décharge.

3.2.1 Principe de fonctionnement électrochimique

Une batterie (ou accumulateur) est un dispositif électrochimique capable de convertir l'énergie électrique en énergie chimique (lors de la charge) et inversement (lors de la décharge), de manière réversible sur un nombre élevé de cycles [36].

Une cellule de batterie comprend trois éléments fondamentaux :

- **L'électrode négative (anode lors de la décharge) :** matériau donneur d'électrons. Pour les batteries lithium-ion, il s'agit typiquement de graphite (C) capable d'insérer des ions lithium (Li^+) dans sa structure (intercalation).
- **L'électrode positive (cathode lors de la décharge) :** matériau accepteur d'électrons. Pour les batteries LFP (Lithium Fer Phosphate), la cathode est constituée de LiFePO_4 , matériau offrant une excellente stabilité thermique et une longue durée de vie.
- **L'électrolyte :** milieu conducteur ionique (liquide, gel ou solide) permettant le transport des ions entre les électrodes, tout en bloquant le passage des électrons (isolant électrique). Pour les batteries Li-ion, l'électrolyte est généralement un sel de lithium (LiPF_6) dissous dans un mélange de carbonates

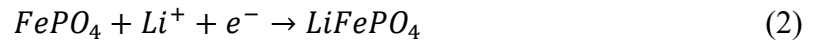
Processus de décharge (conversion chimique $\rightarrow$ électrique) :

À l'anode, le lithium inséré dans le graphite est oxydé (perte d'électron) :



L'ion lithium Li^+ migre à travers l'électrolyte vers la cathode. L'électron transite par le circuit extérieur (la charge), produisant le courant électrique utile.

À la cathode, l'ion lithium est réduit (gain d'électron) et s'insère dans la structure du matériau actif :



Processus de charge (conversion électrique $\rightarrow$ chimique) :

Les réactions sont inversées : une source de tension extérieure impose un courant qui extrait les ions Li^+ de la cathode et les force à s'insérer dans l'anode.

3.2.2 Notion de courant de surcharge (surintensité admissible)

Le courant de charge et de décharge d'une batterie est exprimé en régime de charge/décharge (C_{rate}), défini par rapport à la capacité nominale Q_{nom} [36] :

$$I = C_{rate} \cdot Q_{nom} \quad (3)$$

où : I est le courant en ampères (A), Q_{nom} est la capacité nominale en ampères-heures (Ah), et C_{rate} est le régime (h^{-1}).

Exemples : - 1C pour une batterie de 100 Ah correspond à un courant de 100 A - 0,5C correspond à 50 A - 0,2C correspond à 20 A.

Le courant maximal admissible dépend de la technologie et du fabricant. Pour les batteries Li-ion LFP, les valeurs typiques sont [36-38] :

- Courant de charge continu maximal : 0,5C à 1C
- Courant de décharge continu maximal : 1C à 3C
- Courant de décharge en crête (quelques secondes) : 3C à 5C

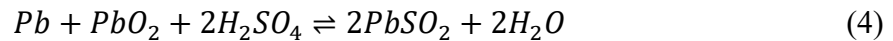
Le dépassement du courant maximal admissible entraîne un échauffement excessif, une dégradation accélérée de la batterie, voire un risque d'emballement thermique pour certaines chimies (bien que le LFP soit intrinsèquement sûr).

3.3 Principaux types de batteries solaires

3.3.1 Batteries au plomb (Pb-acide)

Principe de fonctionnement [36, 39] :

La batterie au plomb, inventée en 1859 par Gaston Planté, reste utilisée dans certaines applications solaires autonomes en raison de son faible coût. La réaction électrochimique globale (dite de double sulfatation) est :



où le sens $\rightarrow$ correspond à la décharge et le sens $\leftarrow$ à la charge.

Tableau 3.1 : Caractéristiques typiques d'une batterie plomb-acide.

Paramètre	Valeur typique
Tension nominale par cellule	2,0 V
Densité d'énergie massique	30–50 Wh/kg
Densité d'énergie volumique	50–90 Wh/L
Nombre de cycles (DOD 50%)	300–800 cycles
Rendement énergétique	70–85 %
Autodécharge mensuelle	3–10 %

Variantes technologiques [36, 39] :

- **Batterie ouverte (vented)** : nécessite un entretien régulier (ajout d'eau distillée), dégage de l'hydrogène en fin de charge.
- **Batterie AGM (Absorbent Glass Mat)** : l'électrolyte est immobilisé dans un feutre de fibres de verre. Sans entretien, étanche, résistance interne plus faible.
- **Batterie Gel** : l'électrolyte est gélifié par ajout de silice. Excellente résistance aux décharges profondes, durée de vie supérieure.

Pour les applications photovoltaïques, les batteries au plomb doivent être dimensionnées pour un fonctionnement en cyclage journalier avec décharge partielle (typiquement DOD < 50 % pour préserver la durée de vie) [36].

3.3.2 Batteries lithium-ion (Li-ion)

Principe de fonctionnement [36-38] :

Contrairement aux batteries au plomb, qui reposent sur une réaction chimique modifiant la nature des électrodes, les batteries Li-ion fonctionnent par insertion (intercalation) réversible des ions lithium dans la structure cristalline des électrodes, sans modification chimique majeure de la matrice hôte.

Principales chimies de cathode :

- **LCO (LiCoO_2)** : oxyde de lithium-cobalt. Haute densité d'énergie mais sécurité limitée et coût élevé (cobalt).
- **NMC (LiNiMnCoO_2)** : oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt. Compromis performance/sécurité/coût. Très répandu dans la mobilité électrique.
- **LFP (LiFePO_4)** : phosphate de fer lithié. Sécurité thermique exceptionnelle, longue durée de vie, mais densité énergétique plus faible que NMC. Technologie retenue pour notre étude en raison de ses excellentes performances en cyclage et de sa stabilité thermique, parfaitement adaptées au stockage stationnaire photovoltaïque [37].
- **LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)** : titanate de lithium (anode). Charge ultra-rapide, durée de vie exceptionnelle ($> 10\,000$ cycles), mais faible densité énergétique et coût élevé.

Tableau 3.2 : Caractéristiques typiques d'une batterie lithium-fer-phosphate (LiFePO_4).

