

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar - Annaba
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار - عنابة

كلية التكنولوجيا

قسم الكهروتقني

Département Electrotechnique

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat 3^{ème} cycle

Spécialité : Commande électrique

Filière : Electrotechnique

Par :

Boukerche Ghania

Thème :

Etude et gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque avec stockage hybride batteries/supercondensateurs

Thèse soutenue le 30 Octobre 2025 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Pr. KLAIAIA Mounia Samira	Prof	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Pr. OMEIRI Amar	Prof	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	Pr. MERABET Hichem	Prof	Unité de recherche en Mines et Métallurgie (URMM)	Co-rapporteur
04	Pr. ADJABI Mohamed	Prof	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
05	Pr. ATTOUI Issam	Prof	Unité de recherche en Mines et Métallurgie (URMM)	Examineur
06	Dr. DJELLAD Abdelhak	MCA	Ecole Supérieure de technologies Industrielles-Annaba	Examineur

الملخص:

التغير المناخي عبر العالم هو أحد مخلفات التطور التكنولوجي والصناعي، وهذا ما أدى الى تزايد الطلب على الطاقة، مما دفع الباحثين إلى السعي لاكتشاف مصادر جديدة للطاقة. وقد اعتمدوا على الطاقة المتجددة لما لها من مزايا عديدة، مثل كونها مصدراً اقتصادياً ونظيفاً للطاقة لا ينضب. ومن هذه الطاقات طاقة الرياح والطاقة الكهرومائية والطاقة الشمسية، والتي تعتبر من أكثر الطاقات موثوقية. يعتمد إنتاج الطاقة الشمسية على الظروف الجوية (درجة الحرارة، الإشعاع). ولذلك فإن كمية الطاقة التي ينتجها النظام الكهروضوئي تختلف باختلاف الظروف الجوية. وتكون مرتفعة أحياناً ومنخفضة أحياناً أخرى، مما دفع المفكرين إلى تطوير نظام لتخزين الطاقة الزائدة واستخدامها عند الحاجة. ولم تتوقف عمليات البحث عند هذا الحد، بل تعدت كيفية تحقيق أقصى كفاءة للنظام الكهروضوئي والبحث عن النظام الأكثر كفاءة لتخزين هذه الطاقة، بهدف تحديد موقع نقطة الطاقة المثلى، والتي تعتمد على طرق مختلفة منها الأساليب التقليدية والحديثة التي تركز على الذكاء الاصطناعي. في هذه الدراسة، قمنا بدراسة النظام الكهروضوئي مع نظام تخزين للطاقة، بالإضافة للتطرق الى طرق تتبع النقطة المثلى بواسطة طرق تقليدية وتعزيز المكثفات ومقارنتها مع الطرق الحديثة من حيث إنتاج الطاقة وتأثيرها على نظام التخزين. علاوة على ذلك قمنا بدراسة المقارنة بين نظامين للتخزين، الأول يعتمد على بطارية الرصاص الحمضية، بينما الثاني يعتمد على نظام هجين مكون من بطارية/مكثف فائق السعة، وذلك باستخدام برنامج MATLAB 2018 (أ)، حيث تأكدنا بفضل النتائج التطبيقية من نتائجنا النظرية حيث اكتدت أن النظام الكهروضوئي ذو المنطق الضبابي (MPPT) أكثر فعالية من الطرق التقليدية من حيث الدقة والثبات والتتبع والتجاوز وزمن الاستجابة، والتي تؤكد أن نظام التخزين الهجين أكثر فعالية من نظام البطارية من حيث الكفاءة والتكلفة. وفي الأخير أتمنى ان يكون لهذا العمل قيمة اضافية في مجال البحث لأنظمة الطاقة الكهروضوئية مع نظام تخزين للطاقة.

كلمات مفتاحية: النظام الكهروضوئي، التخزين، إدارة الطاقة، خوارزمية MPPT، نظام البطاريات الهجين، المكثفات الفائقة السعة.

Résumé :

Avec le monde récemment exposé à un certain nombre de crises, telles que le changement climatique et les guerres en cours, La quantité d'énergie utilisée est en constante hausse, poussant les chercheurs à rechercher de nouvelles sources d'énergie. Ils ont adopté les énergies renouvelables pour avoir de nombreux avantages, tels qu'être une source économique et nette d'énergie durable. Ces énergies sont l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne, qui est considérée comme les énergies les plus bas. La génération d'énergie solaire dépend des conditions météorologiques (chaleur, rayonnement). Donc, en conséquence, la production d'énergie du système électrique varie selon les conditions météorologiques. Il est parfois élevé et parfois faible, ce qui a poussé les penseurs à développer un système pour stocker l'excès d'énergie et l'utiliser au besoin. Les recherches ne se sont pas arrêtées à cette étape, mais se sont concentrées sur la façon de maximiser l'efficacité du système photovoltaïque et sur la recherche du système le plus efficace pour stocker cette énergie, afin de localiser le point d'énergie idéal (MPPT), qui dépend de différentes façons, notamment des techniques traditionnelles et modernes basées sur l'intelligence artificielle. Pendant cette étude, nous avons analysé le processus de transformation en employant un dispositif de stockage d'énergie, tout en cherchant des techniques pour déterminer le point idéal.

Nous avons proposé aussi une étude comparée de deux systèmes de stockage d'énergie. Dans le premier système, on recourt aux batteries (plomb-acide), tandis que le second système s'appuyait sur une accumulation composée d'une batterie et d'un supercondensateur. Nous avons obtenu des résultats qui confirment nos résultats théoriques et qui prouvent que le système photovoltaïque à la logique floue (MPPT) est supérieure aux méthodes classiques pour la stabilité, le temps de réaction, l'excès et le niveau d'écrasement, ce qui prouve que le stockage hybride est plus efficace et plus coûteux qu'un système de batterie.

Mots clés : Système photovoltaïque, stockage, gestion de l'énergie, algorithme MPPT, système hybride batteries, supercondensateurs.

Abstract:

With the world recently exposed to several crises, such as climate change and ongoing wars, demand for energy is steadily increasing, driving researchers to search for new energy sources. They have embraced renewable energy due to its numerous benefits, like being an economical and net source of sustainable energy. Solar photovoltaic energy and wind energy are considered the most reliable sources of energy. Solar energy production depends on weather conditions. Therefore, the weather has an impact on how much energy the electrical system produces. It is sometimes high and sometimes weak, which has prompted thinkers to develop a system to store excess energy and use it as needed. Research has not stopped at this stage but has focused on how to maximize the efficiency of the photovoltaic system and on finding the most efficient system to store this energy in order to locate the ideal energy point (MPP), which depends on different ways, including traditional and modern methods based on artificial intelligence. During the current study, we studied the conversion system with an energy storage system, in addition to looking for ways to track the optimal point. We also proposed a comparative study between two energy storage systems. The first system used batteries (lead acid), while the second system relied on an accumulation consisting of a battery and a supercapacitor. We have obtained results that confirm our theoretical findings and prove that the photovoltaic system with fuzzy logic (MPPT) is more efficient in terms of stability, response time, and excess, and a state of crush that proves that hybrid storage is more efficient and more expensive than a battery system.

Keywords: Photovoltaic system, storage, energy management, MPPT algorithm, hybrid battery system, super capacitors.

Dédicace

*Louange à Dieu qui nous a donné l'opportunité
de profiter de cette étape de notre parcours
éducatif.*

*Ce succès, obtenu par la grâce de Dieu Tout-
Puissant, est dédié à mes honorables mère et
père, Que Dieu ait pitié d'eux et les récompense
de son vaste Paradis.*

À toute ma famille,

*Pour toutes les personnes que mon cœur aime et
que ma plume a oubliées.*

Remerciements

J'adresse mes remerciements et mes louanges à Dieu Tout-Puissant pour la bénédiction de la connaissance et du succès, et je dis que mon succès n'est qu'en Dieu. Ensuite, à mon directeur de thèse, le professeur Omeiri Ammar à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour les conseils et l'orientation avec lesquels il m'a soutenu pendant toute la durée de la recherche.

Je remercie de même mon co-directeur de thèse Hicham Merabet, pour son aide dans la recherche, ainsi que la famille du département électrotechnique de l'université Badji Mokhtar Annaba.

Un grand merci à mes collègues de l'Unité de recherche sur les matériaux avancés d'Annaba pour leur soutien psychologique et scientifique.

À toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, que ce soit de près ou de loin.

LISTE DES FIGURES

I.1	Analyse spectrale de la lumière solaire.	5
I.2	Le potentiel solaire mondial	6
I.3	Capacités solaires en Afrique	7
I.4	Capacités en énergie solaire dans différentes régions d'Algérie	7
I.5	Moyenne annuelle d'irradiation directe mondiale (Phase de 2002-2011)	8
I.6	Les buts du programme d'énergie en Algérie	9
I.7	Principe de fonctionnement de la batterie	12
I.8	Le clip interne de l'accumulateur	13
I.9	Le changement de tension et du courant d'une cellule de batterie au plomb	14
I.10	Diverses catégories de batteries au plomb	16
I.11	Structure d'un supercondensateur	17
I.12	Illustration graphique d'un SC en fonction de sa charge et de sa décharge	18
I.13	Différentes caractéristiques des éléments de stockage pour une hybridation	21
I.14	Système photovoltaïque	22
I.15	Distribution du rayonnement selon le spectre	23
I.16	L'effet photovoltaïque	24
I.17	La composition d'une cellule photovoltaïque en silicium	25
I.18	Système photovoltaïque autonome	28
I.19	Système hybride avec éolien.	30
I.20	PV connecté directement au réseau	31
II.1	Constituants d'un champ photovoltaïque	34
II.2	Un schéma similaire du modèle à une seule diode	35
II.3	Caractéristique (I-V) d'une cellule solaire	38
II.4	Module photovoltaïque	38
II.5	Installation des cellules en série	39
II.6	Ensemble parallèle de cellules solaires	41
II.7	Ensemble en (série + parallèle) mixte des cellules PV	42
II.8	Les panneaux solaires avec les diodes de surveillance	43
II.9	La diode de by-pass et son impact sur les performances $I_{pv}(V_{pv})$ d'un GPV	43
II.10	Caractéristiques générateur PV(a) I-V, (b) P-V	44
II.11	Zones de fonctionnement du Générateur PV	45
II.12	Caractéristiques d'un module PV pour diverses valeurs d'ensoleillement à température constant (a) I-V, (b) P-V	46

II.13	Caractéristiques d'un module solaire PV pour des valeurs de températures variées avec un soleil constant (a) I-V, (b) P-V	47
II.14	Système photovoltaïque avec un couplage direct	48
II.15	Le fonctionnement d'un GPV se base sur la charge liée en direct	48
II.16	Un étage d'adaptation permet d'accoupler un GPV à une charge	49
II.17	Schéma électrique de convertisseur survolteur	50
II.18	Illustration électrique du dévolteur	52
II.19	Schéma électrique du convertisseur dévolteur-survolteur	52
II.20	Système d'énergie solaire avec convertisseur DC-DC et régulateur MPPT	53
II.21	Classification de la technique MPPT couramment utilisée	53
II.22	Structure de la technique IncCond	55
II.23	Structure de l'algorithme P&O	56
II.24	Graphique de flux de la technique FLC	57
II.25	Modèle R-C de la batterie	59
II. 26	Modèle d'un supercondensateur basé sur des circuits RC en cascade	60
II. 27	(a) La modélisation d'un supercondensateur en utilisant l'ESR, (b) La modélisation en utilisant la résistance parallèle	61
III.1	PV étudié sous MATLAB/Simulink avec MPPT(FLC)	64
III.2	Schéma bloc du contrôleur logique floue dans Simulink/MATLAB	65
III.3	PV étudié sous MATLAB/Simulink avec MPPT (IncCond).	65
III.4	Schéma bloc du contrôleur IncCond dans Simulink/MATLAB	66
III.5	Courant à température constante (25°C) et irradiation stable (1000 W/m ²)	67
III.6	Tension à température stable (25°C) et irradiation stable (1000W/m ²)	67
III.7	Puissance à température stable (25°C) et irradiation stable (1000W/m ²)	68
III.8	Courbe de changement du rayonnement solaire	69
III.9	Courant à température constante (25°C) et rayonnement variable	69
III.10	Tension à température stable (25°C) et irradiation variable	70
III.11	Puissance à température stable (25°C) et irradiation variable	70
III.12	Système photovoltaïque étudié sous MATLAB/Simulink avec MPPT (P&O)	71
III.13	Courant à température et irradiation stables	72
III.14	Tension à température et irradiation stables	72
III.15	Puissance à température constante (25°C) et irradiation constante (1000W/m ²)	73
III.16	Variation du rayonnement solaire	73
III.17	Courant à température stable (25°C) et rayonnement variable	74

III.18	Tension à température stable (25°C) et irradiation variable	74
III.19	Puissance à température constante (25°C) et irradiation variable	74
III.20	Système photovoltaïque avec stockage batterie sous MATLAB/Simulink avec MPPT (FLC)	75
III.21	La structure de gestion du contrôle	77
III.22	La variation de radiation	77
III.23	V_{bus} avec utilisation différente des MPPTs	78
III.24	I_{pv} avec utilisation différente des MPPTs	78
III.25	V_{PV} avec utilisation différente des MPPTs	79
III.26	P_{pv} avec utilisation différente des MPPTs	79
III.27	Tension de batterie avec utilisation différente des MPPTs	80
III.28	L'état de charge de la batterie avec différents MPPT	80
IV.1	PV avec ESS de batterie	86
IV.2	PV avec système HESS	87
IV.3	Stratégie pour la gestion d'énergie du surveillé du bus DC	90
IV.4	Structure de gestion du système SSEH	90
IV.5	Modèle PV avec batterie uniquement pour le stockage dans MATLAB/Simulink	92
IV.6	Modèle PV avec batterie/supercondensateur pour stockage dans MATLAB/Simulink	93
IV.7	Illustration du schéma du circuit de charge de la batterie dans MATLAB/Simulink	93
IV.8	Diagramme schématique du circuit de charge de la batterie dans PV avec batterie/supercondensateur	94
IV.9	Diagramme schématique du circuit de charge du supercondensateur dans PV avec batterie/supercondensateur	94
IV.10	Test 01 : (a) Irradiation ; (b) Tension de la batterie ; (c) Courant de la batterie ; Alimentation par batterie ; Puissance requise ; État de charge (SOC) de la batterie	95
IV.11	Irradiation	95
IV.12	La puissance de sortie de panneau	96
IV.13	Test 02 : (a) Irradiation ; (b) Tension de la batterie ; (c) Courant de la batterie	97

LISTE DES TABLEAUX

I.1	Potentiel solaire.	08
I.2	Plan de production d'électricité provenant des énergies renouvelables	10
I.3	Classification des outils de stockage	11
I.4	Avantages et inconvénients de supercondensateurs	19
I.5	Les technologies appliquées pour fabriquer les panneaux solaires	25
I.6	Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque	28
II.1	Bases de règles floues	56
III.1	Caractéristiques électriques du 1soltech 1sth-215-P	63
IV.1	Paramètres de PV	88
IV.2	Paramètre des résultats	97

LISTE DES SYMBOLES

PV	Système photovoltaïque
ES	Energie solaire
GPV	Générateur Photovoltaïque
SSE	Système de stockage de l'énergie électrique
SSEH	Système de stockage d'énergie électrique hybride
CSP	Concentrated Solar Power
PPM	Point de Puissance Maximum
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPPTs	Multiple Maximum Power Point Tracking
Pmax	Puissance maximale
DC	Direct current
AC	Alternatif current
PSO	Particle Swarm Optimization
P&O	Perturbation and d'observation
IncCond	Incremental conductance
FLC	Fuzzy logic
FIS	Fuzzy Inference floue
E (k)	The error
ΔE (k)	The error variance over time k
N	Négatif
Z	Zéro
P	Positif
IA	Intelligence artificielle
CO ₂	Le dioxyde de carbone
PbO ₂	Le dioxyde de plomb
H ₂ SO ₄	Solution d'acide sulfurique
AsGa	Arséniure de Gallium
CdTe	Tellurure de Cadmium

InGaP	Indium Gallium Phosphide
VRLA	Batterie avec vanne régulière
SC	Supercondensateur
R_p	Résistance parallèle
R_s	Résistance série
G	Rayonnement solaire
E	L'intensité lumineuse
T_c	Température de la cellule
I_{ph}	Photo courant
I_s	Courant inverse de saturation de la jonction
K	Constante de Boltzmann
T	Température de la cellule est exprimée en Kelvin
q	Charge de l'électron
a	Facteur de non idéalité de la jonction
I_{pv}	Courant généré par le panneau photovoltaïque
V_{pv}	Tension fournie par le panneau PV
P_{pv}	Puissance fournie par le panneau PV
I_{cc}	Courant de court-circuit du panneau
N_s	Nombre de cellules reliées en série
N_p	Nombre de cellules reliées en parallèle
V_{co}	Tension du circuit ouverte
$I_{opt}(I_{mp})$	Courant optimal
$V_{opt}(V_{mp})$	Tension optimal
I_{cc}	Courant de court-circuit
R_p	Résistance parallèle
R_s	Résistance série
V_0	Tension de sortie
V_i	Tension d'entrée
α	Rapport cyclique
L	Inductance de boost

C	Conductance de boost
F	Fréquence de commutateur l'interrupteur d'un hacheur
R _i	Résistance interne de batterie
E ₀	Tension à vide
SOC _b	Etat de charge de batterie
V _c	Tension d'entrée idéale de batterie
V _{bat}	Tension aux bornes de la batterie
I _{bat}	Courant développé par la batterie
R _v	Résistance variable interne de la batterie
<i>k_b</i>	Coefficient de polarisation
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension
Km	kilomètres
C _{bat}	Capacité de la batterie
V _{bat-oc}	Tension de batterie en circuit ouvert
ω_e	Pulsation électrique
τ_{sc}	Constante de temps
I _{Bat-Ref}	Courant de batterie de référence
C _{ssc}	Capacité équivalente des capacités de supercondensateur
R _{ssc}	Résistance équivalente des résistances de supercondensateur
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
PWM	Pulse Width Modulation
I _{max}	Courant maximal
I _{cc}	Courant de Court-Circuit
V _{co}	Tension de Circuit Ouvert
I _{opt}	Courant Optimaux au PPM
V _{opt}	Tension Optimaux au PPM
irr	Irradiation
I _d	Courant de diode.

V_d	Tension de diode
V_{bus}	La tension de sortie de boost
R_s	Résistance de la source de tension
L_s	Inductance de la source de tension
I_{pv}	Courant de panneaux PV
V_{pv}	Tension de panneaux PV
P_{pv}	Puissance panneaux PV
P_{load}	Puissance de la charge
ΔI	L'erreur de courant
I_{sc}	Courant de super condensateur
ΔI^*	Courant de référence déficitaire
f_{LPF}	Fonction de transfert du filtre passe-bas
D_{bat}	Rapport cyclique pour le signal de commande PWM des commutateurs du convertisseur de batteries (SW1 et SW2).

