Étude et validation en temps réel d'une stratégie de contrôle innovante basée sur un système photovoltaïque pour le contrôle et la gestion d'un chargeur de voiturette électrique

Par

Manel RADDAOUI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉNERGIES RENOUVELABLES ET
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 12 DÉCEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Manel Raddaoui, 2022

\

Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ambrish Chandra, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Miloud Rezkallah, codirecteur de mémoire
Centre de recherche et d'innovation en intelligence énergétique (CR2Ie)

M. Nicolas Constantin, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Ricardo Izquierdo, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 NOVEMBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Un grand merci envers mon directeur de recherche, le professeur Ambrish Chandra pour m'avoir acceptée dans le cadre de mon mémoire. Je salue vivement ses qualités, je lui adresse toute ma gratitude pour ses disponibilités et ses précieux conseils.

Je remercie également Dr Miloud Rezkallah de m'avoir accompagnée tout au long de mon mémoire. J'ai beaucoup appris à son contact et je suis très reconnaissante pour son soutien, ses encouragements.

Je remercie Dr Abdeldjebar Hazzab pour les échanges enrichissants, les corrections et les recommandations.

Je remercie Dr Mounir Benadja pour son soutien moral durant la période de mon mémoire.

J'ai une pensée particulière pour Félix Dubuisson, étudiant au doctorat à l'ÉTS, ce fut une chance d'avoir un collègue aussi compétent que lui. Merci pour l'aide et les conseils.

Je remercie Parth Patel, étudiant au doctorat à l'ÉTS, pour son aide précieuse.

Je tiens à remercier profondément mes chers parents, mon frère et ma sœur. Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour leurs soutiens et encouragements.

Je tiens à exprimer ma plus grande gratitude à mon fiancé qui rien n'aurait été possible sans ses conseils et son amour inconditionnel tout au long de ma maitrise, malgré la distance.

Mes remerciements sincères à tous mes amis pour leurs encouragements et leurs conseils durant ma maîtrise

Étude et validation en temps réel d'une stratégie de contrôle innovante basée sur un système photovoltaïque pour le contrôle et la gestion d'un chargeur de voiturette électrique

Manel RADDAOUI

RÉSUMÉ

Dans ce travail, le système autonome étudié est dédié aux stations de charge des voiturettes électriques des terrains de Golf qui se composent des panneaux photovoltaïques, un convertisseur élévateur CC-CC, un convertisseur abaisseur-élévateur et une batterie. Les performances de ce système sous deux configurations centralisée et décentralisée ont été étudiées. La limite de l'algorithme de suivi de puissance maximale conventionnel P&O sous différentes conditions d'éclairement a été identifiée. Afin de minimiser les effets néfastes de l'ombrage partiel sur le système PV, le convertisseur élévateur CC-CC est contrôlé à l'aide d'un nouvel algorithme MPPT basé sur le réseau de neurones pour extraire la puissance maximale produite des panneaux PV. La commande du contrôleur abaisseur-élévateur CC-CC, qui est associé à la batterie, pour la régulation du bus CC a été développée à l'aide de la logique floue. En vue de leur comportement stochastique, la production de l'énergie solaire engendre un déséquilibre dans un système photovoltaïque, ce qui requiert un gestionnaire de puissance qui contrôle l'écoulement de la puissance. Cet algorithme de gestion a été conçu avec Stateflow. Les performances de la configuration proposée et leur contrôle stratégies ainsi que son gestionnaire de puissance ont été validés par simulation et en temps réel au laboratoire.

Les résultats obtenus sous différentes conditions comme l'ombrage et la variation de la charge offrent des performances convenables.

Mots-clés: ANN-MPPT, gestionnaire de puissance, logique floue FLC, système photovoltaïque, ombrage partiel, Matlab/Simulink

Study and implementation of an innovative control strategy based on a photovoltaic system for the control and management of an cart charger

Manel RADDAOUI

ABSTRACT

This work investigates an autonomous system for charging electric golf cars using photovoltaic panels, a DC-DC boost converter, a buck-boost converter, and a battery. The performance of this system was examined under two centralized and decentralized configurations. The conventional P&O maximum power tracking algorithm is limited by different illumination conditions. In order to minimize the detrimental effects of partial shading on the PV arrays, a neural network-based MPPT algorithm is used to control the DC-DC boost converter. Fuzzy logic was used to control the DC-DC buck-boost controller associated with the battery to regulate the DC bus. Solar energy production generates an imbalance in a photovoltaic system because of its stochastic behavior, requiring a power manager to control power flow. State flow was used to design the power management algorithm. Simulations and real-time experiments have validated the performance and control strategies of the proposed configuration, as well as its power management algorithm.

Results obtained under different conditions such as shading, and load variation are suitable

Keywords: ANN-MPPT, power management, fuzzy logic FLC, photovoltaic system, partial shading, Matlab/Simulink

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE 5
1.1 Introduction 5
1.2 Énergies renouvelables au Canada 5
1.3 Chargeurs des voiturettes électriques 8
1.3.1 Chargeurs électriques basés sur des sources d'énergies renouvelables 9
1.3.2 Avantages et inconvénients des chargeurs électriques basés sur l'énergie renouvelable 10
1.3.3 Classifications des chargeurs électriques d'une voiturette électrique 11
1.4 Cellules photovoltaïques 11
1.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 12
1.4.2 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque 13
1.4.3 Effet de l'éclairement et la température sur une cellule photovoltaïque .. 15
1.4.4 Protection d'une cellule photovoltaïque 17
1.5 Effet de l'ombrage partiel sur une cellule photovoltaïque 18
1.6 Modélisation des convertisseurs CC-CC 19
1.7 Différentes techniques de suivi du point de puissance maximale et classification 22
1.8 Configuration des systèmes solaires photovoltaïques 23
1.9 Performance des MPPT distribuées 24
1.10 Problématique 26
1.10.1 Extraction de la puissance maximale aux conditions d'ombrage partiel .. 27
1.10.2 Régulation de la tension du bus CC 27
1.10.3 Gestion de flux de la puissance 27
1.11 Objectifs 27
1.12 Méthodologie 28
1.13 Conclusion 28

CHAPITRE 2 DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ET EFFET DE L'OMBRAGE PARTIEL 31
2.1 Introduction 31
2.2 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques 31
2.2.1 Choix des panneaux photovoltaïques 32
2.2.2 Puissance générée par les panneaux photovoltaïques 32
2.3 Dimensionnement du convertisseur élévateur CC-CC 33
2.4 Simulations de panneaux photovoltaïques avec une structure centralisée 34
2.4.1 Cas de conditions standards 36
2.4.2 Cas d'ombrage partiel 37
2.5 Simulations de panneaux photovoltaïques avec une structure décentralisée aux conditions d'ombrage partiel 38
2.5.1 Simulation 38

2.5.2 Discussion des résultats 39
2.6 Conclusion 40

CHAPITRE 3 CONTRÔLE DU CONVERTISSEUR ÉLÉVATEUR À BASE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE 41
3.1 Introduction.....41
3.2 Notion d'un neurone 41
3.2.1 Neurone biologique..... 41
3.2.2 Neurone artificiel 42
3.3 Modèle mathématique d'un neurone artificiel.....42
3.4 Architecture d'un réseau de neurones.....44
3.5 Méthodes d'apprentissage d'un réseau de neurones.....44
3.6 Intérêts et limites d'ANN.....45
3.7 Proposition d'un algorithme de contrôle du convertisseur CC-CC 46
3.7.1 Approche de l'algorithme proposé aux conditions d'ombrage partiel..... 46
3.7.2 Conception de ANN-MPPT 47
3.8 Simulations et résultats 50
3.8.1 Simulations 50
3.8.2 Résultats de simulations..... 52
3.9 Conclusion 53

CHAPITRE 4 CONTRÔLE DU CONVERTISSEUR DE PUISSANCE ABAISSEUR-ELEVATEUR BASÉE SUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET GESTIONNAIRE DE PUISSANCE 55
4.1 Introduction.....55
4.2 Modèle mathématique des contrôleurs basé sur la logique floue pour la boucle de tension et la boucle de courant.....56
4.2.1 Théorie de la logique floue 56
4.2.2 Variables linguistiques..... 56
4.2.3 Structure de base du contrôleur à base de logique floue..... 57
4.3 Convertisseur abaisseur-élévateur 58
4.4 Simulation de la commande du convertisseur et résultats 59
4.5 Gestionnaire de puissance.....63
4.6 Conclusion 65

CHAPITRE 5 VALIDATION EXPÉRIMENTALE AU LABORATOIRE.....67
5.1 Introduction.....67
5.2 Simulation du système au complet : Application de station de charge pour les voiturettes électriques 67
5.3 Résultats et discussion 70
5.4 Prototype et validation expérimentale au laboratoire 74
5.5 Résultats et discussion 76
5.6 Conclusion 79

CONCLUSION.....81

RECOMMANDATIONS 83

ANNEXE I GESTIONNAIRE DE PUISSANCE 85

ANNEXE II PARAMÈTRES DU SYSTÈME 87

BIBLIOGRAPHIE 89

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Caractéristiques techniques du panneau 32

Tableau 2.2 Résultats de la puissance sous les conditions standards 36

Tableau 2.3 Résultats de simulation 39

Tableau 4.1 Paramètres du convertisseur bidirectionnel 58

Tableau 4.2 Base de règles du FLC 61

Tableau 5.1 Fonctionnement du système.....69

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Capacité en énergie renouvelable en 2020.....6

Figure 1.2 Capacité installée en énergie solaire photovoltaïque au Canada 7

Figure 1.3 Potentiel d'énergie solaire photovoltaïque du Canada.....8

Figure 1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....12

Figure 1.5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode 13

Figure 1.6 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.....13

Figure 1.7 Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule photovoltaïque sous différentes températures.....16

Figure 1.8 Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule photovoltaïque sous différentes irradiations 16

Figure 1.9 Configuration avec des diodes de dérivation et des diodes de blocage 18

Figure 1.10 Caractéristiques I-V des cellules PV dans une région à polarisation inverse 18

Figure 1.11 Caractéristiques puissance-tension d'un système PV sous l'ombrage partiel 19

Figure 1.12 Circuit d'un convertisseur abaisseur.....20

Figure 1.13 Circuit d'un convertisseur élévateur 20

Figure 1.14 Circuit d'un convertisseur abaisseur-élévateur.....21

Figure 1.15 Circuit d'un convertisseur SEPIC 21

Figure 1.16 Configuration des systèmes solaires photovoltaïques.....24

Figure 1.17 Systèmes MPPT distribuée: onduleur central (a), onduleur de chaine (b), onduleurs multi-strings (c), micro-onduleurs (d), convertisseur en cascade(e).....26

Figure 2.1 Localisation géographique 31

Figure 2.2 Organigramme de l'algorithme P&O 35

Figure 2.3 Représentation de schéma général de la simulation 35

Figure 2.4 Variation des caractéristiques sous les conditions standards.....36

Figure 2.5 Courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) pour 1000 W/m2 et 500 W/m2.....37

Figure 2.6 Cas 1 : Schéma de la simulation aux conditions d'ombrage partiel (a), courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) (b) 37

Figure 2.7 Cas 2 : Schéma de la simulation aux conditions d'ombrage partiel (a), courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) (b) 38

Figure 2.8 Simulation avec une structure décentralisée : Cas 1 (a), Cas 2 (b).....39

Figure 3.1 Correspondance neurone biologique / artificielle.....42

Figure 3.2 Modèle mathématique d'un neurone artificiel.....43

Figure 3.3 Formes de quelques fonctions d'activation pour ANN : linéaire (a), RELU (b), Tanh(c).....43

Figure 3.4 Architectures de réseau de neurones : feed-forward (a), feed-back (b).....44

Figure 3.5 Apprentissage d'un réseau de neurones.....45

Figure 3.6 Principaux blocs du système photovoltaïque.....47

Figure 3.7 La fonction "nntool" sur Matlab 48

Figure 3.8 Structure du réseau neuronal.....49

Figure 3.9 Bloc Simulink ANN issue de la formation des neurones 49

Figure 3.10 Les courbes de régression.....50

Figure 3.11 Système photovoltaïque soumis à différents cas d'ombrage partiel.....51

Figure 3.12 Courbes caractéristiques des PV pour chaque cas de l'ombrage partiel....51

Figure 3.13 Courbes de suivi des puissances maximaux à l'aide de l'algorithme ANN.....52

Figure 4.1 Diagramme du système proposé 55

Figure 4.2 Représentation d'un ensemble flou par sa fonction d'appartenance μA.....56

Figure 4.3 Structure de base du contrôleur à logique floue.....57

Figure 4.4 Convertisseur bidirectionnel 58

Figure 4.5 Boucle de la tension : Interface logique floue (a), Fonctions d'appartenances des entrées (b), Fonctions d'appartenances des sorties (c) 60

Figure 4.6 Boucle du courant : Interface logique floue (a), Fonctions d'appartenances des entrées (b), Fonctions d'appartenances des sorties (c) 60

Figure 4.7 Surfaces des bases de règles : FLC boucle de la tension (a), FLC boucle du courant (b) 61

Figure 4.8 Commande du contrôleur bidirectionnel à base du FLC 62

Figure 4.9 Courbe de la tension Vdc 62

Figure 4.10 Organigramme de gestionnaire de puissance 63

Figure 4.11 Gestionnaire de puissance avec StateFlow 64

Figure 5.1 Schéma bloc du système 68

Figure 5.2 Mode 1 : Formes de courant de charge, batterie, PV et la tension Vdc 70

Figure 5.3 Mode 1 : Les formes des trois courants de charge et courant de la charge fictive 71

Figure 5.4 Mode 2 : Formes de courant de charge, batterie, PV et la tension Vdc 72

Figure 5.5 Mode 2 : Les formes des trois courants de charge et la tension Vdc 72

Figure 5.6 Mode 3 : Formes de courant de charge, batterie, PV et la tension Vdc 73

Figure 5.7 Mode 3 : Les formes des trois courants de charge et la tension Vdc 74

Figure 5.8 Installation expérimentale 75

Figure 5.9 Résultats expérimentaux du système (Mode1) 77

Figure 5.10 Résultats expérimentaux du système (Mode2) 78

Figure 5.11 Résultats expérimentaux du système (Mode 3) 79

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANN	Réseau de neurones artificiels (Artificial neural network)
CC	Courant Continue
CC-CA	Convertisseur continue-alternatif
CC-CC	Convertisseur continue-continue
DSP	dSPACE
FLC	Contrôleur de logique floue (Fuzzy Logic Controller)
GES	Gaz à effet de serre
GMPP	Point de puissance maximale globale (Global maximum power point)
GRÉPCI	Groupe de recherche en électronique de puissance et commande industrielle
IRENA	L'agence internationale pour les énergies renouvelables
MPP	Point de puissance maximale (Maximum power point)
MPPT	Suivi de point de puissance maximale (Maximum power point tracking)
MPPT-ANN	Suivi de point de puissance maximale à base de Réseau de neurones artificiels
PN	Positif-Négatif
P&O	Perturbation et observation
SOC	État de charge (State of charge)
STC	Condition de charge normale (standard test conditions)
TCT	Total-cross-tied

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

C	Capacité du condensateur, F
d	Rapport cyclique
E	Énergie, Wh
I	courant, A
Ir	Irradiation, W/m^2
L	Inductance, H
P	Puissance, W
R	Résistance, Ω
T	Température, °C

INTRODUCTION

L'énergie est un des enjeux cruciaux en matière du développement durable dans le monde entier. En effet, il existe deux types d'énergie à savoir l'énergie fossile et l'énergie verte. Certes, l'énergie fossile est celle qui englobe principalement le charbon, le pétrole, le gaz naturel, etc. Afin de justifier la nécessité de mettre en place de nouveaux modes de production d'énergie et la transition vers les énergies vertes, un des principaux effets néfastes des énergies fossiles doit d'abord être abordé. Les combustibles fossiles sont la cause de troubles majeurs de la santé et la pollution de l'environnement, en vertu de leur usage intensif dans divers secteurs. Par conséquent, une prise de conscience de plus en plus aiguë à développer des solutions énergétiques vertes prend place. Ces solutions sont qualifiées d'un impact environnemental négligeable, voire nul, plus durable, et provenant des énergies renouvelables.

Parmi ces ressources renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque est la plus répandue de nos jours. Elle a connu une croissance exponentielle en raison de la baisse du coût par watt de sorte que les installations photovoltaïques puissent concurrencer les combustibles fossiles sans avoir recours à des subventions. Présentement, plusieurs applications à base de l'énergie photovoltaïque sont en cours, comme le pompage de l'eau, les véhicules solaires, station de charge de batteries, etc. Toutefois, la nature intermittente de cette source demeure un véritable défi. Par ailleurs, l'ombrage partiel est identifié comme étant l'une des principales causes de la réduction de la puissance de sortie d'un système photovoltaïque. Il est provoqué par plusieurs facteurs comme les nuages ou bien une obstruction partielle, etc. Ainsi, lors d'un ombrage partiel, le courant des modules non ombragés crée un point chaud, qui éventuellement détruit ce dernier.

Donc, il s'avère que l'extraction de la puissance maximale d'un système photovoltaïque est une étape incontournable. C'est pour cette raison que de nombreuses méthodes MPPT ont été développées dans la revue de littérature. De ce fait, en considérant les caractéristiques non linéaires des panneaux photovoltaïques, il est nécessaire de concevoir une méthode MPPT efficace qui permette d'obtenir un rendement élevé. En effet, il existe des algorithmes MPPT

conventionnels tels que Perturbation et Observation (P&O), Incrément de conductance (IncCond) et des méthodes intelligentes telles que le contrôle par logique floue et le réseau neuronal artificiel (ANN).

Depuis peu, les topologies MPPT distribuées ont été proposées comme alternative au système d'onduleur central. Comme chaque module est équipé d'un convertisseur avec son propre MPPT, la sortie de chaque peut être contrôlée individuellement. Alors, même en cas d'ombrage, une partie de puissance peut toujours être récupérée car elle n'est pas influencée par les autres modules. Néanmoins, pour un grand système, le nombre élevé de convertisseurs, et le coût peuvent être inacceptables.

Selon IRENA, 60 % de la production supplémentaire d'électricité nécessaire pour atteindre l'accès universel doit provenir de solutions hors réseau. Donc, un système de stockage par batterie pour une installation autonome s'impose. D'une part, la batterie peut être raccordée directement à la charge, mais cette disposition entraîne de nombreuses défaillances. (Almousawi & Aldair, 2022). Par exemple, lorsque la charge varie, la batterie risque d'être endommagée, car de grands courants de surtension se produisent à ce moment-là. D'autre part, une autre méthode qui est l'interfaçage avec le bus CC en utilisant un convertisseur CC-CC bidirectionnel pour atteindre la puissance de décharge ou charge nécessaire à la demande de la charge (Almousawi & Aldair, 2022).

Tout de même, notre étude vise à effectuer un système photovoltaïque autonome, qui à la fois fonctionne à son point de puissance maximale aux conditions d'ombrage partiel et assure une gestion de puissance équitable entre les charges et la batterie. Alors, ce mémoire rapporte l'essentiel de ce travail en cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente le contexte énergétique au Canada, des généralités à propos les chargeurs des voiturettes électriques basés sur des sources d'énergies renouvelables et en particulier l'énergie photovoltaïque. Ensuite, une revue de littératures sur l'effet de l'ombrage partiel et les méthodes à les surmontés à savoir les MPPT et la configuration des panneaux photovoltaïques.

- Le second chapitre aborde les étapes à suivre afin de faire un dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome avec un convertisseur élévateur CC-CC. Des simulations sur Matlab/Simulink seront exposées pour mettre en évidence les conséquences de l'ombrage partiel, la limite de la méthode conventionnelle P&O et l'avantage d'adopter une configuration des PV distribuée.
- Le troisième chapitre présente les notions de base d'un réseau de neurones (l'intelligence artificielle) comme le modèle mathématique et la méthode d'apprentissage des neurones. Ensuite, une méthode de suivi de point de puissance maximale aux conditions d'ombrage partiel sera développée ainsi que des simulations sur Matlab/Simulink pour la validation.
- Le quatrième chapitre porte sur une présentation de la théorie de la logique floue (Fuzzy en anglais) afin de développer une commande du convertisseur abaisseur-élévateur. En plus, le développement d'un gestionnaire de puissance à base de Stateflow qui s'occupe du partage de l'énergie entre les éléments du système.
- Le dernier chapitre est dédié à présenter une application de station de charge des voiturettes du golf électriques. Une simulation ainsi une validation au laboratoire en temps réel sera l'objet de cette section.

Finalement, une conclusion générale ainsi que des recommandations seront présentées.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTERATURE

1.1 Introduction

L'énergie est certes une nécessité pour le progrès d'une société. Néanmoins, elle émet également des émissions de CO2 qui représentent la première cause du changement climatique et de la violation de l'environnement. Au fil des années, de nombreuses études ont été effectuées afin de limiter les facteurs de détérioration de l'environnement. Par conséquent, des alternatives énergétiques plus vertes s'imposent, même au niveau du transport.

Dans ce qui suit, nous présentant en premier lieu une revue de littérature sur les énergies renouvelables au Canada et les chargeurs des voiturettes électriques. Puis, nous donnons un aperçu sur des notions de base sur les cellules photovoltaïques. Ainsi, leurs principes de fonctionnement, modélisation et l'effet de l'ombrage partiel sur ces cellules. Nous présentons, également, les différentes méthodes d'optimisation de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques tels que les algorithmes de maximisation de puissance (MPPT). Et nous finissons par une partie qui décrit les performances de MPPT en mode distribuée.

1.2 Énergies renouvelables au Canada

Le Canada possède des caractéristiques uniques en matière de potentiel d'énergie renouvelable qui le distinguent des autres pays. Tout d'abord, le Canada dispose d'une superficie terrestre abondante, dont dépendent en grande partie les énergies éolienne et solaire. En plus, l'hydroélectricité est la source d'énergie renouvelable la plus mature dont disposent plusieurs provinces canadiennes compte tenu du nombre de projets hydroélectriques, qui sont de grande échelle et comportent des larges réservoirs. En 2020, l'hydroélectricité représentait 81% de la capacité totale de production (figure 1.1) (IRENA).

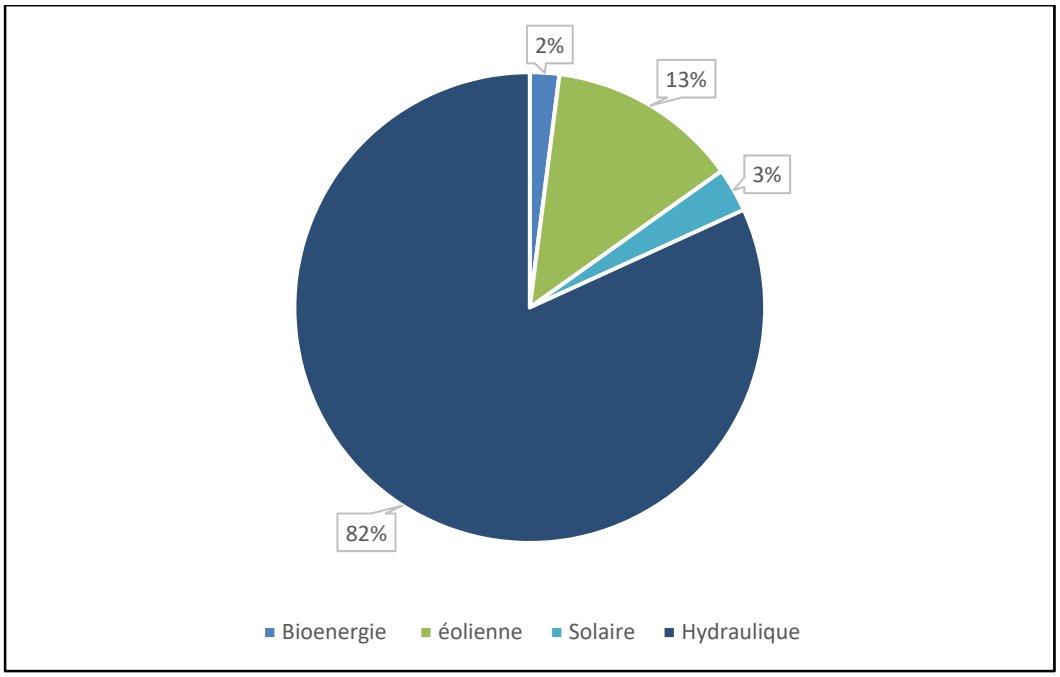

Figure 1.1 Capacité en énergie renouvelable en 2020
Tirée d'IRENA (2020)

Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et atténuer différents aspects de la crise climatique actuelle, le Canada a adopté un engagement visant à atteindre des émissions nettes nulles d'ici 2050 (Adebayo, 2022). Alors, l'amélioration en matière de technologies énergétiques utilisées sera essentielle.

Présentement, l'utilisation de l'énergie solaire au Canada a augmenté au cours des dernières années, même si elle reste relativement faible en termes de pénétration du marché la technologie. Prenant l'exemple du photovoltaïque qui est devenue une forme privilégiée d'énergie renouvelable. L'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) a mis en évidence les statistiques sur la capacité installée de production de l'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque (figure 1.2). La période 2012-2021 a été marquée par une croissance considérable de la puissance installée, qui atteint 3630 mégawatts en 2021.

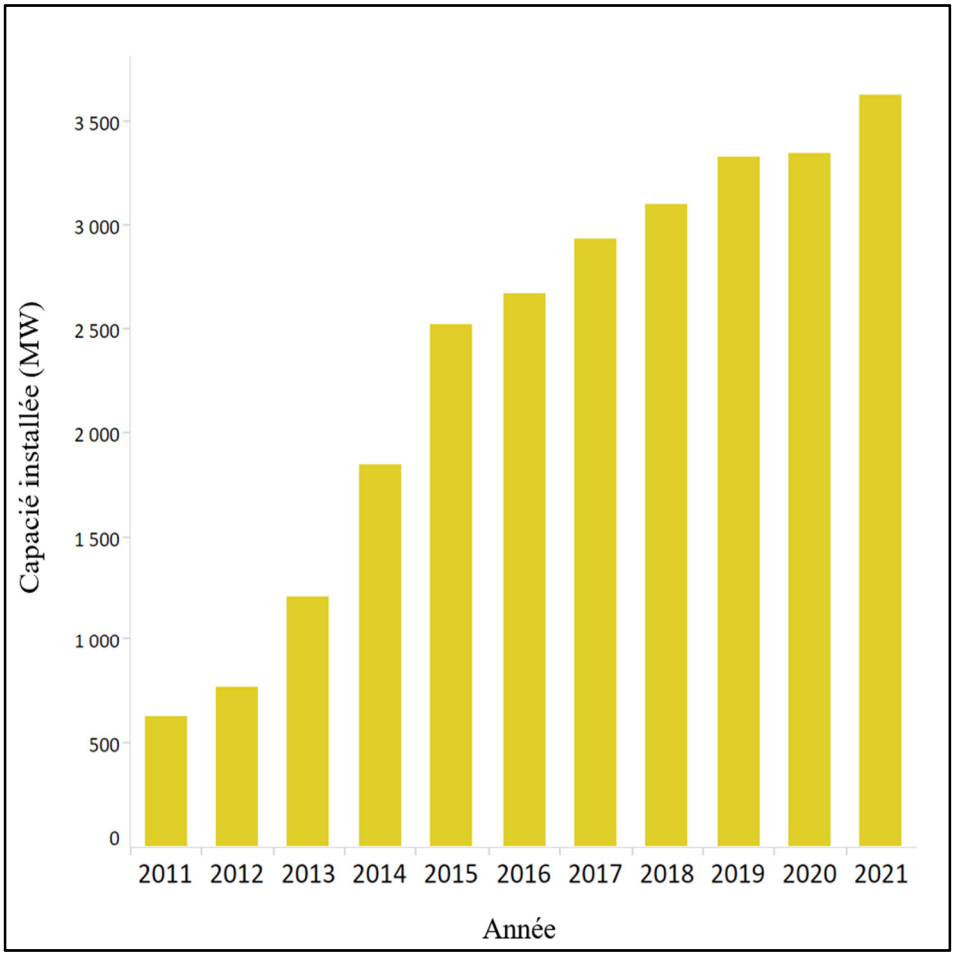

Figure 1.2 Capacité installée en énergie solaire photovoltaïque au Canada
Tirée d'IRENA (2021)

Selon Ressources Naturelles Canada, le potentiel de l'énergie est plus faible dans les régions côtières, en raison d'une couverture nuageuse plus importante, et plus élevée dans les régions centrales. En général, environ la moitié des besoins en électricité résidentielle du Canada pourraient être satisfaits par l'installation de panneaux solaires sur les toits des immeubles résidentiels. La figure 1.3 révèle que la production annuelle potentielle d'électricité à partir du photovoltaïque peut varier d'environ 700-1400 kW h/kW.