Paramètre	Valeur typique
Tension nominale par cellule	3,2 V
Densité d'énergie massique	100–140 Wh/kg
Nombre de cycles (DOD 80%)	2000–6000 cycles
Rendement énergétique aller-retour	92–97 %
Autodécharge mensuelle	1–3 %
Plage de température de fonctionnement	–20 à +60 °C

Avantages des batteries Li-ion LFP pour le stockage solaire [36, 37] :

- Durée de vie cyclique très supérieure aux batteries au plomb (facteur 3 à 6)
- Rendement énergétique élevé ($> 95\%$), minimisant les pertes de conversion
- Maintenance nulle (pas d'entretien de l'électrolyte)
- Haute densité de puissance (capacité à fournir et absorber des courants élevés)

- Stabilité thermique intrinsèque (pas d'emballement thermique)
- Profondeur de décharge admissible élevée (jusqu'à 80-90 % sans dégradation excessive).

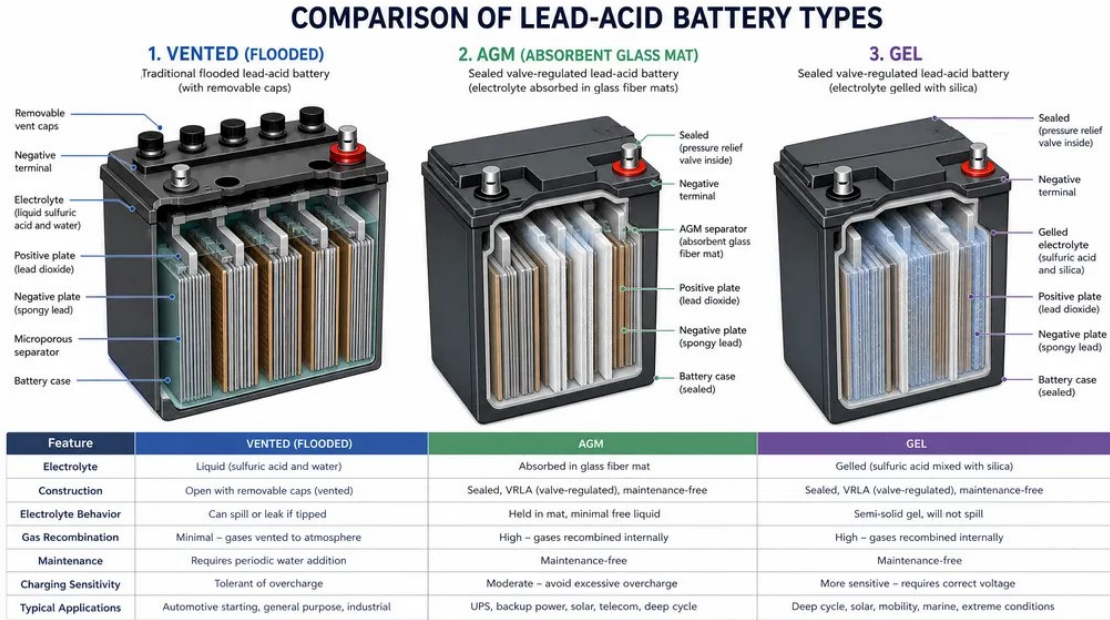


Figure 3.2 : Comparaison des trois principaux types de batteries plomb-acide : ouverte (Flooded), AGM et Gel.

3.4 Paramètres caractéristiques des batteries solaires

3.4.1 Capacité nominale et capacité utile

Capacité nominale Q_{nom} : quantité maximale de charge électrique stockable par la batterie, mesurée en ampères-heures (Ah) dans des conditions de référence (température, régime de décharge) spécifiées par le fabricant. Pour notre système, $Q_{nom} = 100$ Ah [36, 39].

Capacité utile Q_{utile} : quantité de charge effectivement exploitable sans endommager la batterie. Elle est limitée par la profondeur de décharge maximale recommandée :

$$Q_{utile} = DOD_{max} \cdot Q_{nom} \quad (5)$$

Pour une batterie LFP avec $DOD_{max} = 80\%$, la capacité utile est de 80 Ah.

L'énergie stockable correspondante est :

$$E_{stockée} = Q_{nom} \cdot V_{nom} = 100 \text{ Ah} \times 48 \text{ V} = 4800 \text{ Wh} = 4,8 \text{ kWh}$$

$$E_{utile} = Q_{utile} \cdot V_{nom} = 80 \text{ Ah} \times 48 \text{ V} = 3840 \text{ Wh} = 3,84 \text{ kWh}.$$

3.4.2 État de charge (SOC — State Of Charge)

Le SOC est le paramètre le plus important pour la gestion de la batterie [36, 37]. Il représente la quantité de charge disponible exprimée en pourcentage de la capacité nominale :

$$SOC(\%) = \left(\frac{Q_{disponible}}{Q_{nom}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

L'estimation du SOC en temps réel est essentielle pour le contrôle du système. La méthode la plus répandue est le comptage coulombien (*Coulomb Counting*), qui intègre le courant mesuré [36, 37] :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_{nom}} \int_{t_0}^t I_{bat}(\tau) d\tau \times 100\% \quad (7)$$

où I_{bat} est le courant de la batterie (positif en décharge, négatif en charge).

En pratique, pour la simulation discrète avec un pas Δt , la mise à jour du SOC s'écrit :

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \left(\frac{I_{bat}(k) \cdot \Delta t}{Q_{nom}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

Cette méthode, bien que simple, est sujette à une dérive cumulative due aux erreurs de mesure du courant. Des techniques de recalage périodique (basées sur la relation SOC- V_{oc} , ou par filtrage de *Kalman*) sont utilisées dans les BMS (*Battery Management Systems*) réels [38].

3.4.3 Profondeur de décharge (DOD — Depth Of Discharge)

La profondeur de décharge représente la fraction de la capacité nominale qui a été déchargée, exprimée en pourcentage [36] :

$$DOD(\%) = \left(\frac{Q_{décharge}}{Q_{nom}} \right) \times 100\% = 100\% - SOC(\%) \quad (9)$$

La DOD et la durée de vie cyclique sont étroitement liées [36] :

- À DOD = 100 % (décharge complète) : durée de vie cyclique minimale
- À DOD = 80 % : compromis durée de vie / capacité utilisable
- À DOD = 50 % : durée de vie fortement augmentée (batteries plomb)
- À DOD = 20-30 % : durée de vie maximale (micro-cyclage).