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
I. Concepts généraux sur des systèmes PV et de leurs stockages énergétiques	4
I.1.Introduction	4
I.2. l'énergie solaire	5
I.3. L'énergie solaire photovoltaïque	5
I.4. Le potentiel solaire mondial	6
I.5. La richesse de l'énergie solaire en Afrique	6
I.6. La capacité d'énergie solaire en Algérie	7
I.7. Plan d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie dans le futur	9
I.8. Le stockage de l'énergie électrique	10
I.8.1 Classement des méthodes de stockage	10
I.8.1.1 Batteries	11
I.8.1.2 Supercondensateurs	17
I.8.1.3 Stockage hybride dans les systèmes électriques	19
I.9 Identification d'un système PV	21
I.9.1 Rayonnement du soleil	22
I.9.2 L'effet photovoltaïque	23
I.9.3 Le mode d'action d'une cellule photovoltaïque	24
I.9.4 Types de cellule	25
I.9.5 Etude des techniques des cellules PV	27
I.9.6 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque	28
I.9.7 Systèmes d'énergie solaire et leurs types	29

I.9.7.1 Les sources d'électricité de faible puissance	29
I.9.7.2 Système Photovoltaïque autonome	29
A. Systèmes PV autonomes d'alimentation directe	30
B. Système autonome avec système de stockage d'énergie	30
C. Système hybride photovoltaïque autonome	30
I.9.7.3 Système PV accouplé directement au réseau	31
I.10. Conclusion	32
II. Modélisation d'un système photovoltaïque autonome	
II.1. Introduction	33
II.2. Générateur Photovoltaïque GPV	33
II.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	35
II.4 Caractéristiques d'une cellule PV	37
II.5 Assemblage de cellules solaires	38
II.5.1 Installation des cellules en série	39
II.5.2 Installation des cellules en parallèle	39
II.5.3 Les cellules photovoltaïques en mixte (série + parallèle)	40
II.6 Protections d'un générateur	41
II.7 Caractéristiques d'un générateur PV	43
II.8 Les zone de fonctionnement du générateur PV	43
II.9 Effet des conditions environnementales sur le fonctionnement des panneaux photovoltaïques	44
II.9.1 L'effet de l'ensoleillement	44
II.9.2 L'effet de la température	45
II.10 Le fonctionnement des systèmes PV	46
II.10.1 Connexion GPV-charge	46
II.10.1.1 Connexion directe	46

II.10.1.2 Connexion indirecte	48
II.11 Convertisseur électroniques de puissance	48
II.11.1 Hacheur survolteur (Boost)	49
II.11.2 Hacheur dévolteur (Buck)	50
II.11.3 Convertisseur buck-boost	51
II.12 Commande MPPT	52
II.12.1 Les plus importantes des commandes de MPPT	52
II.12.1.1 Techniques indirectes	53
II.12.1.2 Techniques directes	53
II.12.2 Technique d'incrémentation de l'inductance (IncCond)	53
II.12.3 Technique de P&O	54
II.12.4 Technique de logique floue FLC	55
II.13 Modélisation du système de stockage	57
II.13.1 Modélisation de la batterie	58
II.13.2 Modélisation du supercondensateur	59
II.14 Conclusion	61
III. Simulation d'un PV avec batterie de stockage	62
III.1. Introduction	62
III.2. Étude comparative des techniques MPPTs pour un PV autonome sans ESS	62
III.2.1 Détail du système PV analysé	62
III.2.2 Résultats obtenus	65
III.2.2.1 Irradiation constante	65
III.2.2.2 Variation d'irradiation	67
III.3.1 Système photovoltaïque avec stockage de batterie	70

III.3.2 Les résultats	70
III.3.2.1 Irradiation constante	70
III.3.2.2 Variation d'irradiation	72
III.4. Interprétations des résultats	74
III.5. Étude comparative des techniques MPPT pour un PV autonome avec ESS batterie plomb-acide	75
III.5.1. les techniques des MPPTs	75
III.5.2. Gestion du stockage et du contrôle de l'énergie	76
III.5.3. Résultats de simulation	77
III. 6. Conclusion	81
IV. Gestion de l'énergie de PV avec stockage hybride batterie /supercondensateur	
IV.1. Introduction	82
IV. 2. Dispositifs de stockage d'énergie	82
IV.2.1. Batteries	83
IV.2.2. Supercondensateur	84
IV.2.3. Hybridation du stockage	85
IV. 3. Description du système et schéma de contrôle	86
IV. 3.1 Système photovoltaïque avec stockage de batterie	86
IV. 3.2 Système photovoltaïque avec HESS	86
IV. 3.3 Paramètres de système PV	87
IV.4. La stratégie de gestion de l'énergie	88
IV.4.1 L'intérêt de la gestion	88
IV.4.2 La batterie est en état de charge	89
IV.4.3 Ajustage de charge	89

IV.4.4 Protéger contre les surtensions	89
IV.4.5 Gestion de la décharge	89
IV.4.6 Contrôle de la capacité	89
IV.5. Stratégie de gestion du système	89
IV.6. Résultats et discussion	92
IV.7. Conclusion	98
Conclusion générale	99
Perspective	101
Reference	102

Introduction générale

L'énergie est l'un des plus grands problèmes étudiés aujourd'hui. Les sources d'énergie fossiles comme le gaz naturel, le charbon et le pétrole ont pris une place prépondérante depuis la révolution industrielle pour tout ce qui est indispensable à la société humaine : des moteurs à vapeur aux moteurs diesel et à combustion interne, de l'électricité. Même la climatisation Le chauffage des édifices, en partant de la cuisine, l'emploi de l'eau pour le réchauffement et l'éclairage, ainsi que différents appareils électriques et électroniques, outre la majorité des modes de transport, elle demeure tributaire des énergies fossiles, qui sont une image stockée sur l'énergie solaire depuis de nombreuses années, s'épuisent rapidement en raison d'une utilisation excessive. De plus, brûler ces sources a nui à l'environnement. Sur la planète Terre, cela se produit encore aujourd'hui.

Dans beaucoup de parties du globe, l'accroissement rapide de la capacité de production grâce aux énergies renouvelables (ER) intermittentes, en particulier l'énergie solaire et éolienne, le développement du stockage d'énergie à grande échelle pour l'électricité a été fortement renouvelable, soumis à des flux d'énergie qui varient naturellement (tels que le solaire, l'éolien et le photovoltaïque), caractérisés par des facteurs de charge relativement faibles. Ces technologies devraient avoir des capacités installées bien supérieures à la puissance de pointe de l'énergie électrique traditionnelle [2].

Récemment, on a constaté que les systèmes d'énergies renouvelables (SER) continuent d'augmenter, en raison de divers facteurs, tels que les objectifs ambitieux que les pays se sont fixés dans le domaine énergétique en global, L'abaissement persistant des dépenses technologiques et l'accélération du rythme de progrès. Investir dans des technologies abordables et écologiques. Pour atteindre ces objectifs d'ici 2030, les pays visent à ce que les énergies renouvelables représentent entre 15 et 50 % de la production totale d'électricité. Cela laisse supposer que les gouvernements intensifieront leurs efforts dans ce domaine et chercheront à accorder une plus grande importance aux énergies renouvelables dans le système énergétique global, tout en orientant la recherche scientifique vers l'étude des (SER) en ce qui concerne leur amélioration de la production, leur durabilité et leur faible coût.

L'énergie solaire fait partie des ressources énergétiques renouvelables les plus importantes et la principale source d'énergie disponible pour la société humaine. Et celui qui a le plus de croissance rapide promet un avenir prometteur dans la fourniture d'énergie pour divers usages. Les changements climatiques concernant le rayonnement et la température ont poussé les professionnels à utiliser un système de stockage d'énergie électrique (SEE) en période déterminante pour générer de l'électricité et la réutiliser lorsque le rendement du dispositif diminue. Les systèmes photovoltaïques ont besoin de convertisseurs électroniques pour la transformation du courant DC aux valeurs requises et pour convertir de DC à AC et vice versa, ces convertisseurs ont pour fonction de procurer de l'énergie à l'utilisateur sous une forme à haute efficacité. En addition, ils ont pour mission de contrôler la charge et le déchargement des batteries ainsi que des supercondensateurs dans les installations PV où ces éléments sont utilisés comme élément de stockage. D'après cette notion, les chercheurs ont commencé à explorer comment maximiser l'efficacité du système photovoltaïque et le système le plus efficace pour stocker cette énergie. L'objectif est de déterminer l'emplacement du point énergétique optimal (MPPT) à l'aide de diverses techniques, comme les techniques classiques comme perturbation et observation (P&O) et incrémentation d'inductance (IncCond), et modernes axés à propos de la logique floue (FLC) est un exemple d'intelligence artificielle. Le photovoltaïque solaire est un générateur d'énergie performante. Toutefois, la variation du jour et de la nuit et les changements climatiques restreignent son utilisation à long terme. Pour combler ce manque et assurer la continuité du service, des systèmes de stockage d'énergie (ESS) sont nécessaires.

De cette manière, nous avons décidé d'étudier en détail un système photovoltaïque autonome avec un système de stockage dans cette thèse, qui est structurée en quatre chapitres principaux :

Au cours du chapitre I, nous avons abordé les concepts généraux appartenant à l'énergie solaire photovoltaïque et son évolution à l'échelle mondiale, en Afrique et au niveau national. De plus, nous avons abordé les divers types de systèmes photovoltaïques, ainsi que les SSE courantes comme les batteries, les condensateurs à haute densité et les SSEH de type batterie/supercondensateur.

Dans le chapitre deux, nous avons exposé la modélisation mathématique et celle des composants de notre dispositif solaire photovoltaïque. Puis, nous abordons les spécificités des panneaux solaires et PV, ainsi que les facteurs essentiels qui impactent leurs performances, tels que la température et l'éclairage solaire et l'importance de l'étage d'adaptation dans ce type d'application, où il s'agit fréquemment des convertisseurs DC-DC utilisés dans ce système. La batterie et le supercondensateur sont également inclus dans l'ESS, ainsi que les différents types de commandes MPPTs et leur efficacité sur le système photovoltaïque.

Suivi du troisième chapitre, qui contient un certain nombre de simulations, en premier cas, analyse comparative d'un PV avec charge résistive sans système de stockage avec divers algorithmes de MPPTs, nous avons fait une comparaison a été faite entre deux algorithmes MPPT, l'incrémentale de conductance (IncCond) et l'algorithme qui se sert de la logique floue pour surveiller la puissance maximale. Cette technique facilite le suivi du MPP sous rayonnement constant et rayonnement variable. C'est la même chose pour les deux techniques de perturbations et d'observation (P&O) et la logique floue (FLC). Selon les résultats obtenus, le FLC a les avantages par rapport à l'IncCond et P&O. Quant au deuxième cas, l'analyse du système photovoltaïque associé au dispositif de stockage des batteries nous conduit à la découverte que, peu importe la quantité de radiation solaire qui varie, la tension de sortie (V_{bus}) reste constante. Par rapport aux contrôleurs IncCond, P&O et FLC pour réguler la tension de sortie, la technique Optimum (FLC) réagit plus rapidement et permet une régulation plus efficace de la charge de la batterie dans les conditions optimales. On retrouve clairement le point de puissance maximale.

Au cours du quatrième chapitre, nous procéderons à une analyse comparative de deux modèles de **ESS**, l'un comportant une batterie au plomb et l'autre intégrant une batterie au plomb avec un supercondensateur en parallèle. Découvrons l'efficacité du supercondensateur pour résoudre les problèmes rencontrés par les batteries. Et une autre étude concentrée sur la gestion de l'énergie de PV avec stockage hybride batterie /supercondensateur. Et j'ai fini cette thèse par une conclusion globale et une certaine perspective.

CHAPITRE I

CONCEPTS GENERAUX SUR DES SYSTEMES PV ET DE LEURS STOCKAGES ENERGETIQUES

I.1. Introduction

On désigne par énergie renouvelable les ressources naturelles qui ne se déposent pas et qui sont en perpétuel renouvellement, telles que le soleil, vent et l'eau, qui peuvent être trouvés dans la plupart des pays du globe. En règle générale, les énergies renouvelables ne génèrent pas de résidus de combustibles fossiles nocifs pour l'environnement, comme le dioxyde de carbone (CO₂), qui contribue au réchauffement climatique. Pendant la dernière décennie, les frais de production des panneaux solaires ont connu une baisse significative, rendant l'énergie solaire plus accessible et souvent moins chère. Les qualités des panneaux solaires varient selon le matériau utilisé, mais ils sont utilisés depuis environ 30 ans [1].

En parallèle, les chercheurs ont récemment tendance à rechercher et à développer des équipements spécifiques pour le stockage d'énergie, parce qu'il est nécessaire d'atteindre l'objectif qui est de garantir la durabilité énergétique sur le long terme, dans le but d'apporter de l'énergie et de réduire ses coûts élevés [2]. Il existe une multitude d'ESS, comme le stockage par volant d'inertie, le stockage par air comprimé ou encore le stockage d'électricité [2].

Le présent chapitre offre une synthèse des systèmes **PV** et des systèmes **SSE**, qui sont expliqués en ce qui concerne leur mécanisme de fonctionnement et leurs caractéristiques et leurs applications.

I.2. L'énergie solaire :

Près de 8400 fois l'utilisation annuelle de l'énergie par l'homme de l'humanité est compensée par le rayonnement solaire, un élément énergétique presque inépuisable. Ceci indique l'énergie immédiate d'un kilowatt crête par mètre carré (kwc/m²) est réparti sur toutes les sphères spectrales, de l'ultraviolet à l'infrarouge. En une seule année, Le nombre total de déserts dans le monde reçoit plus d'ES que l'humanité en 6 heures [3].

Le rayonnement solaire diffère grandement selon l'heure, la saison et les conditions météorologiques, comme les nuages, la poussière et l'humidité. L'intensité de la lumière solaire absorbée par un aéronef à un instant donné est connue sous le nom d'ensoleillement (G). Pour évaluer l'impact des conditions météorologiques, on présente généralement des moyennes mensuelles de latitudes et d'inclinaisons variées dans des endroits spécifiques, avec un ensoleillement qui s'étend de zéro jusqu'à son

maximum au lever et à midi. La luminosité du soleil est généralement exprimée en heures d'ensoleillement maximum, qui sont le nombre d'heures équivalentes par jour lorsqu'en moyenne l'intensité lumineuse est de 1000 W/m^2 . Un indicateur est l'heure d'ensoleillement maximum [6]. La figure I.1 représente le rayonnement solaire par spectre.

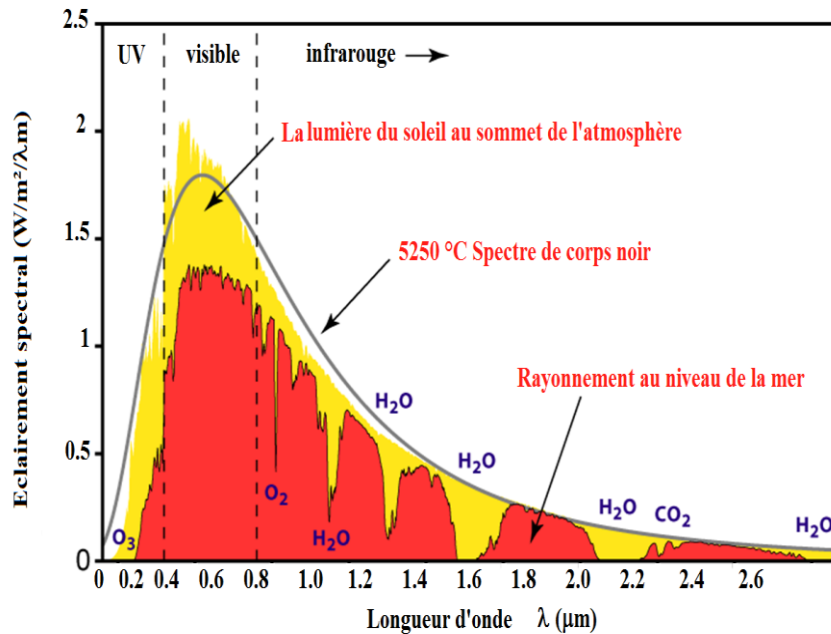


Figure I.1 : Analyse spectrale de la lumière solaire [3].

I.3. L'énergie photovoltaïque solaire :

L'humanité primitive exploite l'énergie solaire pour ses besoins quotidiens depuis l'antiquité, représentée par la lumière et la chaleur émanant du soleil, en utilisant diverses technologies en constante évolution. La technologie qui exploite les panneaux solaires pour générer de l'électricité résulte des dernières recherches menées dans la période moderne grâce aux processus photovoltaïques, que ce soit en ce qui concerne l'énergie électrique, l'énergie de chauffage ou la transformation mécanique du mouvement, par ailleurs, les projets architecturaux qui reposent sur l'utilisation de l'énergie solaire [3].

Étant donné son emplacement géographique, l'Algérie détient une multitude de ressources naturelles, parmi les plus importantes réserves d'ES du monde. Plus de 2000 heures d'insolation sont observées chaque année dans la majorité des régions nationales, avec, dans les zones d'altitude et au Sahara, son niveau atteint 3900

heures. Côté nord, sur une superficie horizontale de 1 mètre carré, l'énergie reçue annuellement est d'environ 3 KWh/m², tandis que dans le grand sud, elle dépasse 5,6 kWh/m² [3].

I.4. Le potentiel solaire mondial

Il est évident sur la figure I.2 qu'il y a des zones plus claires, ce sont les zones bleues, également appelées « ceintures solaires », tandis que les zones les plus nuageuses sont les zones rouges. La figure I.2 montre une carte géographique de la quantité moyenne mondiale de couverture nuageuse observée par le satellite AQUA de la NASA à 13 h 30, heure locale [7].

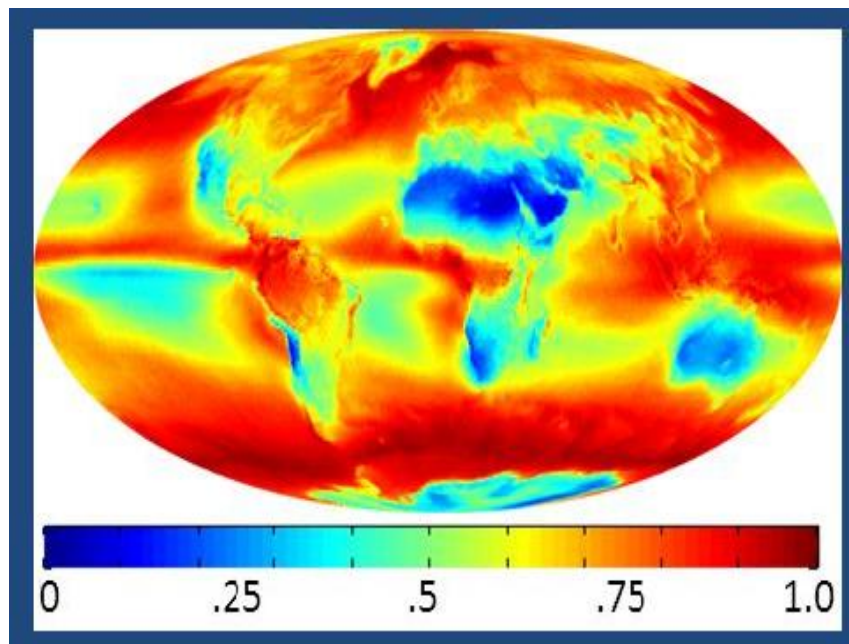


Figure I.2 : Le potentiel solaire mondial [7].