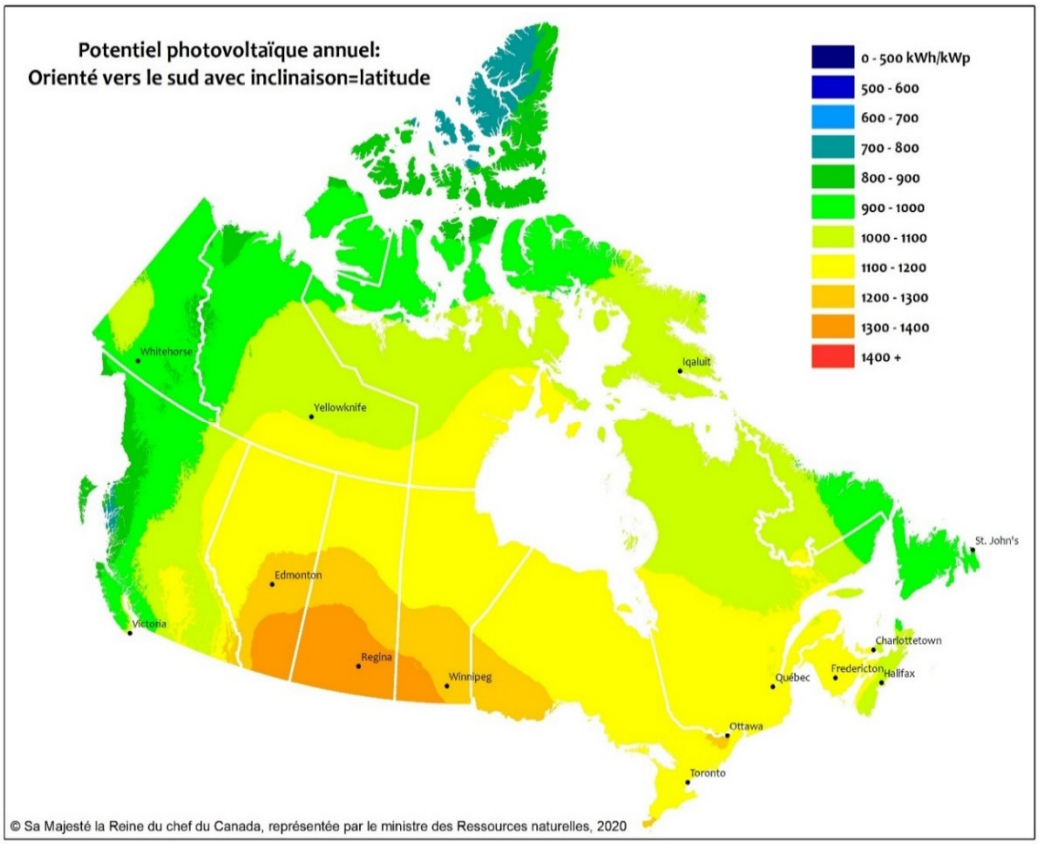

Figure 1.3 Potentiel d'énergie solaire photovoltaïque du Canada
Tirée de Ressources naturelles Canada (2020)

1.3 Chargeurs des voiturettes électriques

Le modèle simple des voitures électriques est très utilisé en raison de sa simplicité, de son faible coût, de la diversité de ses modèles tels que les voiturettes de golf électriques, les scooters électriques et les fauteuils roulants électriques qui sont fréquemment utilisés.

Les voiturettes de golf sont destinées aux trajets de courte distance qui ne nécessitent pas de chargeur grand public. C'est pour cela leurs chargeurs est plus simple que le chargeur d'une voiture électrique routier qui nécessite une alimentation et une communication plus complexes.(Yachiangkam et al., 2022).

1.3.1 Chargeurs électriques basés sur des sources d'énergies renouvelables

Afin de combler le déficit auquel sont confrontés les réseaux électriques locaux (Alkawsi et al., 2021), la forte pénétration des sources d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque, devient un sujet de recherche majeur pour les chargeurs électriques. En plus, l'augmentation de la demande des véhicules électriques de petite taille comme les scooters, les voiturettes de golf et les véhicules utilitaires d'aéroport a besoin d'être soutenue par des sources de recharge naturelles alternatives.

En effet, les travaux de recherche sur les stations de charge alimentées par les énergies renouvelables ont attiré des chercheurs du monde entier. (Chandra Mouli et al., 2019) ont développés un chargeur pouvant être alimenté à la fois par un panneau photovoltaïque et par le réseau triphasé. Également, (Sahoo et al., 2017) ont étudié la modélisation d'un dispositif de charge d'un véhicule électrique reposant sur l'énergie solaire photovoltaïque afin de minimiser les charges sur le réseau par l'intermédiaire d'un schéma véhicule réseau. (Trivedi & Gujar, 2018) présentent une conception, analyse et des résultats expérimentaux d'un chargeur solaire pour voiturette de golf électrique. En plus, l'article de (Muttaqi et al., 2019) fait le point sur le stockage d'énergie, les avantages des véhicules électriques et leurs utilisations, les dispositifs supraconducteurs et les bus magnétiques. Il décrit aussi un nouveau concept de chargement et de déchargement du stockage d'énergie basé sur le SoC. Également, un état de l'art des technologies et orientation des futures recherches sont présentés. L'étude de (Noman et al., 2020) nous décrivent une approche pour les stations de recharge à grande échelle qui considère les éoliennes comme source d'énergie directe. Cette analyse a indiqué que l'utilisation du vent fournit suffisamment de puissance.

En général, l'intégration de chargeurs à source d'énergie renouvelable comme le vent et le soleil sont parmi les solutions qui permettent un déploiement durable. Alors, nous pouvons conclure que ces énergies sont des sources appropriées pour l'infrastructure de recharge des véhicules électriques.

1.3.2 Avantages et inconvénients des chargeurs électriques basés sur l'énergie renouvelable

La dégradation de la qualité de l'air, les problèmes de réchauffement climatique, et l'épuisement des combustibles fossiles sont des problèmes sérieux. Le secteur des transports est l'un des principaux responsables de ces problèmes.

Dans le but d'améliorer le modèle de transport, il est nécessaire de passer le plus tôt possible à des sources d'énergie propres et renouvelables. Les stations de recharge traditionnelles affectent la stabilité du réseau avec des problèmes tels que les harmoniques et les fluctuations. En revanche, l'intégration des chargeurs électriques basée sur les sources d'énergies renouvelables présente plusieurs avantages, tels qu'une efficacité élevée, un faible coût du système et une disposition simple. En plus, les chargeurs électriques nécessitent moins de niveaux de conversion d'énergie par rapport ceux des systèmes à courant alternatif.
Les bornes de recharge basées sur les énergies renouvelables permettent de recharger une voiturette électrique de manière efficace tout en minimisant l'utilisation de combustibles fossiles. Alors, en tant qu'une solution prometteuse, elle permet de réduire les émissions de carbone polluantes (Sayed et al., 2019). Cependant, certains problèmes demeurent les stations de charge à savoir le coût élevé des batteries et leurs faibles nombres de cycles de vie, le manque de systèmes de charge rapide appropriés. D'autre part, du point de vue des sources d'énergie, le véhicule électrique n'a pas atteint l'émission zéro de polluants (Khalid et al., 2019). Toutefois, l'utilisation de batteries de stockage pour supporter le processus de charge pendant la fluctuation des sources présente un impact négatif sur l'environnement. Selon l'étude (Alkawsi et al., 2021), la demande de la production de batteries d'ici jusqu'a 2030 représente 4 % de la production mondiale annuelle de nickel. Alors, la demande de ce dernier atteindrait 34 % de la production minière actuelle en 2030. Par conséquent, l'environnement peut être affecté négativement par ses quantités excessives. C'est la raison pour lequel le nickel est strictement contrôlé et soumis à des évaluations rigoureuses. La limitation de l'énergie solaire pour charger des véhicules électriques de grande échelle réduira les chances de mettre en œuvre les stations de charge solaires.

1.3.3 Classifications des chargeurs électriques d'une voiturette électrique

Les chargeurs de batterie de voiture électrique peuvent être classés en deux catégories : « on-bord » et « off-bord » avec un flux d'énergie unidirectionnel ou bidirectionnel. Les chargeurs on-bord sont intégrés avec des batteries de stockage, mais, en raison des contraintes de poids d'espace et de coût, ces types de chargeurs sont limités. D'autre part, les chargeurs off-bord n'ont pas des limitations quant à leurs tailles et de poids, car ils ne font pas partie de la voiture et ils sont installés dans des stationnements publics tels que les parcs de golf, centres commerciaux et des universités(Yilmaz & Krein, 2013).

Les systèmes de chargeurs off-bord peuvent être à conduction ou à induction. Les infrastructures de recharge par conduction sont bien développées. Elles font appel à un contact direct entre deux métaux pour transférer l'énergie au véhicule. Cette méthode de charge est très efficace et robuste. En revanche, les infrastructures de charge inductive sont encore sujettes d'actualité pour les chercheurs. Elles utilisent le principe d'induction mutuelle pour transférer l'énergie entre la source et la voiture électrique. Également elles ne requièrent aucun contact entre les matériaux, mais elles sont réputées par une faible efficacité (Khalid et al., 2019).

1.4 Cellules photovoltaïques

Afin de déterminer des propriétés électriques, les cellules photovoltaïques sont testées en laboratoire dans des conditions appelées STC « conditions de test normal » (Abraham et al., 2021):

- Irradiation Ir: 1 000 W/m²
- Température de cellule T : 25 °C
- Coefficient Air Masse : 1.5

1.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques assurent la conversion directe de l'énergie des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur tel que le silicium. Cependant, à l'état pur le semi-conducteur ne conduit pas bien le courant.

Afin d'améliorer la conductivité, le dopage des cristaux de silicium est indispensable. Cette phase se résume à leur incorporer d'autres atomes. Alors, on distingue deux types de silicium. La face exposée au soleil est dopée avec des atomes de phosphore, qui possèdent plus d'électrons, et dite dopée de type N. L'autre face est dopée par des atomes de bore qui possèdent moins d'électrons que le silicium. D'où la nomenclature type P. La région délimitant ces deux zones constitue une jonction PN. En parcourant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium, créant ainsi des trous. Les électrons vont migrer vers la zone N, tandis que les trous se dirigent vers la zone P. D'où la naissance d'une différence de potentiel et d'un courant électrique qui circule. La figure 1.4 montre une coupe transversale d'une cellule photovoltaïque.

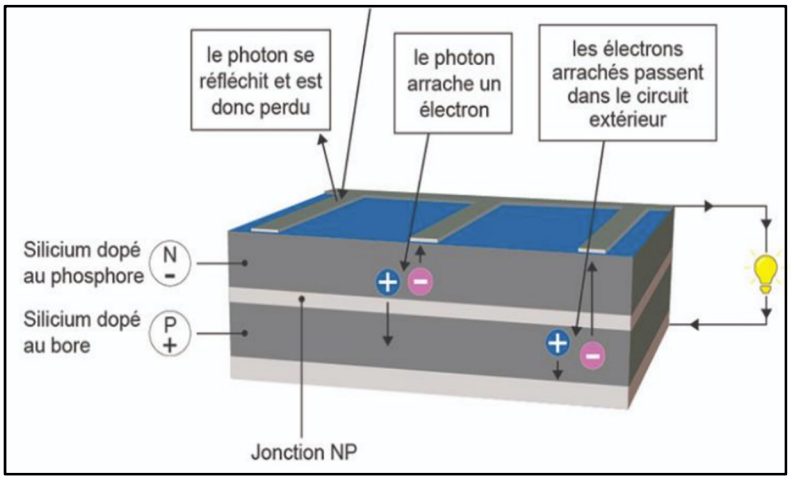

Figure 1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1.4.2 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Théoriquement, le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale est une source de courant en parallèle avec une ou deux diodes. Ainsi, il a été développé deux modélisations des cellules photovoltaïques : le modèle à diode simple et le modèle à deux diodes. Par ailleurs, ces dernières doivent inclure une résistance en série R_s et également une résistance en parallèle R_p. Il est jugé que R_p est trop grande comparativement à celle en série, et son effet peut-être négligé afin de simplifier l'analyse.

En ce qui concerne le modèle à deux diodes, il est difficile de mettre en évidence les caractéristiques du PV à cause de la complexité de l'implantation(Hoarca, 2021).Les schémas électriques de la cellule photovoltaïque sont représentés dans les figures 1.5 et 1.6.

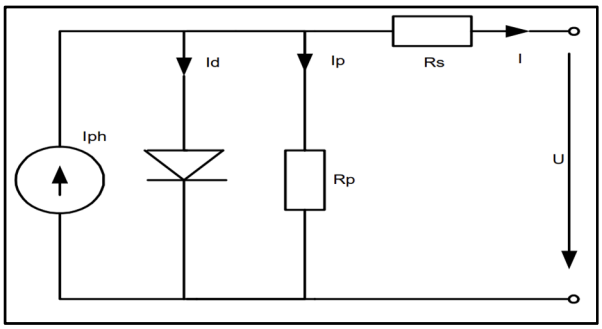

Figure 1.5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode

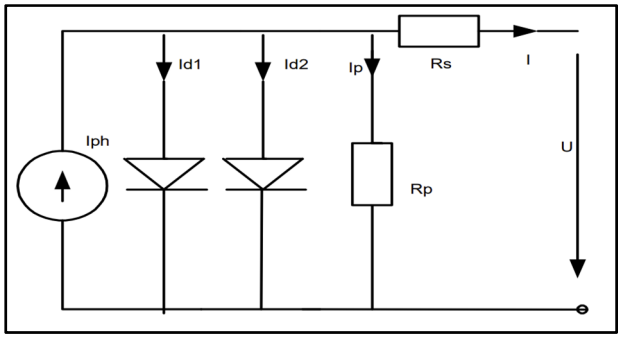

Figure 1.6 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

En se basant sur le modèle à diode simple, le courant de sortie de la cellule photovoltaïque I_{pv} est égal à la différence entre le courant produit par les photons (I_{ph}) et le courant de diode (I_d). Dans ce cas, la cellule PV peut être modélisée mathématiquement comme indiqué dans l'équation 1.1 (Dey et al., 2016)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1\right] - \frac{V}{R_p} \tag{1.1}$$

Avec :

I_s : le courant de saturation de la diode

V : la tension de la diode

$$V = V_{pv} + I_{pv} R_s \tag{1.2}$$

V_T : la tension thermique

$$V_T = \frac{KT}{q} \tag{1.3}$$

K : la constante de Boltzmann

T : la température de fonctionnement

Le courant produit par les photons est donné par l'équation suivante

$$I_{ph} = \left[\mu_{SC}\left(T_c - T_{ref}\right) + I_{sc}\right] \times G_{pu} \tag{1.4}$$

Avec :

$$G_{pu} = \frac{G_c}{G_{ref}} \tag{1.5}$$

μ_{SC} : le coefficient de court-circuit

T_c et T_{ref} : les températures de fonctionnement et de référence respectivement

I_{sc} : le courant de court-circuit

G_c et G_{ref} : l'éclairement de fonctionnement et de référence respectivement

La résistance branchée parallèlement est inversement proportionnelle au courant de fuite. Alors, en vue de simplifier l'analyse, on suppose que la cellule photovoltaïque est idéale. En appliquant cette condition, il n'y a plus de perte en série et également pas de courant de fuite ($R_s = 0$ et $R_p = \infty$).

En conclusion, nous tirons l'équation simplifiée caractérisant le courant d'une cellule PV qui est donnée par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_T}\right) - 1\right] \tag{1.6}$$

1.4.3 Effet de l'éclairement et la température sur une cellule photovoltaïque

La puissance produite par un panneau photovoltaïque est principalement influencée par la variation de l'éclairement et de la température. Ainsi, ces deux derniers présentent deux facteurs importants pour l'efficacité d'une cellule photovoltaïque (Tripathi et al., 2021). Cela se traduit notamment par la variation de la tension en circuit ouvert (V_{OC}) et le courant de court-circuit (I_{SC}).

La simulation des panneaux photovoltaïque nous amène à avoir les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sous différents éclairements et températures. En premier lieu, en faisant varier la température avec un ensoleillement constant, on observe une diminution de la tension ainsi que la puissance générée par les cellules photovoltaïques. Le courant est assez stable sous un même éclairement comme le montre la figure 1.7.

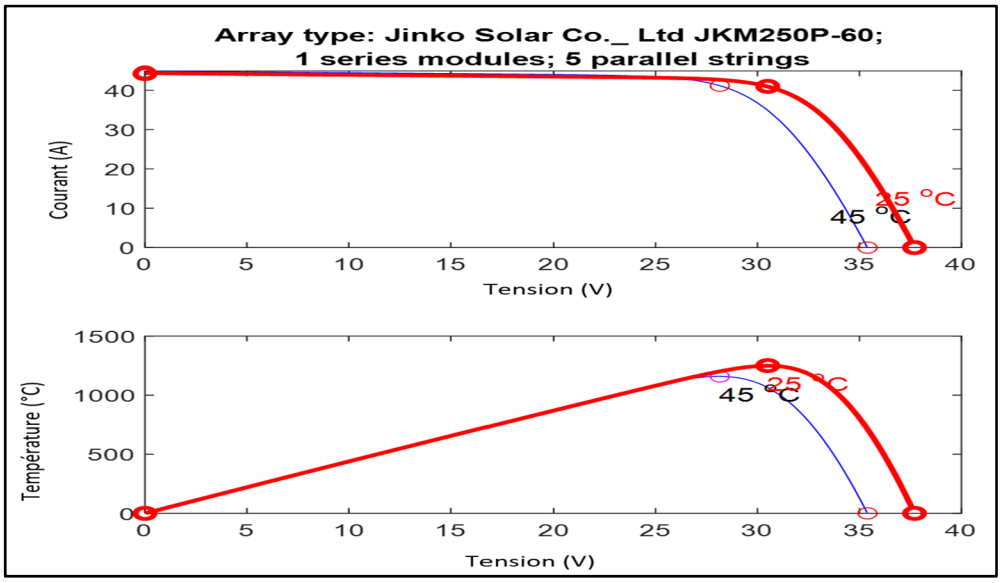

Figure 1.7 Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule photovoltaïque sous différentes températures

En second lieu, pour une température constante, le courant varie largement en fonction de l'irradiation et également pour la puissance maximale générée alors que la variation de la tension est assez faible (figure 1.8).

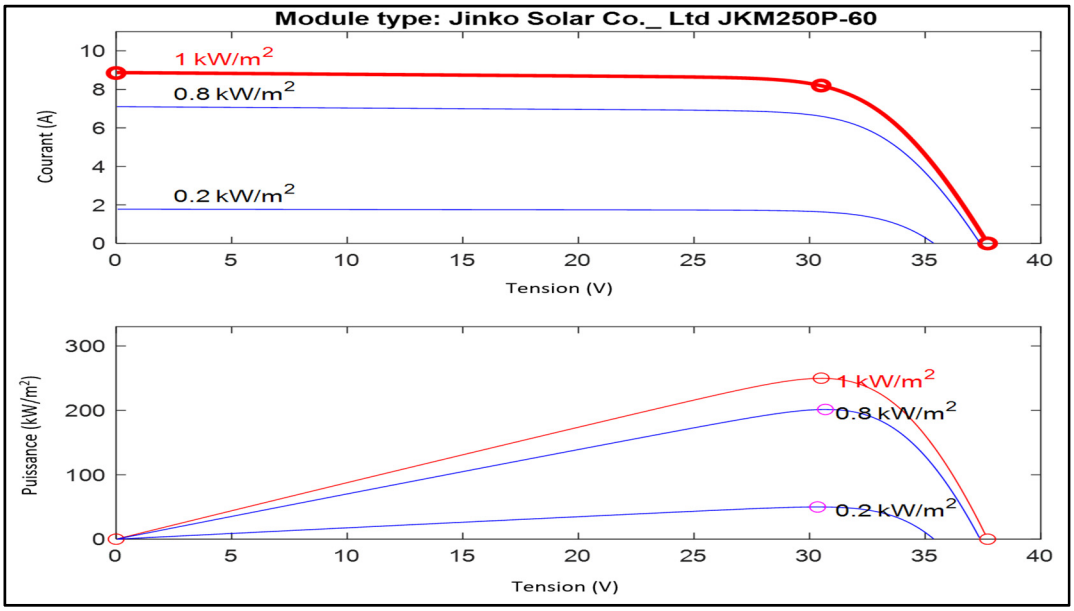

Figure 1.8 Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule photovoltaïque sous différentes irradiations

1.4.4 Protection d’une cellule photovoltaïque

Étant donné que les installations photovoltaïques enregistrent une croissance rapide sur le marché de l'énergie, la sécurité de fonctionnement des systèmes PV a attiré une grande attention. En effet, les cellules photovoltaïques sont connectées en série et/ou en parallèle afin de générer des tensions, des courants et des niveaux de puissance plus élevés (Munna Kumar et al., 2019). Ainsi, des conditions de fonctionnement inadaptées au sein d'une chaîne entraînent des niveaux de courant différents et violent ainsi le principe des sources connectées en série. Cependant, l'un des défis les plus importants à surmonter et qui limite la fiabilité est celui des points chauds où une cellule s'échauffe considérablement et dégrade les performances du panneau. Ils sont susceptibles de se produire aux endroits où la cellule photovoltaïque endommagée ou qui reçoit une irradiation partielle (Winston, 2019).

Pour pallier ce problème, les fabricants ont intégré 2 à 6 diodes de dérivation en parallèle par module pour protéger les cellules ombragées des cellules entièrement opérationnelles et pour fournir un chemin électrique alternatif (Ayache et al., 2020). Ce procédé permet de limiter la tension de polarisation inverse générée aux bornes d'une cellule ombragée et, par conséquent, de réduire la puissance électrique qui peut être dissipée par la cellule (Laamami et al., 2020).
Des solutions de commutation active également ont été proposées, (Kim & Krein, 2015), et qui ont été commercialisées sous le nom de diodes de dérivation intelligentes. Ces diodes permettent la réduction de la tension sur une chaine photovoltaïque pendant le contournement et la perte de puissance qui en résulte plus qu’une diode de dérivation conventionnelle.

En plus, un dispositif souvent utilisé est la diode de blocage. L'objectif de cette diode est d'empêcher le retour du courant de la charge vers le système de panneaux photovoltaïques (Umana & Meliopoulos, 2016). La figure 1.9 illustre une configuration standard avec des diodes de dérivation et des diodes de blocage (Kreft et al., 2021).

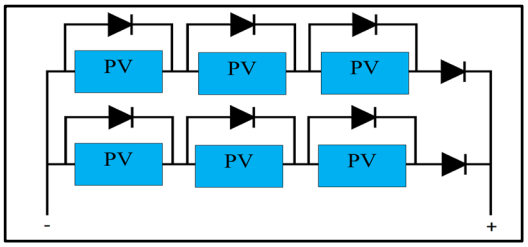

Figure 1.9 Configuration avec des diodes de dérivation et des diodes de blocage

1.5 Effet de l'ombrage partiel sur une cellule photovoltaïque

Les performances du système photovoltaïque dépendent fortement des conditions de fonctionnement, notamment de l'irradiation solaire. L'ensemble ou certaines parties du système peuvent être ombragés par des nuages, des grands arbres et des bâtiments. D'ailleurs, l'ombrage partiel a été considéré comme l'une des principales raisons qui contribuent à la réduction de la puissance de sortie,(Salam & Ramli, 2012), par conséquent, la réduction du rendement énergétique. En effet, une cellule complètement ombragée peut réduire le rendement d'un module solaire de 40 à 95 %(Atul Sharma et al., 2018). Étant donné que le courant qui circule à travers des modules en série doit être constant, alors les modules ombragés sont imposés de fonctionner avec une tension de polarisation inverse pour fournir ce même courant (Seyedmahmoudian et al., 2016) (figure 1.10).

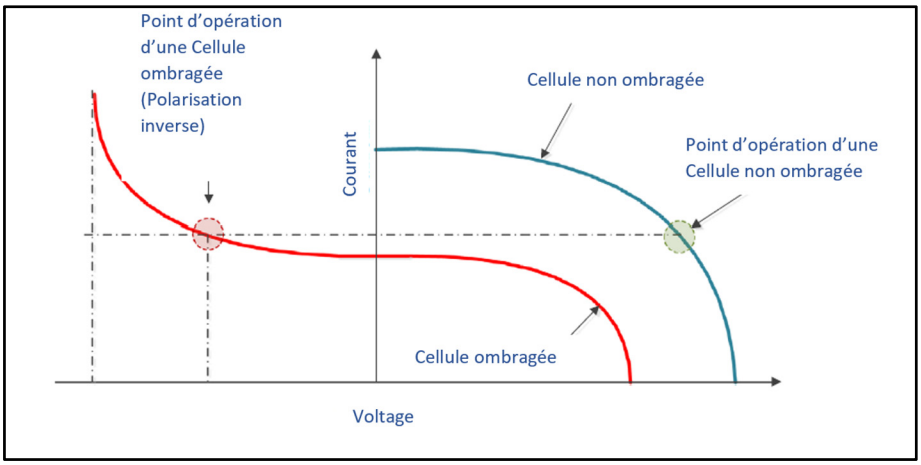

Figure 1.10 Caractéristiques I-V des cellules PV dans une région à polarisation inverse
Tirée de Seyedmahmoudian et al. (2016, p. 437)

Dans des conditions d'irradiation uniforme, les caractéristiques électriques telles que les caractéristiques I-V et P-V des panneaux n'ont qu'un unique point de puissance maximale. Cependant, dans des conditions d'ombrage partiel, la courbe des caractéristiques P-V présente des points de puissance maximaux (figure 1.11) multiples due à la présence des diodes de dérivation.

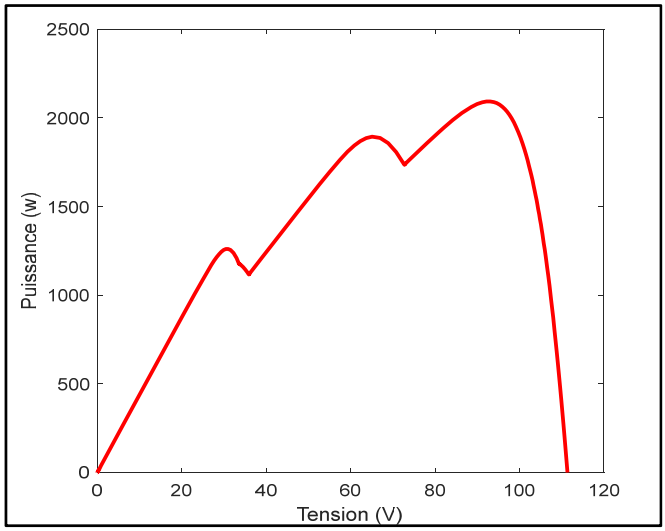

Figure 1.11 Caractéristiques puissance-tension d'un système PV sous l'ombrage partiel

1.6 Modélisation des convertisseurs CC-CC

Les convertisseurs CC-CC permettent d'obtenir à partir d'une tension continue un autre niveau de tension continue. Le convertisseur est une partie importante du système solaire photovoltaïque de nos jours. Il agit comme une unité d'adaptation d'impédance entre la charge et le panneau PV. Les Buck, boost, buck-boost, cuk, SEPIC et zeta sont souvent utilisés avec le contrôleur MPPT pour la puissance de crête (Chewale et al., 2018).

1) Hacheur abaisseur (Buck)

Ce type de convertisseur permet d'avoir une tension de sortie inférieure à la tension d'entrée. La figure 1.12 montre le circuit d'un hacheur abaisseur. Il est notamment utilisé lorsque la tension des panneaux solaires est supérieure à celle de la batterie. Ce convertisseur fournit un courant de sortie continu d'entrée continue et nécessite un grand condensateur afin de lisser le courant d'entrée discontinu (Shweta Dahale et al., 2017).