Les batteries LFP, contrairement aux batteries au plomb, tolèrent des DOD élevées (jusqu'à 80-90 %) sans réduction drastique de leur durée de vie, ce qui les rend particulièrement attractives pour le stockage solaire [36, 37].

3.4.4 Temps de charge / décharge

Le temps de charge ou de décharge dépend du courant et de la capacité [36] :

$$t_{charge} = \frac{Q_{nom}}{I_{charge}} \text{ (en heures)} \quad (10)$$

$$t_{décharge} = \frac{Q_{nom}}{I_{décharge}} \text{ (en heures)} \quad (11)$$

Ces durées, valables pour des courants constants, sont purement théoriques. En réalité, le temps de charge est allongé par les phases de tension constante (CV) en fin de charge, et le temps de décharge est affecté par l'effet Peukert (réduction de la capacité effective à fort régime de décharge) [36, 39].

3.4.5 État de santé (SOH — State Of Health)

Le SOH est un indicateur du vieillissement de la batterie, exprimé en pourcentage [36, 38] :

$$SOH(\%) = \left(\frac{Q_{nom \text{ actuelle}}}{Q_{nom \text{ initiale}}} \right) \times 100 \% \quad (12)$$

Une batterie est généralement considérée en fin de vie (EOL — End Of Life) lorsque son SOH atteint 70 à 80 % de sa capacité initiale. Le SOH diminue progressivement avec le nombre de cycles (vieillissement cyclique) et avec le temps, même sans utilisation (vieillissement calendaire).

La modélisation précise du vieillissement dépasse le cadre de ce mémoire ; nous considérons une batterie en bon état (SOH = 100 %) et de capacité nominale constante pour nos simulations.

3.5 Association de batteries (série / parallèle)

Pour atteindre les niveaux de tension et de capacité requis par une application, les cellules élémentaires sont associées [36] :

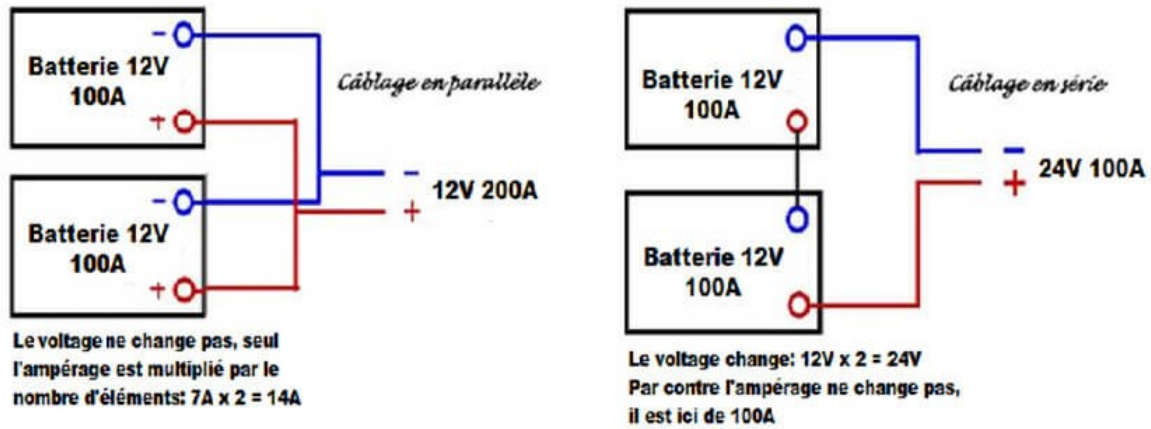


Figure 3.3 : Branchement des batteries : parallèle vs série – impact sur la tension et le courant.

Association série : N_s cellules connectées en série. Les tensions s'additionnent, le courant reste celui d'une cellule.

$$V_{\text{nom_bat}} = N_s \cdot V_{\text{nom_cellule}} \text{ et } Q_{\text{nom_bat}} = Q_{\text{nom_cellule}}$$

Pour notre batterie 48 V avec des cellules LFP de 3,2 V nominal : $N_s = 48 / 3,2 = 15$ cellules en série.

Association parallèle : N_p branches connectées en parallèle. Les capacités s'additionnent, la tension reste celle d'une branche.

$$V_{\text{nom_bat}} = V_{\text{nom_cellule}} \text{ et } N_p \cdot Q_{\text{nom_bat}} = Q_{\text{nom_cellule}}$$

Association mixte : N_s en série $\times$ N_p en parallèle.

$$V_{\text{nom_bat}} = N_s \cdot V_{\text{nom_cellule}}, N_p \cdot Q_{\text{nom_bat}} = Q_{\text{nom_cellule}}, \text{ et } E_{\text{totale}} = N_s \cdot N_p \cdot V_{\text{nom_cellule}} \cdot Q_{\text{nom_cellule}}.$$

Nécessité du BMS (Battery Management System)

Dans toute association de cellules, des déséquilibres de SOC apparaissent inévitablement en raison des dispersions de fabrication (capacité, résistance interne, autodécharge). Le BMS a pour fonction [38] :

- Surveiller la tension de chaque cellule

- Équilibrer les SOC (équilibrage passif par dissipation, ou actif par transfert d'énergie)
- Protéger contre les surtensions, sous-tensions, surintensités et surchauffes
- Estimer le SOC et le SOH globaux.

Dans notre modèle de simulation, nous considérons une batterie équivalente globale, l'étude détaillée du BMS n'étant pas l'objet du présent mémoire.

3.6 Modélisation électrique de la batterie

La modélisation électrique de la batterie est nécessaire pour la simulation du système complet. Parmi les nombreux modèles disponibles, le modèle de Thévenin d'ordre 1 (une branche RC) offre le meilleur compromis entre précision et simplicité pour les applications d'électronique de puissance [37, 40].