I.5. La richesse de l'énergie solaire en Afrique

L'Afrique est considérée comme le continent avec un potentiel considérable pour l'ES en raison de sa disponibilité en quantité, en qualité et sur un large territoire [2]. Le continent abrite de nombreux endroits et pays les plus ensoleillés du monde. Pour autant l'énergie solaire présente un potentiel considérable, son utilisation est encore limitée à 1,7 % de la production d'électricité en 2020, cependant, elle a connu une forte expansion dès la seconde moitié des années 2010, comme illustré dans la figure I.3 [7].

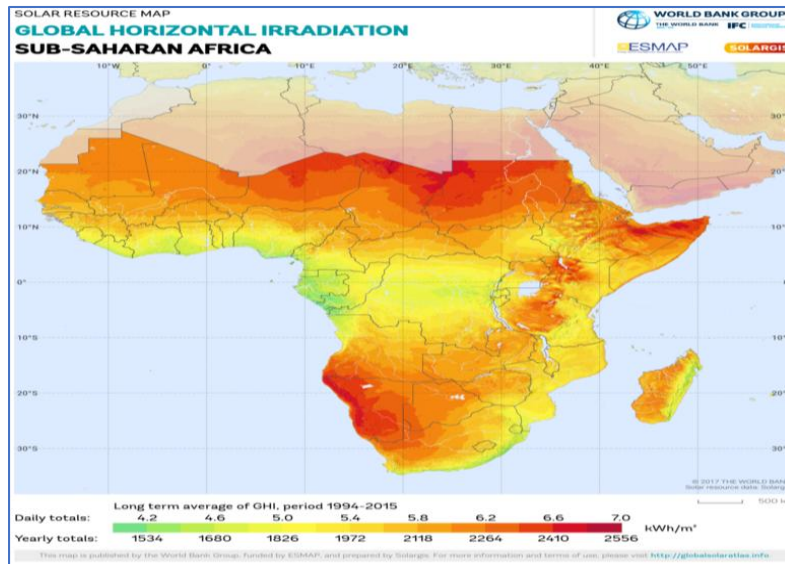


Figure I.3 : Capacités solaires en Afrique [7].

I.6. La capacité d'énergie solaire en Algérie

L'Algérie regorge des richesses solaires les plus importantes au monde [2]. En effet, le potentiel de ce pays dépasse les cinq milliards de GWh par an grâce à son excellente position géographique. L'Algérie profite d'une exposition solaire annuelle de plus de 2 000 heures par an sur une partie de sa région. Dans le Sahara et dans les zones élevées, cette durée peut dépasser 3900 heures d'ensoleillement. Sur une vaste zone de l'Algérie [3]. Efficacité énergétique reçue en continuant sur l'espace horizontale de 1 m², elle a une capacité d'environ 5 KWh/m²/jour, ce potentiel est décomposé comme suit : environ 2650 KWh/m²/an au côté sud et 1700 KWh/m²/an au côté nord [3,10-11]. La figure I.4 illustre les capacités en énergie solaire dans différentes régions d'Algérie.

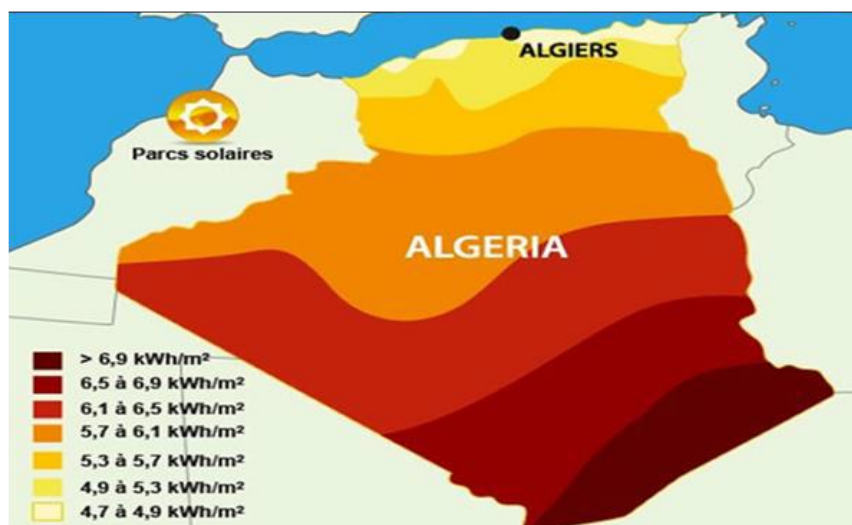


Figure I.4 : Capacités en énergie solaire dans différentes régions d'Algérie [7].

Le sud du pays possède le plus grand potentiel solaire, représentant 86 % de la superficie du pays, D'après une recherche menée par le physicien allemand Gérard Knies, les informations présentées dans le tableau I.1 confirment cela, l'énergie peut être stockée pour toute l'humanité pendant une année entière, grâce à six heures d'ensoleillement dans le désert, confirmant ainsi la capacité exceptionnelle du désert à absorber de l'énergie. En outre, selon Bachir Messaitfa, un économiste algérien, dans son ouvrage intitulé Algérie 2030 : une perspective d'avenir, la région sud de l'Algérie est capable de couvrir quatre fois la demande mondiale en électricité, tout en se conformant aux standards de sécurité énergétique [6, 10].

Tableau I. 1 : Potentiel solaire [8, 10,11]

Zones	Zones côtières	Zones élevées	Sahara
La surface (%)	4	10	86
Heures d'ensoleillement moyennes (heures/an)	2650	3000	3500
Moyenne de l'énergie reçue (Kwh/m²/an)	1700	1900	2650

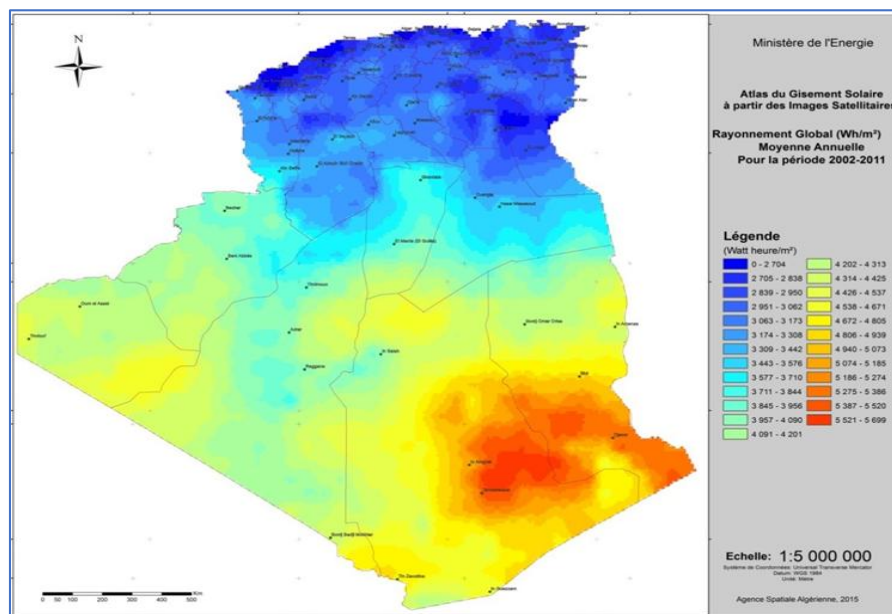


Figure 1.5 : Moyenne annuelle d'irradiation directe mondiale (Phase de 2002-2011) [10].

I.7. Plan d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie dans le futur

La réserve solaire de l'Algérie est l'une des plus importantes du monde. Chaque année, dans la plupart des régions du pays, le rayonnement solaire est supérieur à 2000 heures, arriver un pic de 3900 heures dans le Sahara et les zones élevées. Les régions du Nord reçoivent 5,1 KWh (environ 1860 KWh par an et par m²) d'ES par jour sur une surface plane d'un mètre carré, alors que le grand Sud bénéficie de 6,6 KWh (environ 2410 KWh annuellement et par m²). Effectivement, la production électrique en Algérie vise à maximiser le recours à l'ES (thermique et photovoltaïque) principalement.

Le programme d'énergie renouvelable est structuré en deux étapes afin de satisfaire les besoins nationaux en électricité durable :

Première étape (2015 – 2020) : La phase pilote avait pour but de générer 3000 MW d'énergie photovoltaïque et 1010 MW d'énergie éolienne, Cependant, 515 MW de biomasse, de cogénération et de géothermie sont disponibles.

Deuxième étape (2021 – 2030) : Au sein des régions Timimoune, d'In Salah, de Bechar et d'Adrar, on envisage de bâtir d'importantes l'intégration des centrales d'énergie renouvelable dans le réseau énergétique national. À ce moment précis, plus de 60 % du recours aux énergies renouvelables devraient provenir de l'énergie solaire [7, 13].

Les buts visés du programme algérien des énergies sont résumés dans la figure I.6.

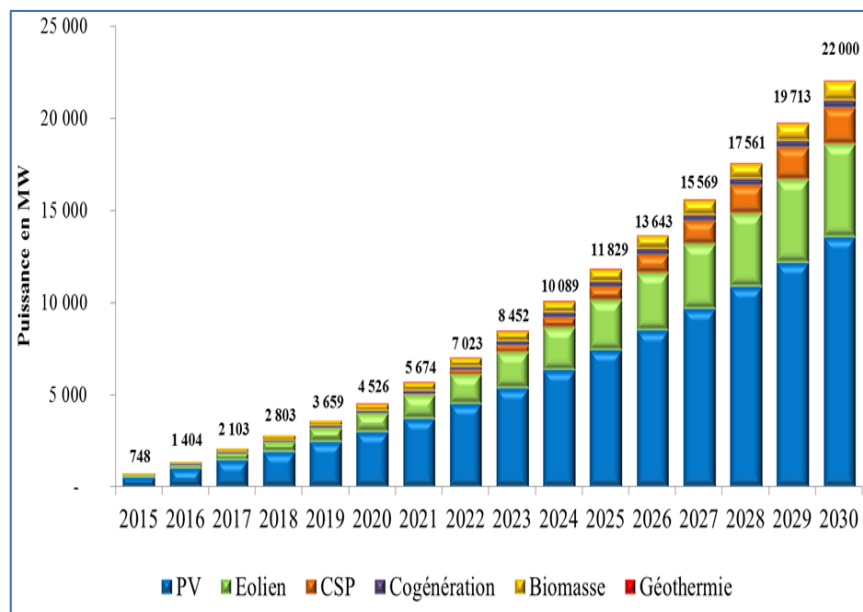


Figure I.6 : Les buts du programme d'énergie en Algérie [10].

Le tableau I. 2 présente la répartition de l'énergie électrique par secteur sur la période 2015-2030 :

Tableau I. 2 : Plan de production d'électricité provenant des énergies renouvelables [10].

La consistance du programme	1^{ère} Période 2015-2020 (MW)	2^{ème} Période 2020-2030 (MW)	Total (MW)
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Éolienne	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Total	4525	17475	22000

I.8. Le stockage de l'énergie électrique (SSE)

Il est essentiel d'ESS afin de faire demande et offre d'énergie électrique [2]. Le concept même de (SSE) incorporé au concept de réseau intelligent en termes de dispatchabilité. De plus, c'est bénéfique pour l'intégrité du système électrique en ce qui concerne ce thème : qualité de l'énergie et le niveau de charge. Le talon d'Achille du stockage d'énergie est son coût d'investissement élevé et son faible rendement aller-retour.

Plusieurs facteurs liés aux méthodes de stockage d'énergie comprennent la puissance nominale, les coûts énergétiques, le temps de réaction, la densité de puissance, la température fonctionnelle, l'autodécharge, l'efficacité aller-retour, la durée de vie, les cycles et les particularités de décharge/recharge. Ces critères déterminent les capacités des technologies de stockage d'énergie [2].

I.8.1 Classement des méthodes de stockage : [2,14]

Les techniques de stockage sont classées de différentes manières, donc le tableau suivant résume les catégories des outils de stockage.

Tableau I. 3 : Classification des outils de stockage

Energies intermédiaires	Système de stockage
Gravitaire	Pompage par l'eau
Thermique	Préserver la chaleur latente ou sensible avant de la produire électrique.
De pression	La compression de l'air.
Chimique	Batteries pour l'accumulateur électrochimique
	Méthode de stockage de H ₂ par pile à combustible et électrolyse.
Electromagnétique	Une bobine supraconductrice fournit un courant permanent.
Electrostatique	Condensateur standard.
	Supercondensateur à électrolyte double couche
Cinétique	Volant d'inertie

I.8.1.1 Batteries : [14]

L'énergie générée par les modules PV est stockée dans la batterie. Chaque fois que la demande d'énergie diminue, le stockage est nécessaire. Comparé à l'apport d'énergie solaire. La quantité d'énergie requise est en effet établie en fonction de la charge à alimenter et des dispositifs employés. L'apport de l'ES est cyclique, le stockage de l'électricité est donc devenu nécessaire à cause de la non-conformité entre l'offre et la demande. Les systèmes photovoltaïques utilisent généralement des accumulateurs électrochimiques comme méthode d'isolation. Pendant le processus de stockage, les batteries remplissent trois tâches fondamentales dans le système photovoltaïque :

- **Autonomie** : Même pendant la nuit ou en cas de nuages, une batterie peut répondre aux besoins de charge.
- **Courant de surcharge** : En seulement quelques instants, une batterie peut générer un courant supérieur au champ photovoltaïque. Cela consiste à mettre en marche des dispositifs électriques comme les moteurs qui nécessitent un courant de démarrage 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Pour supprimer les variations de tension dans le champ photovoltaïque, la tension constante est assurée par la batterie, ce qui permet aux appareils de fonctionner à une tension élevée et stable [15].

Pendant des dernières années, cette notion a servi de base pour la création de diverses

technologies, en particulier, on retrouve des batteries au nickel-cadmium, au plomb, au lithium et au nickel-hydrure métallique.

La figure I.7 illustre la manière dont la batterie fonctionne.

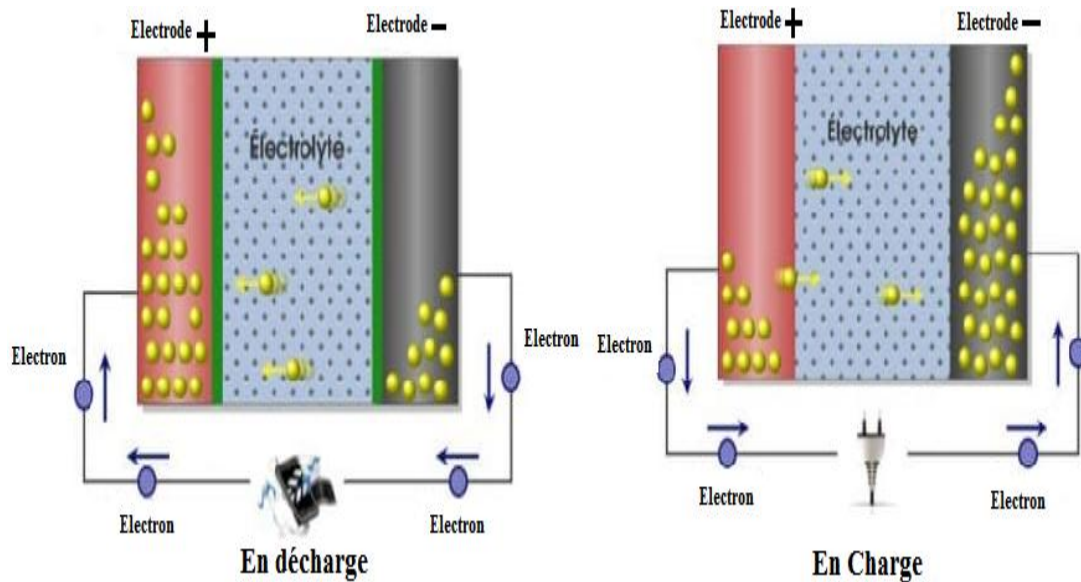


Figure I.7 : Principe de fonctionnement de la batterie.

❖ **Batterie Plomb-acide (Lead-Acid Battery):**

Des piles rechargeables, qui sont des piles électrochimiques, ont été inventées et les plus fréquentes remontent à 1859 [2]. Le pôle plomb est l'un, l'oxyde de plomb l'autre et l'électrolyte en acide sulfurique dans le cas du chargement [2].

Une batterie en plomb-acide peut être soit liquide ou soit immergée (batterie remplie ou noyée) qui devrait être régulièrement remplie d'eau distillée, ou scellée (batterie scellée) qui n'a pas besoin d'entretien et contient de l'électrolyte gélifié ou absorbé [2]. Batterie avec soupape de régulation [2], puisqu'elles sont imperméables, elles sont pratiques à transporter et relativement peu coûteuses par rapport à d'autres catégories de batteries. Nous utilisons principalement des batteries à plomb pour favoriser la mise en place d'énergies renouvelables, notamment dans les systèmes PV autonomes [2]. Cependant, il existe plusieurs problèmes techniques liés au plomb-acide classique [31] :

- ✚ La décharge a une faible profondeur.
- ✚ Sa durée de vie est limitée.
- ✚ Charge progressive et nécessités d'entretien.

Les batteries à plomb-acide sont idéales pour les applications nécessitant une capacité considérable, étant donné leur simplicité, leur fiabilité et leur faible coût. Sa

capacité à supporter différentes conditions de fonctionnement, incluant des courants de charge, des températures importantes ou des taux de décharge importants, la profondeur de décharge les rend moins sensibles que les ions lithium [2].

❖ **Fonctionnement:**

Un accumulateur est un appareil électrochimique qui facilite la transformation de l'énergie chimique qu'il contient en énergie électrique. De plus, il est possible de modifier les réactions internes. Il y a deux électrodes (négative et positive) dans ce système ainsi qu'un électrolyte. Le dioxyde de plomb (PbO_2) est présent dans l'électrode positive, tandis que la négative contient du plomb. La solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) est utilisée comme électrolyte afin de favoriser le mouvement des ions entre les deux électrodes, cela génère un courant. Une différence de potentiel de 2V existe entre les deux électrodes.