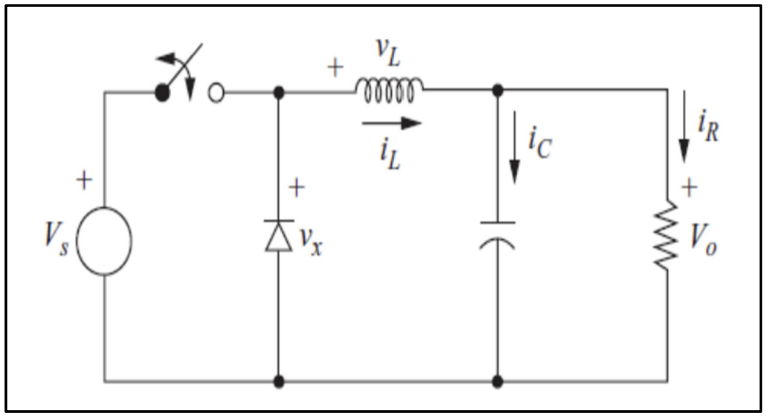

Figure 1.12 Circuit d'un convertisseur abaisseur

2) Hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur élévateur est composé d'une inductance et d'un condensateur (figure 1.13). Il permet de générer une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée. Ce convertisseur a un courant d'entrée continu et un courant de sortie discontinu ou continu. Il ne peut pas refléter des impédances supérieures à l'impédance de charge. Par conséquent, il n'atteint pas des valeurs supérieures au V_{oc} d'un panneau solaire (G & Singh, 2017). Ce convertisseur nécessite une valeur plus élevée d'inductance en comparaison avec un convertisseur abaisseur. En plus, il a un coût d'implémentation faible (Shweta Dahale et al., 2017).

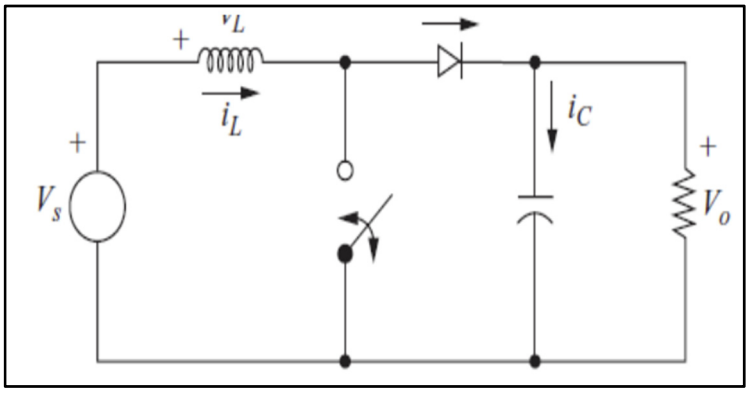

Figure 1.13 Circuit d'un convertisseur élévateur

3) Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)

La tension de sortie de convertisseur abaisseur-élévateur est peut-être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. Il fonctionne comme un convertisseur bidirectionnel également. La figure 1.14 montre le circuit de celui-ci. Cette configuration est obtenue en connectant un convertisseur abaisseur en série avec un convertisseur élévateur avec le même rapport cyclique D pour les commutateurs des deux convertisseurs (Taghvaee et al., 2013).

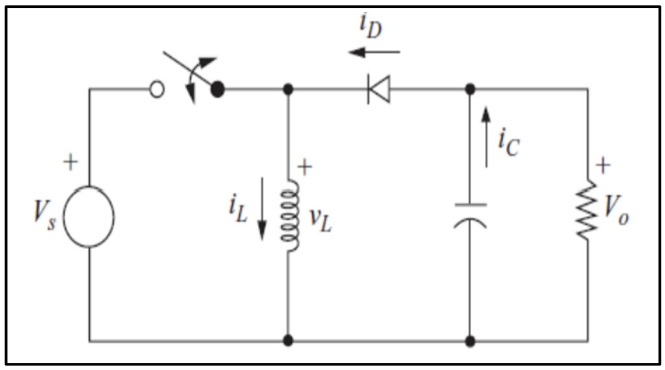

Figure 1.14 Circuit d'un convertisseur abaisseur-élévateur

4) Convertisseur SEPIC

Le convertisseur SEPIC permet de convertir une tension continue en une autre tension continue, de valeur différente. Il peut fonctionner comme un élévateur ou un abaisseur de tension, mais sans inversion de polarité. La figure 1.15 présente le circuit d'un hacheur SEPIC.

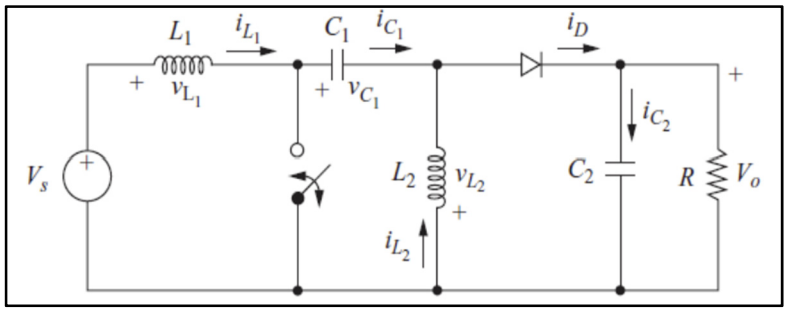

Figure 1.15 Circuit d'un convertisseur SEPIC

1.7 Différentes techniques de suivi du point de puissance maximale et classification

Dans les systèmes photovoltaïques, la puissance de sortie atteint son maximum en un point appelé « Point de Puissance Maximale (MPP) », et sa position change en fonction du niveau d'irradiation et de la température. Afin de maximiser cette puissance, des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisées (Gupta & Saxena, 2016). Un grand nombre de méthodes MPPT sont disponibles dans la littérature. Chaque méthode possède ses propres spécifications et est destinée à un système précis. Ces méthodes peuvent être classées en trois groupes : méthodes conventionnelles, méthodes intelligentes et méthodes hybrides (Bollipo et al., 2021).

Les méthodes classiques (ou conventionnelles) sont largement répandues. Leurs deux avantages principaux consistent en une simplicité de mise en œuvre et un coût d'implémentation faible. Leur inconvénient majeur est l'inefficacité en cas d'irradiation non-uniforme. Ces méthodes sont également classées en deux catégories : indirectes et directes. En effet, les valeurs physiques du PV (Vpv , Ipv , Ppv , Voc, Isc) sont utilisées pour le contrôle au niveau des méthodes indirectes. Parmi ces dernières, on cite Curve Fitting, Pilot Cell, Constant Voltage et Look-up-table. Ensuite, les méthodes directes qui utilisent des valeurs instantanées du tension et courant. Elles comprennent les méthodes suivantes : Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (InC), Hill Climbing (HC), Beta, Ripple Correlation Control, One Cycle Control, State Space (Ali et al., 2020).

Les méthodes intelligentes sont relativement plus complexes. Cependant, elles sont plus efficaces que celle d'une méthode conventionnelle. Elles sont basées sur la logique floue (FLC), le réseau neuronal artificiel (ANN) et le contrôle en mode glissant. Ces techniques sont destinées pour les conditions météorologiques dynamiques. L'avantage du FLC qu'elle n'exige pas un modèle précis du système, mais l'efficacité de cet algorithme est fortement influencée par l'expertise du concepteur. L'ANN nécessite une base de données pour entraîner les neurones (Motahhir et al., 2020).

Les méthodes hybrides sont basées sur l'idée d'une optimisation qui résulte de la combinaison des MPPT telles que classique-intelligent ou classique-classique. Elles sont supposées de suivre plus efficacement la MPP. Par conséquent, le processus de recherche est divisé en deux étapes : méthode pour identifier la région du MPP et la deuxième méthode pour le localiser.(Mao et al., 2020). D'ailleurs, des nombreuses méthodes sont mentionnées dans la littérature. (Al-Majidi et al., 2018) propose une technique basée sur FLC et P&O. Cette commande incorpore les avantages des deux méthodes combinées pour tenir compte des changements lents et rapides de l'irradiance solaire et le temps de traitement réduit pour la FLC avec un rendement supérieur à 99.6%. (Alajmi et al., 2011), également, a proposé une technique basée sur la FLC et HC pour un système PV autonome. Cette méthode est capable d'exploiter les avantages de HC et élimine ses inconvénients.

1.8 Configuration des systèmes solaires photovoltaïques

Bien que les systèmes photovoltaïques soient largement utilisés, ils sont souvent affectés par une réduction de la puissance de sortie. Ainsi, le choix d'une configuration PV optimale est crucial. Diverses configurations existantes des systèmes solaires PV ont été proposées dans la littérature et classées en deux catégories(Bonthagorla & Mikkili, 2022) :

1) Configurations conventionnelles (Charles Tze Kang Kho et al., 2017) :

- Série (S) et parallèle (P) (figure 1.16(a) et figure 1.16(b)): Il s'agit des configurations les plus simples. L'un des avantages de ces deux connexions est leur simplicité.
- Série-Parallèle (SP) (figure 1.16(c)): L'une des configurations les plus connues et basique des modules photovoltaïques. Ces derniers sont connectés en série pour augmenter le niveau de tension et en parallèle pour augmenter le niveau de courant.
- Total-Cross-Tied (TCT) (figure 1.16(d)) : C'est la dérivée de la configuration SP en connectant en parallèle tous les panneaux photovoltaïques sur la même ligne des différentes chaînes, formant ainsi une connexion symétrique de type matrice. La somme des courants aux différents nœuds et les tensions en parallèle sont égales.
- Bridge-Linked (BL) : Cette configuration est constituée des plusieurs ponts. La figure 1.16(e) montre deux modules du pont sont connectés en série, puis en parallèle. BL a une

durée de vie opérationnelle légèrement plus longue et est moins sensible aux pertes Mismatch par rapport au TCT. D'ailleurs, les résultats dans la littérature ont démontré que BL est capable de générer une puissance maximale plus importante dans un cas d'irradiation uniforme, comparé à SP et TCT.

- Honey-Comb (HC) (figure 1.16(f)) : C'est la configuration modifiée du BL et la plus performante que la TCT lorsque le réseau est connecté de manière asymétrique.

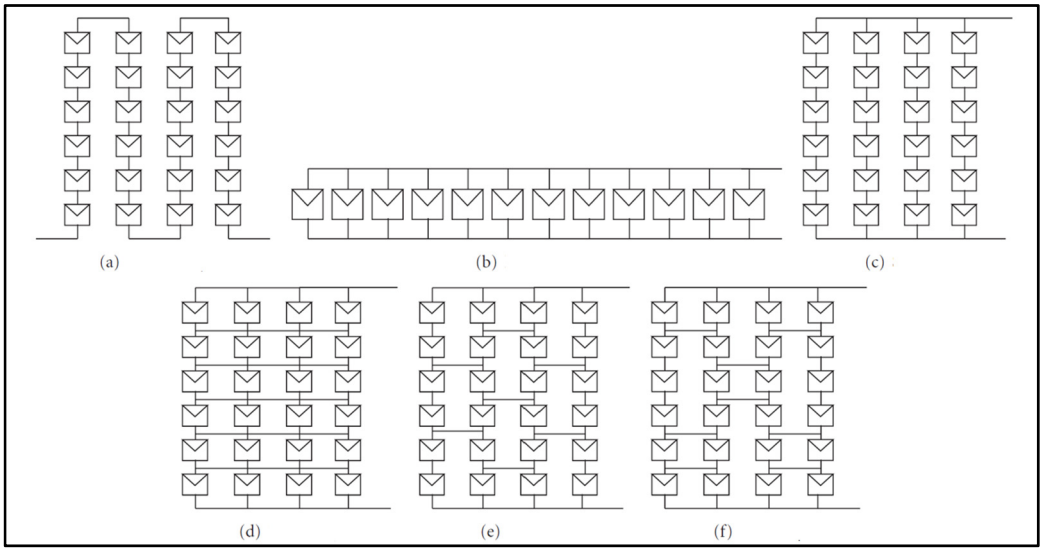

Figure 1.16 Configuration des systèmes solaires photovoltaïques
Tirée de Ramaprabha et Mathur (2012, p. 2)

2) Configurations Hybrides

D'après la littérature, elles présentent une combinaison des configurations conventionnelles mentionnées ci-dessus telles que : SP-TCT, BL-TCT, HC-TCT, BL-HC. Les chercheurs (Mehiri et al., 2017), (Yadav et al., 2016) ont analysée les performances de quelques configurations hybrides et ils ont conclu que la configuration TCT est la plus performante.

1.9 Performance des MPPT distribuées

Afin d'améliorer la fiabilité et le rendement énergétique des systèmes PV, différentes topologies des systèmes PV sont étudiées dans la littérature.

En fonction de la disposition entre les panneaux, les convertisseurs CC-CC et les onduleurs solaires, les configurations des MPPT peuvent être classés en cinq catégories (Olalla et al., 2017). Les sous-réseaux sont faits à l'aide des boîtiers de combinaison. En effet, les systèmes PV deviennent plus complexes à mesure que la taille de l'installation augmente. Alors, le succès de ces systèmes à grande échelle dépend de la capacité de l'installation PV à fournir un rendement énergétique élevé et une plus grande disponibilité du système. (Elasser et al., 2010)

Pour la première configuration, les onduleurs centraux (figure 1.17.a) sont couramment les plus adoptés. Néanmoins, l'utilisation d'un seul système de suivi du point de puissance maximale et la dépendance d'un seul onduleur pour une grande installation risquent d'un manque de fiabilité. La deuxième configuration est celle des onduleurs de chaine (string) (figure 1.17.b) qui sont affectés à chacun des strings. Cette caractéristique permet un rendement plus élevé que la première configuration. La troisième catégorie est celle des onduleurs multi-strings (figure 1.17.c). Celle-ci est composée d'un seul convertisseur CC-CA commun à toutes les chaines et de convertisseurs CC-CC pour chacune des chaines. L'efficacité de cette configuration est que le MPPT est spécifique pour chaque chaîne. La quatrième configuration est composée des micro-onduleurs (figure 1.17d) qui sont connectés à un module photovoltaïque. Le MPPT est spécifique au panneau, ce qui augmente considérablement l'efficacité et la compatibilité. En revanche, le coût élevé d'un seul onduleur pour un panneau seulement représente un inconvénient important. Pour la dernière configuration (figure 1.17.e), il s'agit d'une amélioration de la configuration précédente. Chaque convertisseur CC-CC est directement connecté en série au module photovoltaïque, formant ainsi une chaine, qui à son tour, est connectée à un onduleur de chaîne.

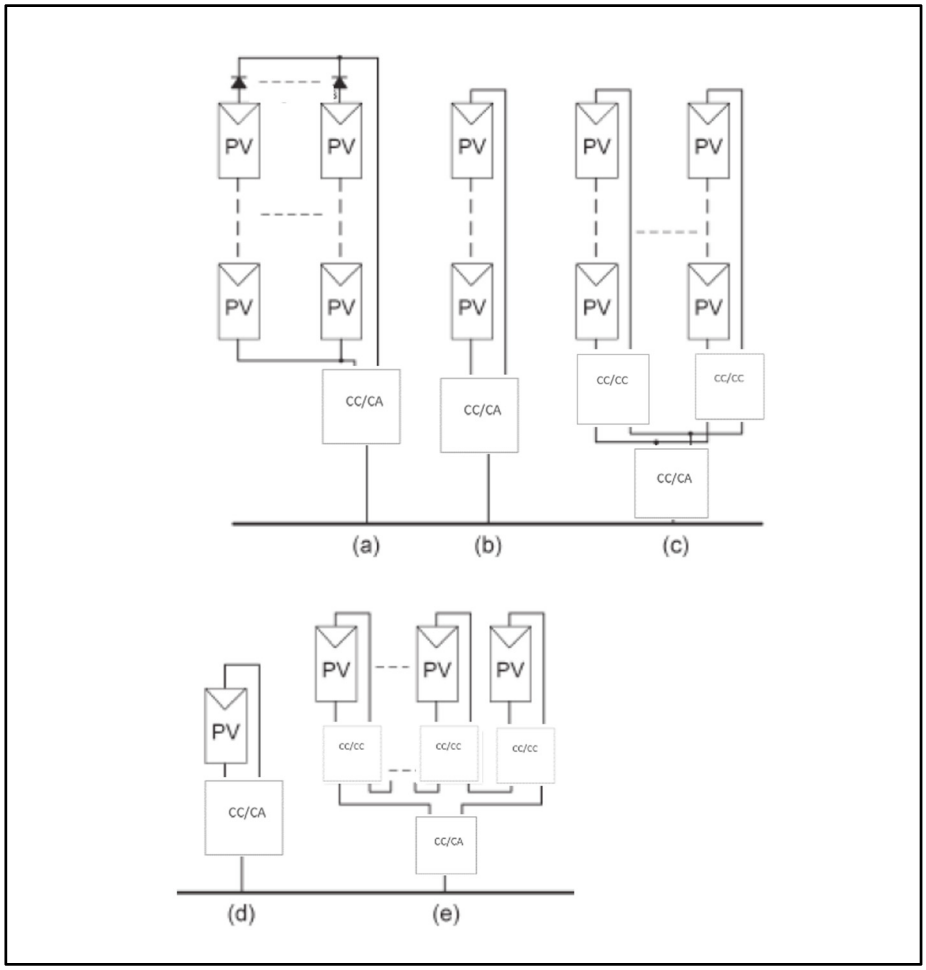

Figure 1.17 Systèmes MPPT distribuée: onduleur central (a), onduleur de chaine (b), onduleurs multi-strings (c), micro-onduleurs (d), convertisseur en cascade(e)
Tirée de Madhura et Subhash (2018, p. 217)

1.10 Problématique

Les effets néfastes des énergies fossiles, leur déplétion rapide et les prix exagérés ne satisfont pas la demande des consommateurs. Afin de réaliser la « neutralité en carbone » en premier, une orientation planétaire vers les énergies renouvelables s'impose. L'énergie photovoltaïque semble être une source de production d'électricité adéquate en raison de son abondance. Néanmoins, ce type d'énergie est soumis à des défis, principalement l'ombrage partiel. Alors, dans le but d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique, les problématiques suivants doivent être traitées correctement.

1.10.1 Extraction de la puissance maximale aux conditions d'ombrage partiel

Durant l'ombrage partiel, les caractéristiques I-V et P-V d'un système photovoltaïque présente de multiples pics de puissance. Plusieurs chercheurs ont proposé des algorithmes qui peuvent identifier le point maximal parmi ces pics. Les méthodes conventionnelles comme P&O sont caractérisées par l'inaptitude à le détecter. De ce fait, il est très important de développer des autres méthodes plus sophistiquées.

1.10.2 Régulation de la tension du bus CC

Pour un système autonome, le système PV, les charges et la batterie sont connectés à travers un bus CC, alors, la régulation de la tension de ce bus est très essentielle afin d'avoir un bon fonctionnement du système au complet.

1.10.3 Gestion de flux de la puissance

Afin d'avoir un système stable avec un minimum de perte d'énergie et qui répond aux besoins de la demande, une bonne supervision et stratégie de gestion de puissance doit être installée, tout en garantissant un équilibre entre l'énergie PV produite et la charge demandée.

1.11 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'assurer le meilleur fonctionnement possible et le plus fiable d'un système photovoltaïque autonome grâce aux commandes des convertisseurs et le contrôle propre des échanges de puissance. Ce système est composé des panneaux PV, deux convertisseurs CC-CC, batterie et charges. Afin d'accomplir cet objectif principal et surmonter les problématiques mentionnées, nous pouvons définir des sous-objectifs suivants :

- L'évaluation des performances du système photovoltaïque aux conditions d'ombrage partiel.
- La maximisation de la puissance produite de l'énergie solaire photovoltaïque à l'aide d'un réseau de neurones.

- La gestion de flux de puissance entre les éléments du système.
- La validation des méthodes développées en temps réel.

1.12 Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs mentionnés précédemment, nous suivrons la méthodologie suivante. Tout d'abord, nous effectuerons une revue de la littérature afin de définir les notions de base, les éléments importants d'un système et les méthodes d'amélioration déjà développées pour ce dernier. Ensuite, nous présenterons des étapes régulières pour le dimensionnement des éléments de notre étude. Nous exposons, également, les performances de ce système dans deux configurations différentes : centralisée et décentralisée (distribuée) à l'aide de l'outil MATLAB/Simulink. Après, nous soulignerons la limite de la méthode conventionnelle perturbation et observation pour l'extraction de la puissance générée par les modules PV sous un ombrage partiel. Étant donné cet inconvénient, nous réaliserons une nouvelle méthode MPPT basée sur les réseaux de neurones et nous la testerons sous différents cas d'ombrage partiel. Par la suite, une technique de contrôle du convertisseur de puissance abaisseur-élévateur à base de la logique floue sera développée afin de régler la tension sur le bus CC, après avoir définir les modes de fonctionnement en se basant sur l'état de charge de la batterie, un gestionnaire de puissance entre les éléments du système sera effectué à l'aide de stateflow. Une application de station de charge des voiturettes de golf électriques sera l'objet de la dernière étape. Ainsi qu'une validation en temps réel au laboratoire.

1.13 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré en première partie à la présentation des énergies renouvelables au Canada ainsi les chargeurs des voiturettes électriques basés sur les sources d'énergies vertes. Ensuite, nous avons présenté les cellules photovoltaïques à savoir leur modélisation, leur principe de fonctionnement et les méthodes de protection de ces cellules. Par ailleurs, une attention particulière a également été faite à propos l'effet de l'ombrage partiel sur les panneaux solaires photovoltaïques. Ce qui nous a amenés à présenter des méthodes afin d'extraire le maximum de la puissance solaire même aux conditions d'ombrage partiel. Par la

suite, nous avons donné un aperçu sur les différentes techniques de suivi de puissance maximale, la configuration des systèmes photovoltaïques ainsi que les MPPT distribuées.

Une étude de dimensionnement d'un système photovoltaïque sera l'objectif du chapitre prochain.

CHAPITRE 2

DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ET EFFET DE L'OMBRAGE PARTIEL

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons une démarche de dimensionnement d'un système PV. Afin de réaliser un système efficace, l'étude de la performance et la limite d'une technique de suivi du point de puissance maximale dans l'ombrage partiel se révèle essentielle dans ce chapitre. En effet, l'MPPT Perturbation et Observation est une méthode simple et moins coûteuse. Mais, selon la littérature, elle est connue de l'incapacité à suivre le point de puissance maximale dans des conditions d'ombrage partiel. En plus, nous validerons la performance des MPPT distribuée (configuration décentralisée) et la configuration des panneaux photovoltaïque (TCT).

2.2 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

Nous désirons d'installer un système photovoltaïque pour une charge située géographiquement à Montréal de coordonnées (45.495332°, -073.635138), comme le montre la figure 2.1 prise du site ATLAS SOLAIRE MONDIAL. Ses besoins d'alimentation en énergie par jour est 1125 W*8h (E=9000Wh).

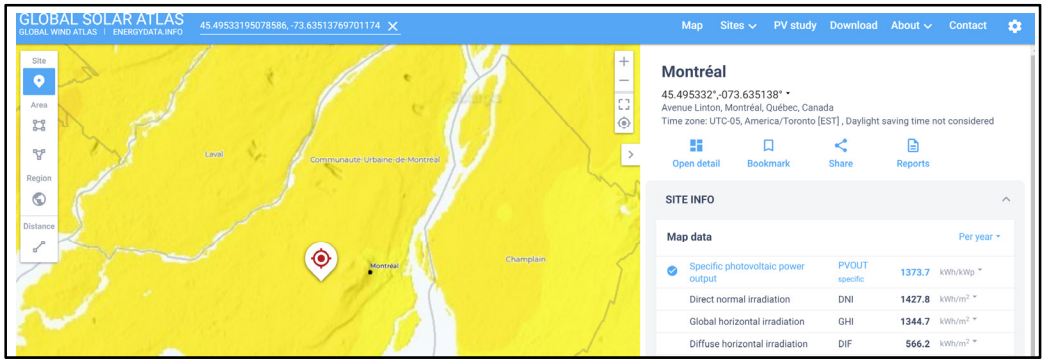

Figure 2.1 Localisation géographique

2.2.1 Choix des panneaux photovoltaïques

Les panneaux solaires photovoltaïques utilisés pour notre étude sont de la marque Jinko Solar JKM250-P-60. Ils appartiennent à la famille polycristalline dont l'efficacité est de l'ordre de 15% selon (Abdelhakim B et al., n.d.). Les caractéristiques techniques des panneaux sont affichées dans le tableau 2.1 suivant et ils sont donnés dans les conditions STC.

Tableau 2.1 Caractéristiques techniques du panneau

Spécifications	Valeurs
Puissance maximale (Pmax)	250 W
Tension en circuit ouvert (Voc)	37,7 V
Courant de court-circuit (Isc)	8,85 A
Tension au point de puissance maximum (Vmp)	30,5 V
Courant au point de puissance maximum (Imp)	8,20 A

2.2.2 Puissance générée par les panneaux photovoltaïques

Afin de calculer la puissance des panneaux photovoltaïques nécessaires, nous avons suivi ces étapes (du cours SYS864 à l'ETS) :

- Nombre d'heures d'ensoleillement par jour :

$$\frac{N_h}{jours} = \frac{Nombre\ d'ensoleillement\ par\ année}{Nombre\ de\ jours\ par\ année} = \frac{1373{,}7}{365} = 3{,}76\ h \tag{2.1}$$

- Energie par jour en tenant compte des pertes de 30% dans le panneau solaire :

$$E_j/jours = 9000 \times 1{,}3 = 11700\ Wh$$

- En prenant un rendement du convertisseur égal à 95%, la puissance nécessaire est :

$$P_{pv} = \frac{11700}{0{,}95 \times 3{,}76} = 3275{,}5 \text{ W} \tag{2.2}$$

Afin d'avoir moins de pertes au niveau de l'interrupteur, nous avons pris un rapport cyclique d proche de 0,4 avec Vdc égale à 144 V. En plus, on sait que le rapport cyclique d'un convertisseur élévateur est donné par :

$$d = 1 - \frac{V_{mpT}}{V_{dc}} = 0{,}4 \tag{2.3}$$

Avec : V_{mpT} est la puissance maximale totale générée par le système photovoltaïque.

Alors, le nombre de panneaux montés en série est égal :

$$\mathrm{N}_{pvs} = \frac{V_{mpT}}{30{,}5} = \frac{0{,}6 \times 144}{30{,}5} = 2.87 \rightarrow 3 \text{ s} \tag{2.4}$$

Également, le nombre de panneaux montés en parallèle est égal :

$$\mathrm{N}_{pvp} = \frac{3275{,}5}{3 \times 250} = 4{,}4 \rightarrow 5 \text{ p} \tag{2.5}$$

Vérification :

$$P_{pv} = 3 \times 5 \times 250 = 3750\ W \tag{2.6}$$

2.3 Dimensionnement du convertisseur élévateur CC-CC

Pour calculer les paramètres du convertisseur élévateur CC-CC, nous avons utilisé les étapes suivantes :

- Calcul du courant dans l'inductance I_L :

$$I_L = \frac{P_{pv}}{V_{mp}} = \frac{3750}{91{,}5} = 41 \text{ A} \tag{2.7}$$

- Calcul de la valeur de l'inductance L_{boost}, en tenant compte de l'ondulation de courant ΔI_L=10% I_L et La fréquence de commutation du hacheur f = 20 kHz.

$$L_{boost} = \frac{V_{dc}(1-d)d}{f\ \Delta I_L} = 0{,}88\ mH \tag{2.8}$$

2.4 Simulations de panneaux photovoltaïques avec une structure centralisée

Pour ce travail, nous avons choisi d'utiliser la méthode Perturbation et Observation (P&O) comme commande MPPT pour le convertisseur élévateur avec Stateflow. Ce dernier présente un format graphique de type State-charts du logiciel Matlab/Simulink. Il est fréquemment adopté dans le développement de systèmes électroniques de puissance, notamment utilisée pour les MPPT et la gestion de puissance.

Cette technique est fréquemment utilisée en raison de sa simplicité et de son faible coût de mise en œuvre (Alik et al., 2015). Par ailleurs, l'algorithme consiste à mesurer la tension et le courant instantanés afin de calculer la puissance des panneaux. Ensuite, cette dernière est comparée avec celle qui la précède. Donc, s'il y a une augmentation de la puissance, la perturbation continue dans le même sens. Sinon, la perturbation prochaine sera dans un sens opposé (Alik et al., 2015).

La figure 2.2 présente l'organigramme de l'algorithme P&O.