Circuit équivalent :

Le modèle de Thévenin d'ordre 1 comprend les éléments suivants [37] :

1. Une source de tension idéale $V_{oc}(SOC)$: tension à vide (Open Circuit Voltage), fonction non linéaire du SOC.
2. Une résistance série R_0 (ou R_s) : modélise les pertes ohmiques instantanées (résistance des électrodes, de l'électrolyte, des contacts). Elle est responsable de la chute de tension immédiate lors de l'application d'un courant.
3. Une branche RC parallèle ($R_1 // C_1$) : modélise les phénomènes transitoires de diffusion ionique et de transfert de charge aux interfaces électrode-électrolyte. La constante de temps $\tau_1 = R_1 \cdot C_1$ est typiquement de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes.

Équations du modèle :

La tension aux bornes de la batterie est donnée par [37, 40] :

$$V_{bat} = V_{oc}(SOC) - R_0 \cdot I_{bat} - V_1 \quad (13)$$

où V_1 est la tension aux bornes du circuit RC, régie par l'équation différentielle :

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{I_{bat}}{C_1} \quad (14)$$

Le courant I_{bat} est compté positivement en décharge (courant sortant de la batterie) et négativement en charge.

La tension à vide $V_{oc}(SOC)$ est une fonction généralement polynomiale ou par morceaux, dérivée des courbes de décharge expérimentales. Pour une batterie LFP, la caractéristique $V_{oc}(SOC)$ est relativement plate dans la zone 20-80 % de SOC (plateau de tension caractéristique du LFP), avec une variation plus marquée aux extrémités [37].

Tableau 3.3 : Paramètres d'un modèle électrique équivalent de batterie (modèle RC à une branche).

Paramètre	Valeur
V_{nom}	48 V
Q_{nom}	100 Ah
SOC initial	60 %
R_0	0,05 Ω
R_1	0,025 Ω
C_1	1000 F
$\tau_1 = R_1 \cdot C_1$	25 s

3.7 Convertisseur DC-DC bidirectionnel

3.7.1 Rôle et topologie

Le convertisseur DC/DC bidirectionnel assure l'interface entre le bus DC à tension régulée (150 V) et la batterie (48 V nominal), permettant un transfert de puissance dans les deux sens [41-43] :

- **Mode charge (Buck) :** transfert Bus DC $\rightarrow$ Batterie. Le convertisseur fonctionne en abaisseur, réduisant la tension de 150 V à environ 48-54 V pour charger la batterie.
- **Mode décharge (Boost) :** transfert Batterie $\rightarrow$ Bus DC. Le convertisseur fonctionne en élévateur, élevant la tension de 48 V à 150 V pour alimenter le bus DC lorsque la production PV est insuffisante.

La topologie retenue est le demi-pont (*half-bridge*) bidirectionnel, constitué de [41, 42] :

- Deux interrupteurs commandés S1 et S2 (MOSFET avec diodes body intégrées)
- Une inductance L_{bid}
- Deux condensateurs : C_{bus} (côté bus DC) et C_{bat} (côté batterie)

En mode Buck (charge), S_1 est commandé en PWM tandis que S_2 est bloqué (sa diode body joue le rôle de diode de roue libre). En mode Boost (décharge), S_2 est commandé en PWM tandis que S_1 est bloqué.

Tableau 3.3 : Paramètres de filtre et de découpage pour un convertisseur DC-DC bidirectionnel.

Paramètre	Valeur
L_{bid}	10 mH
C_{bus}	2200 μ F (partagé avec le bus DC)
C_{bat}	1000 μ F
f_{sw}	20 kHz

3.7.2 Stratégie de commande

La commande du convertisseur bidirectionnel est hiérarchique [41, 44] :

- **Niveau haut :** Gestion de l'énergie. Détermine le mode (charge ou décharge) et la référence de courant batterie I_{bat_ref} en fonction du bilan de puissance sur le bus DC, du SOC, et des seuils de protection.
- **Niveau bas :** Régulation. Des correcteurs PI en cascade assurent :
 - Boucle externe : régulation de la tension du bus DC $\rightarrow$ génère la référence de courant
 - Boucle interne : régulation rapide du courant dans l'inductance $\rightarrow$ génère le rapport cyclique.

Les gains des correcteurs PI, optimisés pour notre système, sont :

Tableau 3.4 : Paramètres des correcteurs PI pour la gestion d'un système batterie – bus DC.

Correcteur PI	Kp	Ki
Tension Bus DC (PB)	0,5	15
Courant Batterie (B)	1,2	40
SOC (PI2)	2,0	0,5
Tension Batterie (PI B)	0,8	25

3.8 Caractéristiques de décharge d'une batterie

La courbe de décharge d'une batterie représente l'évolution de sa tension V_{bat} en fonction de la capacité déchargée, pour un courant de décharge donné et une température donnée [36, 37, 40].

Pour une batterie LFP, la courbe de décharge présente trois zones caractéristiques :

1. **Zone 1 (SOC 100 % → 90 %) :** Chute de tension initiale relativement rapide, correspondant à la transition depuis l'état de pleine charge (relaxation de la surtension de charge).
2. **Zone 2 (SOC 90 % → 20 %) :** Plateau de tension très plat (typiquement 3,2-3,3 V par cellule), caractéristique de la chimie LFP. La faible pente (dV/dQ faible) complique l'estimation du SOC uniquement basée sur la tension en circuit ouvert.
3. **Zone 3 (SOC 20 % → 0 %) :** Chute de tension accélérée, signalant l'approche de la décharge complète. La tension de coupure (cut-off voltage) est atteinte, au-delà de laquelle la décharge doit impérativement cesser pour éviter des dommages irréversibles.

Tension de coupure [36, 37] :

Pour une batterie LFP 48 V (15 cellules) : - Tension de coupure basse (décharge) : 2,5 V/cellule $\times 15 = 37,5$ V - Tension de coupure haute (charge) : 3,65 V/cellule $\times 15 = 54,75$ V.

Effet Peukert [36, 39]

La capacité effective d'une batterie diminue lorsque le courant de décharge augmente, en raison des limitations cinétiques des réactions électrochimiques. La loi de Peukert modélise cet effet :

$$I_{peukert}^k \cdot t = \text{constante} \quad (15)$$

où k est le coefficient de Peukert ($k > 1$; typiquement $k \approx 1,02-1,05$ pour Li-ion, contre 1,1-1,3 pour le plomb). Plus k est proche de 1, moins la capacité dépend du régime de décharge.

Les batteries Li-ion, dont le coefficient de Peukert est très faible, présentent un excellent comportement en décharge à différents régimes, ce qui constitue un avantage supplémentaire pour les applications PV [36].