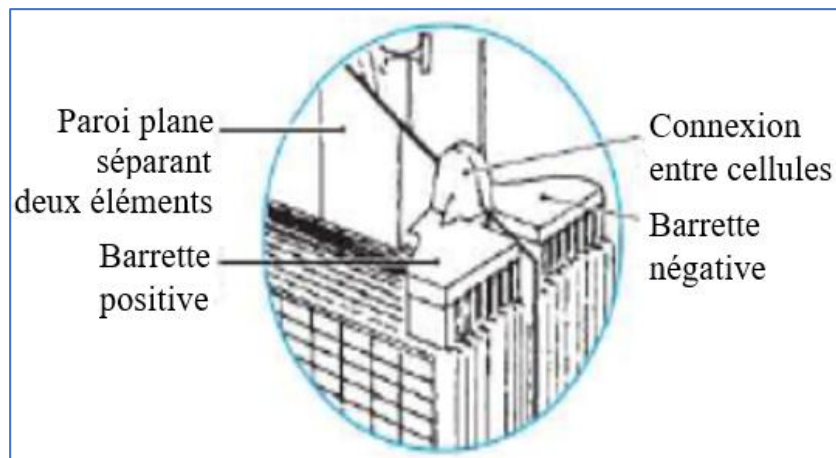
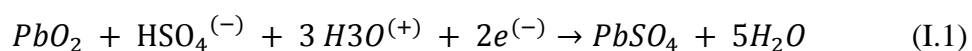


Figure I.8 : Le clip interne de l'accumulateur [29].

Les deux électrodes sont séparées par une paroi plane formée de la matière poreuse qui empêche le contact entre elles. La réaction d'oxydoréduction se produit dans l'ensemble électrodes-électrolyte, dont les équations sont les suivantes :

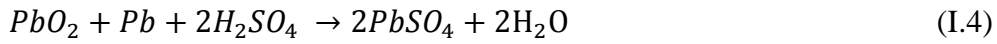
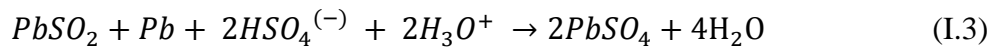
L'anode (électrode positive) :



Cathode (électrode négative) :



Ce qui en résulte en général :



La présence d'une décharge trop profonde peut causer une diminution irréversible de la capacité. Trois raisons envisageables expliquent ce phénomène : [29]

- Une partie de la substance active est transformée d'une anode (PbO₂) en des cristaux de sulfate de plomb sans fin.
- Le composant actif de l'électrode se gonfle progressivement, ce qui conduit à une diminution de la cohésion positive.
- L'anode est passivée électrochimiquement pour son collecteur de courant.

La tension et le courant des cellules changent généralement comme suit :

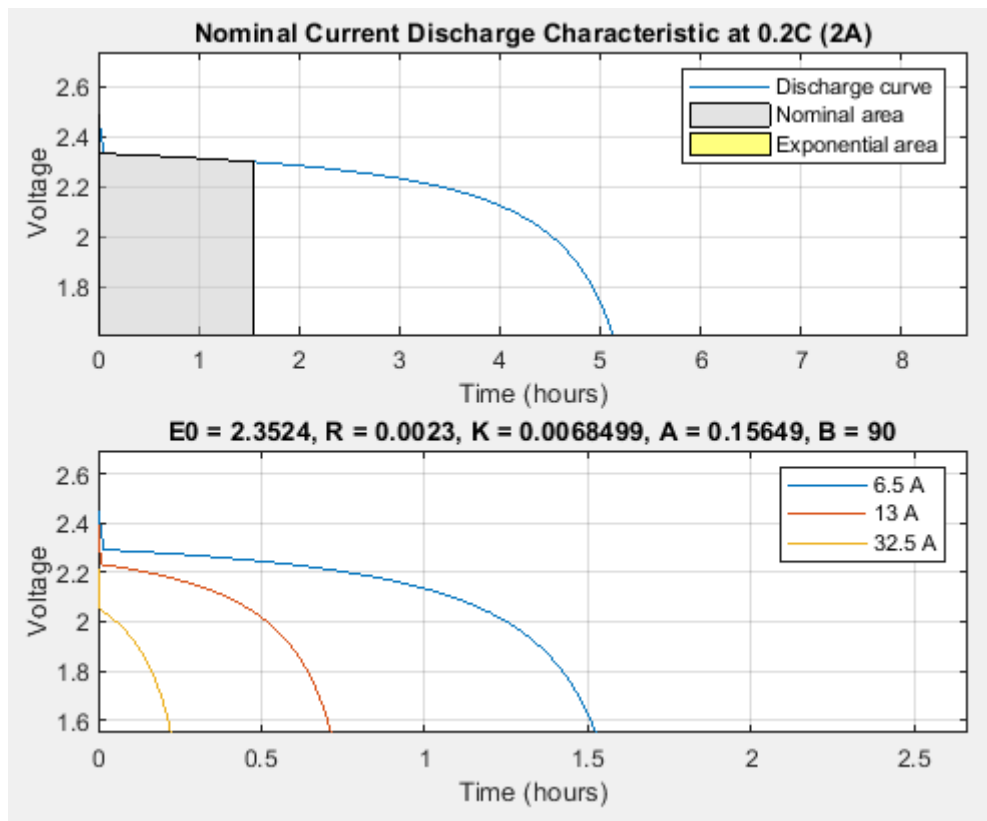
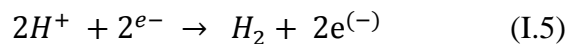


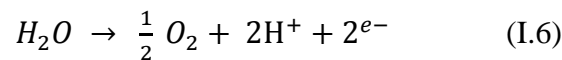
Figure I.9 : Le changement de tension et du courant d'une cellule de batterie au plomb.

Lorsque la charge persiste pendant une période prolongée, la tension peut atteindre 2,4 V, ce qui représente un seuil. Par conséquent, l'eau de l'électrode positive se transforme en dioxygène gazeux O₂, tandis qu'au niveau de l'électrode négative, elle se transforme en dihydrogène gazeux H₂. Les réactions suivantes aux électrodes sont caractéristiques de ce phénomène appelé dégazage :

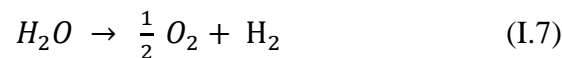
À l'anode



À la cathode :



Réaction générale :



Le couple électrochimique a théoriquement une densité de 170 Wh/kg. Toutefois, le sulfate de plomb, qui est généré par des réactions entre les électrodes, n'est pas soluble et non conducteur. L'accumulation de cette substance sur les électrodes, et dans un moindre cas, de mesure dans l'électrolyte, limite donc la quantité d'énergie possible à récupérer depuis la batterie. Par ailleurs, les concentrations et les volumes de substances actives sont inférieurs à ceux qui provoquent ce critère. La densité d'énergie pratique s'élève à environ 40 Wh/kg, ce qui est quatre fois inférieure à la valeur maximale théorique [29].

❖ **Classification des batteries en plomb**

Elles se divisent en deux catégories principales : les batteries ouvertes, également appelées (vented batteries), et les batteries scellées (batteries au plomb équipées par vanne), qui se caractérisent par une vanne. La figure I.10 illustre diverses catégories de batteries en plomb.

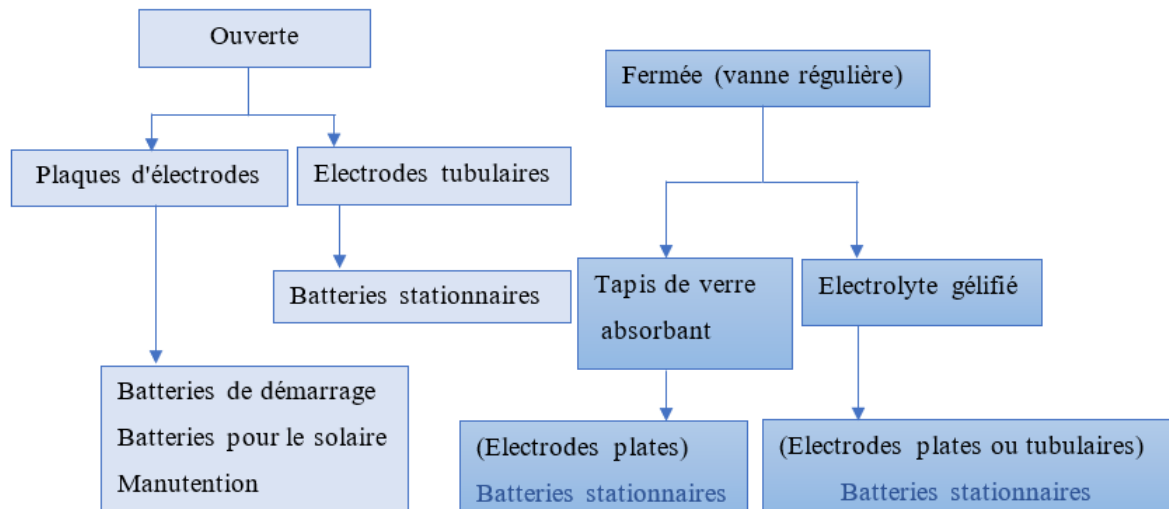


Figure I.10 : Diverses catégories de batteries au plomb.

On peut citer :

❖ **Batteries ouvertes :**

Inclut des batteries traditionnelles dans lesquelles la cellule n'est pas fermée. L'électrolyte est composé de 35 % d'acide sulfurique et de 65 % d'eau, et son niveau peut diminuer en raison des processus naturels de décharge et d'évaporation [31]. Il est donc essentiel que l'entretien de la batterie nécessite une modification du niveau de l'électrolyte en utilisant de l'eau dé-ionisée pour assurer le bon fonctionnement du dispositif d'accumulation [31]. Finalement, il est essentiel que ces batteries soient situées dans un endroit bien ventilé, en raison du gaz que celles-ci peuvent générer, Il devient explosif lorsque le taux d'hydrogène dans l'atmosphère excède 4 % en volume [31].

❖ **Batteries VRLA (vanne régulière):**

Batteries VRLA sont également désignées comme des batteries « sans maintenance ». Il y a une cellule fermée ici [31]. Le gel de silice à haute surface spécifique est utilisé pour immobiliser l'électrolyte, où il est conservé dans un séparateur en fibre de verre à force capillaire élevée (AGM, Mat Absorbant Glass) [31]. Ainsi, les gaz générés lors du dégazage restent « prisonniers » dans le gel et sont collectés lors de la décharge. Aussi, La consommation d'eau et les rejets de gaz sont extrêmement limités [31].

Deux catégories principales de technologies sont utilisées pour l'électrode positive PbO_2 : elle peut avoir la forme d'un tube ou une plaque plane. Les grilles des plaques

planes constituent une combinaison de plomb et d'antimoine, avec une couche de matière active enrobée. Cette configuration offre des puissances accrues en augmentant les surfaces d'échange entre l'électrode et l'électrolyte. En revanche, dans le cas des plaques en forme de tube, la matière active se retrouve enfermée dans des gaines poreuses [31]. Des épines de plomb sont placées dans ces gaines afin d'assurer la circulation du courant. La technologie permet d'améliorer la longévité, notamment en cyclage profond. Toutefois, Van présente un coût de revient plus important [31].

1.8.1.2 Supercondensateurs : [16]

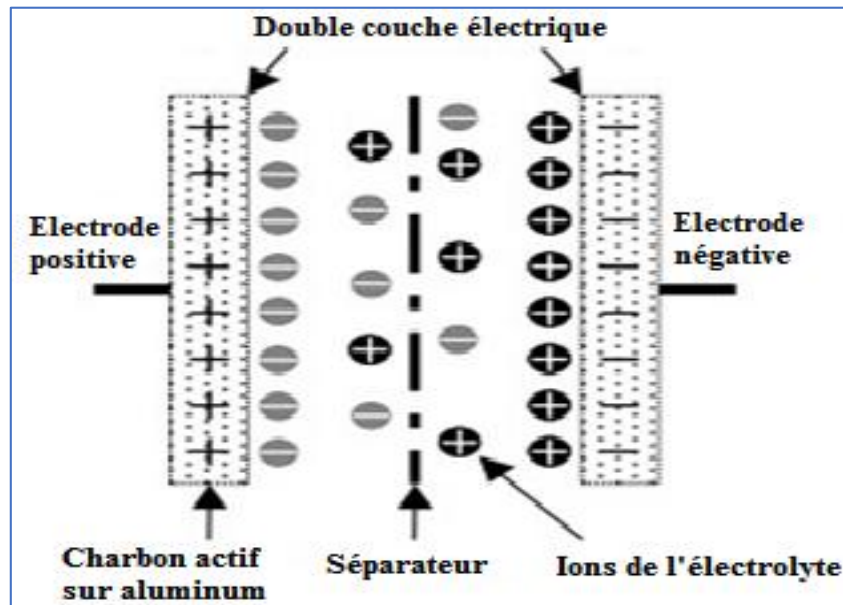


Figure I.11 : Structure d'un super condensateur [16].

Les composants d'un supercondensateur sont deux collecteurs en métal, habituellement en aluminium, deux électrodes qui transportent une surface spécifique très élevée plongeant dans un liquide électrolytique et une membrane poreuse de séparation. Comme lustrée dans la figure I.11.

- **Principe** : Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur repose sur la distribution d'ions électrolytes autour de la surface des électrodes pour obtenir de l'énergie. Par conséquent, on génère une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte lorsqu'une tension est appliquée aux bornes d'un supercondensateur. On appelle cela la double couche électrique [2]. De cette façon, l'énergie peut être conservée sous forme électrostatique dans le supercondensateur. La figure I.12 représente la schématique d'un supercondensateur dans l'état chargé et déchargé.

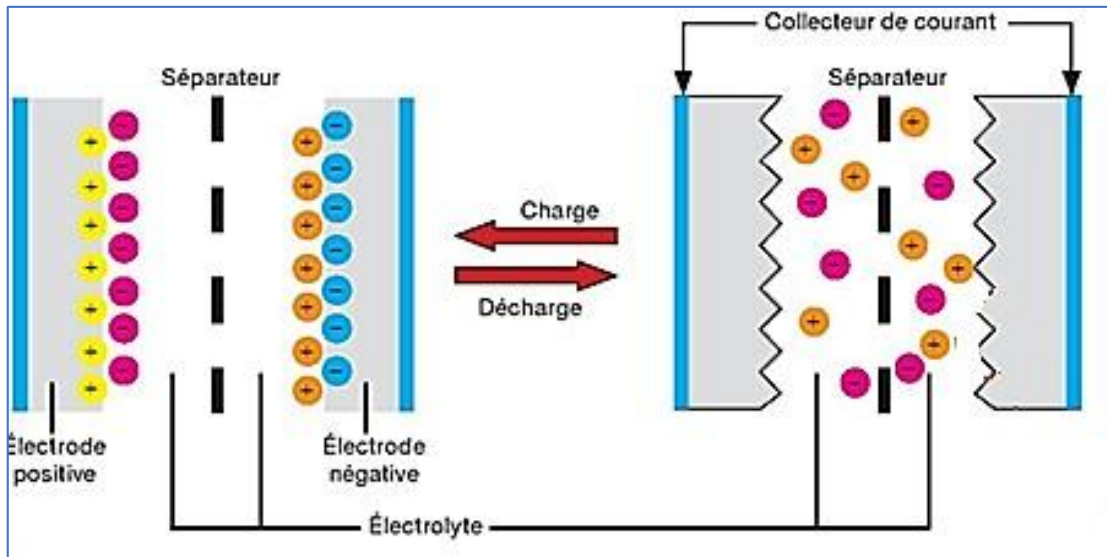


Figure I.12 : Illustration graphique d'un SC en fonction de sa charge et de sa décharge.

- **Des spécificités et ses utilisations :** Les supercondensateurs ont une durée de vie d'environ 8 à 10 ans, leur rendement est d'environ 95 %, leur autodécharge est d'environ 5 % par jour et leur capacité peut ce sommet 5000 F. On les retrouve souvent dans le secteur des transports, où sa technologie joue principalement le rôle de démarrage. En outre, ils servent de référence pour les mémoires informatiques et sont utilisés pour récupérer l'énergie de freinage (ascenseurs, tramways, métros...) [14,15].
- **Domaines d'utilisation :** Avec l'évolution technologique, plusieurs secteurs contemporains exigent le stockage d'énergie pour une réutilisation en cas de nécessité, comme les énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien. Dans ce secteur, l'utilisation des supercondensateurs est devenue plus courante. Dans la majorité des applications, l'énergie stockée ne produit la charge que pour une durée de quelques secondes ou quelques minutes. Il existe presque un grand nombre de cycles de charge et de décharge, cependant, la transmission d'énergie en mode cyclique rapide est restreinte. Il est essentiel d'avoir un circuit de contrôle afin de préserver un équilibre entre les tensions propres à chaque SC. Cela garantit un fonctionnement sécurisé et fiable lorsqu'ils sont reliés en série dans le but d'obtenir une tension de sortie considérable bien que la durée de vie des supercondensateurs soit similaire à celle des gros condensateurs conventionnels, elle est d'environ 10 ans. La performance entre l'entrée et la sortie est extrêmement élevée, cependant le taux d'autodécharge est important concernant les batteries. Enfin, il convient de rappeler que l'inconvénient l'importante des supercondensateurs représente dans leur coût haut élevé, alentours à 5 fois celui des

batteries plomb-acide.

➤ **Avantage et inconvénients des supercondensateurs :**

Le tableau I. 4 présente les avantages et les inconvénients des supercondensateurs.

Tableau I. 4 : Avantages et inconvénients de supercondensateurs

Supercondensateurs	
Les avantages	Les inconvénients
Longue durée de vie	Prix élevé.
Large plage de température de fonctionnement	Faible densité d'énergie.
Ecologiques	Base tension.
Haute efficacité	Absence de normes.
	Sensibilisation limitée des consommateurs

I.8.1.3 Stockage hybride dans les systèmes électriques (SSHE) : [16]

Lorsque les voitures électriques ont été introduites dans le domaine de l'automobile, la notion de stockage hybride a gagné en popularité. Les fluctuations brusques d'énergie, telles que des montées et des diminutions significatives par rapport à la puissance moyenne, Cela entraîne d'importantes pertes et une augmentation du coût des systèmes de transformation, finalement, cela entraîne un bilan énergétique négatif [31]. Le système de stockage intermédiaire optimise la gestion de l'énergie tout en minimisant les effets négatifs liés aux fortes demandes [31]. Cela s'applique particulièrement au métro ou au tramway, qui atteint des sommets de consommation (démarrages et freinages de récupération) qui atteint dix fois plus élevés que la puissance moyenne [31]. Avec l'intégration de techniques de stockage d'énergie adaptées aux transferts à grande vitesse, il est possible d'optimiser la balance énergétique globale pour diminuer les pertes, en particulier dans la canalisation électrique [31]. Dans l'automobile, le moteur thermique d'un véhicule (à combustion interne, essence ou diesel) crée une puissance maximale afin de favoriser amélioration des performances en accélération et en franchissement de collines, etc [31]. Qui est peu exploité dans les utilisations habituelles (vitesse constante et modérée), ce qui entraîne une faible puissance et un faible rendement. Un moteur dont la puissance nominale est plus faible sera plus efficace à cette puissance et devra donc consommer moins de carburant. En fin de compte, le surdimensionnement entraîne un

gaspillage d'énergie. Il existe deux options pour résoudre ce problème : soit accepter une puissance moins importante et des performances inférieures en termes d'accélération, soit la chaîne de traction peut être hybridée en connectant un moteur thermique à un moteur réversible d'électricité grâce à une batterie électrique [31]. La partie électrique soutient le moteur thermique lorsqu'il a besoin d'une grande puissance, et il est également envisageable d'utiliser l'énergie du freinage [31], contrairement au moteur thermique non réversible. La Toyota Prius est considérée comme l'automobile hybride la plus avancée et la plus réputée. Le cycle urbain réduit considérablement la consommation de carburant.