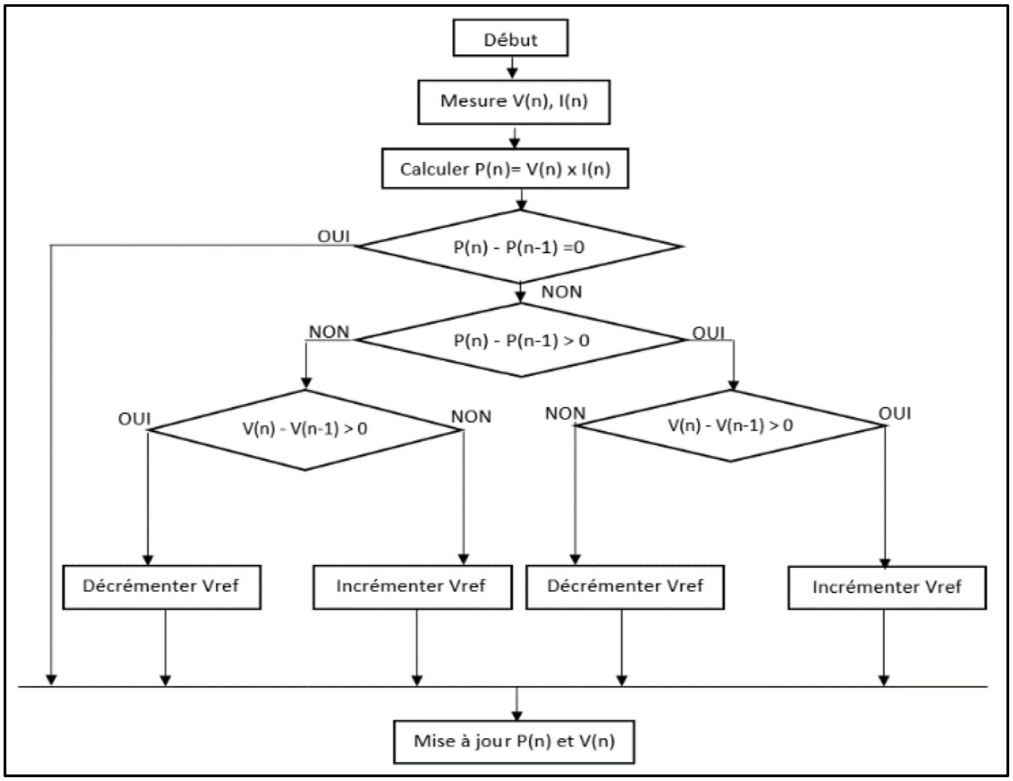

Figure 2.2 Organigramme de l'algorithme P&O

Dans cette partie, le système étudié est simulé sous l'environnement Matlab/Simulink avec une puissance totale de 3,75 kW. Il est constitué de 3, 5 modules respectivement en série et en parallèle comme le montre la figure 2.3, également avec une structure centralisée.

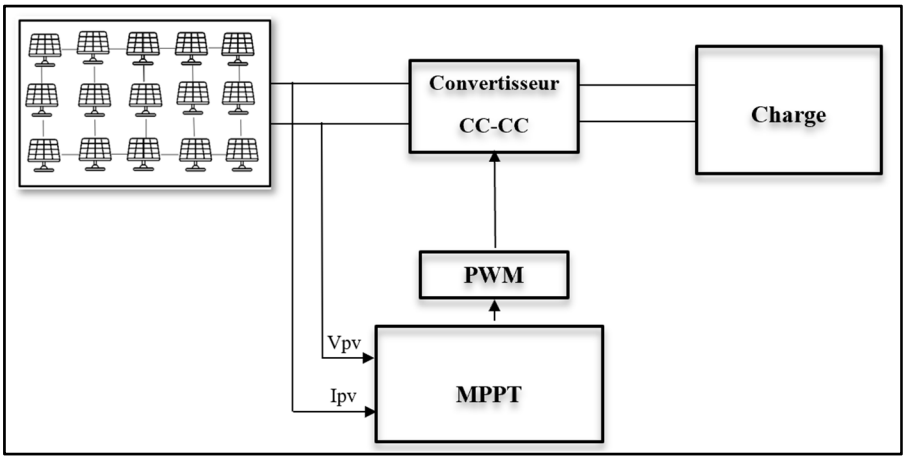

Figure 2.3 Représentation de schéma général de la simulation

2.4.1 Cas de conditions standards

Une variation de l'éclairement Ir de 1000 W/m² jusqu'à 500 W/m² a été faite à 0.5s comme le montre la figure 2.4. Les résultats de la simulation sont résumés sur le tableau 2.2.

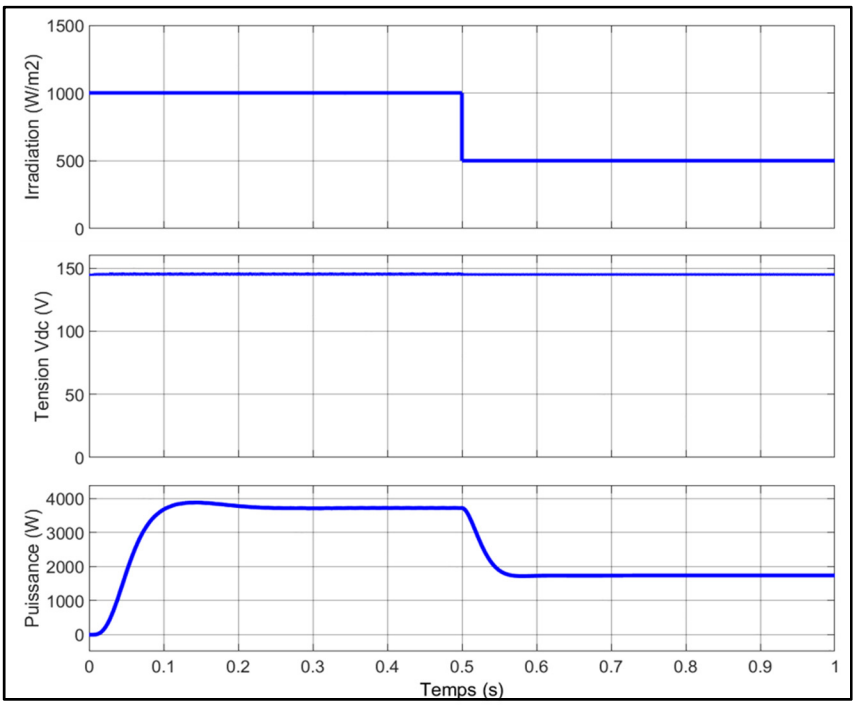

Figure 2.4 Variation des caractéristiques sous les conditions standards

Tableau 2.2 Résultats de la puissance sous les conditions standards

Irradiation (W/m²)	**1000**	**500**
Puissance (W)	3740	1825

Nous constatons que l'algorithme est presque en mesure de trouver le point de puissance maximale pour les deux irradiations 1000W/m^2 et 500W/m^2 comme le montre la courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) (figure 2.5). Ce qui vérifie l'efficacité de la méthode MPPT P&O implantée pour ces conditions.

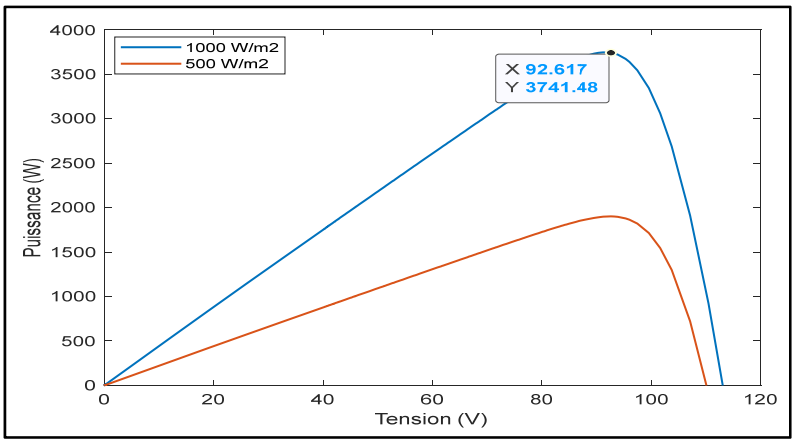

Figure 2.5 Courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) pour 1000 W/m2 et 500 W/m2

2.4.2 Cas d'ombrage partiel

Nous avons effectué deux simulations différentes sur les 15 panneaux soumis, également, à des irradiations différentes. La figure 2.6 (a) et (b) montre le schéma de la simulation aux conditions d'ombrage partiel et la courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) respectivement pour le premier cas. Ensuite, la même chose pour la figure 2.7 (a) et (b) pour le deuxième cas.

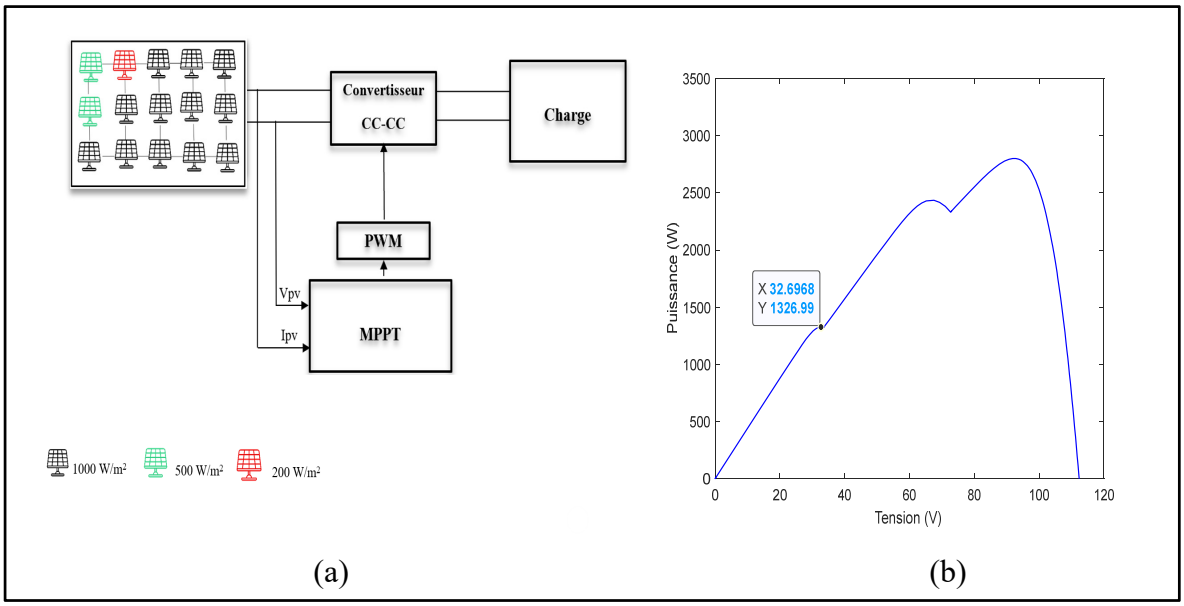

Figure 2.6 Cas 1 : Schéma de la simulation aux conditions d'ombrage partiel (a), courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) (b)

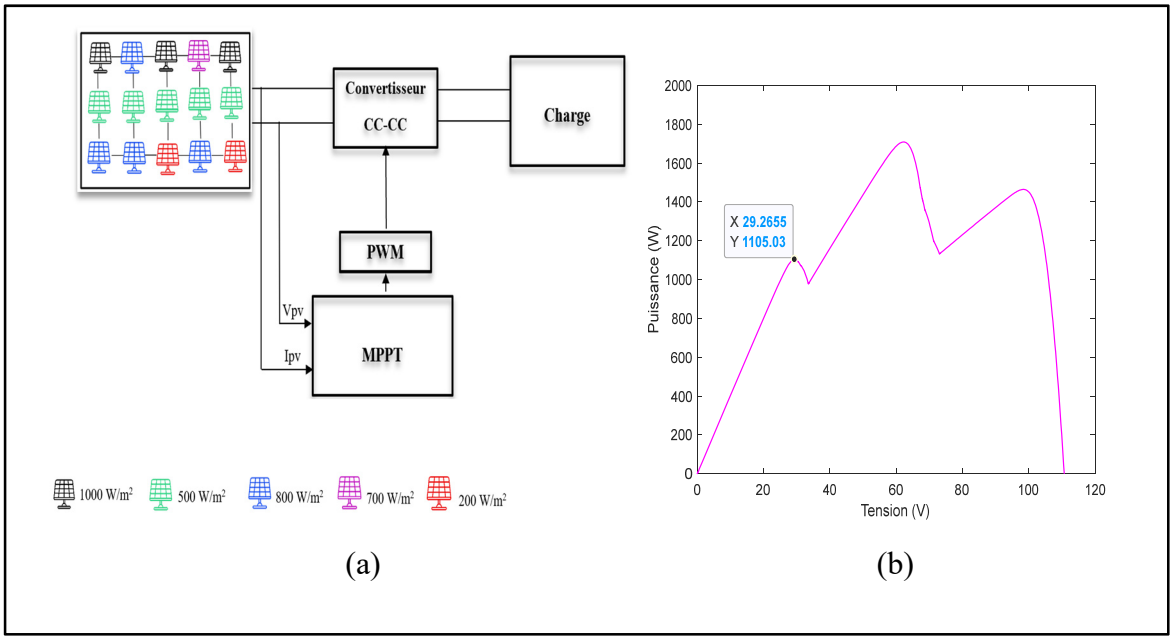

Figure 2.7 Cas 2 : Schéma de la simulation aux conditions d'ombrage partiel (a), courbe caractéristique Ppv =f (Vpv) (b)

Sur les deux courbes de puissance en fonction de la tension, on remarque l'apparition de trois points maximaux, pour chaque, à cause de l'ombrage partiel. En effet, cette technique MPPT détecte le premier pic 1326W et 1105W pour le cas 1 et cas 2 respectivement et n'est pas les pics les plus importants. Donc, cette méthode n'est pas capable de suivre le point de puissance maximale aux conditions d'ombrage partiel.

2.5 Simulations de panneaux photovoltaïques avec une structure décentralisée aux conditions d'ombrage partiel

2.5.1 Simulation

Comme indiqué dans la figure 2.8, pour cette simulation nous avons intégré un convertisseur sur chaque panneau soumis à différentes irradiations (1000W/m^2, 800W/m^2, 700W/m^2,500W/m^2 et 200W/m^2) afin de vérifier l'effet d'une structure décentralisée avec une configuration TCT.

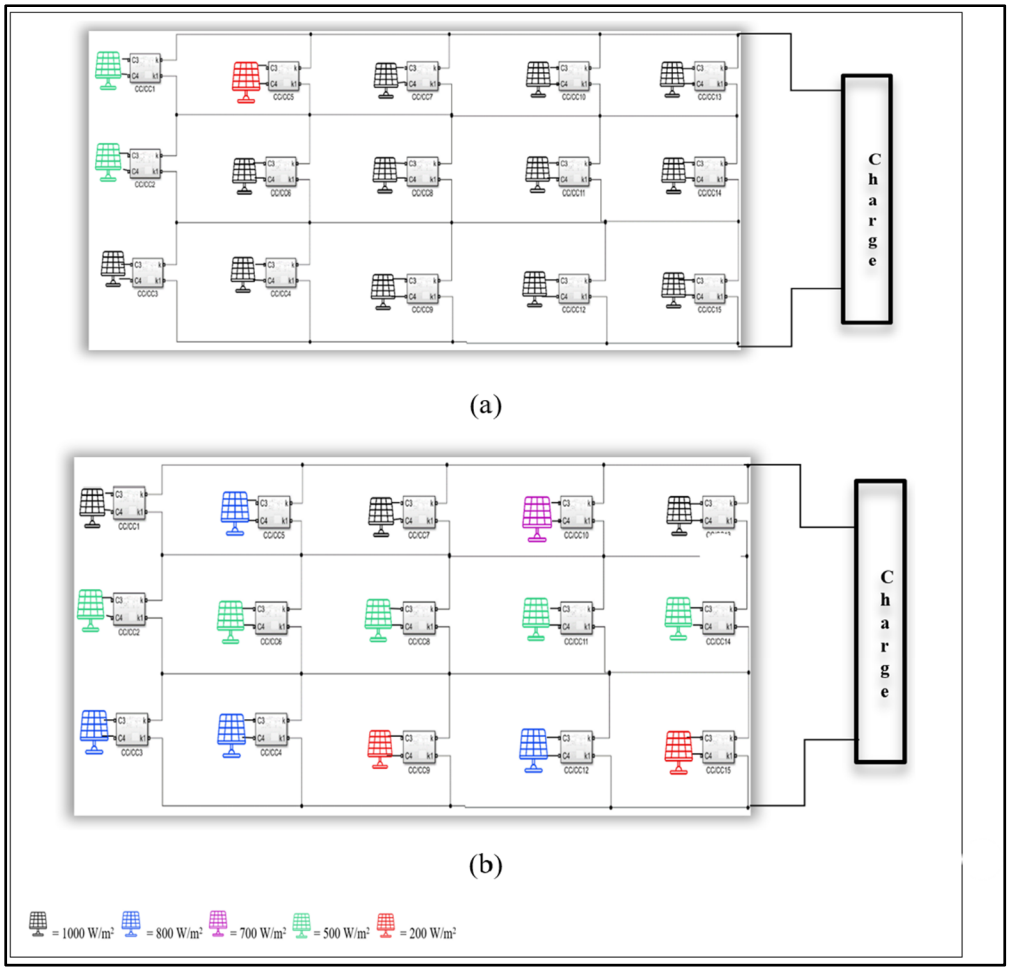

Figure 2.8 Simulation avec une structure décentralisée : Cas 1 (a), Cas 2 (b)

2.5.2 Discussion des résultats

Le tableau 2.3 suivant résume la puissance générée par les deux cas. On remarque que lorsqu'on place le MPPT à chaque module, la puissance extraite a augmenté par rapport à une structure centralisée.

Tableau 2.3 Résultats de simulation

Cas	**Cas 1**	**Cas 2**
Puissance (W)	3100	2172

Lorsque l'ombrage partiel se produit, les performances des modules PV sont affectées en raison d'une réduction de l'irradiation, et donc du courant de sortie. Et comme un module ou un string, contourné par une diode de dérivation, est affecté, cela a un impact sur l'augmentation des pertes par le système. Dans ce cas, le point de puissance maximale global n'est pas le même MPP pour chaque module, ce qui explique les résultats obtenus, entraînant ainsi une perte d'énergie. D'où l'utilisation d'une architecture PV distribuée aux conditions d'ombrage partiel permet d'atténuer cet inconvénient. Néanmoins, cette configuration reste très coûteuse.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les étapes nécessaires pour le dimensionnement des éléments d'un système photovoltaïque non raccordée au réseau. Le reste de chapitre a été consacré à mettre en évidence les effets de la variation de l'irradiation sur la puissance d'un système photovoltaïque. Ce système a été simulé à l'aide de MATLAB/Simulink dans des conditions d'ombrage partiel. D'une part, nous avons testé l'algorithme P&O qui est la méthode la plus fréquemment utilisée en raison de sa simplicité et de son faible coût. En revanche, nous avons montré que cette technique ne permet pas de suivre la puissance maximale dans les conditions d'ombrage partiel. D'autre part, une étude sur l'impact de l'architecture des PV TCT et la performance des MPPT distribuées lors de l'ombrage partiel a été faite. En effet, la distribution au niveau des modules, même si elle fournit une puissance élevée, elle est considérée comme une configuration coûteuse.

CHAPITRE 3

CONTRÔLE DU CONVERTISSEUR ÉLÉVATEUR À BASE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

3.1 Introduction

Le réseau de neurones artificiel « ANN » est l'un des techniques d'apprentissage automatique les plus populaires, connu par un sous-ensemble de l'intelligence artificielle. Cette technique appartient à la catégorie des modèles « boîte noire » puisque les informations relatives aux paramètres physiques du processus ne sont pas nécessaires (Jawad et al., 2021). D'ailleurs, un réseau de neurones artificiel est similaire au fonctionnement d'un système nerveux du cerveau humain.

Dans ce chapitre, nous commençons par définir les notions de base des réseaux de neurones artificiels afin de comprendre leur architecture, leurs techniques et leurs intérêts. Ensuite, nous développons une stratégie de contrôle du convertisseur élévateur basée sur cette théorie. Les données d'un algorithme Scan seront utilisées pour entrainer le réseau de neurones.

3.2 Notion d'un neurone

Dans sa configuration la plus basique, un neurone artificiel est une imitation d'un neurone biologique (Shiruru, 2016).

3.2.1 Neurone biologique

Le cerveau est constitué de cellules appelées neurones. Un neurone biologique est caractérisé par la capacité de traitement de l'information (Isaac Abiodun et al., 2018). En effet, des nombreux neurones biologiques complexes sont interconnectés en collaborant afin de résoudre des problèmes spécifiques au quotidien, envoyer et recevoir des signaux nécessaires à l'action humaine.

Un neurone biologique est constitué par un corps cellulaire (Soma), axone, dendrites et synapse (figure 3.1). Il reçoit des signaux d'autres neurones par l'intermédiaire des dendrites. Puis, il traite ces signaux au niveau du corps cellulaire en les sommant. Dès que l'intensité du signal dépasse un certain seuil, ce neurone déclenche un signal le long de son axone et à travers des synapses vers d'autres neurones.

3.2.2 Neurone artificiel

Un neurone artificiel est essentiellement une approche d'ingénierie d'un neurone biologique. Il reçoit des entrées (dendrites) et chaque entrée est associée avec un poids (synapses). Une fonction d'activation qui limite la sortie du neurone dans un intervalle de [0,1] ou [- 1,1] (corps cellulaire). Enfin, l'axone représente l'élément de sortie.

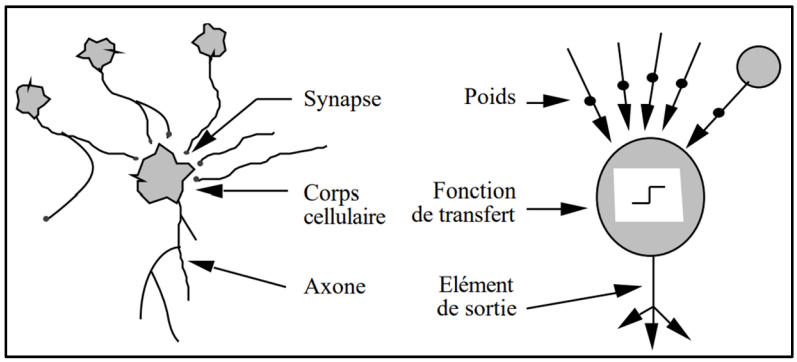

Figure 3.1 Correspondance neurone biologique / artificielle
Tirée de Touzet (1992, p. 22)

3.3 Modèle mathématique d'un neurone artificiel

L'équation 3.1 représente le modèle mathématique d'un neurone artificiel et également la figure 3.2. Alors, la sortie y est ainsi exprimée comme suit (de Oliveira et al., 2017):

$$y = \varphi\,(\,\Sigma_m\,(\omega_m x_m) + b\,) \tag{3.1}$$

Avec : ω_m sont les poids synaptiques

x_m est l'entrée élémentaire

b est le biais, qui sert à augmenter ou diminuer l'entrée de la fonction d'activation

φ est la fonction d'activation

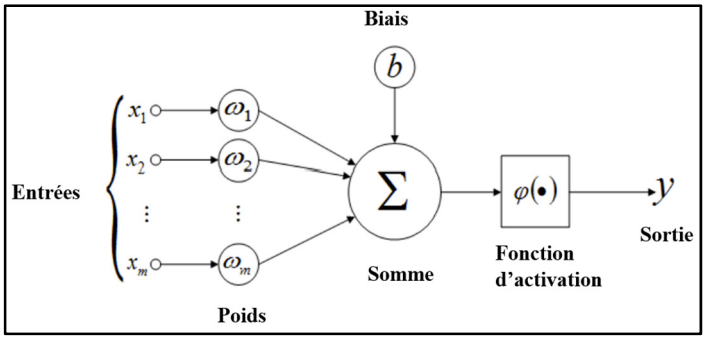

Figure 3.2 Modèle mathématique d'un neurone artificiel

La fonction d'activation détermine si un neurone doit être activé ou non en calculant la somme des poids, en y ajoutant un biais et également, introduit une non-linéarité dans la sortie d'un neurone. En effet, elle permet ce dernier d'être capable d'effectuer des tâches très complexes. Diverses fonctions d'activation peuvent être utilisées telles que Linéaire, Unité linéaire rectifiée (RELU), Gaussienne, Sigmoïde, Hyperbolique tangente (Tanh) ... (figure 3.3).

Un réseau de neurones sans fonctions d'activation agit comme un modèle de régression linéaire simple (polynôme de degré un) avec des performances, capacité et complexités limitées (Guillod et al., 2020).

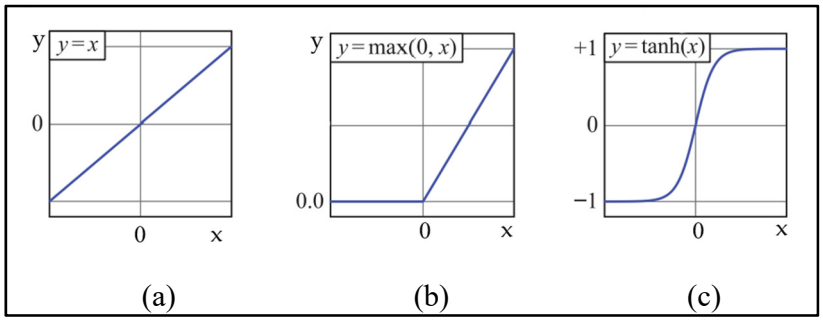

Figure 3.3 Formes de quelques fonctions d'activation pour ANN : linéaire (a), RELU (b), Tanh(c)

3.4 Architecture d'un réseau de neurones

Un réseau de neurones est composé d'une couche d'entrée, d'une ou de plusieurs couches cachées, et d'une couche de sortie. Chacune possède un certain nombre de neurones. La couche d'entrée est celle qui reçoit les données (elle peut être des capteurs). Ensuite, la couche de sortie est la réponse à tous les processus du réseau. Et finalement, la couche cachée est censée réaliser les traitements. Par ailleurs, on distingue deux types de réseau : monocouche qui est composé d'une seule couche de neurones et multicouches qui est composée de plusieurs couches. Ces réseaux peuvent être unidirectionnels dites « Feed-Forward » ou « Perceptron », ou bien récurrents dites « Feed-Back », où le flux peut être dans différents directions, même de la couche de sortie vers la couche d'entrée (Pekel et al., 2017). La figure 3.4 suivante présente ces deux types de réseau.

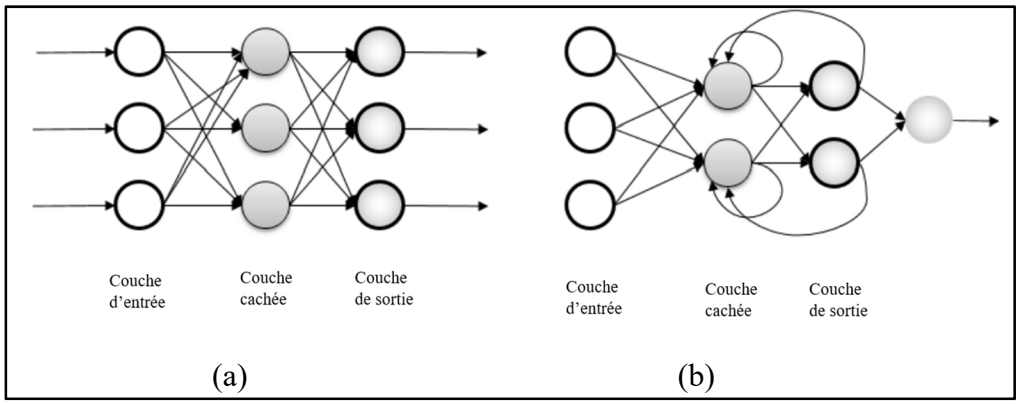

Figure 3.4 Architectures de réseau de neurones : feed-forward (a), feed-back (b)

3.5 Méthodes d'apprentissage d'un réseau de neurones

Il existe deux approches d'apprentissage, supervisée et non supervisée. Dans le cas de l'apprentissage supervisé, on vise à prévoir une ou plusieurs valeurs cibles à partir d'une ou plusieurs entrées. Ce type est le plus répandu puisqu'il est excellent au niveau de prédiction (Agatonovic-Kustrin & Beresford, 2000).

D'autre part, sauf les entrées sont fourni au cas de l'apprentissage non supervisé, sans avoir des sorties souhaitées. Alors, le système décide tout seul les caractéristiques afin de regrouper

les données d'entrée. On appelle ce processus l'auto-organisation. La sélection des poids et des biais optimaux d'une ANN par rapport à un ensemble de données est à la base un défi d'optimisation. Néanmoins, un réseau de neurones contient des centaines de poids et de biais ce qui entraîne un niveau de complexité relativement élevé. C'est la raison pour laquelle il existe plusieurs méthodes d'apprentissage. Par ailleurs, la plupart de ces algorithmes partagent un concept similaire : la propagation et la rétropropagation (Guillod et al., 2020).