3.9 Résultats et discussion

La figure 3.4 illustre le schéma de la modélisation sous Simulink d'un système hybride PV-batterie. Dans cette étude, nous avons étudié premièrement l'influence de l'éclairement à une température de 25 °C, et deuxièmement l'influence de la température sous un éclairement de 1000 W/m².

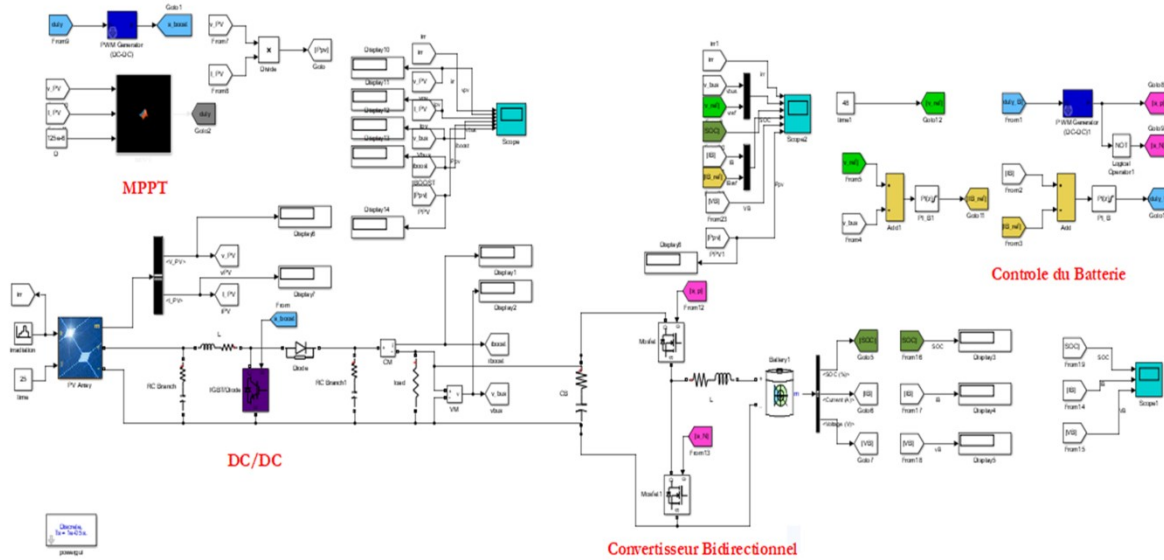


Figure 3.4 : Modélisation sous Simulink d'un système hybride PV-batterie.

3.9.1 Influence de l'éclairement (irradiance)

La variation de l'éclairement ($T = 25^{\circ}\text{C}$) est illustré sur la figure 3.5.

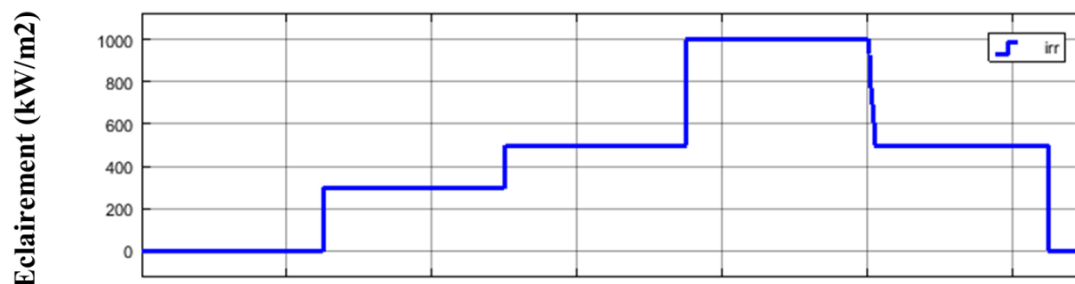
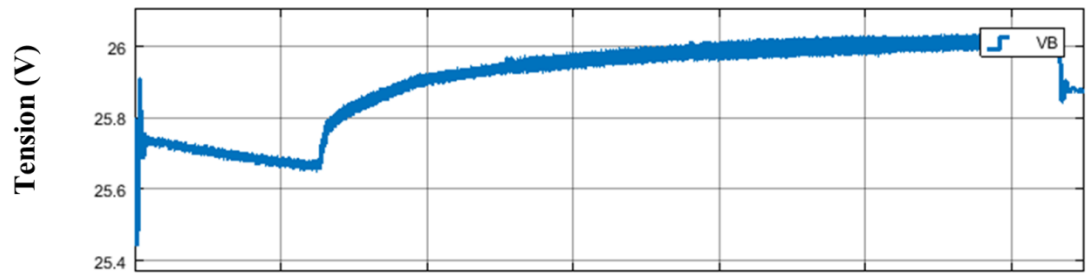
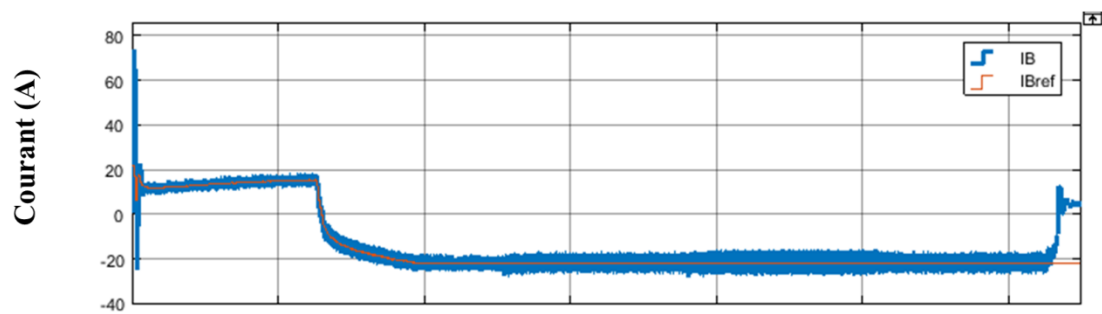


Figure 3.5 : Variation de l'éclairement.