L'utilisation du principe d'hybridation pour le photovoltaïque permet d'améliorer le confort d'utilisation. Effectivement, l'accès immédiat à une puissance élevée favorisera une modification des habitudes d'exploitation de l'énergie à partir d'un PV en site isolé [31]. À la différence d'un système classique où seuls des appareils à très faibles consommations sont employés, il est possible d'envisager l'introduction d'équipements consommateurs d'électricité lors des phases de démarrage [31]. Un cahier des charges précis sera nécessaire pour sélectionner les composants de stockage.

Plusieurs études indiquent que l'association de diverses sources d'énergie est essentielle pour créer une HESS efficace. La technologie d'un système de stockage est définie par les dépenses d'investissement et de fonctionnement. Selon la figure 1.13, pour satisfaire simultanément aux besoins d'énergie, La meilleure association possible est celle des supercapacités et des batteries. Il est essentiel que le dispositif de stockage soit rapide, puissant et en mesure de résister à des décharges profondes pour faire face aux perturbations d'électricité.

Par ailleurs, par rapport aux autres méthodes de stockage, les supercapacités présentent un nombre important de cycles. En associant supercapacités et batteries, Il sera possible d'améliorer la dimension de l'SSE, améliorer sa durée de vie et obtenir une excellente dynamique. [31].

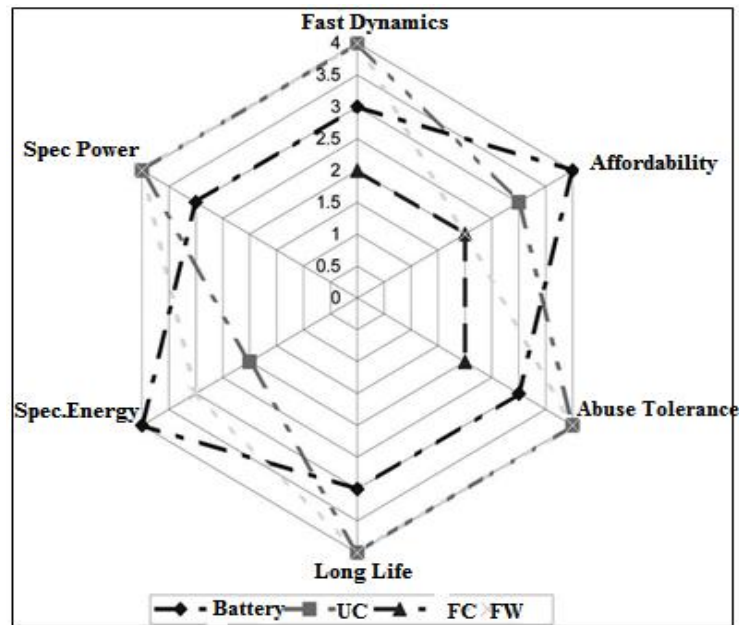


Figure I.13 : Différentes caractéristiques des éléments de stockage pour une hybridation [15].

I.9 Identification d'un système PV

Un système photovoltaïque est constitué d'un ensemble de composants. Qui vise à produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Il s'agit principalement du champ photovoltaïque et du système de stockage, l'adaptation énergétique, la charge. Un convertiteur inséré (DC/DC ou DC/AC) ou un convertisseur seul peuvent être utilisés dans le conditionnement de puissance. Un système plus approfondi est illustré à la figure I.14 [16,18].

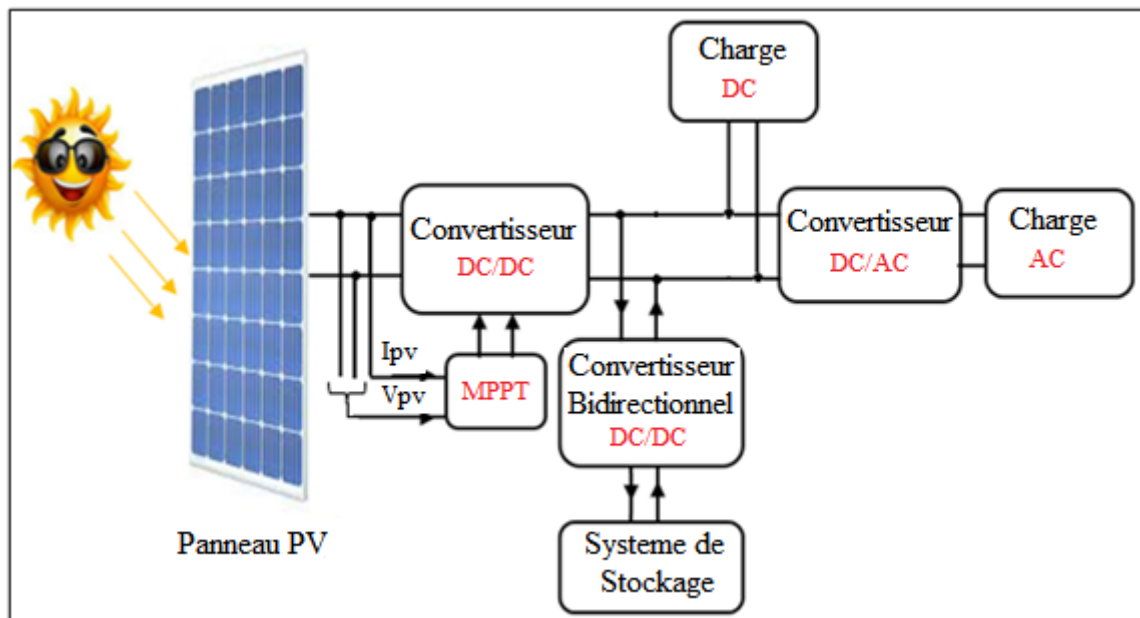


Figure I.14 : Système photovoltaïque.

I.9.1 Rayonnement du soleil

La distance géographique entre le Soleil et la Terre peut atteindre 150 millions de km et à un âge de 4,5 milliards d'années. L'énergie solaire est produite par les réactions thermonucléaires qui se déroulent au centre du soleil. Le Soleil produit environ 1,71023 kW de puissance. La terre reçoit environ 8.51013 kW de cette puissance, ce qui représente 163 %. 70 % (environ 6 1013 kW) de cette puissance entre dans l'atmosphère. Le rayonnement électromagnétique est la forme sous laquelle le soleil nous donne de l'énergie. Le rayonnement a une longueur d'onde variant de 0,22 μm à 10 μm . La différence dans la distribution spectrale de ce rayonnement est présentée dans la figure 1.15 [1, 5]. Le rayonnement solaire atteint 342 W/m^2 à la limite de l'atmosphère. La surface terrestre absorbe le rayonnement de 168 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Il est composé de 40 % de rayonnement diffus et de 60 % de rayonnement direct [8, 9].

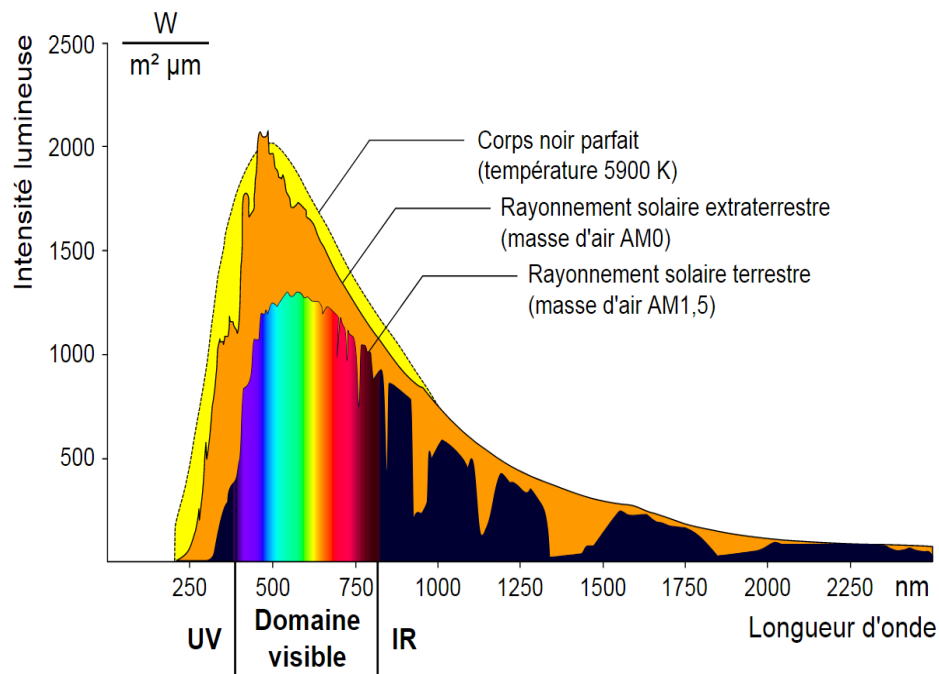


Figure I.15 : Distribution du rayonnement selon le spectre [8, 9].

I.9.2 L'effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque, également appelée effet photovoltaïque, consiste à transformer directement l'énergie électromagnétique (rayonnement). Lorsqu'un corps semi-conducteur est exposé au soleil, ses atomes sont capables de réagir aux photons de lumière, ce qui est responsable de ce phénomène. Par conséquent, 150 électrons sont présents dans les couches électroniques supérieures, aussi connus sous le nom d'électrons des couches de

valence, et ils ont tendance à se perdre. Les cellules photovoltaïques produisent une faible tension électrique continue en raison des électrons « détachés ». L'effet photovoltaïque est désormais défini comme la conversion d'ES en électricité par des panneaux solaires. Pour produire une unité ou un champ photovoltaïque, environ 155 cellules ou plus sont connectées [17, 19].

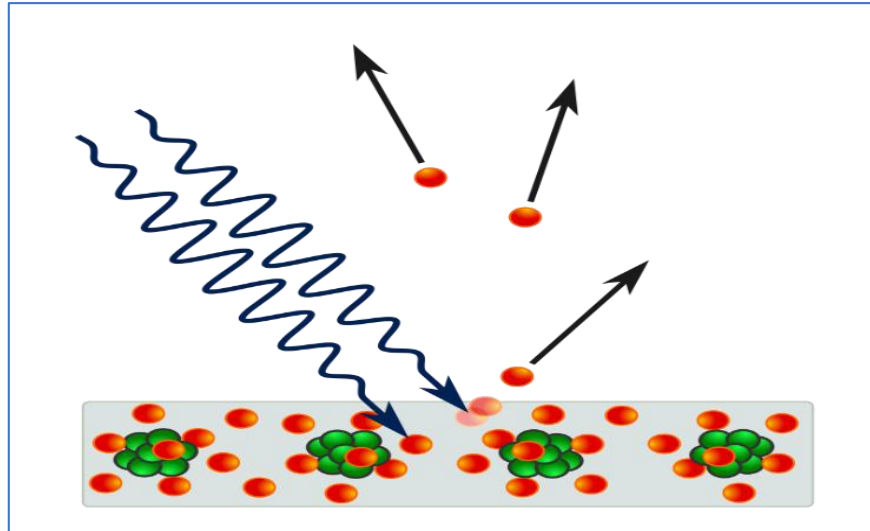


Figure I.16 : L'effet photovoltaïque.

I.9.3 Le mode d'action d'une cellule photovoltaïque

Un capteur composé d'une substance semi-conductrice en tant que cellule photovoltaïque : elle capte l'énergie lumineuse et la transforme en électricité directement. Cette cellule fonctionne grâce aux caractéristiques des matériaux semi-conducteurs qui absorbent le rayonnement lumineux. Par conséquent, les matériaux employés pour fabriquer les cellules PV, on les sélectionne en se basant sur les attributs physiques de quelques-uns de leurs électrons, qu'on peut libérer de leurs atomes lorsqu'on stimule des photons du spectre solaire, et leur valeur énergétique est déterminée par leurs longueurs d'onde. Ces charges circulent à travers le matériau après leur libération, créant ainsi un courant électrique de nature continue (DC). Le phénomène physique appelé effet photovoltaïque est provoqué par ce courant circule, générant une force électromotrice (FEM) aux extrémités du semi-conducteur. La figure I.17 montre la construction d'une cellule photovoltaïque en silicium [20, 21].

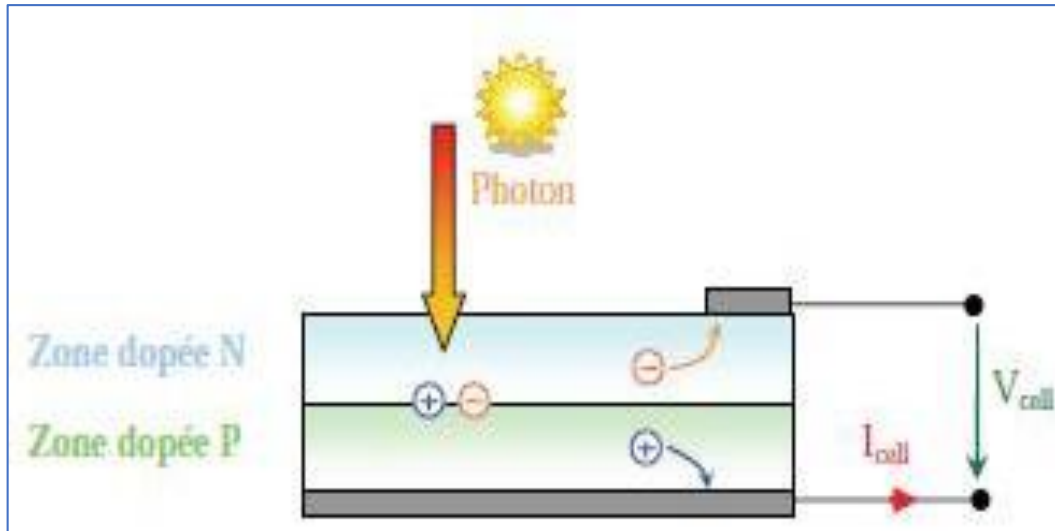


Figure I.17 : La composition d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Deux couches de silicium peuvent être utilisées pour production cellule PV, avec une dopation P (dopée au bore) et une dopation N (dopée au phosphore). Une barrière de potentiel se crée entre les deux zones lors d'une jonction PN. Une plaque en métal recouvre l'autre face du cristal (contact arrière) qui agit en tant qu'anode, pendant qu'une plaque métallique (contact avant) recouvre la zone N et sert principalement de cathode (contact avant). Lors d'une collision, le semi-conducteur capte les photons et transmet son énergie aux électrons. La transmission d'énergie excède celle liée à la bande interdite du semi-conducteur, provoquant ainsi la création de paires électrons-trous dans cet espace, les électrons sont arrachés. Compte tenu de la prédominance du champ électrique dans cette zone, des porteurs indépendants sont orientés vers les contacts métalliques des zones P et N. La tension du circuit ouverte, également connue sous le nom de V_{co} , est étroitement liée à la température et un courant et une variation de potentiel sont produits entre les électrodes métalliques de la cellule PV (de 0,6 à 0,8 volts). Tant que le courant maximal I_{max} survient, cela provoque un court-circuit aux bornes de la cellule. L'intensité lumineuse (E) a un impact significatif sur le courant de court-circuit (I_{cc}) [22, 23].

I.9.4 Types de cellule

Le tableau I.5 expose les diverses sortes de cellules solaires [3].

Tableau I. 5 : Les technologies appliquées pour fabriquer les panneaux solaires [3, 24,25].

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium monocristalline	13-17%	Bonne rendement, cellulaire	Le coût de production élevé et la diminution de la quantité de matière au cours de la production.	
Silicium Polycristallin	11-15%	Excellente rendement pour un module	Le coût de production élevé entraîne une perte de matière en cours de production.	
Silicium Amorphe	5-9%	Facile à produire.	Mauvais performance	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	L'énergie de gap est ajustée, 99 % des photons sont absorbés.	Manque de matière première	
Cellules organiques	≤ 5%	Prix de fabrication abordable, souple	Rendement toujours insuffisant.	

1.9.5 Étude des techniques des cellules PV

Les cellules PV sont généralement constituées de silicium. La technologie du silicium monocristallin et du silicium polycristallin constitue respectivement 29 % et 51 % du marché mondial. En fonction du processus de production, des photopiles polycristallines, monocristallines ou amorphes seront produites. On peut également utiliser d'autres matériaux comme le Cu(InGa) Se₂, le Gallium Indium Phosphide (InGaP), la Tellurure de Cadmium (CdTe) et l'Arseniure de Gallium (AsGa). Le choix entre ces technologies est influencé par le coût et la performance énergétique. Ci-dessous sont présentés les rendements des différentes photopiles existantes [24, 25] :

- ❖ La première génération de photopiles est constituée de cellules monocristallines. Elles ont un rendement exceptionnel de 24,7 % en laboratoire. Une cellule comparable avec un bon rendement de 24,2 % est proposée par Sun Power. Cependant, ils sont extrêmement coûteux, car leur production est laborieuse et difficile. Le cristal pur nécessite beaucoup d'énergie.
- ❖ La performance des cellules polycristallines fluctue entre 11 et 15 % (19,8 % en laboratoire) et diminuer les dépenses liées à la production.
- ❖ Même si la fabrication des cellules amorphes est nettement moins coûteuse, leur rendement est malheureusement inférieur de 5 à 8 % (13 % en laboratoire). La technologie permet l'emploi de strates de silicium extrêmement fines, allant de 0,3 à 1,0 micromillimètre (500 nm pour les deux autres catégories). Pour générer la même quantité d'énergie électrique, les panneaux amorphes demandent environ deux fois plus de surface et semblent se détériorer plus rapidement. Toutefois, ils réagissent plus efficacement à la lumière diffuse et fluorescente, tandis que leurs performances à des températures hautes sont améliorées.
- ❖ L'efficacité des cellules issues du monocristallin (AsGa) varie entre 18 et 20 %, soit 27,5 % en laboratoire.
- ❖ Les cellules produites à partir de monocristallin ou de polycristallin tel que CdS, CdTe et CuInGaSe₂ ont un rendement allant jusqu'à 8 %, soit 16 % en laboratoire [26].

1.9.6 Avantages et inconvénients d'une PV : [14, 27]

Le tableau I. 6 résume les bénéfices et les désavantages d'une PV.