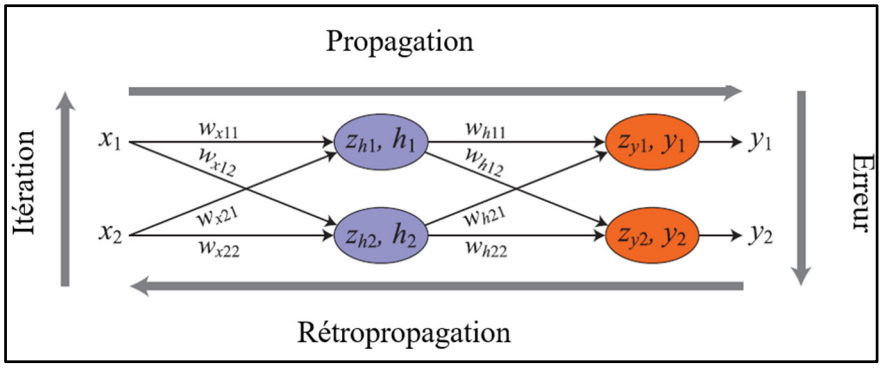

Figure 3.5 Apprentissage d'un réseau de neurones
Tirée de Guillod et al. (2020, p. 287)

En effet, les poids et les biais sont attribués de manière aléatoire. Puis, le ANN est évalué avec les entrées fournies couche par couche, c'est-à-dire la propagation (figure 3.5). Ensuite, l'erreur entre les valeurs calculées et les sorties fournies est évaluée. La sensibilité de l'erreur par rapport aux poids est calculée couche par couche jusqu'à ce que l'erreur totale soit inférieure à une valeur souhaitée, C'est la rétropropagation. Enfin, avec la sensibilité obtenue, les poids sont mis à jour pour diminuer l'erreur (Guillod et al., 2020).

3.6 Intérêts et limites d'ANN

Les ANN sont très souvent employées dans plusieurs domaines en raison de leurs nombreux avantages.(Marugán et al., 2018) et met l'accent sur ces derniers :

- L'apprentissage adaptatif : apprendre à effectuer des tâches par le biais d'un processus.
- Auto-organisation : création d'une structure pour représenter l'information
- Tolérance aux pannes : traitement des données incomplètes et du bruit.

- Résolution des problèmes non linéaires.
- Implantation facile dans les systèmes : il existe des puces spécialisées pour l'intégration des ANN dans les systèmes.
- Pas d'hypothèses sur les propriétés ou la distribution des données ce qui est plus pratique.

Malgré le fait que les méthodes basées sur les ANN ont montré des capacités extraordinaires, il est intéressant de noter qu'elles possèdent des limites intrinsèques (Li et al., 2021). On cite :

- L'inexistence de méthodes standards pour déterminer l'architecture du réseau.
- Des systèmes "boîte noire" qui peuvent d'établir des corrélations entrée-sortie compliquées.
- Les modèles de réseaux neuronaux sont susceptibles d'être sur-apprenti « Overfitting ».
- Le réseau est réduit à une certaine valeur de l'erreur sur l'échantillon. Cela signifie que l'apprentissage est terminé et probablement la valeur finale peut-être n'est pas l'optimale.

3.7 Proposition d'un algorithme de contrôle du convertisseur CC-CC

Comme mentionné précédemment, l'ombrage partiel affecte la puissance de sortie du système photovoltaïque. Ainsi, le MPP change en fonction de ces conditions. Par conséquent, il est essentiel de suivre le MPP dans toutes les situations afin d'assurer une puissance maximale. Donc, dans cette partie, nous développons un MPPT pour le convertisseur CC-CC basé sur les réseaux de neurones (ANN).

3.7.1 Approche de l'algorithme proposé aux conditions d'ombrage partiel

Les principaux blocs du système photovoltaïque avec le contrôleur MPPT-ANN sont illustrés dans la figure 3.6. Le nouvel algorithme a été développé, basé sur une méthode de Scan, afin de suivre le GMPP dans différentes conditions d'ombrage partiel. En effet, cette méthode permet de balayer toute la courbe de la tension du système solaire photovoltaïque jusqu'à la valeur Ns$\times 0.9\times Voc$ soit atteinte (Ns c'est le nombre des panneaux en série). En incrémentant la tension, il fait à chaque pas une comparaison de la nouvelle puissance calculée avec la valeur précédente et il stocke la plus élevée. Dès l'instant où l'algorithme a balayé toute la courbe, il

mémorise la valeur de la puissance la plus importante, et également sa valeur de tension correspondante. Finalement, il renvoie le rapport cyclique D. Par ailleurs, la base de données utilisée pour le nouvel algorithme MPPT-ANN (les entrées et sorties) est celle issue de la méthode Scan.

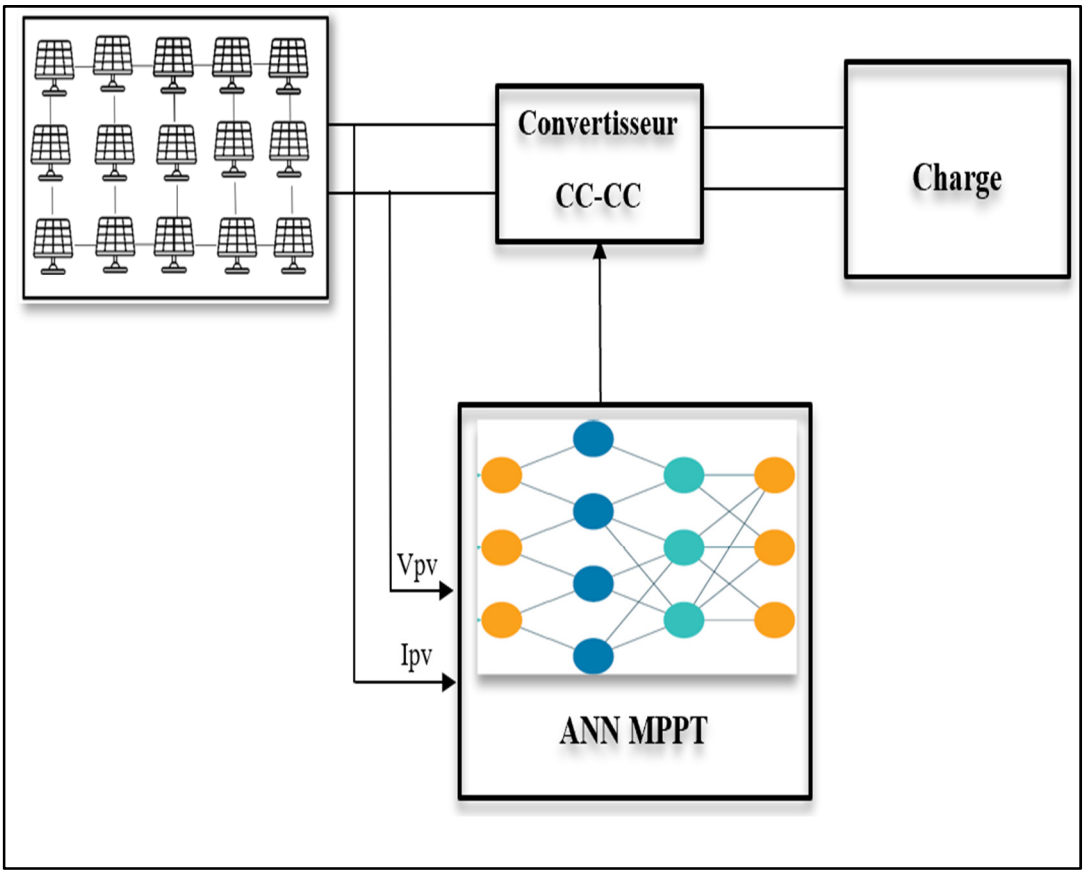

Figure 3.6 Principaux blocs du système photovoltaïque

3.7.2 Conception de ANN-MPPT

Pour la commande MPPT, les variables d'entrée sont le courant (Ipv) et la tension (Vpv) du système photovoltaïque de sorte que la sortie est le rapport cyclique (D) pour commander le convertisseur à opérer plus efficacement. En effet, le succès d'un contrôleur neuronal dépend d’un entrainement correct des neurones artificiels. Dans la présente étude, l’entraînement

(supervisé) est fait sous l'environnement Matlab/Simulink avec la fonction « nntool » (figure 3.7).

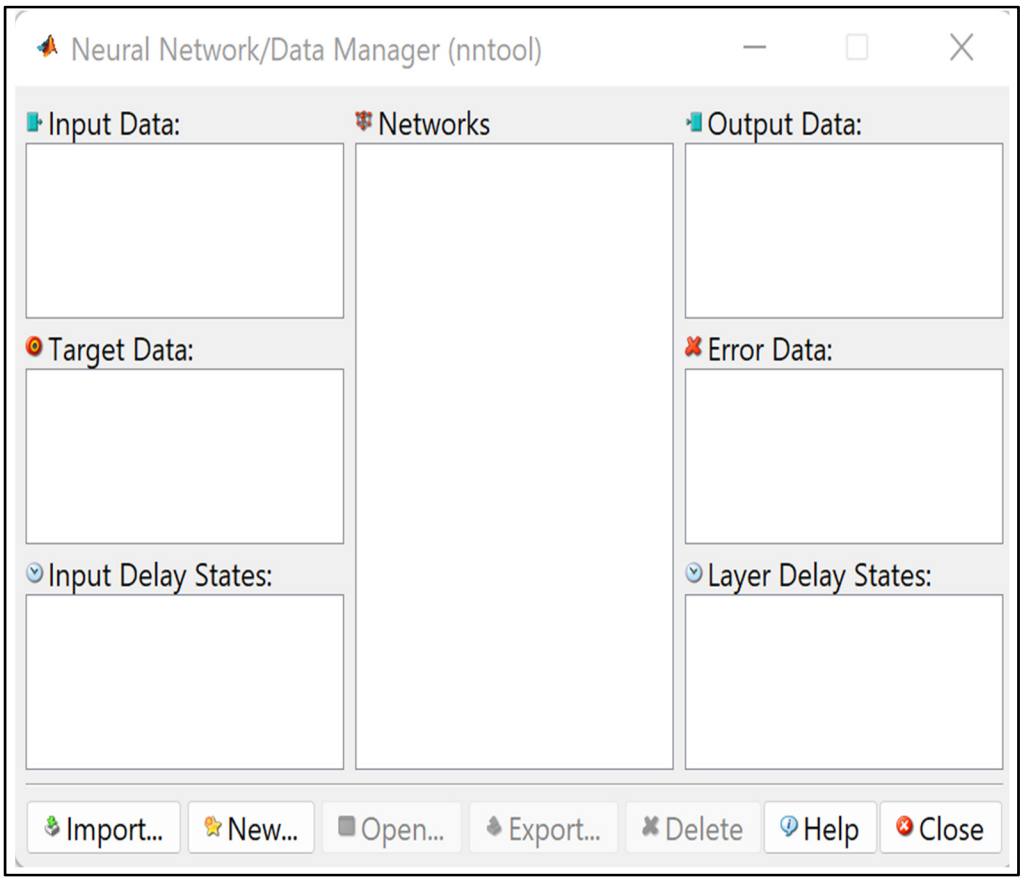

Figure 3.7 La fonction "nntool" sur Matlab

Nous avons choisi une structure à trois couches : une couche d'entrée qui contient seulement deux neurones avec une fonction d'activation Purelin, une couche cachée qui se compose de 15 neurones, Tansig comme fonction d'activation et finalement une couche de sortie. La figure 3.8 montre la structure du réseau neuronal.

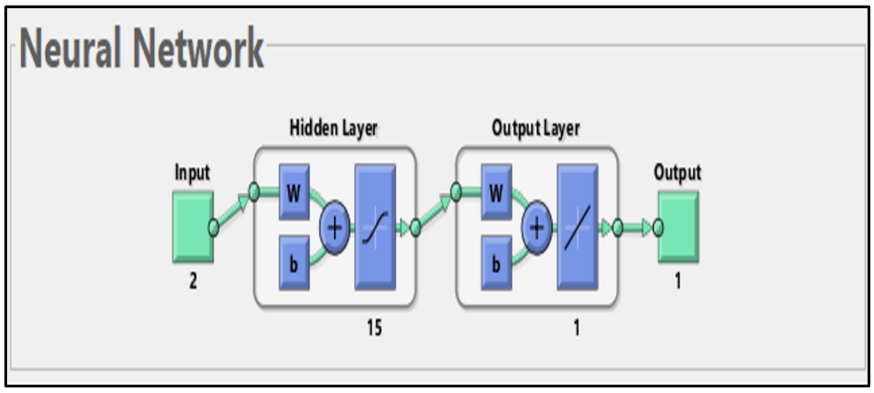

Figure 3.8 Structure du réseau neuronal

L'algorithme utilisé pour l'apprentissage est Levenberg-Marquardt. Par ailleurs, sur les 100 ensembles de données, 70% sont utilisés pour l'apprentissage, 15% pour la validation et 15% pour le test. L'erreur quadratique (Mean Squared Error MSE) acceptable pour l'entrainement est de 10^{-2}. Ainsi, le nombre total de neurones est de 17 neurones. La figure 3.9 montre le bloc ANN sur Simulink qui sera utilisée pour la simulation.

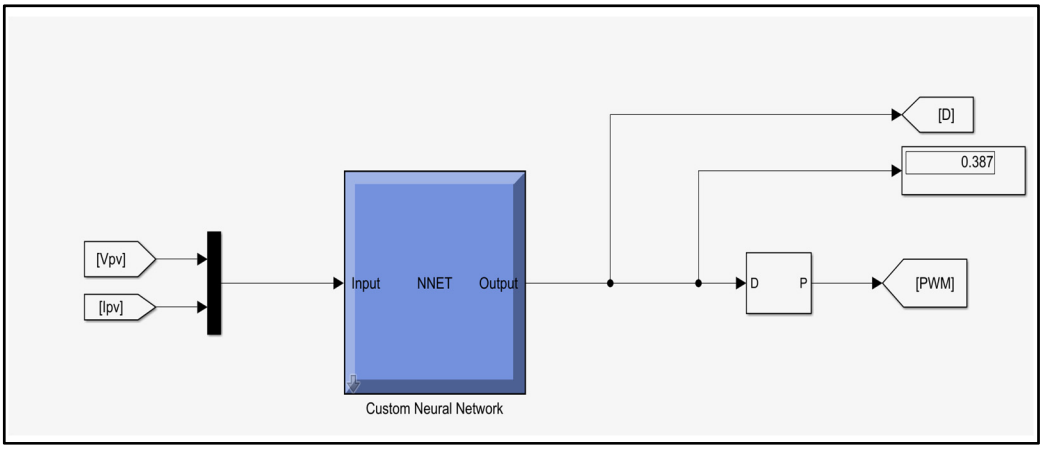

Figure 3.9 Bloc Simulink ANN issue de la formation des neurones

La figure 3.10 présente les courbes de régression avec R= 0,90273. Le tracé montre que les données sont parfaitement entraînées où la sortie suit les valeurs cibles en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt puisque la valeur de R est proche de 1.

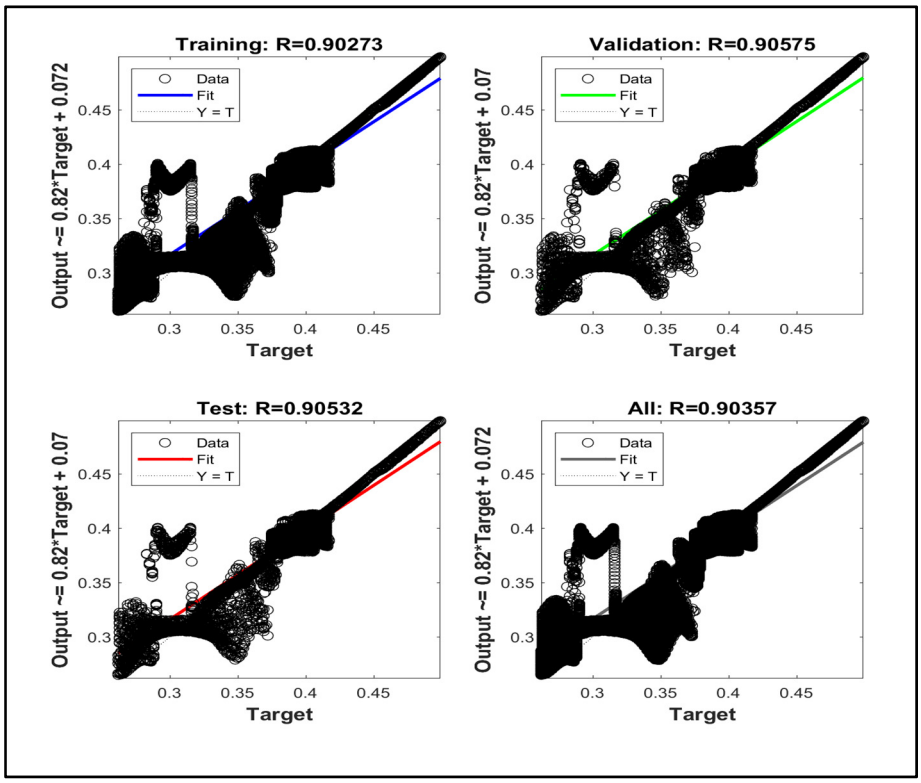

Figure 3.10 Les courbes de régression

3.8 Simulations et résultats

3.8.1 Simulations

Des simulations de quatre cas (a, b, c, d) sont conçues et développées en utilisant MATLAB/Simulink afin d'évaluer l'algorithme proposé lorsque l'ombrage partiel se produit. Les simulations se composent d'un système de 15 panneaux photovoltaïques (3 en série et 5 en parallèle) connectés à un convertisseur élévateur avec un bus CC dans lequel la gamme de tension appropriée est choisie. La figure 3.11 montre un aperçu des simulations.

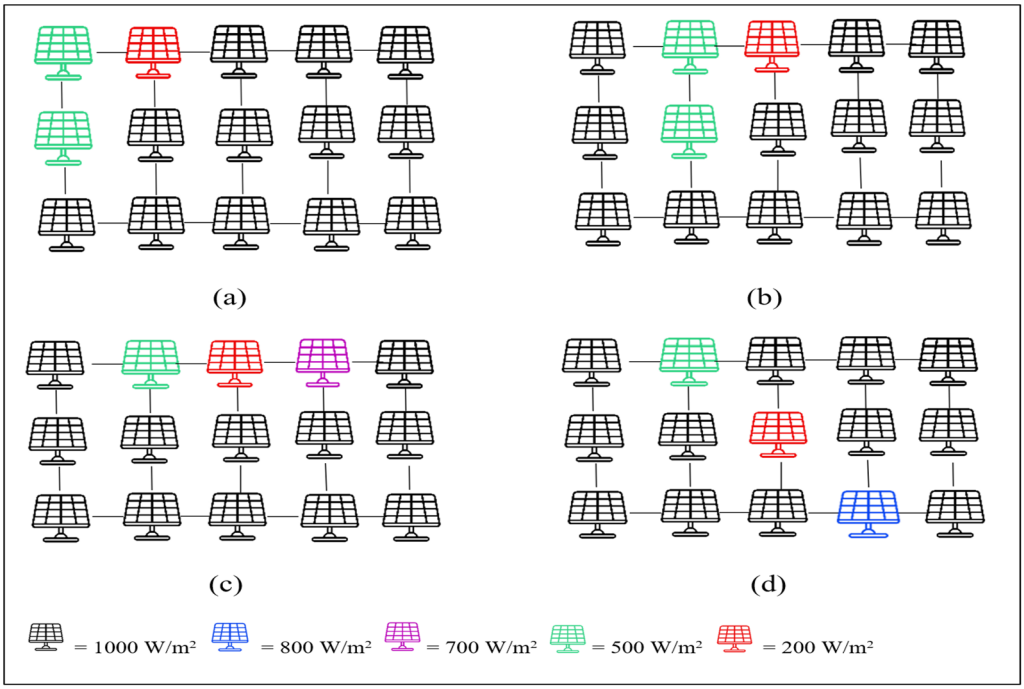

Figure 3.11 Système photovoltaïque soumis à différents cas d'ombrage partiel

La figure 3.12 suivante présente les courbes caractéristiques des PV pour chaque cas de l'ombrage partiel.

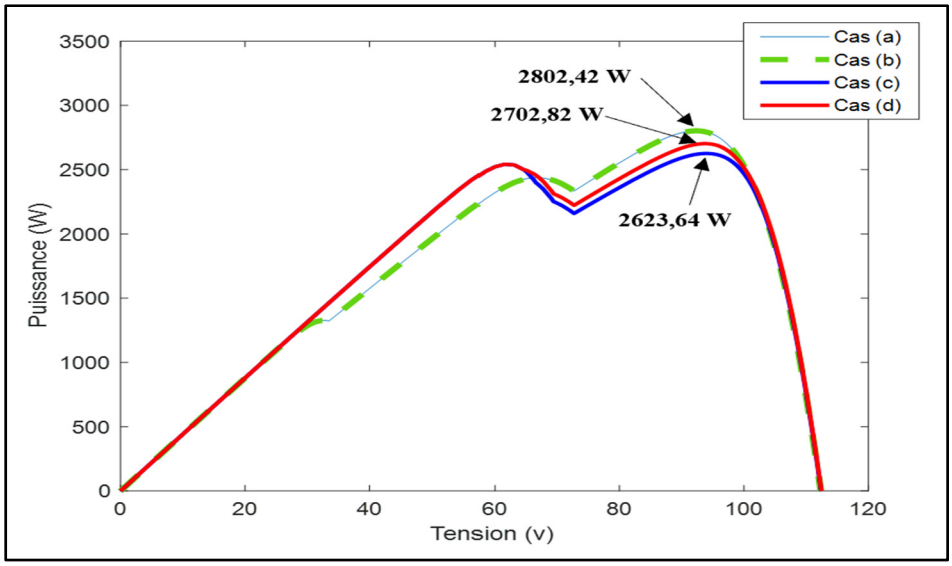

Figure 3.12 Courbes caractéristiques des PV pour chaque cas de l'ombrage partiel montrés dans la figure 3.11

3.8.2 Résultats de simulations

Les résultats de simulation, de la méthode proposée, sont présentés par la figure 3.13 à T=25°C.

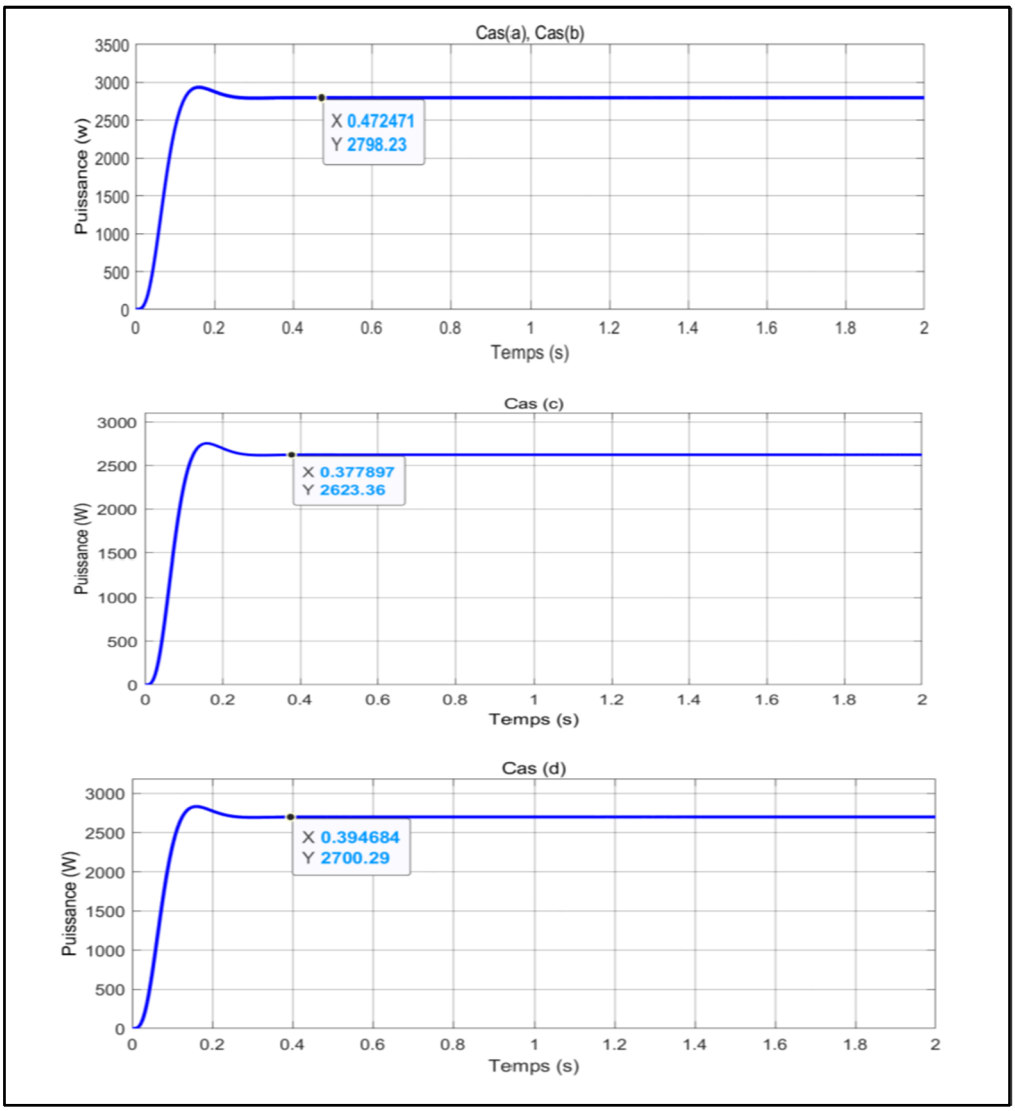

Figure 3.13 Courbes de suivi des puissances maximaux à l'aide de l'algorithme ANN

Pour les différents cas, les points des puissances maximaux des PV ont été suivies, étant stables à 2798W (Cas (a) et Cas (b)), 2623W (Cas (c)) et également 2700W (Cas (d)). Alors, cet algorithme implémenté permet de détecter tous les maximums globaux parmi plusieurs maximums lors d'un ombrage partiel. D'où l'efficacité et la fiabilité de ce contrôleur.

3.9 Conclusion

Dans le présent chapitre, un algorithme MPPT basé sur l'intelligence artificielle était développé après l'entrainement des neurones. Afin de valider les performances de cet algorithme, des tests de simulation sur Matlab/Simulink ont été effectués. Nous avons présenté par la suite les résultats obtenus pour des différents cas de l'ombrage partiel. Finalement, le MPPT proposé a fait preuve des excellentes performances du suivit de manière efficace le point de puissance maximale du panneau aux conditions de l'ombrage partiel.

CHAPITRE 4

CONTRÔLE DU CONVERTISSEUR DE PUISSANCE ABAISSEUR-ELEVATEUR BASÉE SUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET GESTIONNAIRE DE PUISSANCE

4.1 Introduction

Le fait de s'appuyer sur une seule source d'énergie afin de répondre à la demande de la charge pour un système autonome n'offre pas une assez fiabilité. Donc, étant donné que les sources d'énergie renouvelables, dans notre cas l'énergie solaire photovoltaïque, sont dépendantes des changements climatiques, l'utilisation des batteries pour stocker l'énergie est inévitable.

En effet, La coordination de l'énergie entre la source d'énergie et son stockage s'avère très importante. Dans ce qui suit, nous approvisionnerons trois charges autonomes avec un système photovoltaïque et un système de stockage de batterie comme le montre la figure 4.1. Pour ce faire, nous proposons une méthode de contrôle de convertisseur abaisseur-élévateur (bidirectionnel) qui régulera la tension du bus Vdc à la valeur 48V et basé sur la logique floue (FLC). En plus, un gestionnaire de puissance basé sur un stateflow sera présenté afin qu'il contrôle le flux de l'énergie entre les panneaux PV, la batterie et les charges.