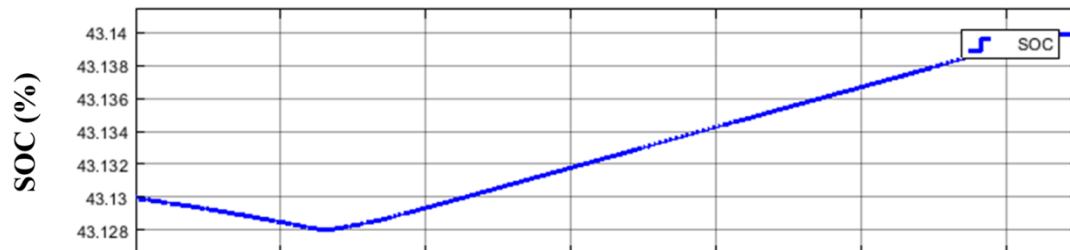
La figures 3.6 illustre l'influence de l'éclairement sur la tension, le courant, et l'état de charge de la batterie à une température de 25°C.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.6 : Influence de l'éclairement ; (a) : tension, (b) : courant, et (c) : état de charge de la batterie.

Sans éclairage, le panneau ne produit aucune énergie. L'alimentation de la charge est assurée par la batterie. La tension diminue due à la décharge naturelle de la batterie sans contribution du PV. Lorsque l'éclairement augmente, le panneau PV commence à produire du courant. La tension de la batterie augmente sous l'effet de la charge; plus l'éclairement est élevé, plus le courant de charge est important, ce qui élève temporairement la tension aux bornes. En plus, la tension diminue sans éclairage ou à éclairage faible.

Le courant de la batterie est positif si l'éclairement est nul (la batterie se décharge). Lorsque l'éclairement augmente, le courant diminue progressivement puis devient négatif (la batterie se charge). Lorsque l'éclairement diminue, le courant repasse du négatif au positif (passage de la charge à la décharge).

Le SOC diminue progressivement en absence de l'éclairement (absence de production photovoltaïque) puisque la batterie se décharge pour alimenter seule la charge. Lorsque l'éclairement augmente, le SOC augmente lentement du fait de la charge de la batterie par l'excédent d'énergie solaire.

3.9.2 Influence de la température

La variation de la température ($E = 1000 \text{ W/m}^2$) est illustré sur la figure 3.7.

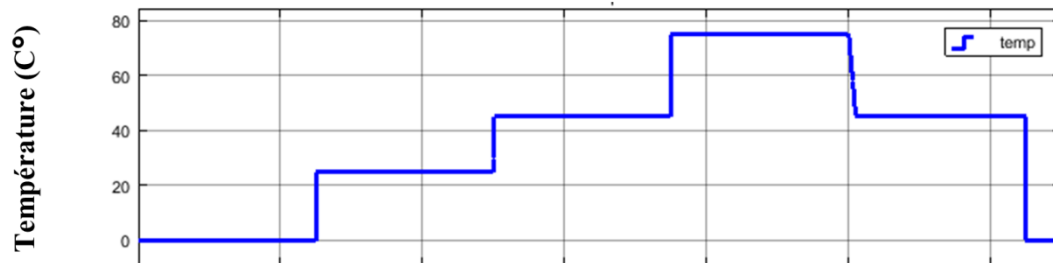
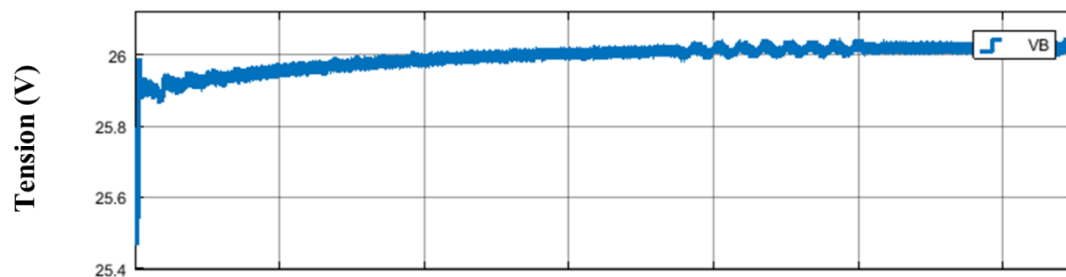
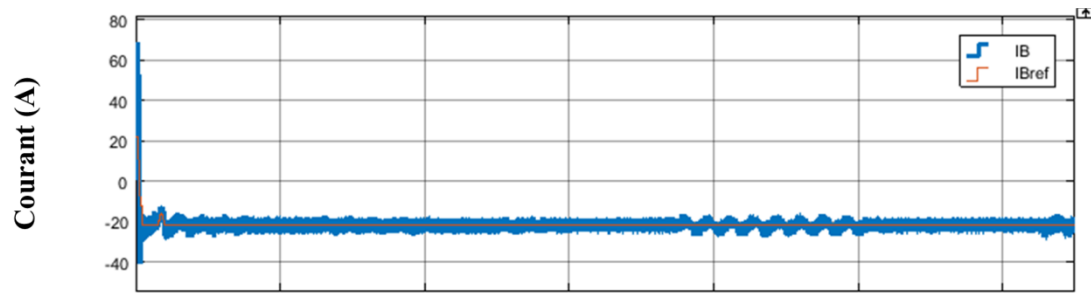


Figure 3.7 : Variation de la température .

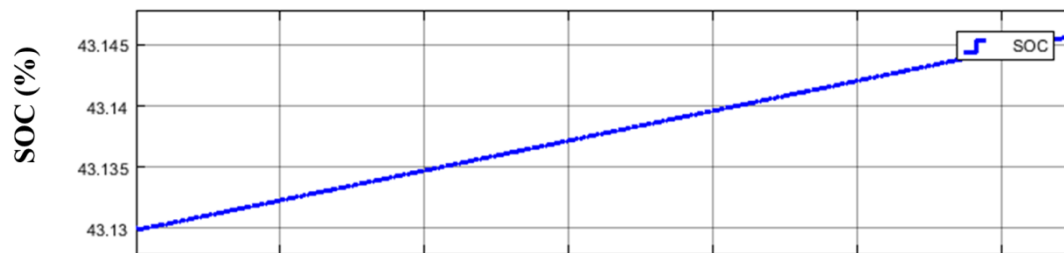
La figures 3.8 illustre l'influence de de la température sur la tension, le courant, et l'état de charge de la batterie à un éclairement de 1000 kW/m^2 .