Tableau I. 6 : Avantages et inconvénients des systèmes PV

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none">▪ En début, une grande fiabilité. L'installation est particulièrement adaptée aux zones isolées, car elle n'a pas de composants mobiles. Il est utilisé sur les engins spatiaux pour cette raison.▪ Les panneaux photovoltaïques, en raison de leur caractère modulaire, peuvent être montés facilement et adaptés à une variété selon les besoins énergétiques. Il est possible de dimensionner les systèmes pour des applications qui requièrent des puissances allant du milliwatt au mégawatt [2].▪ Les dépenses de fonctionnement sont très faibles, car il ne nécessite pas de carburant, de transport et de personnel hautement qualifié.▪ La technologie solaire photovoltaïque offre des avantages pour l'environnement, car le produit final est non polluant, silencieux et ne perturbe pas l'environnement, à l'exception de l'occupation de l'espace dédié aux installations de grande envergure.	<ul style="list-style-type: none">▪ L'élaboration d'un module photovoltaïque est une entreprise de pointe qui demande des investissements considérables. Le module a une effectivité de conversion faible, d'environ 10 à 15 %, avec une limite théorique de 28 % pour une cellule. Les générateurs solaires ne rivalisent pas avec les générateurs diesel que lorsque la quantité d'énergie requise est faible dans les régions isolées.▪ Transformés en énergie électrique. De la même façon, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, tandis que l'énergie restante sera dissipée sous forme de chaleur.▪ Dépendant de la météo.▪ Le coût du générateur augmente lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire.▪ Il existe encore de nombreux problèmes liés à l'ESS.

I.9.7 Systèmes d'énergie solaire et leurs types :

Il existe plusieurs catégories de PV :

I.9.7.1 Les sources d'électricité de faible puissance :

Ce sont des petites ressources d'énergie comme les caulettes ou les piles. Les panneaux solaires peuvent générer de l'énergie pour tout dispositif qui fait appel aux piles [10].

I.9.7.2 Système Photovoltaïque autonomes : [11]

Ces installations isolées, également appelées « autonomes », Leur connexion au réseau n'est pas nécessaire, mais elles doivent être en mesure de répondre à la demande de charge en tout temps. Le générateur photovoltaïque ne produit pas assez de puissance pour répondre à la demande de charge. Un **ESS** garantit également l'autonomie du système. En général, ces installations se composent de cinq composants :

- Un ou une série de modules photovoltaïques.
- Le système de régulation.
- Un ou plus d'accumulateurs.
- L'onduleur.
- Une ou plus des charges.

La figure I.18 lustre le système photovoltaïque autonome.

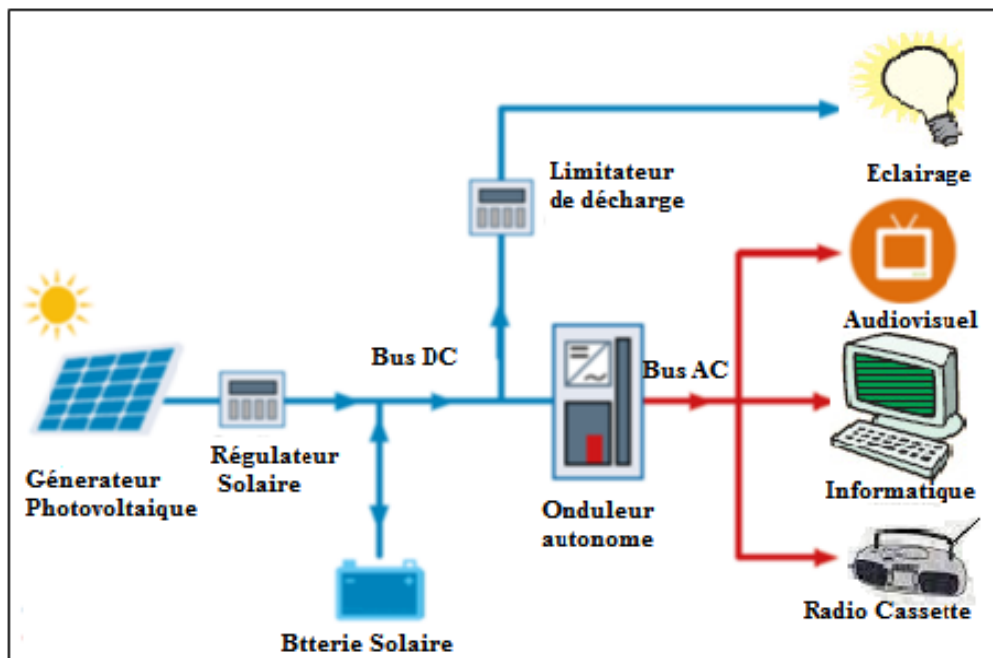


Figure I.18 : Système photovoltaïque autonome.

Ils se trouvent dans les trois cas suivants :

A. Système PV autonomes d'alimentation directe (sans SSE)

Dans cette situation, l'appareil alimenté ne sera en marche que lorsqu'il y aura de la lumière et dès qu'il y aura assez de lumière pour générer la puissance nécessaire [30].

B. Système autonome avec système de stockage d'énergie (SSE)

On désigne généralement le système photovoltaïque comme le plus fréquemment utilisé sous le nom de « système autonome ». Généralement, le montage est effectué pour le courant continu (DC), Ce qui est plus avantageux, parce que plus simple. Toutefois, dès que l'on entre dans la résidence, il est quasiment constamment nécessaire de nourrir des installations en courant alternatif (AC) [31].

C. Système hybride photovoltaïque autonome

Tous les systèmes hybrides en constituent dans lesquels plusieurs sources de production d'énergie sont fusionnées à l'énergie photovoltaïque, comme des groupes électrogènes ou des éoliennes. Le rôle du deuxième producteur d'énergie est de remédier aux déficits potentiels de production photovoltaïque. En ce qui concerne un système éolien hybride illustré dans la figure.1.19, l'énergie produite par le système (qui dispose d'un contrôleur indépendant) vient ajouter une charge aux batteries. Parce que sa production est plus volatile que celle des panneaux solaires, elle peut être utilisée comme un complément d'un générateur photovoltaïque pour des applications qui nécessitent beaucoup d'électricité. Ces applications ne nécessitent pas de fonctionnement régulier, mais plutôt en fonction du vent [11].

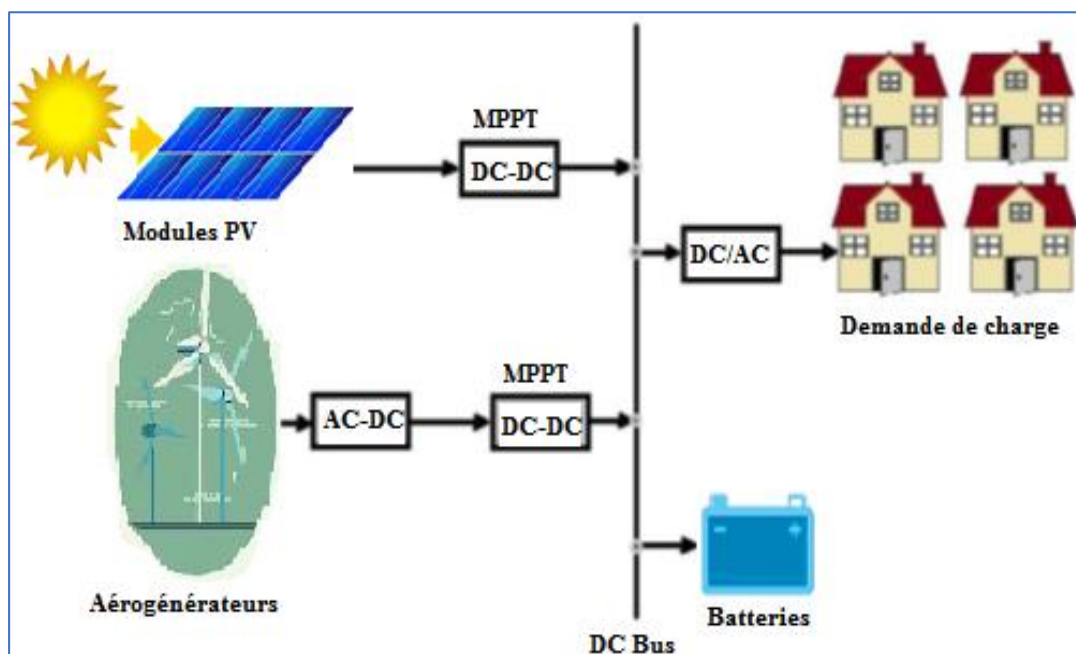


Figure I.19 : Système hybride avec éolien.

I.9.7.3 Système PV accouplé directement au réseau :

Le but essentiel d'un système photovoltaïque est de participer à la génération d'électricité initialement renouvelable dans le réseau, comme illustré dans la figure I.20. De ce point de vue physique, les charges locales de l'habitat consomment directement l'énergie générée grâce aux panneaux. Le surplus de production immédiate est transféré au réseau. Si une coupure d'énergie survient, l'onduleur met fin à la génération d'énergie solaire produite dans le réseau et transmise à un circuit d'urgence électrique parallèle formé d'une ou plusieurs batteries supplémentaires. Avec la sécurité contre la rupture, toute coupure de courant de l'onduleur, qui s'éteint automatiquement lorsque le réseau arrête la production, évite ainsi tout risque d'électrocution pour le personnel concerné.

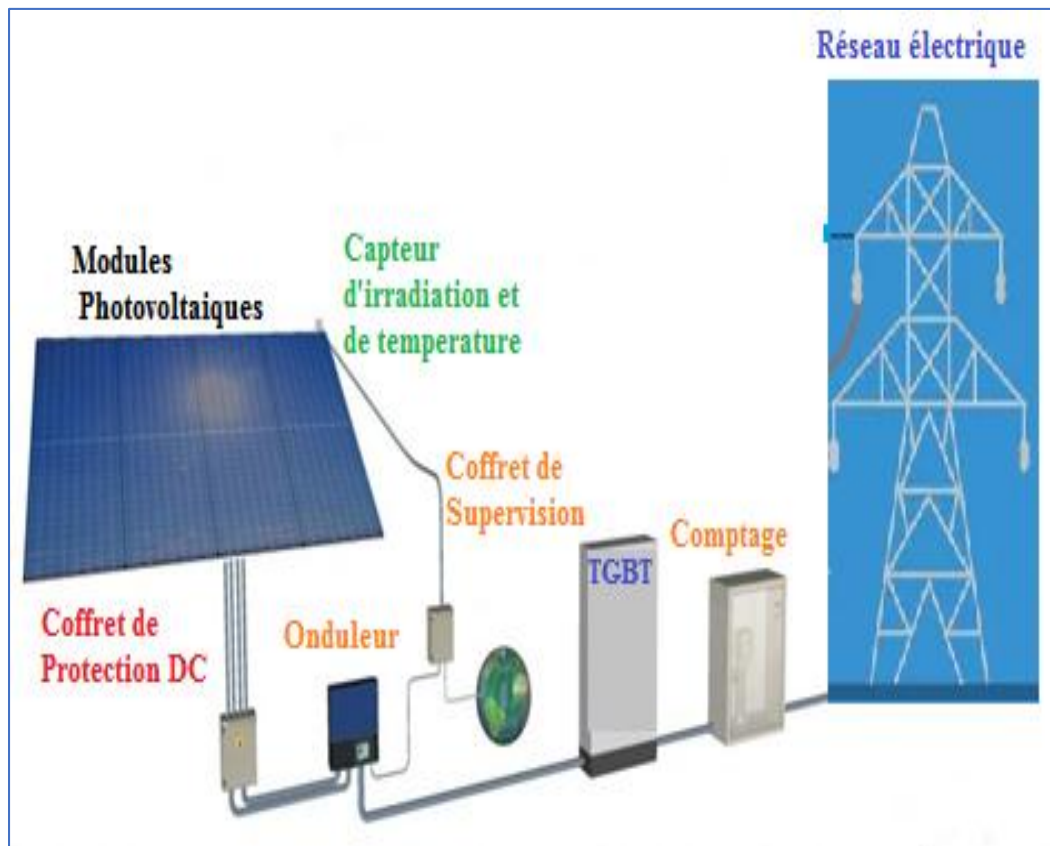


Figure I.20 : PV connecté directement au réseau.

I.10. Conclusion

Ce chapitre aborde quelques aspects généraux liés aux énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque et concernant les diverses techniques de stockage de ce dispositif, y compris les batteries au plomb-acide et les supercondensateurs, ainsi que sur notre exposition au stockage hybride (batteries plomb-acide / supercondensateurs). Nous avons présenté le fonctionnement et les applications de ces techniques dans le secteur des énergies renouvelables, en particulier les bénéfices majeurs.

CHAPITRE II

SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE ET LEUR MODELISATION

II.1. Introduction

Les éléments de conversion d'énergie photovoltaïques sont la base des modules solaires qui génèrent de l'énergie en convertissant la lumière solaire incidente en énergie électrique. Par conséquent, pour mieux appréhender le processus de transformation et examiner le comportement des PV dans divers milieux de fonctionnement, les cellules solaires nécessitent une modélisation et une caractérisation indispensables. Des simulations des effets causés par les défauts de composants et les changements dans le milieu sur les performances opérationnelles peuvent ensuite être effectuées. Les objectifs principaux sont le rayonnement solaire et la température pour la performance de l'approvisionnement en énergie photovoltaïque. Il est admis que les variations du PPM des modules PV sont causées par les conditions météorologiques. On recommande donc vivement d'extraire les PPM des sources photovoltaïques si possible.

L'algorithme MPPT est le choix privilégié, car la demande et la nécessité sont les plus importantes pour extraire les points de puissance et améliorer l'efficacité des modules photovoltaïques. Il ne faut pas négliger les diverses méthodes MPPT élaborées. La précision, la complexité, la vitesse et les vibrations des MPP peuvent varier. Les algorithmes classiques comme (IncCond) et (P&O) de sont les plus fréquemment employés grâce à leur simplicité d'application et à leur structure de contrôle, ainsi que de l'intelligence artificielle(IA) (logique floue). Ce chapitre présentera le modèle électrique, ainsi que le mécanisme d'un système photovoltaïque connecté à une charge et comment améliorer son fonctionnement grâce à un contrôle MPPT approprié.

II.2. Générateur photovoltaïque GPV

Les ingrédients de base d'un générateur PV englobent toutes les cellules PV, Les dispositifs de sécurité, les connexions et les supports. De cette façon, n'importe quel machine photovoltaïque (panneaux, modules, cellules solaires,...etc.) peut être utilisé pour représenter le terme « générateur photovoltaïque » [30, 31].

En effet, selon les technologies, une cellule solaire photovoltaïque (figure II.1. (a)) ne génère qu'une puissance électrique extrêmement faible. En général, il s'agit de 1 à 3 W et une tension entre 0,5 et 1,5 Volts [2, 31-32]. Généralement, on assemble en série et en parallèle les cellules solaires sous verre pour créer un module qui mène à

générer davantage de puissance (figure II.1.(b)). Afin de constituer un panneau, les modules sont reliés en série et en parallèle (figure II.1. (c)). Un champ photovoltaïque est créé lorsque plusieurs panneaux sont rassemblés sur un même site (figure II.1. (d)).

Des diodes de protection sont ajoutées pour transférer le module au panneau. Ces diodes de dérivation sont reliées en parallèle et en série pour annuler les courants inverses. Il n'intervient pas et ne limite pas la tension quand un ensemble de cellules est déséquilibré. Pour réduire la perte de production liée, revenez à la fin de cette collection.

En connectant les cellules en parallèle, le courant s'accroît tout en préservant la tension, tandis que l'association de plusieurs éléments photovoltaïques (cellules, modules) provoque une hausse de la tension pour un courant constant [31].

Un GPV présente une intensité électrique $I(V)$ non linéaire et un PPM, comme pour une cellule [3]. Il existe également une tension et un courant connus à ce point, ils sont appelés V_{opt} et I_{opt} . L'impédance de la charge qu'un GPV alimente, laquelle a été précisé le point de fonctionnement. Cette charge peut être considérée comme une charge résistive. Lors d'une connexion directe, le point de fonctionnement du GPV est déterminé par la batterie.

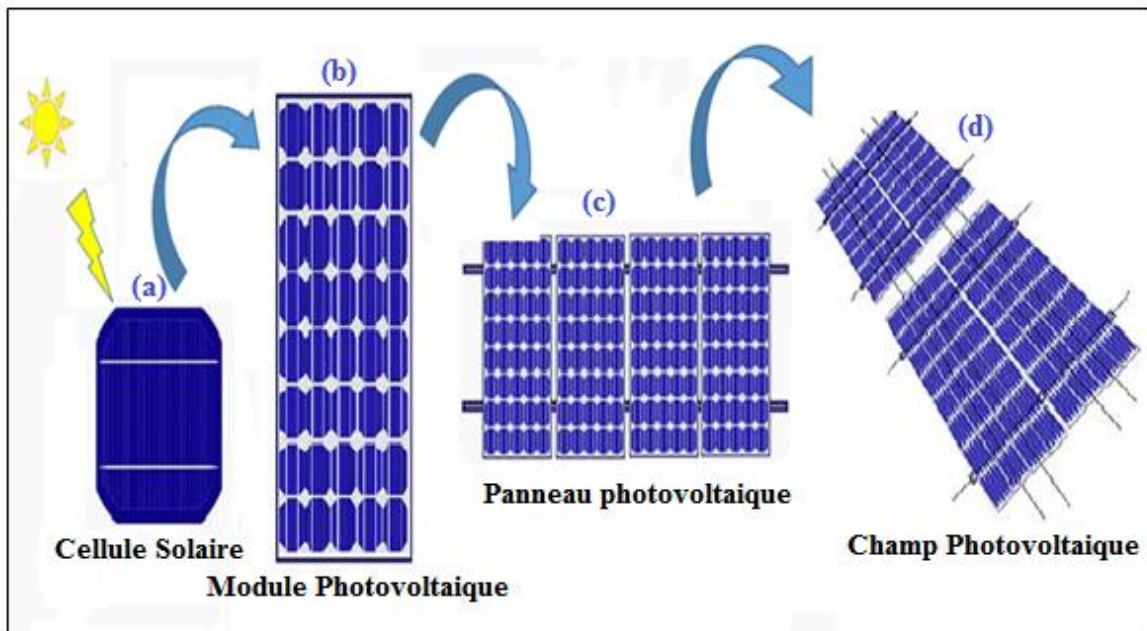


Figure II.1 : Constituants d'un champ photovoltaïque.

II.3 Modélisation d'une cellule solaire photovoltaïque

Il existe différents types de générateurs photoélectriques, ce qui varie d'un type à l'autre en fonction du nombre de paramètres utilisés pour déterminer le courant et la tension finale du générateur photoélectrique [2] Toutefois, nous avons décidé d'examiner le modèle le plus couramment employé. D'après Shockley, on se sert du modèle à une diode pour une seule cellule photovoltaïque et il est considéré comme le modèle « standard ». Il sert à définir un module photovoltaïque comme une série de cellules identiques qui sont reliées en parallèle et en série. Cela implique que ce modèle produit une baisse de l'exponentielle dans la caractéristique courant-tension [3, 34, 35]. Le schéma équivalent de modèle à une diode (standard) est présenté dans la figure II.2.