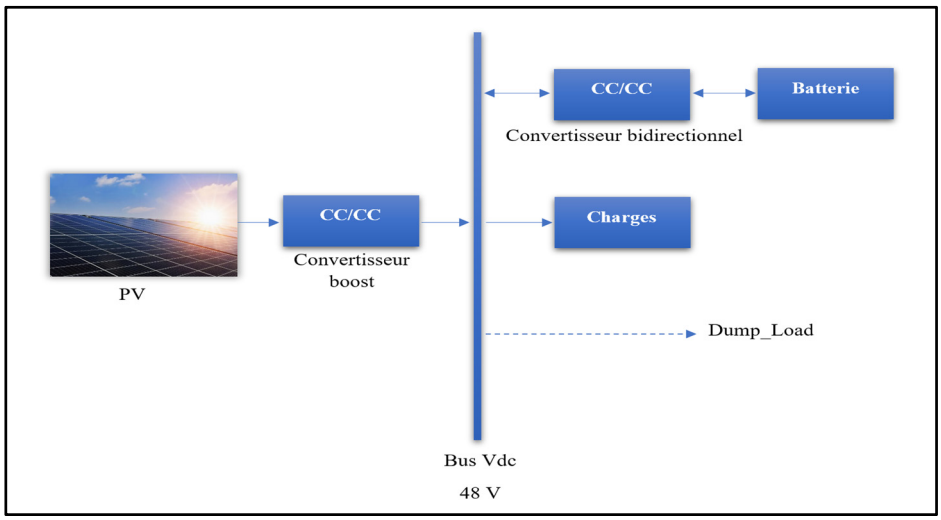

Figure 4.1 Diagramme du système proposé

4.2 Modèle mathématique des contrôleurs basé sur la logique floue pour la boucle de tension et la boucle de courant

4.2.1 Théorie de la logique floue

Le concept de la logique floue a été introduit par Lotfi Zadeh (1965), et sa modélisation mathématique qui traite l'incertitude (Ugale & Dixit, 2017). Contrairement à la logique booléenne, la logique floue permet à une condition d'être entre 0 et 1 grâce à l'existence des « degrés » dans la vérification d'une condition. Soit une variable floue x, un ensemble flou A sur un univers de discours X est exprimé par une fonction degré d'appartenance (figure 4.2):

$$\begin{aligned} \mu_A : X &\rightarrow [0,1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x) \end{aligned} \tag{4.1}$$

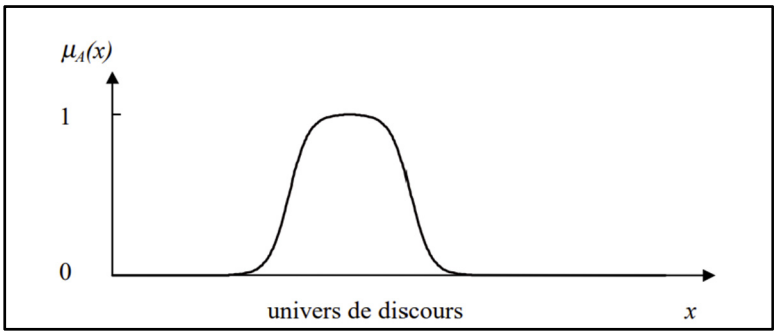

Figure 4.2 Représentation d'un ensemble flou par sa fonction d'appartenance μ_A

Avec :

X : Univers de discours qui présente l'ensemble des valeurs réelles qui peut prendre la variable floue x

$\mu_A(x)$: le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble flou A

4.2.2 Variables linguistiques

La notion d'une variable linguistique s'avère très cruciale et notion de base dans le domaine de la logique floue.

En réalité, cette notion est définie par une description d'un cas, d'un évènement ou d'un mécanisme à savoir : petit, moyen, grand, rapide, très grand…(Ugale & Dixit, 2017). Ce qui prouve l'avantage de cette commande floue de ne pas être dépendante d'un modèle mathématique précis pour une installation. Par ailleurs, elle est applicable à un système dont le modèle est inconnu.

4.2.3 Structure de base du contrôleur à base de logique floue

Le schéma fonctionnel d'un contrôleur à logique floue est présenté dans la figure 4.3.

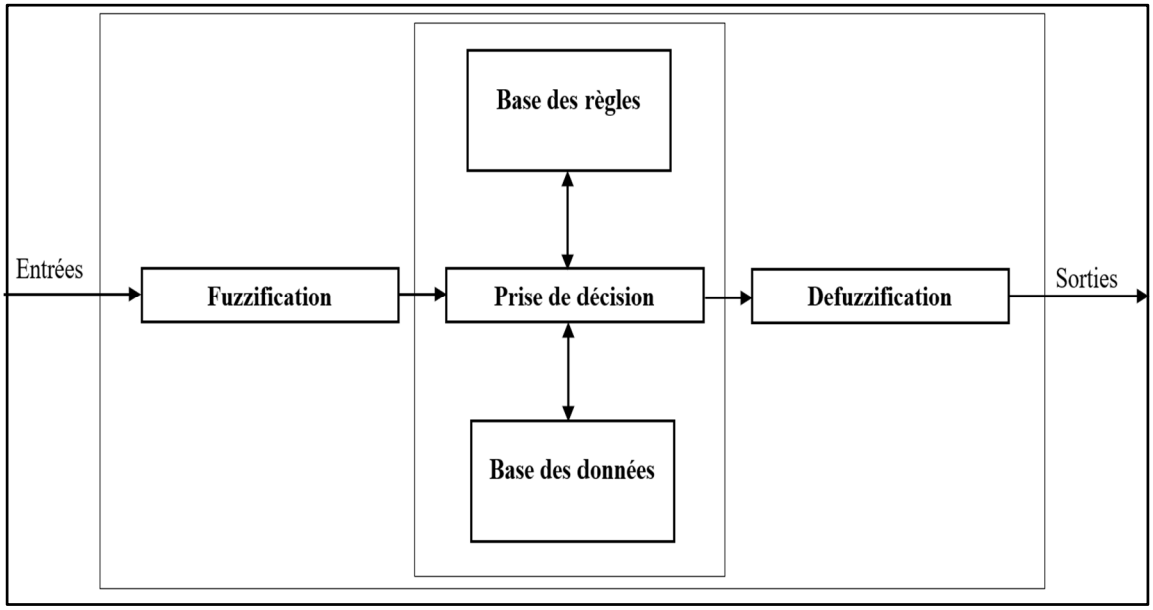

Figure 4.3 Structure de base du contrôleur à logique floue

Il est composé de quatre éléments principaux (Yusoff et al., 2010) :

1) Fuzzification (Fuzzifier) : c'est une interface de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques adéquate.

2) Base de règles et base de données : les deux sont considérées comme des bases de connaissances qui comportent d'une base de données avec la définition linguistique nécessaire et une série règles de contrôle.

3) Prise de décision : c'est une logique de prise de décision, qui imite un processus de décision humain, déduit à partir de la connaissance des règles de contrôle et les variables linguistiques. Ces décisions sont principalement basées sur des expertises et statistiques déjà existantes, notamment pour la définition des fonctions d'appartenance.

4) Défuzzification (Defuzzifier) : c'est une interface qui convertit la conclusion prise après la décision logique floue en action de contrôle pour la commande.

4.3 Convertisseur abaisseur-élévateur

L'utilité d'un convertisseur abaisseur-élévateur est de régler une tension à une tension désirée. Il est connecté entre le bus CC et la batterie. La figure 4.4 montre la structure de ce convertisseur sur Matlab/Simulink.

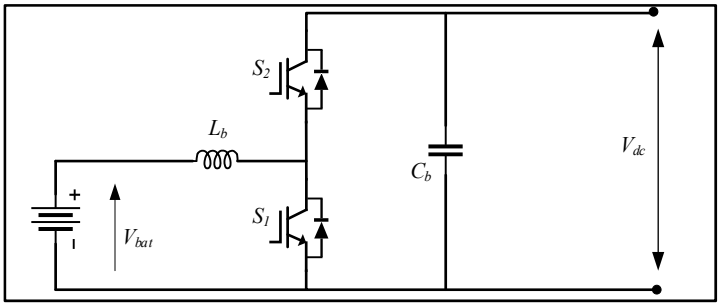

Figure 4.4 Convertisseur bidirectionnel

En effet, la commande du convertisseur permet de contrôler deux variables à savoir : la tension Vdc qui engendre un courant de référence, et le courant de la batterie qui sera comparé par ce dernier courant de référence. Le tableau x suivant présente les paramètres de ce convertisseur.

Tableau 4.1 Paramètres du convertisseur bidirectionnel

Paramètres	**Valeurs**
Inductance L_b	0,05 e^{-3} H
Capacité C_b	2000 e^{-6} F

4.4 Simulation de la commande du convertisseur et résultats

Comme nous avons mentionné dans la partie précédente, il y aura deux boucles pour la commande. Donc, les entrées du FLC (l'erreur E(k) et la variation de l'erreur ΔE(k)) sont définies dans les deux équations 4.2 et 4.3 suivantes :

- Boucle de la tension :

$$E(K) = V_{ref} - V(K) \tag{4.2}$$

$$\Delta E(K) = E(K) - E(K-1) \tag{4.3}$$

Avec : $E(K)$: L'erreur

$E(K-1)$: L'erreur précèdent

V_{ref} : Tension de référence

$V(K)$: Tension instantanée

- Boucle du courant :

$$E(K) = I_{ref} - I(K)$$

$$\Delta E(K) = E(K) - E(K-1)$$

Avec : I_{ref} : Courant de référence

$I(K)$: Courant instantané

Les figures 4.5 et 4.6 montrent les fonctions d'appartenances des entrées et sorties pour les deux boucles. Les ensembles flous suivants sont utilisés : PB « Positif Grand », PS « Positive Petit », Z « Zéro », NS « Négatif Petit » et NB « Négatif Grand ».

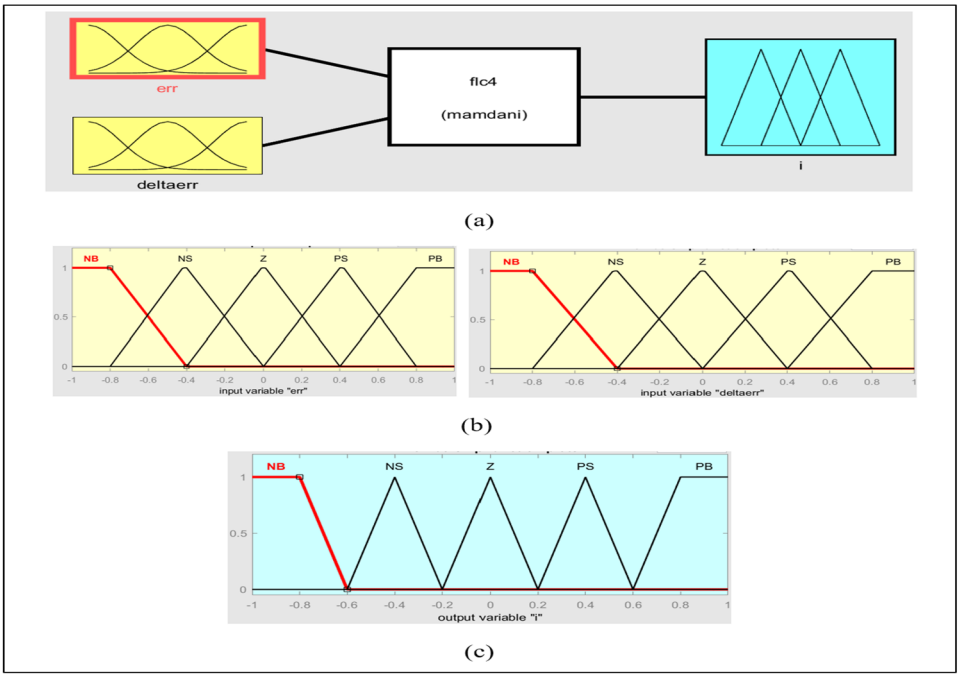

Figure 4.5 Boucle de la tension : Interface logique floue (a), Fonctions d'appartenances des entrées (b), Fonctions d'appartenances des sorties (c)

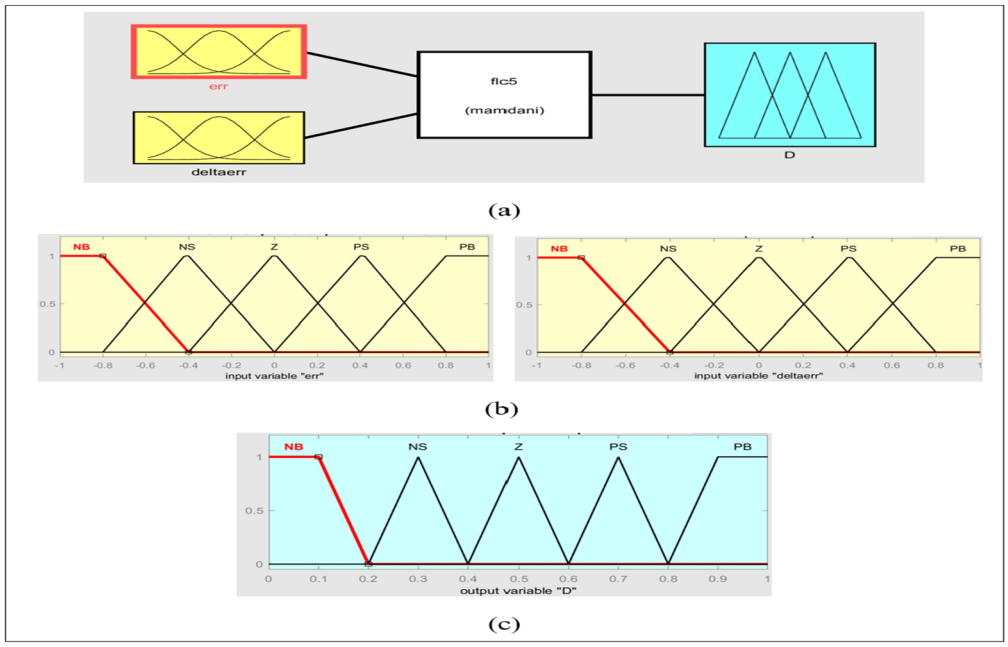

Figure 4.6 Boucle du courant : Interface logique floue (a), Fonctions d'appartenances des entrées (b), Fonctions d'appartenances des sorties (c)

Le tableau 4.1 montre la base de règles du FLC et la figure 4.7 présente les surfaces de ces bases de règles.

Tableau 4.2 Base de règles du FLC

	ΔE					
E		NB	NS	Z	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PB	PB
	PS	NS	Z	PS	PS	PB
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	NS	NB	NS	NS	Z	PS
	NB	NB	NB	NS	NS	Z

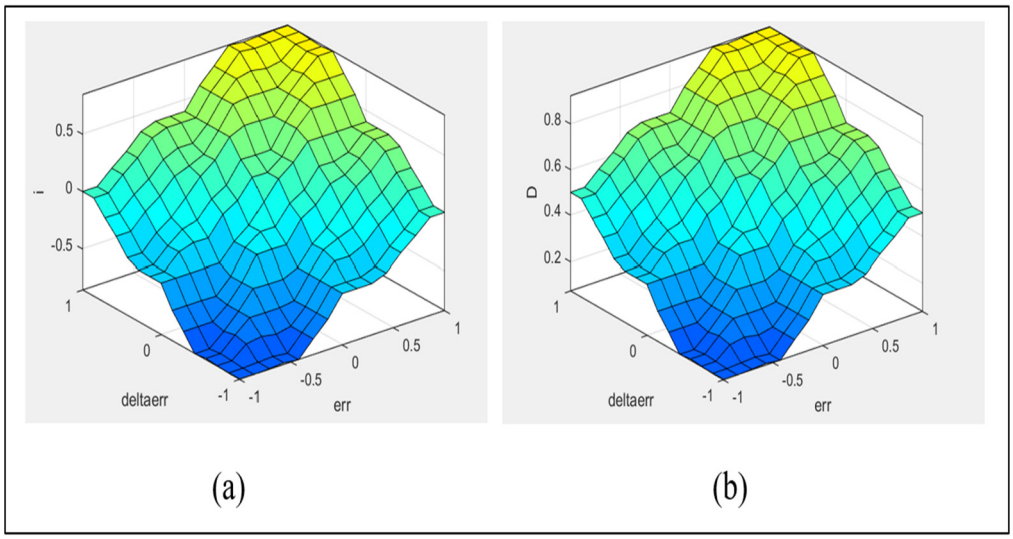

Figure 4.7 Surfaces des bases de règles : FLC boucle de la tension (a), FLC boucle du courant (b)

La figure 4.8 présente la simulation d'un modèle Matlab/Simulink du contrôleur à logique floue.

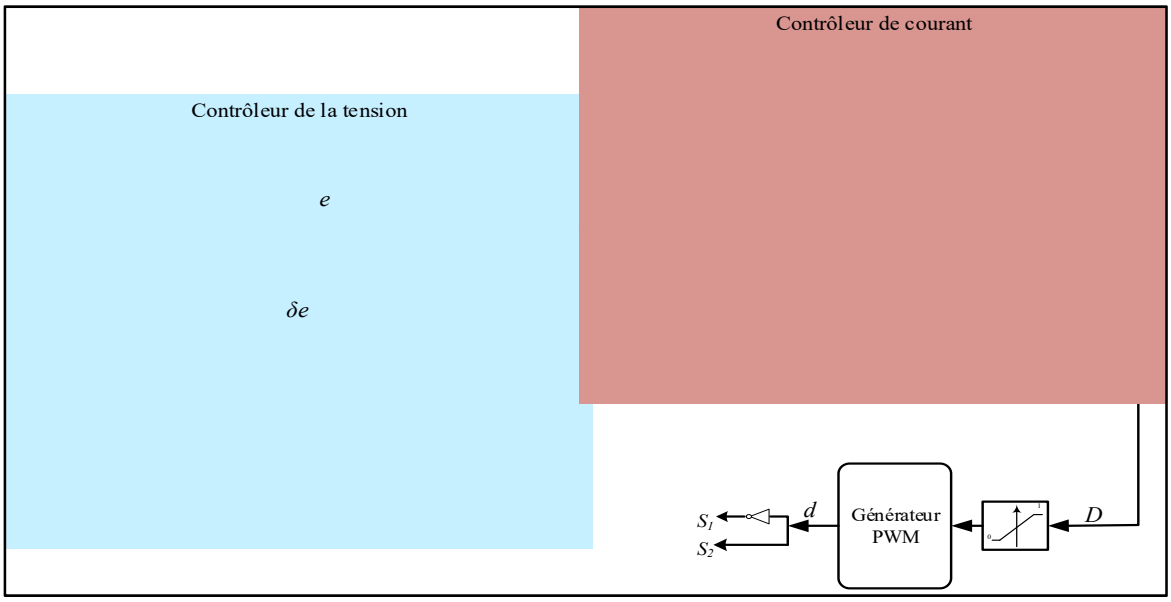

Figure 4.8 Commande du contrôleur bidirectionnel à base du FLC

La simulation du convertisseur abaisseur-élévateur à logique floue nous permet d'avoir une tension Vdc insensible aux perturbations de la charge. D'après la figure 4.9, nous avons obtenu la tension désirée de 47,92V, très proches de 48V. À l'instant 1 seconde, nous avons varié la charge en ajoutant une autre charge de 40 Ohm. Par conséquent, on remarque quelques oscillations, mais il reste toujours stable aux alentours de la tension de référence 48V.

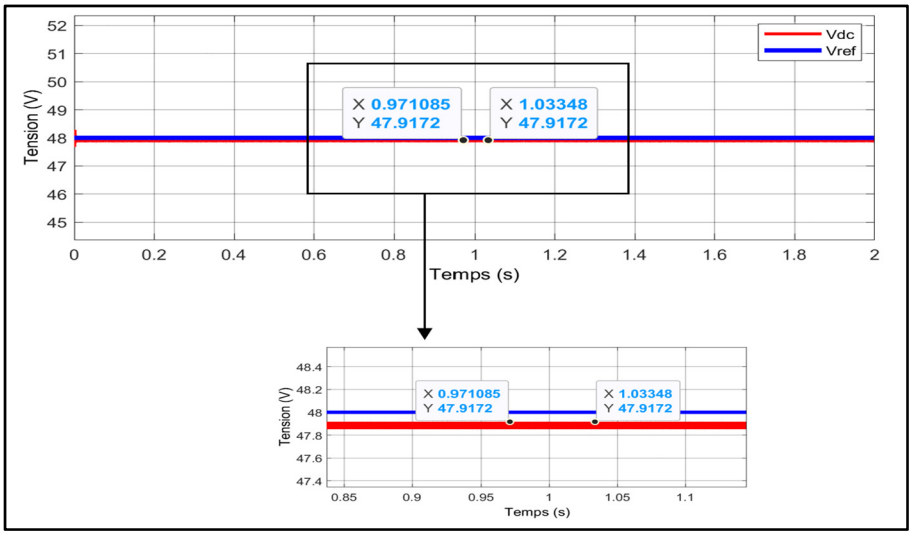

Figure 4.9 Courbe de la tension Vdc

4.5 Gestionnaire de puissance

La manière dont le gestionnaire de puissance contrôle le flux d'énergie définit le fonctionnement du notre système. La figure 4.10 suivante présente l'organigramme de ce gestionnaire de puissance.

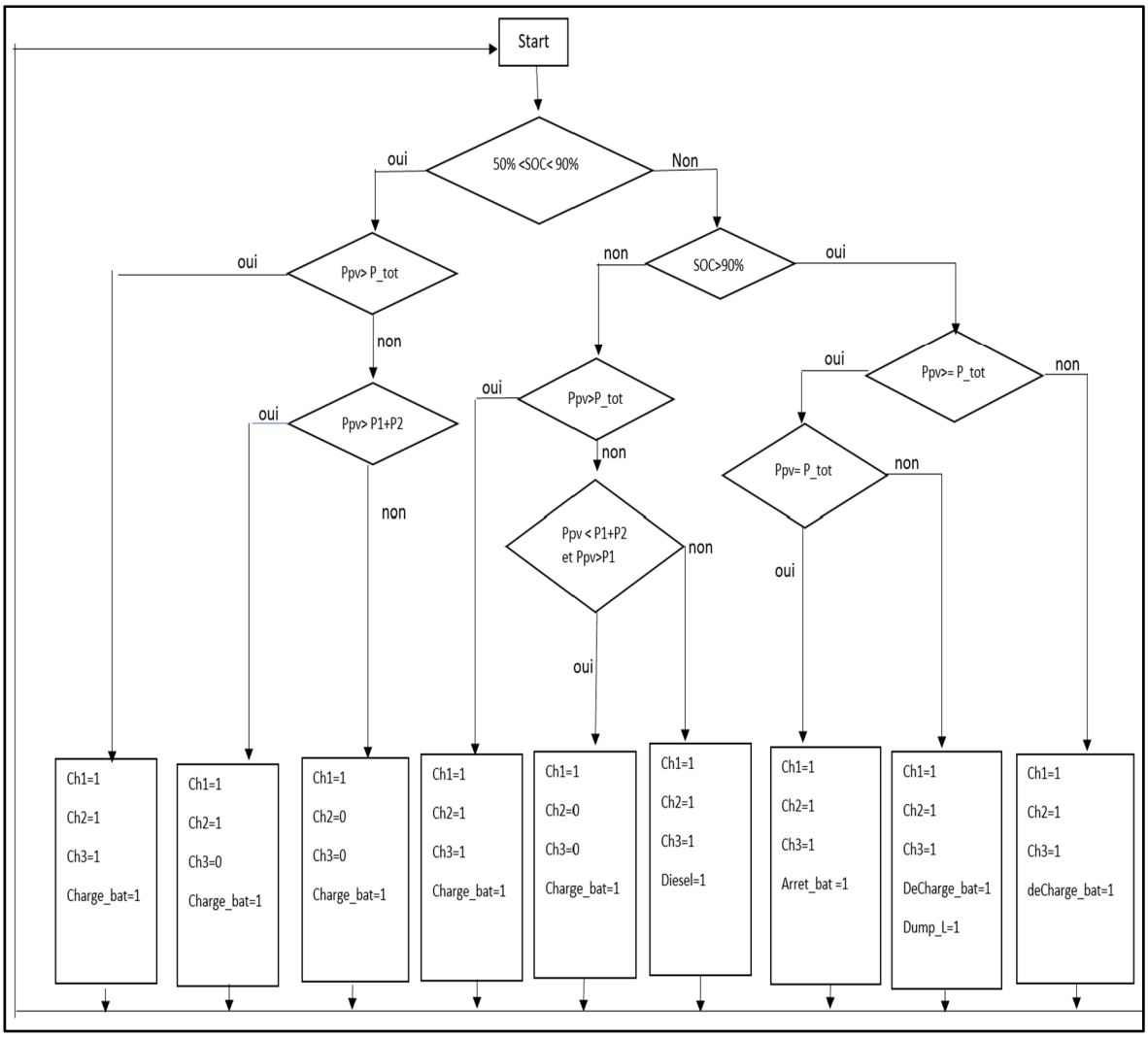

Figure 4.10 Organigramme de gestionnaire de puissance

Avec : Ch1, Ch2, Ch3 sont les charges 1, 2 et 3

P_tot : Puissance totale des trois charges (P1 + P2 + P3)

Ppv : puissance produite par les PV

Charge_bat : chargement de la batterie

DeCharge_bat : déchargement de la batterie

Dump_L : la charge de délestage

Le diesel mentionné sur l'organigramme représente seulement une recommandation au cas où l'irradiation est nulle. Ce dernier ne sera pas simulé lors du prochain chapitre.

Ce gestionnaire est implanté grâce à StateFlow sur Simulink/Matlab comme le montre la figure 4.11. L'algorithme Stateflow développé est présenté au complet dans l'annexe A-I.

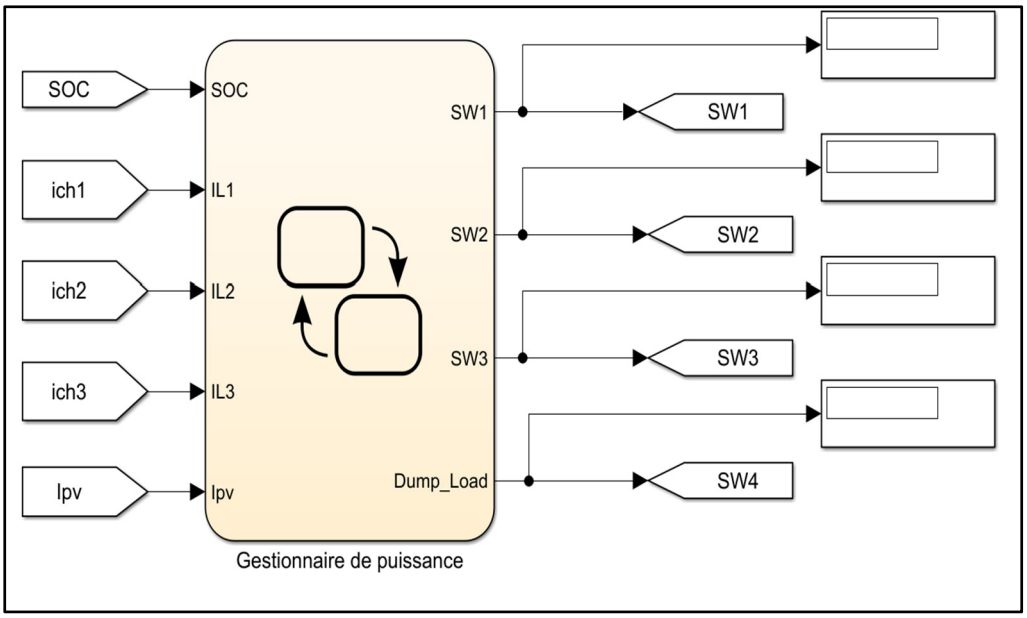

Figure 4.11 Gestionnaire de puissance avec StateFlow

Les entrées de cet algorithme sont :

- L'état de charge
- Ipv : courant des panneaux photovoltaïques
- Ich1, Ich2, Ich3 : les courants de charges 1, 2 et 3 respectivement

Les sorties représentent des différents commutateurs SW1, SW2, SW3 et SW4 qui contrôlent la connexion ou la déconnexion des charges 1, 2, 3 et la charge de délestage respectivement.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté la théorie de la logique floue. Nous avons, également, illustré le convertisseur abaisseur-élévateur à l'aide de Matlab/Simulink. En plus, une commande de ce convertisseur à base de la FLC a été développée. Cette méthode régule la tension du bus CC à la valeur 48V désirée ce qui démontre l'efficacité de ce contrôleur. Finalement, un gestionnaire de puissance, qui assure le contrôle de l'écoulement de puissance entre les panneaux photovoltaïques, la batterie et les charges, a été développé.

Dans le chapitre suivant, nous faisons une validation du système complet.

CHAPITRE 5

VALIDATION EXPÉRIMENTALE AU LABORATOIRE

5.1 Introduction

Dans le cadre de notre étude, il est également en question de simuler tout le système au complet avec les méthodes développées dans les chapitres précédents. Pour ce faire, nous assumons que les trois charges représentent une station de charge pour les voiturettes électriques. Donc, l'objectif de ce chapitre est d'assurer le bon fonctionnement de tous les éléments de système, ainsi ses commandes, à savoir : les panneaux photovoltaïques, le convertisseur élévateur CC-CC, le convertisseur abaisseur-élévateur CC-CC, la batterie, le gestionnaire de puissance et enfin les charges.