(a)



(b)



(c)

Figure 3.8 : Influence de la température ; (a) : tension, (b) : courant, et (c) : état de charge de la batterie.

Lorsque la température augmente, la tension de la batterie croît progressivement, tandis que le courant reste quasi stable car le régulateur de la charge impose un courant de référence (IB_{ref}) indépendant de la température. Le SOC reste quasi constant (très faible variation) avec l'augmentation de la température, cette dernière n'affecte que très peu l'efficacité de charge, et son influence est masquée par la régulation du courant.

3.10 Conclusion

Ce chapitre a visé d'étudier la modélisation et simulation d'un système hybride PV-batterie de stockage afin d'assurer la disponibilité continue de l'énergie. Nous avons présenté les principes fondamentaux du fonctionnement des batteries, en distinguant les technologies plomb-acide et lithium-ion, et en justifiant le choix du LFP pour notre application en raison de sa durée de vie cyclique exceptionnelle, de son rendement élevé et de sa sécurité intrinsèque. Les paramètres caractéristiques des batteries (capacité, SOC, DOD, SOH) ont été définis et leur estimation discutée. Le modèle électrique de Thévenin d'ordre 1, retenu pour les simulations, a été présenté avec ses équations et ses paramètres. L'étude du convertisseur DC/DC bidirectionnel, interface indispensable entre le bus DC et la batterie, a été conduite, avec sa double fonctionnalité Buck/Boost et sa commande hiérarchique.

Les simulations sous diverses conditions d'ensoleillement et de température ont démontré la capacité du système hybride complet à assurer la continuité d'alimentation des charges même en l'absence d'ensoleillement. Le système ainsi modélisé et simulé constitue une base solide pour le développement de systèmes réels de stockage d'énergie solaire, combinant performance énergétique, fiabilité et durabilité.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'étudier, modéliser et simuler un système photovoltaïque hybride avec stockage par batterie, en mettant l'accent sur l'optimisation de l'extraction d'énergie solaire et la gestion des flux de puissance. À travers les trois chapitres présentés, nous avons abordé successivement les fondamentaux du photovoltaïque, les techniques de conversion DC/DC et de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), puis l'intégration du stockage batterie.

Le premier chapitre a posé les bases nécessaires à la compréhension des systèmes photovoltaïques. Nous y avons rappelé l'effet photovoltaïque, les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule, ainsi que les paramètres clés (point de puissance maximale, facteur de remplissage, rendement). L'influence prépondérante de l'ensoleillement et de la température sur les performances du générateur PV a été clairement mise en évidence. Ce chapitre a également justifié le recours à des systèmes hybrides PV-batterie pour assurer la continuité de l'alimentation en l'absence de soleil, introduisant ainsi la problématique centrale de ce travail.

Le deuxième chapitre a été consacré aux convertisseurs DC/DC et aux algorithmes MPPT. Nous avons montré qu'un convertisseur agit comme un transformateur d'impédance variable, permettant d'adapter dynamiquement la charge au générateur PV. L'analyse des algorithmes MPPT a permis de comprendre leur fonctionnement et leurs performances. La comparaison directe entre un système sans MPPT (rapport cyclique fixe) et un système avec MPPT a clairement démontré que l'intégration du MPPT est nettement plus performante.

Le troisième chapitre a étendu l'étude au système hybride complet, incluant une batterie et un convertisseur DC/DC bidirectionnel (Buck/Boost). Le modèle électrique de Thévenin d'ordre 1 a été retenu pour représenter la batterie, avec une gestion du SOC par comptage coulombien. Les simulations sous différents éclairagements et températures ont confirmé que le système hybride assure la continuité de service : en présence d'ensoleillement, l'excédent

d'énergie charge la batterie ; en absence ou faible ensoleillement, la batterie se décharge pour alimenter la charge.

Références bibliographiques

- [1] N.Touil, S.Ghenbazi, «Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », Master académique, Université Echahid Hama Lakhder ,El-Oued ,Septembre 2015.
- [2] S.M.Ait-Cheikh, «Etude Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [3] M.Adouane, «Etude et conception d’une stratégie de commande d’un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [4] N.Anbouchabana, « Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Ecole Doctorale Energie renouvelable, Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2008.
- [5] Kahlaoui Imed - Chouia Mohamed – Thème « Simulation de couplage d’un moteur asynchrone avec un onduleur multi-niveaux alimenté par un générateur photovoltaïque » 2016.
- [6] Helali, K. (2012). Modélisation d’une cellule photovoltaïque : étude comparative. Master in Electrotechnique, Université Mouloud Mammri de Tizi-Ouzou.
- [7] <https://www.connaissancedesenergies.org/>
- [8] <https://www.ecosources.org/>
- [9]M. Missoum, « Contribution de l’énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l’habitat à haute qualité énergétique en Algérie ». Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, 2011.
- [10].D. Boukhers, « Optimisation d'un système d’Energie photovoltaïque application au pompage ». Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [11] Mornay Thomas, Vernay Alexis, Volle Marion, Sup-D, « les cellules photovoltaïques », classes préparatoires CPE institution des chartreux année 2004/2005.
- [12] M. Mehdi, « Injection de l’électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique », Mémoire de Master académique, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2010.

- [13] B. M. Salih, R. A. Mohmeed, and M. A. Ibrahim, “The environment coefficients effect on iv and Pv characteristics curves of photovoltaic cell using MATLAB/Simulink,” *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 2651–2654, 2018.
- [14] A. Labouret, M. Villos, *Energie solaire photovoltaïque*, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [15] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [16] R. Venkateswari and S. Sreejith, “Factors influencing the efficiency of photovoltaic system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 376–394, 2019.
- [17] A.Bisker, M.Chiri, « Commande d’un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau », *Projet de fin d’études En vue de l’obtention du diplôme D’Ingénieur d’État en Électrotechnique*, École Nationale Polytechnique, Juin 2012.
- [18] A. Learrti « Réalisation de commande MPPT numérique », Rovira & Virgili, 2006.
- [19] R. Mukund, Ph.D Patel, « Wind and Solar Power Systems », edition CRC PRESS.
- [20] B.Mehimmed, «Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque», *Mémoire de Magister*, Université Mantouri de Constantine, 2007.
- [21] Slama Fateh, « Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », *Mémoire de Magister*, Université Ferhat Abbas, Setif, 2012.
- [22] Azoui, *Energie renouvelable « Systèmes photovoltaïques »*. Université Mostefa Ben Boulaid, Batna. [En ligne], Disponible sur : staff.univ-batna2.dz. Consultée le 22 avril 2022.
- [23] G. Abdelkarim. « Aspects techniques des projets solaires PV raccordés au réseau ». [En ligne], Disponible sur : energypedia.info. Consultée le 03 mai 2022.
- [24] F. Kandouli, « Modélisation et commande des machines électriques », Juillet 2007
- [25] L. Stoyanov, «Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d’énergie renouvelables», *Thèse de Doctorat de l’Université Technique de Sofia*, 2011.
- [26] Erickson, R.W. & Maksimović, D. — *Fundamentals of Power Electronics*, 3rd Edition, Springer, Cham, 2020. (ISBN: 978-3-030-43879-1).