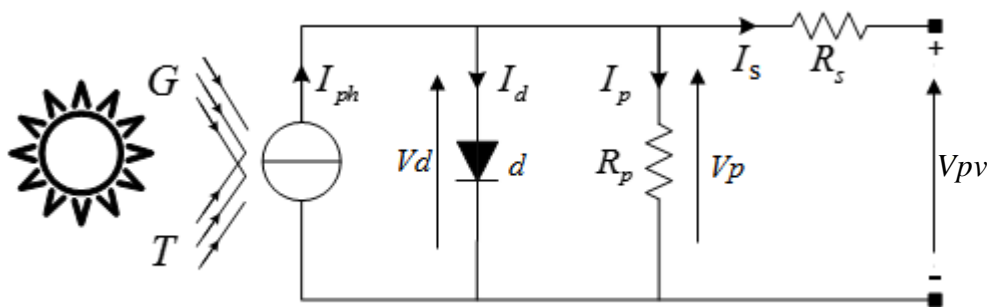


Figure II.2 : Un schéma similaire du modèle à une seule diode.

Le modèle correspondant d'une cellule solaire comprend une source de lumière où :

R_p : résistance parallèle,

d : diode,

R_s : résistance série,

En appliquant la première loi de Kirchhoff à la figure II.2, On peut recevoir les équations ci-dessous [2] :

$$I_{ph} = I_d + I_p + I_s \tag{II.1}$$

$$I_s = I_{ph} - I_d - I_p \tag{II.2}$$

La loi du courant de la branche parallèle est :

$$I_p = V_p/R_p \quad (II.3)$$

La tension de la diode est :

$$V_d = V_{pv} + R_s \cdot I_s \quad (II.4)$$

Le courant généré par la diode du débit interne d'une cellule provoqué par la jonction P-N de celle-ci est illustré par :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (II.5)$$

Avec : $V_t = a \cdot k \cdot T_c / q$ (II.5)

La jonction I_s présente un courant de saturation inverse :

$$I_s = I_{sn} \left(\frac{T_c}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot E_g}{ak} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_c}\right)\right) \quad (II.6)$$

$$I_s = \frac{I_{ccn}}{e^{aKT_1-1}} \quad (II.7)$$

Les symboles suivants indiquent respectivement :

« G » : le rayonnement solaire,

T_c : la température de la cellule,

I_{ph} : le photocourant est mentionné dans la relation ci-dessous :

$$I_{ph} = I_{CC} + \frac{G}{G_0} (I_{phn} + K_1(T_c - T_n)) \quad (II.8)$$

$$K_1 = \frac{I_{CC(T_2)} - I_{CC(T_1)}}{T_2 - T_1} \quad (II.9)$$

Avec : $K_1 = 4.10^{-4} JK^{-1}$

D'après la fonction de l'éclairage, la température ambiante et de la température T_c peut être donnée par la relation suivante linéaire :

$$T_c = T_a + \frac{T_n - 20G}{800} \quad (II.10)$$

De cette façon, le GPV offre un courant qui peut être écrit :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{a.K.T} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_s}{R_p} \quad (\text{II.11})$$

Puissance fournie :

$$P = V_{pv} \cdot I_{pv} = V_{pv} \left(I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{q(V_{pv} + R_s I_s)}{a.K.T} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_s}{R_p} \right) \quad (\text{II.12})$$

Où :

I_s : l'inverse du courant de saturation de la jonction.

K : le facteur de Boltzmann,

T : la température de cellule est mesurée en kelvin,

q : la quantité de charge d'un électron,

a : le critère d'incompatibilité de la jonction,

I_{pv} : le courant généré par les panneaux PV,

V_{pv} : la tension générée par le panneau PV,

I_{cc} : le courant au niveau du court-circuit du panneau,

R_p : la résistance connectée en parallèle,

R_s : la résistance connectée en série,

N_s : le nombre total de cellules reliées en série,

N_p : le nombre total de cellules reliées en parallèle.

II.4 Caractéristiques d'une cellule PV

Les graphiques de tension-courant (I-V) et de puissance-tension (P-V) résultant grâce à l'équation (II.11) illustrent le comportement d'une cellule photovoltaïque en fonction des conditions météorologiques spécifiques comme illustré dans la figure II.3 [38, 42].

D'après les caractéristiques de la cellule photovoltaïque, il est possible de constater qu'il existe trois paramètres électriques essentiels qui caractérisent cette courbe [30,38, 40] :

- ❖ On désigne sous le terme de tension à vide (V_{co}) la tension maximale présente dans une cellule sans charge ($I = 0$).

- ❖ le courant maximal que la cellule connectée à elle-même peut fournir ($V = 0$) est le courant de court-circuit (I_{cc}).
- ❖ La puissance maximale est l'énergie maximale qu'une cellule peut fournir, calculée en fonction d'un courant et d'une tension optimaux : I_{opt} , V_{opt} (appelés aussi I_{mpp} , V_{mpp}).

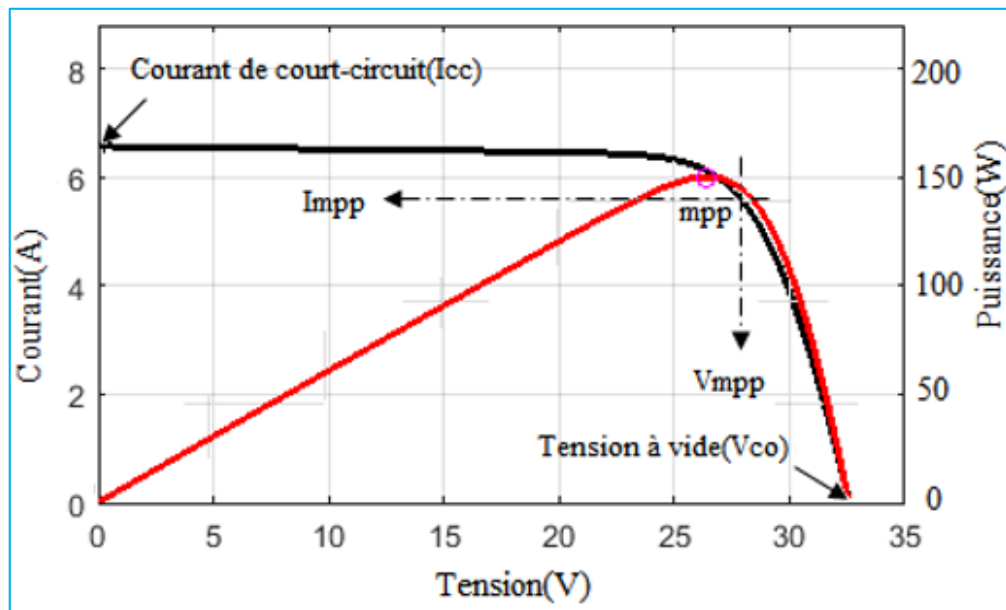


Figure II.3 : Caractéristique (I-V) d'une cellule solaire.

II.5 Assemblage des cellules solaires

Pour soulever la production d'énergie, les cellules solaires sont montées en série et en parallèle à la construction d'un module PV, comme indiqué dans la figure II.4. Sachant que pour obtenir une tension importante et un courant constant, les cellules doivent être connectées en parallèle, tandis que les connecter en série augmente le courant pour une tension constante. Chaque série bénéficie d'une protection grâce à une diode anti retour (ou diode by-pass), car quand la cellule n'est pas correctement éclairée, la diode empêche l'échauffement qui en découle de la dégradation ou de la panne [43, 45].

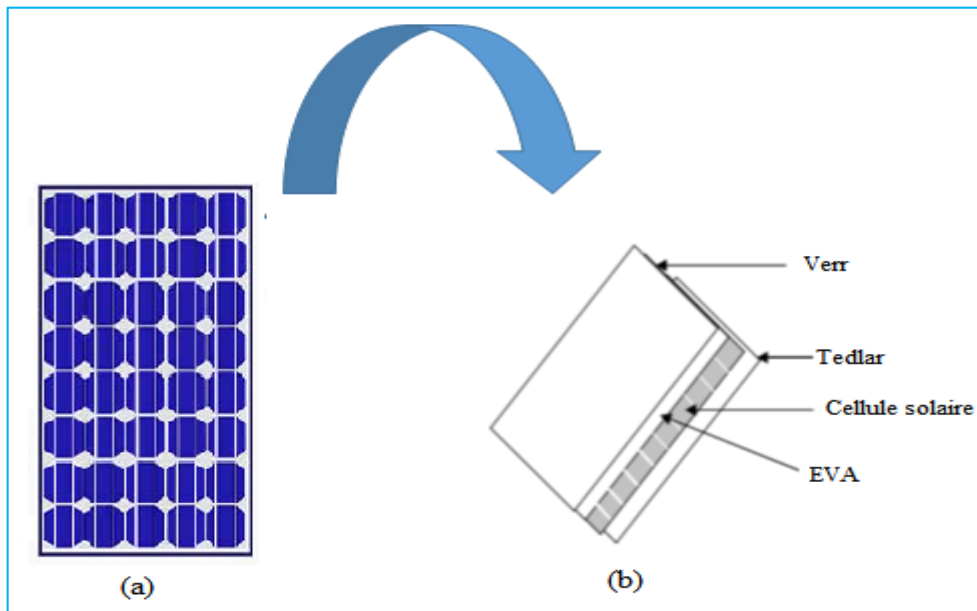


Figure II.4 : Module photovoltaïque.

II.5.1 Installation des cellules en série

La mise en série de plusieurs cellules permet d'atteindre la tension souhaitée, comme illustré dans la figure II.5(a). Chaque cellule génère un courant continu dont la force varie en fonction de sa surface. Les diverses cellules sont assemblées en série afin d'élaborer des modules produisant des hautes tensions, la tension produite découle de la fusion des tensions des différentes cellules liées, la puissance la plus grande de toutes les cellules correspond à celle d'une cellule multipliée par le chiffre de cellules connectées [45, 46].

Quand des cellules identiques sont assemblées en série, il est simplement nécessaire Il suffit de modifier la caractéristique d'une cellule en augmentant le facteur « N_s » en direction de l'axe des tensions, comme illustré dans la figure. II.5. (b).

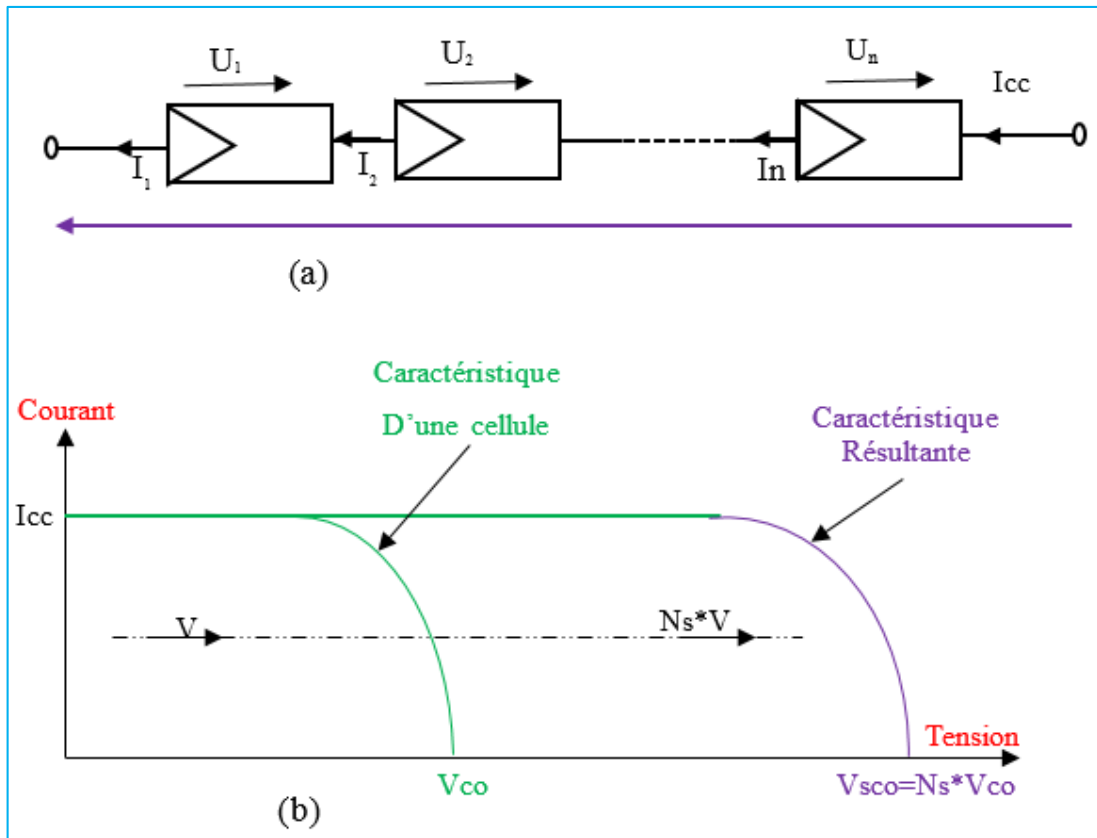


Figure II.5 : Installation des cellules en série.

II.5.2 Installation des cellules en parallèle

Pour amplifier le courant, il est nécessaire d'établir une association parallèle. On place les cellules sous la même tension et on obtient la caractéristique qui en découle par l'ajout de courants à une tension précise (voir figure II.6) [2, 43, 45].

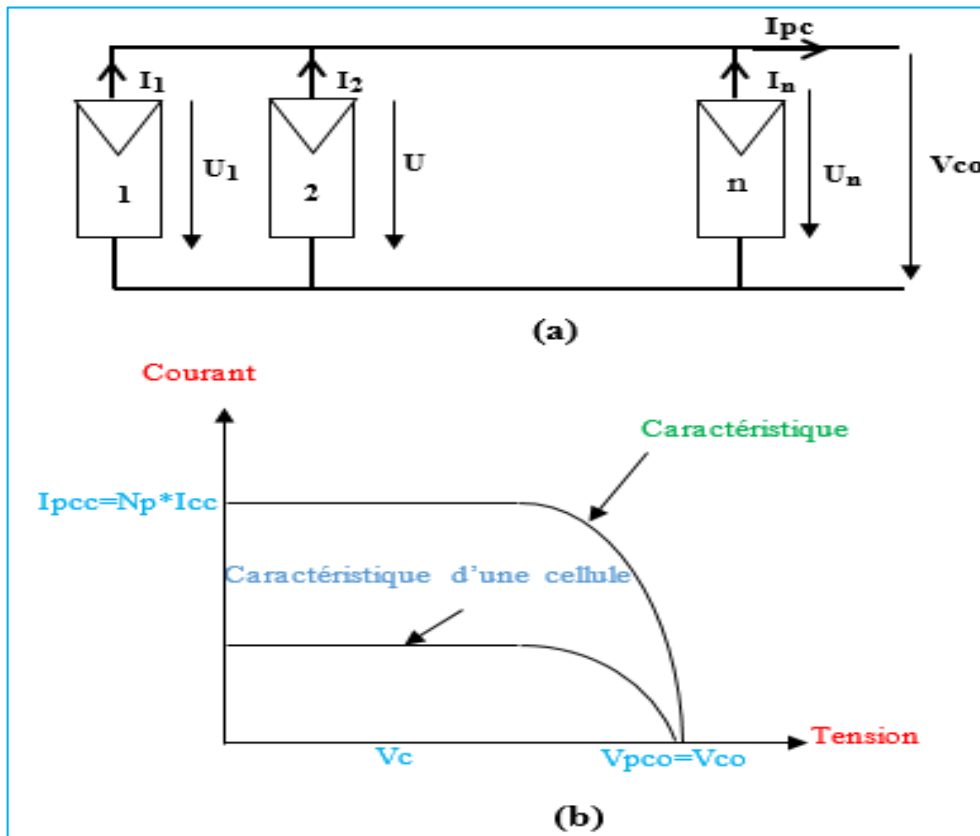


Figure II.6 : Ensemble parallèle de cellules solaires.

Lorsque deux cellules identiques sont montées en parallèle, Nous notons que P_{max} pour tous est plusieurs fois P_{max} pour la cellule, tandis que la tension optimale représente la tension optimale d'une unique cellule. En outre, le courant idéal de toutes est deux fois du courant idéal d'une cellule unique.

Cette règle peut être généralisée facilement dans le cas de cellules identiques liées en parallèle, comme illustré dans la figure (II.6.a). Il est simplement nécessaire de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur « N_p » en direction de l'axe des courants, comme le montre la figure (II.6. b) [45, 47].

II.5.3 Les cellules photovoltaïques en mixte (série + parallèle)

En ce qui concerne le courant et la tension, il est nécessaire d'associer un groupement série-parallèle, c'est-à-dire mixte. Il est donc possible de déduire les caractéristiques globales d'une installation en combinant les caractéristiques des constitués $N_s \times N_p$ (nombre de cellules en séries x nombre de cellules en parallèles). Voir la figure II.7.

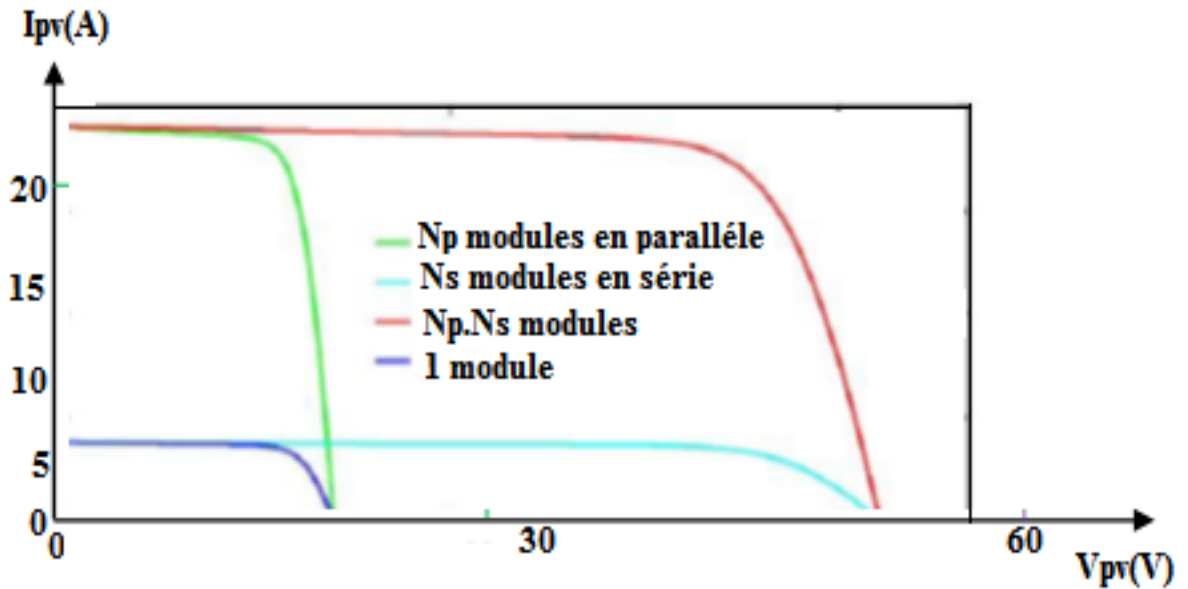


Figure II.7 : Ensemble en (série + parallèle) mixte des cellules PV.