Une validation en temps réel au laboratoire GRÉPCI sera exposée dans une deuxième partie.

5.2 Simulation du système au complet : Application de station de charge pour les voiturettes électriques

Dans le but de tester et valider les performances du gestionnaire de puissance et les techniques de contrôle développés dans les chapitres précédents dans un système complet, nous effectuerons des simulations dans des différentes conditions. La figure 5.1 représente le schéma de la simulation.

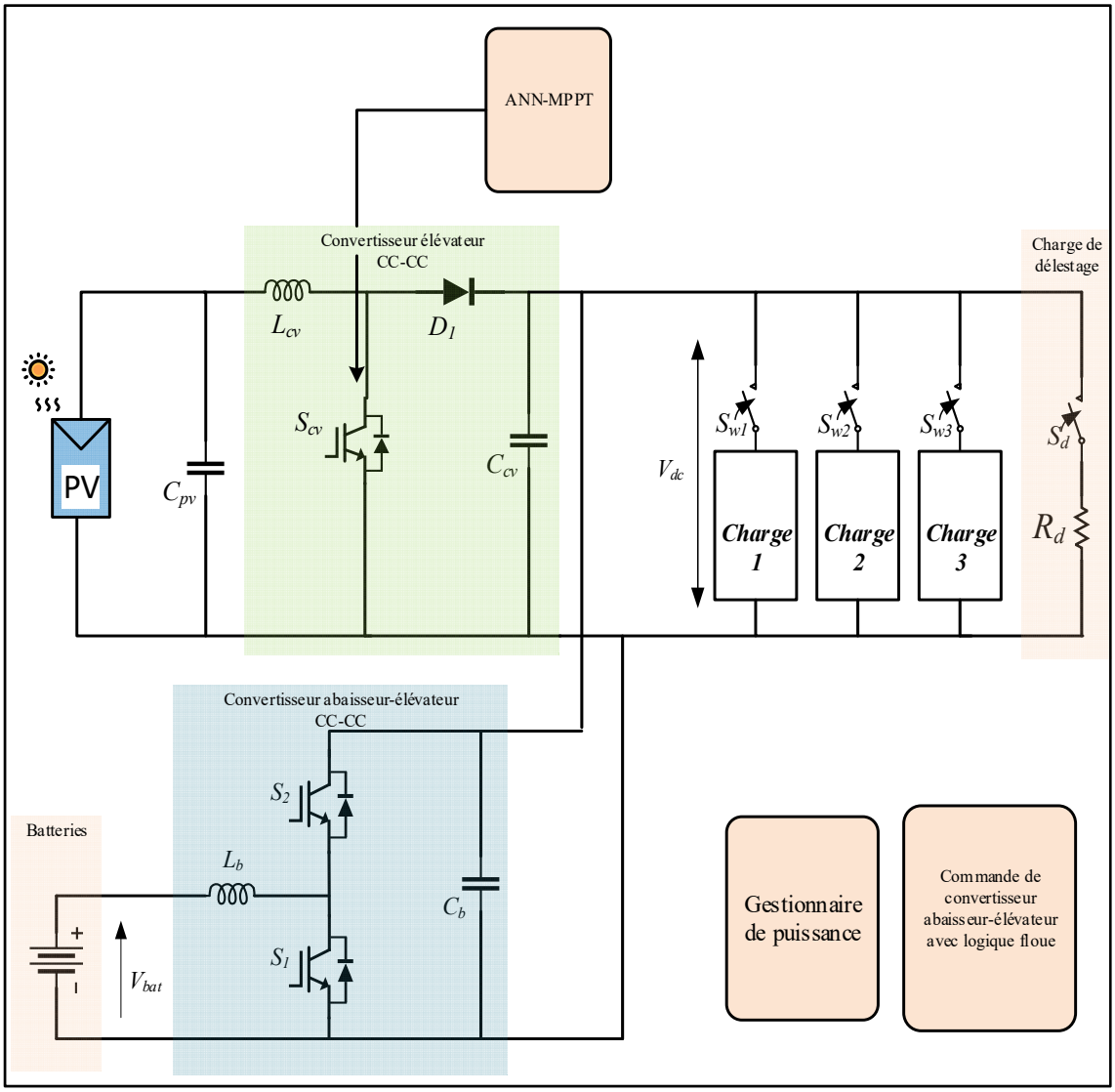

Figure 5.1 Schéma bloc du système

Les paramètres de la simulation sont résumés en annexe II. Le tableau 5.1 suivant présente les modes de fonctionnement du système au complet.

Tableau 5.1 Fonctionnement du système

Mode	Conditions		Fonctionnement	Batterie	Ch 1	Ch 2	Ch 3
1	SOC>90%	a) Ppv=P1+P2+P3	PV = 1 Dump_L=1	Arrêt de chargement	1	1	1
		b) Ppv<P1+P2+P3	PV = 1	Décharge			
		c) Ppv> P1+P2+P3	PV = 1 Dump_L=1	Décharge			
2	50%<SOC<90%	a) Ppv>P1+P2+P3	PV = 1	Se charge	1	1	1
		b) Ppv>P1+P2 Et Ppv<P1+P2+P3	PV = 1	Se charge	1	1	0
		c) Ppv>P1 Et Ppv<P1+P2	PV = 1	Se charge	1	0	0
3	50%<SOC	a) Ppv>P1+P2+P3	PV = 1	Se charge	1	1	1
		b) Ppv>P1 Et Ppv<P1+P2	PV = 1	Se charge	1	0	0
		c) Ppv<P1	PV = 0 G. Diesel = 1	Se charge	1	1	1

Avec 1 = charge connectée

0 = charge déconnectée

Afin de tester le fonctionnement des trois modes, nous avons appliqué des différentes irradiations sur les modules photovoltaïques entre 50W/m^2 et 1000 W/m^2 (ombrage partiel) pour qu'on puisse balayer tous les modes de la batterie.

En premier lieu, nous avons effectué le test sur le mode 1 en passant de l'état (b) à l'état (c). En second lieu, le mode 2 a été testé en passant de l'état (b) à (c) ensuite (a). Finalement, le dernier mode 3, de (a) à (b).

5.3 Résultats et discussion

- Mode 1 : (b) → (c)

Pour ce premier cas, les deux modules photovoltaïques sont soumis à des ensoleillements de 50W/m^2 et 100W/m^2 respectivement. Puis à l'instant 1 seconde, l'irradiation augmente à 800W/m^2 et 200W/m^2 pour le deuxième panneau. Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 5.2 et 5.3.

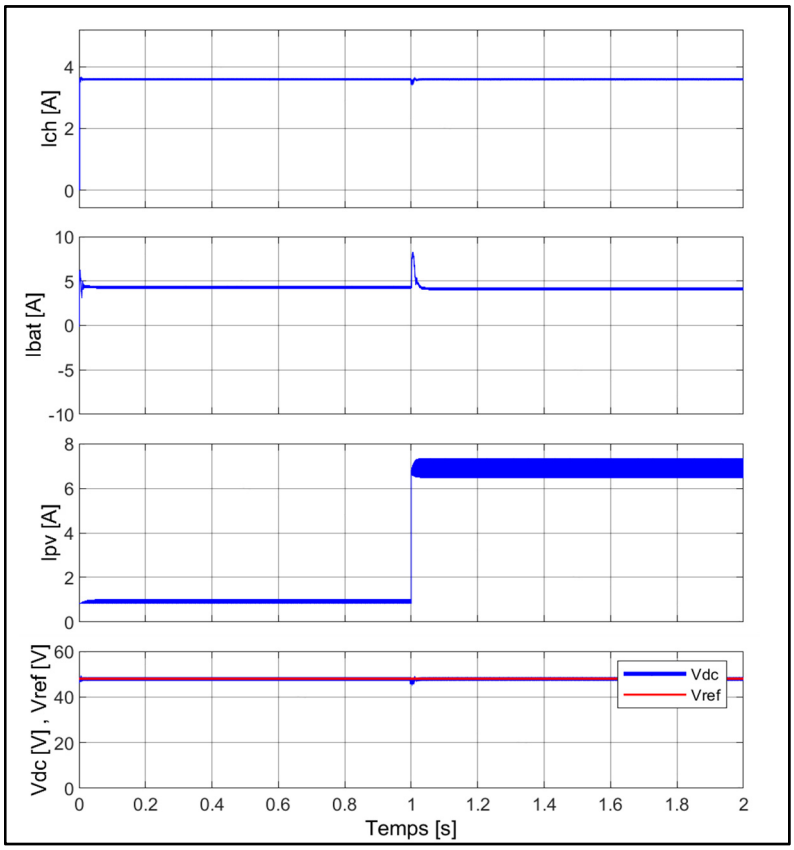

Figure 5.2 Mode 1 : Formes de courant de charge, batterie, PV et la tension Vdc

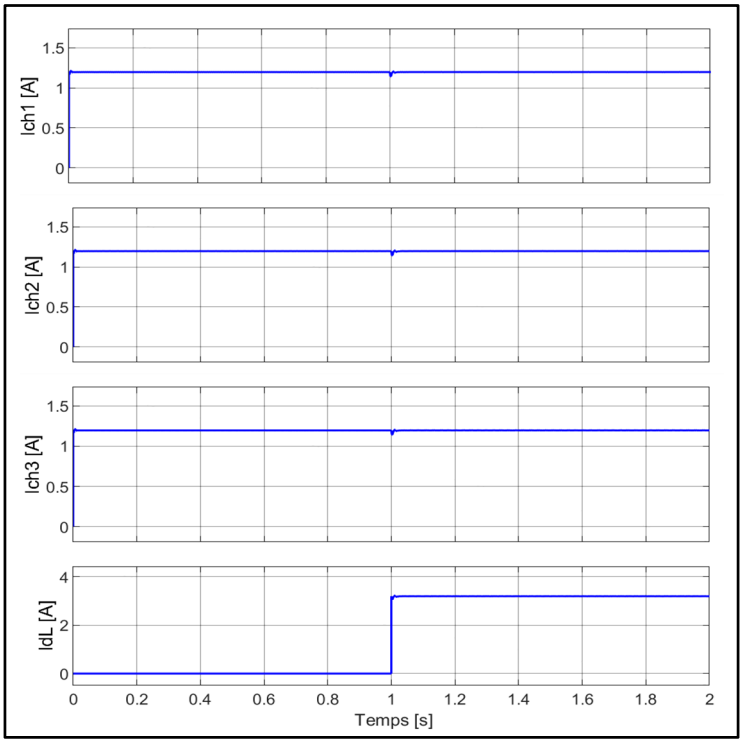

Figure 5.3 Mode 1 : Les formes des trois courants de charge et courant de la charge fictive

Les résultats du mode 1 montrent qu'à l'instant 1 seconde où les irradiations augmentent, la charge de délestage est activée dans le but de protéger la batterie contre les surcharges. En plus la batterie continue à se décharger et les 3 charges sont alimentées puisque la demande est inférieure à la puissance des PV. On remarque également que la tension du bus CC a diminué très légèrement et puis s'est stabilisée en suivant la valeur de référence 48 V toute au long de la simulation.

- Mode 2 : (b) → (c) → (a)

Pour ce mode, les modules photovoltaïques sont soumis aux irradiations suivantes pour chaque état:

(b) : 350W/m^2 et 150W/m^2

(c) : 50W/m^2 et 100W/m^2

(a) : 200W/m^2 et 1000W/m^2

Les résultats de ces simulations sont représentés dans les figures 5.4 et 5.5 suivantes.

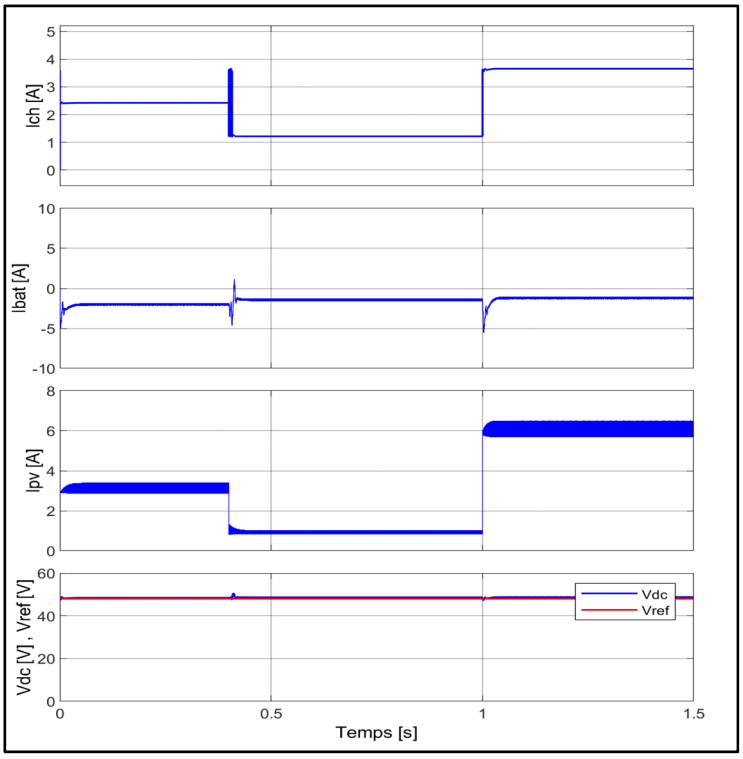

Figure 5.4 Mode 2 : Formes de courant de charge, batterie, PV et la tension Vdc

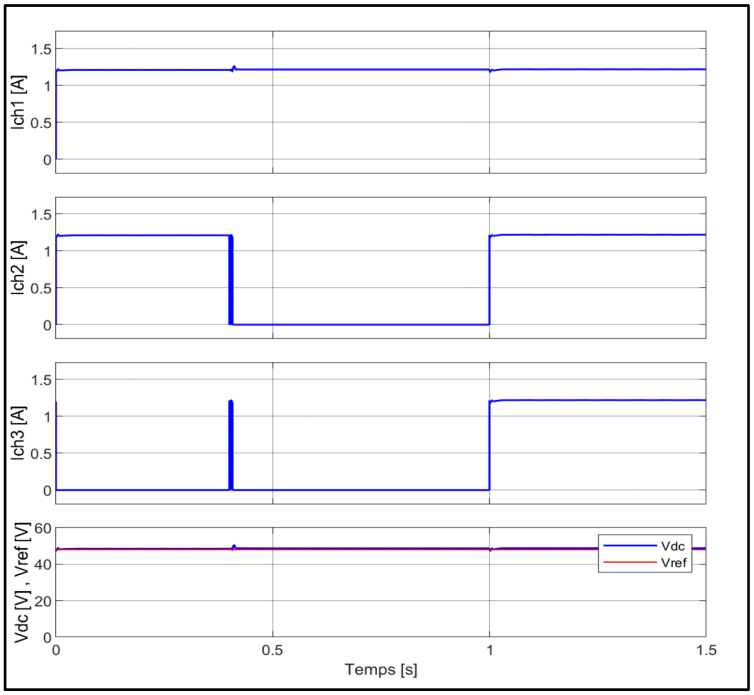

Figure 5.5 Mode 2 : Les formes des trois courants de charge et la tension Vdc

On peut voir sur ces figures que dès le début de la simulation jusqu'à 0,4 seconde (cas b), les panneaux photovoltaïques peuvent fournir de l'énergie suffisante pour activer seulement deux charges 1 et 2. Néanmoins, le reste de la puissance sert à recharger la batterie. Ensuite, à l'instant 0,4 seconde jusqu'à 1 seconde (cas c), l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques a diminué de telle façon que la charge 3 est déconnectée. On constate aussi que la tension de bus CC a été variée un peu puis elle reste constante à 48V. L'excès de la puissance permet de charger la batterie.

Après, de l'intervalle 1 seconde jusqu'à la fin de la simulation (cas a), l'ensoleillement sur les panneaux photovoltaïques a augmenté. Donc, le gestionnaire de puissance active, en plus de la charge 1, les deux autres charges 2 et 3. Puisque la puissance fournie par les PV est supérieure à celle de la demande, le reste sert à charger la batterie.

- Mode 3 : (a) → (b)

Finalement, les deux modules photovoltaïques sont soumis à des ensoleillements de 700W/m^2 et 600W/m^2 respectivement. Puis à l'instant 1 seconde, l'irradiation a diminué à 300W/m^2 pour le premier panneau et 200W/m^2 pour le deuxième. Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 5.6 et 5.7.

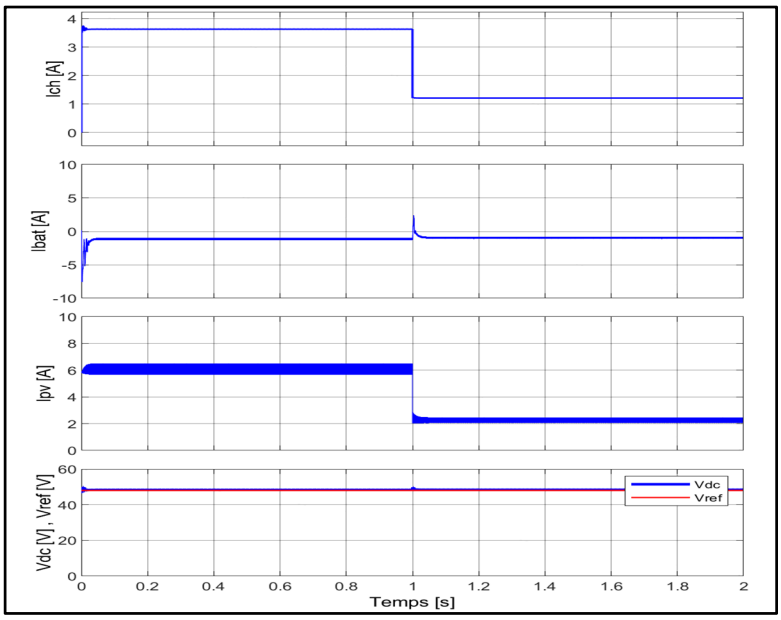

Figure 5.6 Mode 3 : Formes de courant de charge, batterie, PV et la tension Vdc

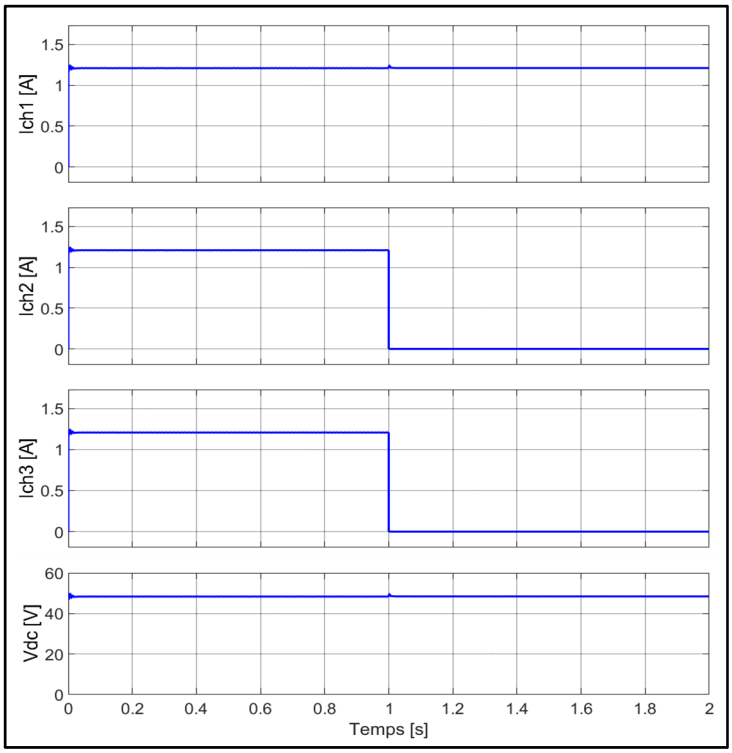

Figure 5.7 Mode 3 : Les formes des trois courants de charge et la tension Vdc

Les résultats de ce mode montrent que la batterie est initialement à faible niveau de charge et l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques est supérieure à la demande (a). Ce qui explique l'activation des trois charges 1, 2 et 3 et le chargement de la batterie. À partir de l'instant 1 seconde, en passant vers l'état (b), l'irradiation a diminué. D'où, la déconnexion des deux charges 1 et 2. En ce qui concerne de la tension Vdc et malgré une petite variation lors de changement de l'irradiation et la charge, elle se stabilise à 48V comme la tension de référence.

Tous ces résultats seront validés expérimentalement dans la partie suivante du chapitre.

5.4 Prototype et validation expérimentale au laboratoire

Un prototype du système est réalisé au laboratoire GRÉPCI, comme le montre la figure 5.8. Les performances sont testées à l'aide des éléments suivants :

- LabVolt émulateur d'un panneau solaire (1)

- Convertisseur élévateur (2)
- Convertisseur abaisseur-élévateur (3)
- Condensateurs et bobines (4)
- Charges (5)
- Batteries (6)
- Un contrôleur DSP : Digital Signal Processeur F28335 (7)

En ce qui concerne le temps d'échantillonnage et la fréquence de commutation sont $1e^{-5}$ ms et 10 kHz respectivement. Les charges utilisées sont de valeur 80 Ohm pour chaque. Ensuite, nous avons adopter UniSolar PVL-29 comme type de panneau solaire. Ce dernier est caractérisé par : Voc = 10,8 V; Isc = 4,8 A, MPP = 7,6 V et 3,2 A.

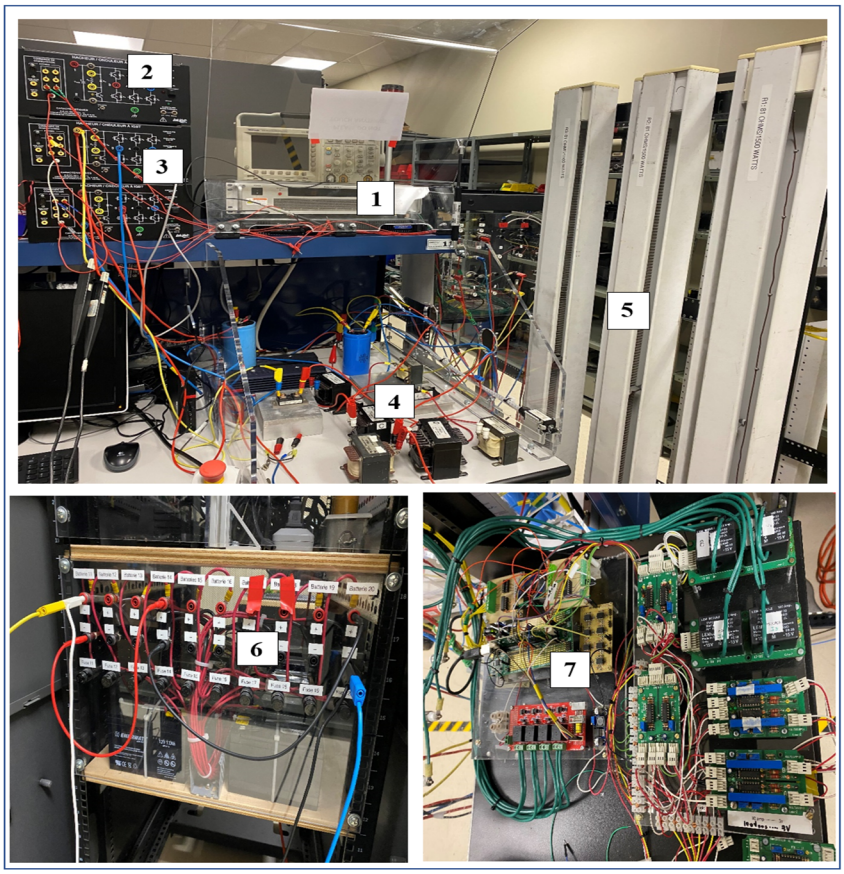

Figure 5.8 Installation expérimentale

5.5 Résultats et discussion

Les résultats expérimentaux de la tension CC (Vdc), des courants des charges (Ich1, Ich2, Ich3 et Ich_T), du courant du panneau photovoltaïque (Ipv), de la batterie (Ibat) et du courant de la charge délestage (IdL) sont présentés sur les figures suivantes.

Pour le premier mode, les figures 5.9 (a) et (b) montrent qu'initialement la batterie est en mode arrêt de chargement et que la puissance générée par les panneaux est supérieure à celle demandée par les charges. Donc, une charge de délestage est connectée au système afin de protéger la batterie contre le surplus de charges à l'instant t=0.5ms. On peut voir, également, que la tension Vdc est presque constante, ce qui confirme la fiabilité de la commande du convertisseur CC bidirectionnel. Comme la puissance des PV est moindre, le courant positif de la batterie donné par la figure 5.9(c) montre que cette dernière se décharge pour fournir l'énergie. Une fois, la puissance des PV est égale à la puissance des charges, la batterie arrête le chargement puisque les panneaux commencent à fournir de l'énergie. On remarque aussi que les courbes présentent des vibrations à cause des conditions environnementaux et du bruit lors de l'expérience. Alors, on retrouve les résultats décrits auparavant, la batterie se charge ou se décharge pour donner ou emmagasiner plus de courant. De ce fait, la stabilité du système complet lors de la variation de la charge est bien maintenue et le partage de puissance est correctement établi.

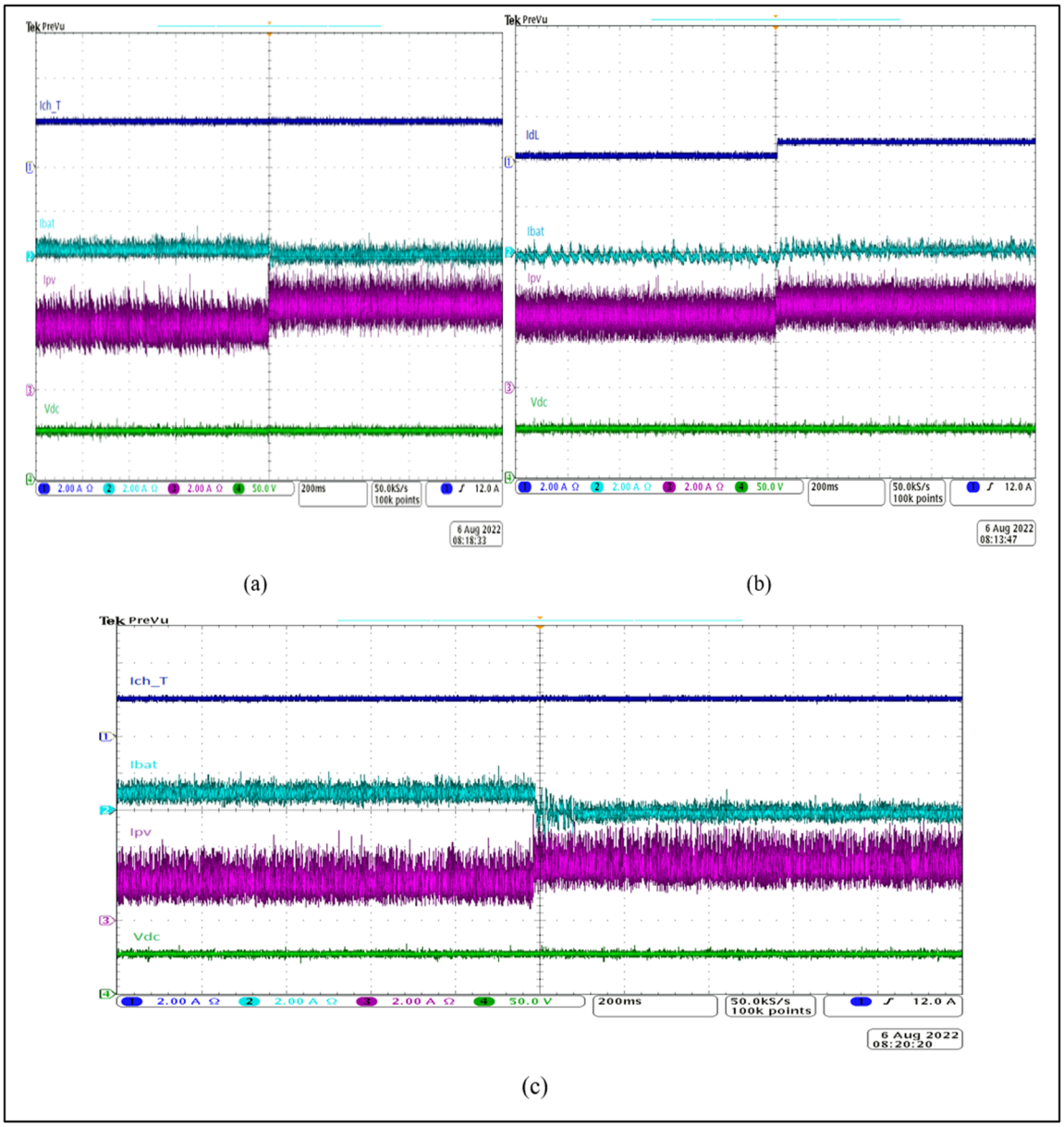

Figure 5.9 Résultats expérimentaux du système (Mode1)

Pour le mode 2, les figures 5.10 (a) et (b) montrent l'alimentation de deux charges par les panneaux photovoltaïques. Dès que cette puissance diminue en deçà de celle demandée par les deux charges, la deuxième charge se déconnecte du système et l'excès de l'énergie sert à charger la batterie. Ensuite, si la puissance générée par les PV s'élève au-delà du besoin des charges, ces dernières se reconnectent. On note que la tension Vdc du système est maintenue constante, comme le représentent les figures 5.10 (c) et (d).