- [27] Mohan, N., Undeland, T.M. & Robbins, W.P. — Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003. (ISBN: 978-0-471-22693-2)
- [28] Rashid, M.H. — Power Electronics Handbook, 4th Edition, Butterworth-Heinemann (Elsevier), Oxford, 2018. (ISBN: 978-0-12-811407-0)
- [29] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G. & Vitelli, M. — Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems, CRC Press, Boca Raton, 2013. (ISBN: 978-1-4665-0690-9)
- [30] Kazimierczuk, M.K. — Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Chichester, 2016. (ISBN: 978-1-119-00954-2)
- [31] Esram, T. & Chapman, P.L. — Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, pp. 439–449, 2007. (DOI: 10.1109/TEC.2006.874230)
- [32] De Brito, M.A.G., Galotto, L., Sampaio, L.P., Melo, G.A. & Canesin, C.A. — Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, pp. 1156–1167, 2013. (DOI: 10.1109/TIE.2012.2198036)
- [33] Rajani, K. & Pandya, M.H. — Maximum Power Point Tracking: A Review, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 4, No. 6, 2015.
- [34] "Photovoltaic Systems Engineering" (4th Ed.) – Roger A. Messenger, Jerry Ventre. Chapitre 5 : "Power Conditioning and Maximum Power Point Tracking".
- [35] "Renewable and Efficient Electric Power Systems" – Gilbert M. Masters. Sections sur l'optimisation des systèmes PV et les algorithmes MPPT.
- [36] Linden, D. & Reddy, T.B. — Handbook of Batteries, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 2011. (ISBN: 978-0-07-162421-3)
- [37] Chen, M. & Rincon-Mora, G.A. — Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, pp. 504–511, 2006. (DOI: 10.1109/TEC.2006.874229)
- [38] Plett, G.L. — Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling, Artech House, Norwood, 2015. (ISBN: 978-1-63081-023-8)
- [39] Berndt, D. — Maintenance-Free Batteries: Lead-Acid, Nickel/Cadmium, Nickel/Metal Hydride, 3rd Edition, Research Studies Press, Baldock, 2003. (ISBN: 978-0-86380-239-3)

- [40] Tremblay, O., Dessaint, L.A. & Dekkiche, A.I. — A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2007. (DOI: 10.1109/VPPC.2007.4544139)
- [41] Erickson, R.W. & Maksimović, D. — Fundamentals of Power Electronics, 3rd Edition, Springer, Cham, 2020. (ISBN: 978-3-030-43879-1)
- [42] Mohan, N., Undeland, T.M. & Robbins, W.P. — Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003. (ISBN: 978-0-471-22693-2)
- [43] Rashid, M.H. — Power Electronics Handbook, 4th Edition, Butterworth-Heinemann (Elsevier), Oxford, 2018. (ISBN: 978-0-12-811407-0)
- [44] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G. & Vitelli, M. — Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems, CRC Press, Boca Raton, 2013. (ISBN: 978-1-4665-0690-9).

ملخص

تتناول هذه المذكرة نمذجة ومحاكاة والتحكم في نظام هجين من الألواح الكهروضوئية والبطاريات بهدف تحسين أداء أنظمة إنتاج الطاقة الشمسية. تشمل الدراسة نمذجة المولد الكهروضوئي، ومحولات التيار المستمر/المستمر، ونظام التخزين بالبطاريات، بالإضافة إلى تطبيق تحكم MPPT لاستخراج القدرة القصوى. تم استخدام محوّل رافع (Boost Converter) لتكييف الجهد وضمان التشغيل عند نقطة القدرة القصوى. أظهرت المحاكاة التي أجريت باستخدام MATLAB/Simulink الاستراتيجية المقترحة في مواجهة تغيرات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، مع ضمان إدارة فعالة لتخزين الطاقة.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروضوئي، بطارية، MPPT، محوّل رافع، نمذجة، محاكاة، MATLAB/Simulink، طاقة متجددة.

Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation, la simulation et la commande d'un système hybride photovoltaïque-batterie visant à améliorer les performances des systèmes de production d'énergie solaire. L'étude comprend la modélisation du générateur photovoltaïque, des convertisseurs DC/DC, du système de stockage par batterie ainsi que l'implémentation d'une commande MPPT pour l'extraction optimale de la puissance. Un convertisseur Boost est utilisé afin d'adapter la tension et de garantir le fonctionnement au point de puissance maximale. Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink montrent l'efficacité de la stratégie proposée face aux variations de l'irradiance et de la température, tout en assurant une gestion efficace du stockage énergétique.

Mots-clés : Système photovoltaïque, Batterie, MPPT, Convertisseur Boost, Modélisation, Simulation, MATLAB/Simulink, Énergie renouvelable.

Abstract

This thesis focuses on the modeling, simulation, and control of a hybrid photovoltaic-battery system aimed at improving the performance of solar energy production systems. The study includes the modeling of the photovoltaic generator, DC/DC converters, the battery storage system, as well as the implementation of MPPT control for optimal power extraction. A Boost converter is used to adapt the voltage and ensure operation at the maximum power point. Simulations carried out in MATLAB/Simulink demonstrate the effectiveness of the proposed strategy under variations in irradiance and temperature, while ensuring efficient energy storage management.

Keywords: Photovoltaic system, Battery, MPPT, Boost converter, Modeling, Simulation, MATLAB/Simulink, Renewable energy.