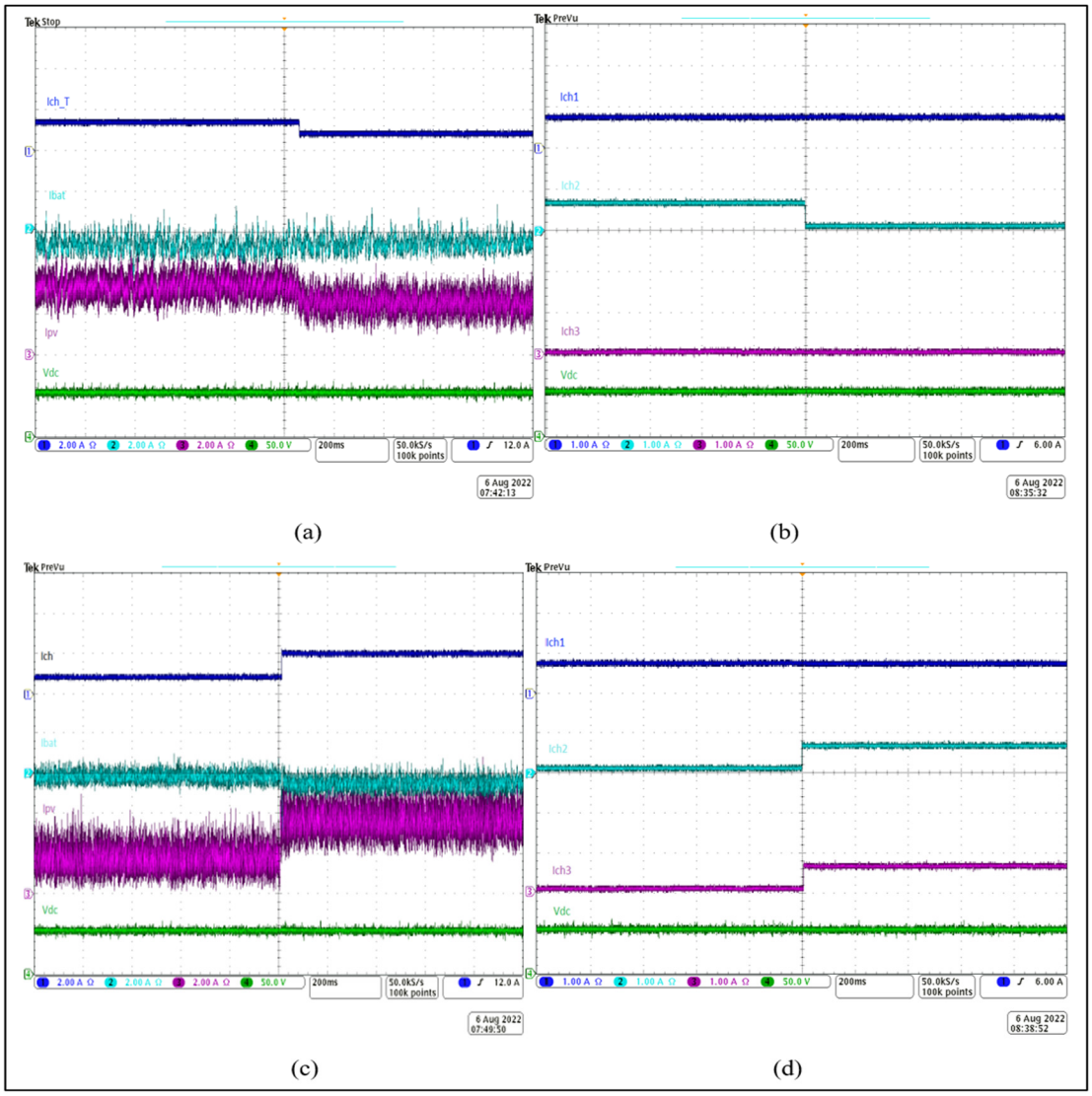

Figure 5.10 Résultats expérimentaux du système (Mode2)

Finalement, les résultats du mode 3 montrent que la puissance PV diminue et puisque la batterie est déchargée, deux charges ont été déconnectées du réseau. En effet, seulement une charge est alimentée par les PV et l'excès de l'énergie contribue à charger la batterie (figure 5.11).

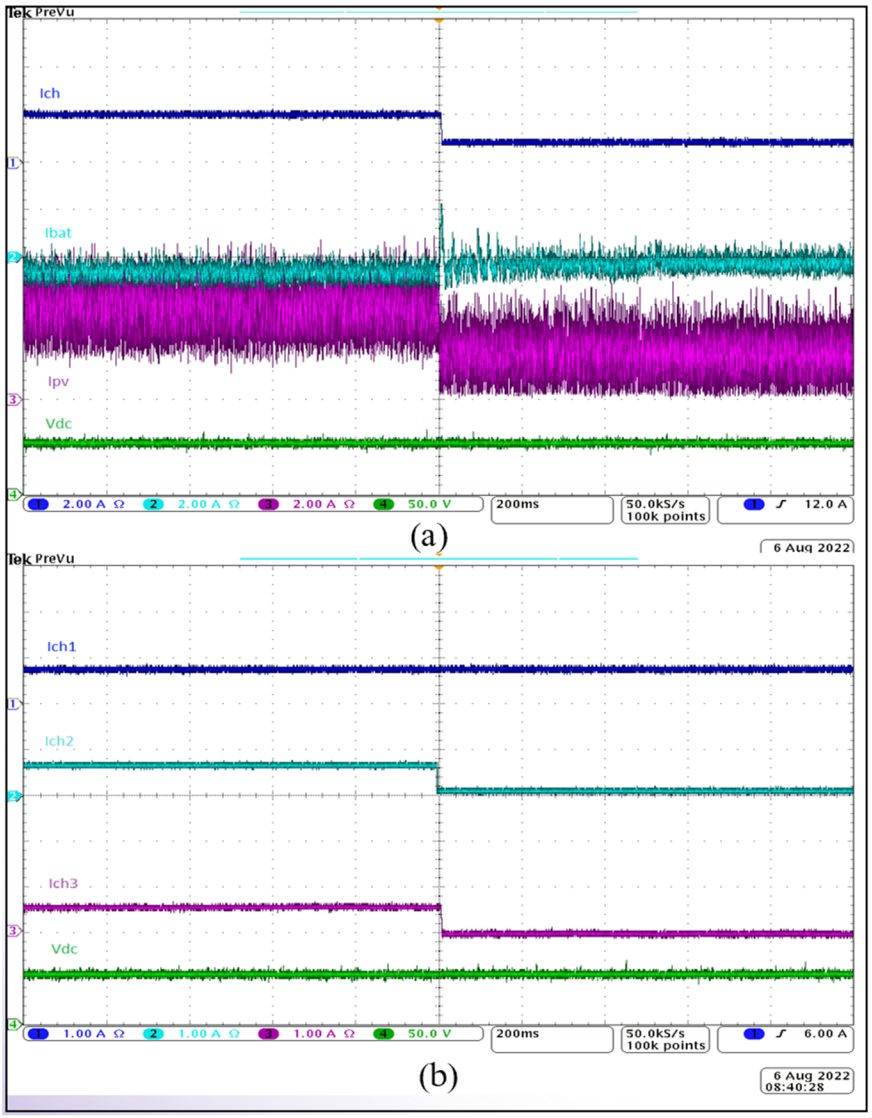

Figure 5.11 Résultats expérimentaux du système (Mode 3)

5.6 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons effectué plusieurs tests à l'aide de Matlab/Simulink. Ces tests affirment et prouvent l'efficacité du système automne étudié qui présente une station de charge des voiturettes électriques. Grâce au gestionnaire de puissance développé, la charge 1 est toujours alimentée dans toutes les conditions. Nous avons réalisé, également, un prototype pour la validation en temps réel de ce système dans le laboratoire « Groupe de recherche en électronique de puissance et commande industrielle (GRÉPCI) ».

Les résultats expérimentaux obtenus ont été promettants et ont montré un bon accord avec les résultats des simulations qui sont faites au niveau de la première partie de ce chapitre. De ce fait, les commandes développées ont été finalement validées pour les trois modes.

CONCLUSION

L'objectif de notre étude était l'amélioration de la puissance produite par un système photovoltaïque autonome, qui par la suite a fait l'objet d'une source d'alimentation pour une application de station de charge pour les voiturettes électriques (voiturettes du golf). Également, le développement d'un gestionnaire d'énergie afin de contrôler le flux de puissance et de satisfaire la demande des charges en fonction de l'ensoleillement disponible. En premier lieu, nous avons passé par une revue de littérature sur les énergies renouvelables basées au Canada et par des notions de base sur les chargeurs des voiturettes électriques qui s'articule sur les énergies vertes. Notamment, l'énergie solaire photovoltaïque. De ce fait, nous avons détaillé le principe de fonctionnement d'une cellule PV, sa modélisation électrique et sa performance face au changement de l'éclairement et la température afin de bien comprendre le comportement d'une telle cellule. Ensuite, nous avons étudié l'effet de l'ombrage partiel qui peut se survenir sur un système PV. Des méthodes d'optimisation de la puissance de sortie ont été discutées évidemment. En second lieu, nous avons abordé les étapes de dimensionnement d'un système PV. Compte tenu du phénomène d'ombrage partiel, plusieurs pics de puissance ont été identifiés sur la caractéristique P = f (V) des PV. Alors, différents tests ont été faits en vue d'améliorer la puissance extraite des PV en changeant la disposition des convertisseurs élévateurs de façon centralisée vers distribuée. Les résultats de ces tests nous ont montré que cette dernière configuration est la meilleure, mais coûteuse. Ainsi, la limitation de la méthode P&O utilisée de ne pas suivre le point de puissance maximale a été relevé dans ces conditions. En troisième lieu, il fallait important de développer une méthode de suivi plus sophistiquée et à base de l'intelligence artificielle. Donc, nous avons entrainé des neurones artificiels avec une méthode qui scanne la courbe de P=f(V) afin de concevoir un algorithme MPPT. Les performances de ce dernier ont été évaluées avec différentes irradiations sur Matlab/Simulink. D'autre part, nous avons effectué une commande à base de logique floue pour le convertisseur bidirectionnel dans le but de stabiliser la tension au bus CC-CC aux alentours de 48V et de contrôler la charge et la décharge de la batterie. Ainsi, nous avons développé un gestionnaire de puissance afin d'assurer le bon partage de la puissance vers les éléments d'un système. En dernier lieu, nous avons effectué une simulation complète de l'application de station de charge pour les véhicules à vitesse faible. La validation expérimentale au laboratoire en temps réel a démontré la fiabilité des commandes développées.

RECOMMANDATIONS

Les performances de notre système ont été validées par simulation et par l'expérience en temps réel. Néanmoins, nous pouvons suggérer des recommandations qui peuvent être intéressantes pour de futurs travaux de recherche.

- L'étude de bilan de puissance de chargeur électrique pour les voiturettes électrique
- Étude de la stabilité.
- Étude comparative de chargeur avec Buck boost et avec d'autre convertisseurs de puissance isolés comme le Fly back.
- Intégration des chargeurs et les panneaux solaires avec l'autre équipement sur la voiturette elle-même.
- Une étude technico-économique du système.
- Changement du choix de la configuration des panneaux solaires.

ANNEXE I

GESTIONNAIRE DE PUISSANCE

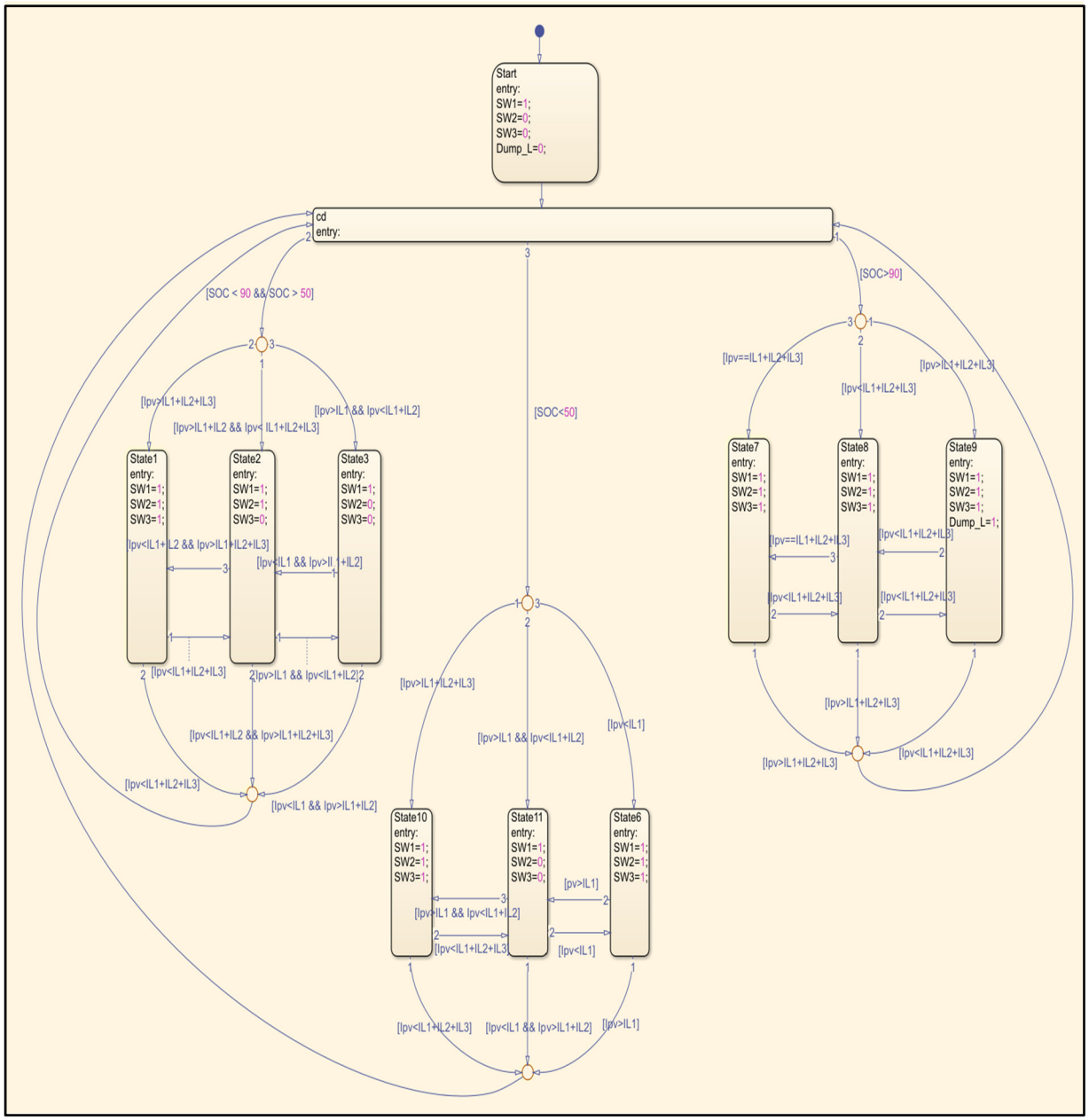

Figure-A I Gestionnaire de puissance

ANNEXE II

PARAMÈTRES DU SYSTÈME

Tableau A.II-1 Paramètres du système

Éléments	Paramètres
Panneau Jinko Solar JKM250-P-60	• 2 PV en série
Convertisseur élévateur CC-CC	• C_{cv} = 20 e^{-4} F • L_{cv} = 0.085e^{-3} H • Fréquence de commutation = 10 kHz
Bus CC	• Vdc = 48 V
Charges	• Charge1 = 40 Ohm • Charge2 = 40 Ohm • Charge3 = 40 Ohm
Charge de délestage	• R_d = 15 Ohm
Batterie lithium-ion	• Tension nominale=36 V

BIBLIOGRAPHIE

Abdelhakim B, Mustapha S, Ilhami C, Ramazan B, & Korhan K. (n.d.). Modeling and Simulation of Polycrystalline Silicon Photovoltaic Cells.

Abraham, J. D., Sasiraja, R. M., & Winston, D. P. (2021). Quality span prediction (QSP) of solar photovoltaic panels. Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks, ICICV 2021, 619–628, doi: 10.1109/ICICV50876.2021.9388537

Adebayo, T. S. (2022). Renewable Energy Consumption and Environmental Sustainability in Canada: Does Political Stability Make a Difference? Environmental Science and Pollution Research, doi: 10.1007/s11356-022-20008-4

Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R. (2000). Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. In Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis (Vol. 22).

Alajmi, B. N., Ahmed, K. H., Finney, S. J., & Williams, B. W. (2011). Fuzzy-logic-control approach of a modified hill-climbing method for maximum power point in microgrid standalone photovoltaic system. IEEE Transactions on Power Electronics, 26(4), 1022–1030, doi: 10.1109/TPEL.2010.2090903

Ali, A., Almutairi, K., Padmanaban, S., Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., Islam, S., Zahir, M. H., Shafiullah, M., & Malik, M. Z. (2020). Investigation of MPPT Techniques under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition-A Retrospection. IEEE Access, 8, 127368–127392, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007710

Alik, R., Jusoh, A., & Shukri, N. A. (2015). An improved perturb and observe checking algorithm MPPT for photovoltaic system under partial shading condition. 2015 IEEE Conference n Energy Conversion, CENCON 2015, 398–402.

Alkawsi, G., Baashar, Y., Dallatu Abbas, U., Alkahtani, A. A., & Tiong, S. K. (2021). Review of renewable energy-based charging infrastructure for electric vehicles. In Applied Sciences (Switzerland) (Vol. 11, Issue 9). MDPI AG.

Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., & Al-Raweshidy, H. S. (2018). A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems. International Journal of Hydrogen Energy, 43(31), 14158–14171.

Almousawi, A. Q., & Aldair, A. A. (2022). A New Power Management Control Strategy for PV-Battery Hybrid System. International Journal of Computing and Digital Systems, 12(1), 427–437, doi: 10.12785/ijcds/120134

Atul Sharma, Balaji Venkateswaran V, & Rashmi Singh. (2018). Experimental Analysis of Electrical and Thermal Effects of Various Configurations of Partial Shading on Three Different Solar Module Technologies.

Ayache, K., Chandra, A., & Chériti, A. (2020). An Embedded Reconfiguration for Reliability Enhancement of Photovoltaic Shaded Panels against Hot Spots. IEEE Transactions on Industry Applications, 56(2), 1815–1826.

Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2021). Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. In CSEE Journal of Power and Energy Systems (Vol. 7, Issue 1, pp. 9–33), doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720

Bonthagorla, P. K., & Mikkili, S. (2022). Performance Investigation of Hybrid and Conventional PV Array Configurations for Grid-connected/Standalone PV Systems. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 8(3), 682–695.

Chandra Mouli, G. R., Schijffelen, J., van den Heuvel, M., Kardolus, M., & Bauer, P. (2019). A 10 kW Solar-Powered Bidirectional EV Charger Compatible with Chademo and COMBO. IEEE Transactions on Power Electronics, 34(2), 1082–1098, doi: 10.1109/TPEL.2018.2829211

Charles Tze Kang Kho, Jubaer Ahmed, Saad Kashem, & Yi Lung Then. (2017). A comprehensive review on PV configurations to maximize power under partial shading.

Chewale, M. A., Wanjari, R., avakhande, V. B., & Sonawane, P. R. (2018). A Review on Isolated and Non-isolated DC-DC Converter for PV Application.

de Oliveira, R. M. S., Araújo, R. C. F., Barros, F. J. B., Segundo, A. P., Zampolo, R. F., Fonseca, W., Dmitriev, V., & Brasil, F. S. (2017). A system based on artificial neural networks for automatic classification of hydro-generator stator windings partial discharges. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 16(3), 628–645, doi: 10.1590/2179-10742017v16i3854

Dey, B. K., Khan, I., Abhinav, M. N., & Bhattacharjee, A. (2016, November 16). Mathematical modelling and characteristic analysis of Solar PV Cell. 7th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEEE IEMCON 2016, doi: 10.1109/IEMCON.2016.7746318

Elasser, A., Agamy, M., Sabate, J., Steigerwald, R., Fisher, R., & Harfman-Todorovic, M. (2010). A comparative study of central and distributed MPPT architectures for megawatt utility and large scale commercial photovoltaic plants. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2753–2758.

G, D., & Singh, S. N. (2017). Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 76, pp. 1230–1247), doi: 10.1016/j.rser.2017.03.130

Guillod, T., Papamanolis, P., & W. Kolar, J. (2020). Artificial Neural Network (ANN) Based Fast and Accurate Inductor Modeling and Design. IEEE Open Journal of Power Electronics, 1, 284–299, doi: 10.1109/ojpel.2020.3012777

Gupta, A. K., & Saxena, R. (2016). Review on widely-used MPPT techniques for PV applications. 2016 1st International Conference on Innovation and Challenges in Cyber Security, ICICCS 2016, 270–273.

Hoarca, I. C. (2021, May 27). Mathematical modeling and simulation of PV systems Part I: Mathematical modeling and Simulink implementation. 2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2021 – Proceedings, doi: 10.1109/ICATE49685.2021.9465047

Isaac Abiodun, O., Jantan, A., Esther Omolara, A., Victoria Dada, K., AbdElatif Mohamed, N., & Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. Heliyon, 4, e00938, doi : 10.1016/j.heliyon.2018

Jawad, J., Hawari, A. H., & Javaid Zaidi, S. (2021). Artificial neural network modeling of wastewater treatment and desalination using membrane processes: A review. In Chemical Engineering Journal (Vol. 419), doi: 10.1016/j.cej.2021.129540

Khalid, M. R., Alam, M. S., Sarwar, A., & Jamil Asghar, M. S. (2019). A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid. In eTransportation (Vol. 1).

Kim, K. A., & Krein, P. T. (2015). Reexamination of Photovoltaic Hot Spotting to Show Inadequacy of the Bypass Diode. IEEE Journal of Photovoltaics, 5(5), 1435–1441. doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2444091

Kreft, W., Przenzak, E., & Filipowicz, M. (2021). Photovoltaic chain operation analysis in condition of partial shading for systems with and without bypass diodes. Optik, 247, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167840

Laamami, S., Abid, A., Benhamed, M., & Sbita, L. (2020). Investigation on Protection Diodes in PV Generator. Proceedings of the 17th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2020,1069–1073.

Li, L. N., Liu, X. F., Yang, F., Xu, W. M., Wang, J. Y., & Shu, R. (2021). A review of artificial neural network based chemometrics applied in laser-induced breakdown spectroscopy analysis. In Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy (Vol. 180), doi: 10.1016/j.sab.2021.106183

Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. In Energy Reports (Vol. 6, pp. 1312–1327), doi: 10.1016/j.egyr.2020.05.013

Marugán, A. P., Márquez, F. P. G., Perez, J. M. P., & Ruiz-Hernández, D. (2018). A survey of artificial neural network in wind energy systems. In Applied Energy (Vol. 228, pp. 1822–1836), doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.084

Mehiri, A., Hamid, A.-K., & Almazrouei, S. (2017). The Effect of Shading with Different PV Array Configurations on the Grid-Connected PV System; The Effect of Shading with Different PV Array Configurations on the Grid-Connected PV System. In 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC).

Motahhir, S., el Hammoumi, A., & el Ghzizal, A. (2020). The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. In Journal of Cleaner Production (Vol. 246).

Munna Kumar, Sai Kumar Morla, & R.N.Mahanty. (2019). Configuration standard avec des diodes de dérivation et des diodes de blocage.

Muttaqi, K. M., Islam, M. R., & Sutanto, D. (2019). Future Power Distribution Grids: Integration of Renewable Energy, Energy Storage, Electric Vehicles, Superconductor, and Magnetic Bus. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 29(2), doi: 10.1109/TASC.2019.2895528

Noman, F., Alkahtani, A. A., Agelidis, V., Tiong, K. S., Alkawsi, G., & Ekanayake, J. (2020). Wind-energy-powered electric vehicle charging stations: Resource availability data analysis. Applied Sciences (Switzerland), 10(16).

Olalla, C., Maksimovic, D., Deline, C., & Martinez-Salamero, L. (2017). Impact of distributed power electronics on the lifetime and reliability of PV systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25(10), 821–835.

Pekel, E., Kara, S., & Soner Kara, S. (2017). A COMPREHENSIVE REVIEW FOR ARTIFICAL NEURAL NETWORK APPLICATION O PUBLIC TRANSPORTATION. In Nat Sci (Vol. 35, Issue 1).

Sahoo, S., Prakash, S., & Mishra, S. (2017). Handshaking V2G strategy for grid connected PV assisted charging station. IET Renewable Power Generation, 11(11), 1410–1417, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0853

Salam, Z., & Ramli, M. Z. (2012). A simple circuit to improve the power yield of PV array during partial shading. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012, 1622–1626, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342619

Sayed, K., Abo-Khalil, A. G., & Alghamdi, A. S. (2019). Optimum resilient operation and control DC microgrid based electric vehicles charging station powered by renewable energy sources. Energies, 12(22), doi :10.3390/en12224240

Seyedmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T. K., Rahmani, R., Than Oo, A. M., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2016). State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 64, pp. 435–455).

Shiruru, K. (2016). AN INTRODUCTION TO ARTIFICIAL NEURAL NETWORK Article in International Journal Of Advance Research And Innovative Ideas In Education.

Shweta Dahale, Aakriti Das, Naran. M. Pindoriya, & S. Rajendran. (2017). An Overview of DC-DC Converter Topologies and Controls in DC Microgrid.

Taghvaee, M. H., Radzi, M. A. M., Moosavain, S. M., Hizam, H., & Hamiruce Marhaban, M. (2013). A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 17, pp. 216–227), doi: 10.1016/j.rser.2012.09.023

Tripathi, A. K., Ray, S., & Aruna, M. (2021). Analysis on photovoltaic panel temperature under the influence of solar radiation and ambient temperature. Proceedings of the 2021 1st International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communications and Sustainable Technologies, ICAECT 2021.

Trivedi, N., & Gujar, N. S. (2018). Smart Solar Charge Controller for Electric Golf Cart Promoting Green Transportation; Smart Solar Charge Controller for Electric Golf Cart Promoting Green Transportation. In 2018 IEEE Punecon.

Ugale, C. P., & Dixit, V. v. (2017). Buck-boost converter using Fuzzy logic for low voltage solar energy harvesting application. Proceedings of 2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO 2017, 413–417.

Umana, A., & Meliopoulos, A. P. S. (2016). Detection of cell-level fault conditions within a photovoltaic array system. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2016-July.

Winston, D. P. (2019). Efficient Output Power Enhancement and Protection Technique for Hot Spotted Solar Photovoltaic Modules. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 19(4), 664–670, doi: 10.1109/TDMR.2019.2945194

Yachiangkam, S., Tammawan, W., Sriprom, T., Thongpron, J., Kamnarn, U., Oranpiroj, K., Somsak, T., Yotkaew, E., & Namin, A. (2022). Wireless Golf Cart Charging Development in Thailand. Proceedings of the 2022 International Electrical Engineering Congress, IEECON 2022.

Yadav, A. S., Pachauri, R. K., & Chauhan, Y. K. (2016). Comprehensive investigation of PV arrays with puzzle shade dispersion for improved performance. Solar Energy, 129, 256–285, doi: 10.1016/j.solener.2016.01.056

Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2013). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. In IEEE Transactions on Power Electronics (Vol. 28, Issue 5, pp. 2151–2169), doi: 10.1109/TPEL.2012.2212917

Yusoff, M. J., Ismail, N. F. N., Musirin, I., Hashim, N., & Johari, D. (2010). Comparative study of fuzzy logic controller and proportional integral derivative controller on DC-DC Buck converter. PEOCO 2010 - 4th International Power Engineering and Optimization Conference, Program and Abstracts, 142–148.