II.6 Protection d'un générateur

Afin d'assurer une longévité significative d'un champ photovoltaïque visant à générer de l'électricité pendant plusieurs années, il faut incorporer des protections électriques dans les modules commerciaux pour prévenir les pannes destructrices causées par le groupement de cellules de panneaux en mixte. Deux types de protections traditionnelles sont employés dans les PV pour cette raison :

- ✚ La protection des générateurs photovoltaïques est assurée par la diode anti-retour qui empêche tout courant négatif. Ce type de phénomène peut survenir lorsqu'il y a plusieurs modules connectés simultanément. Lorsque la charge est une batterie, il est essentiel d'avoir cette diode afin d'éviter qu'elle ne débite sur le module photovoltaïque au cours de la nuit.
- ✚ Lorsque l'éclairage n'est pas homogène, les diodes by-pass ont la capacité de séparer un sous-réseau cellulaire, prévenant ainsi l'émergence de points chauds et le décès des cellules mal éclairées. L'emploi de ces diodes a un impact sur la qualité du produit final du générateur. La protection du module contre ce phénomène nécessite l'utilisation de ces diodes en parallèle pour chaque groupe de cellules (par séries de 18 cellules, soit 2 par panneau de 36 cellules) ; leur travail consiste à rendre les cellules négatives [46-48].

La figure II.8 présente la conception et l'intégration des diodes de protection dans un panneau La figure II.9 illustre comment la diode de by-pass affecte la performance I(V) d'un GPV.

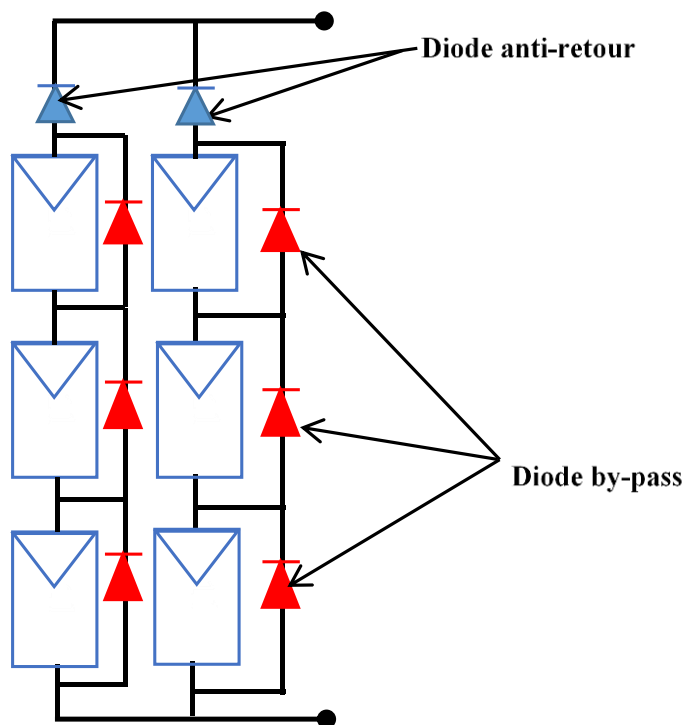


Figure II.8 : Les panneaux solaires avec les diodes de surveillance.

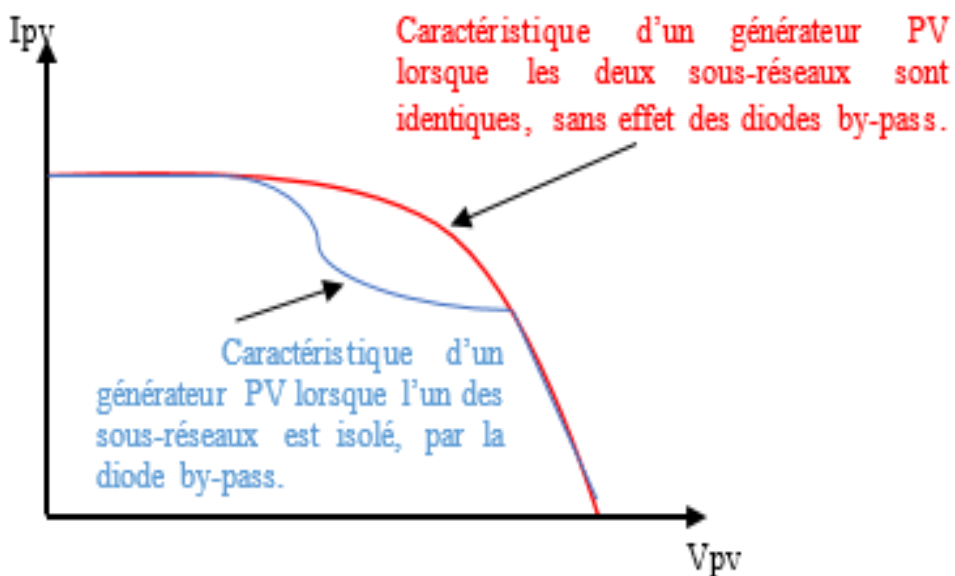


Figure II.9 : La diode de by-pass et son impact sur les performances $I_{pv}(V_{pv})$ d'un GPV.

II.7 Caractéristiques d'un générateur PV

En présence de conditions météorologiques spécifiques d'ensoleillement et de température qui affectent le comportement du générateur photovoltaïque, en particulier en présence de charges potentielles, cela est confirmé par les caractéristiques de la tension actuelle (I-V) et de la puissance (P-V) d'un générateur PV. Le point de fonctionnement du système PV sera déterminé en se basant sur la charge aux bornes du générateur. La figure II.10 présente les caractéristiques de tension et de courant (I-V) d'un module photovoltaïque pour des applications spécifiques d'éclairage et de température [49-58].

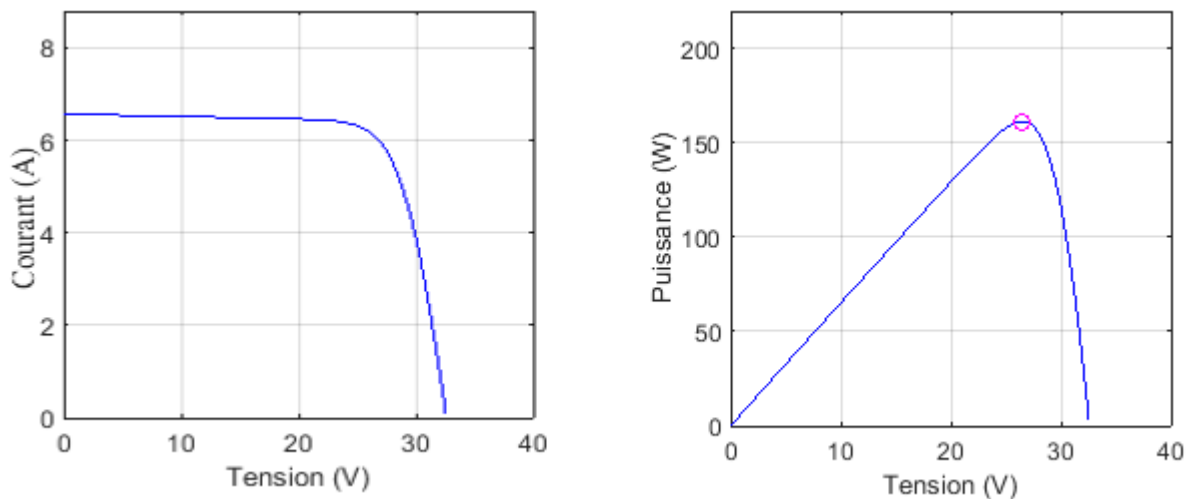


Figure II.10 : Caractéristiques générateur PV(a) I-V, (b) P-V.

II.8 Les zone de fonctionnement du générateur PV

On peut identifier le point optimal qui se distingue par une puissance de sortie max dans cette zone. Le champ d'action du module photovoltaïque est influencé par la charge et les conditions météorologiques, ce qui peut avoir un impact sur ses performances [23]. Dans la zone 1, le courant ne dépend pas de la tension, Le module solaire électrique joue le rôle d'un générateur de courant. Bien que le courant varie dans la zone 3, la tension demeure presque stable, ce qui indique que le module PV peut servir de générateur de tension [58]. La zone 2 représente le passage entre les deux zones antérieures, garantissant une harmonisation en ce qui concerne la caractéristique I-V. C'est la zone idéale pour l'efficacité du module PV en tant que générateur PV. [49-58]. Ceci est illustré dans la figure II.11.

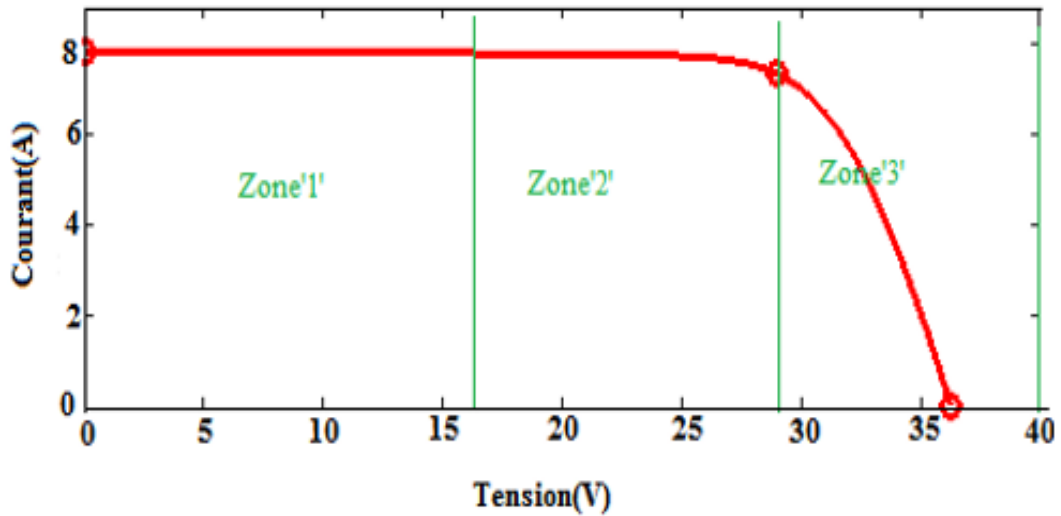


Figure II.11 : Zones de fonctionnement du Générateur PV.

II.9 Influence des conditions météorologiques sur le fonctionnement des panneaux solaires

II.9.1 Influence de l'ensoleillement

La caractéristique courant-tension est influencée par le rayonnement incident. Effectivement, lorsque le flux lumineux augmente, cela entraîne un déplacement de la caractéristique I-V en fonction de l'axe des courants. Effectivement, le courant de court-circuit est lié à l'intensité de l'irradiation. Toutefois, l'augmentation du courant de court-circuit est bien supérieure à la tension en circuit ouvert. L'éclairement a une influence très faible sur la tension en circuit ouvert. La puissance s'accroît considérablement avec l'éclairage. La figure II.12 montre l'effet de l'intensité lumineuse E (W/m^2) sur les caractéristiques I-V et P-V du module photovoltaïque [49].

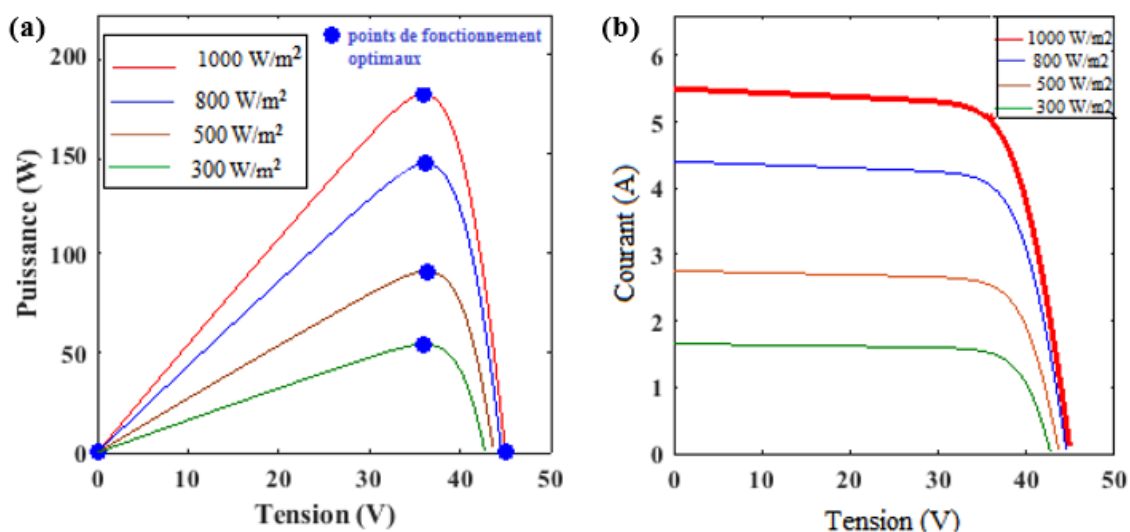


Figure II.12 : Caractéristiques d'un module PV pour diverses valeurs d'ensoleillement à température constant (a) I-V, (b) P-V.

II.9.2 L'effet de la température

La température joue un rôle principal pour garantir le bon fonctionnement des cellules PV, car les caractéristiques électriques d'un semi-conducteur sont extrêmement sensibles à la variation de température.

Sous intensité d'éclairages constants et température variable, les caractéristiques V-I et P-V du module photovoltaïque sont obtenues en fonction de la température et cela est illustré par la figure II.13. C'est prouvé que l'augmentation de la température provoque une diminution significative de la tension du circuit ouvert (jusqu'à -0,4 %) [49], mais le courant de court-circuit évolue légèrement lorsque la température augmente. En règle générale, une température élevée provoque une énorme perte d'énergie.

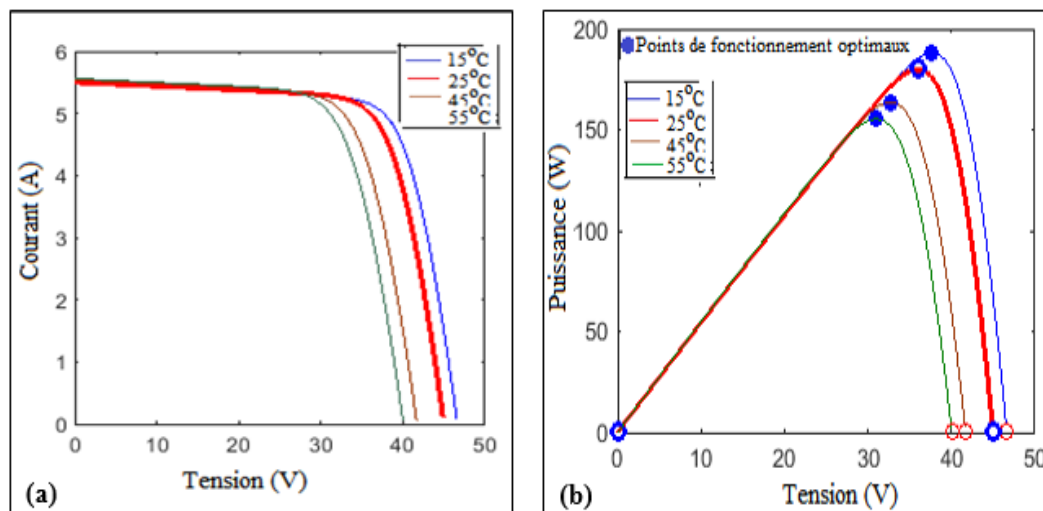


Figure II.13 : Caractéristiques d'un module solaire PV pour des valeurs de températures variées avec un soleil constant (a) I-V, (b) P-V.

II.10 Le fonctionnement des systèmes PV

Le fonctionnement d'un système photovoltaïque fonctionne en transformant la lumière solaire en électricité. Il est donc constitué de divers éléments, comme les cellules, il s'agit d'un assemblage mécanique, d'un moyen de conversion de l'énergie électrique et de connexions électriques. On peut stocker l'électricité produite dans un système photovoltaïque autonome, la stocker dans des batteries ou l'utiliser pour alimenter un réseau électrique plus important. L'ajout d'équipement de conditionnement électrique est intéressant. Cela favorise le bon fonctionnement du système photovoltaïque. Dans cette situation, nous employons des dispositifs spécifiques afin de surveiller la puissance maximale du réseau. Cet instrument est appelé le suivi du point de puissance maximale [50-51].

II.10.1 Connexion GPV-charge

II.10.1.1 Connexion directe

En ce qui concerne les installations autonomes, les systèmes photovoltaïques opèrent sans dépendre du réseau électrique. Les panneaux photovoltaïques génèrent une énergie qui peut être utilisée immédiatement ou stockée dans des batteries pour l'utiliser en cas de besoin. Le courant continu généré alimente directement les dispositifs spécifiquement conçus pour cela. Pour les systèmes autonomes, la configuration la plus simple consiste en le couplage direct. Dans ce cas, le GPV est

connecté directement à la charge CC. Dans cette optique, la recharge peut être réalisée à des moments d'ensoleillement adéquat. Il est envisageable pour les applications qui ne nécessitent pas de fonctionnement pendant la nuit, et c'est le principal désavantage de la connexion directe, comme illustré dans la figure II.14 [51].

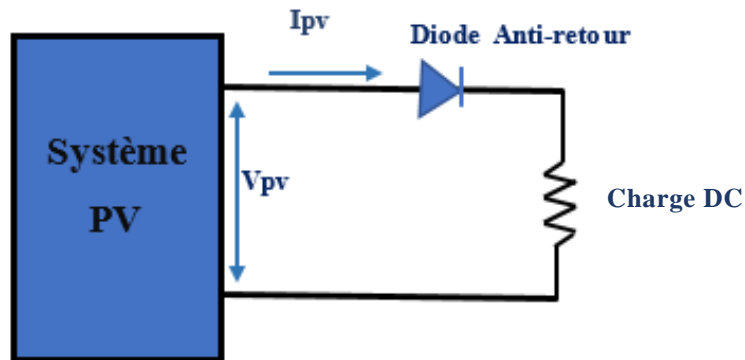


Figure II.14 : Système photovoltaïque avec un couplage direct.

Dans cette configuration, il est impossible de limiter ou de régler la tension de la charge. Il n'est donc pas assuré que la puissance maximale disponible aux bornes du GPV soit transmise à la charge, comme le démontre la figure II.14 [33, 51].

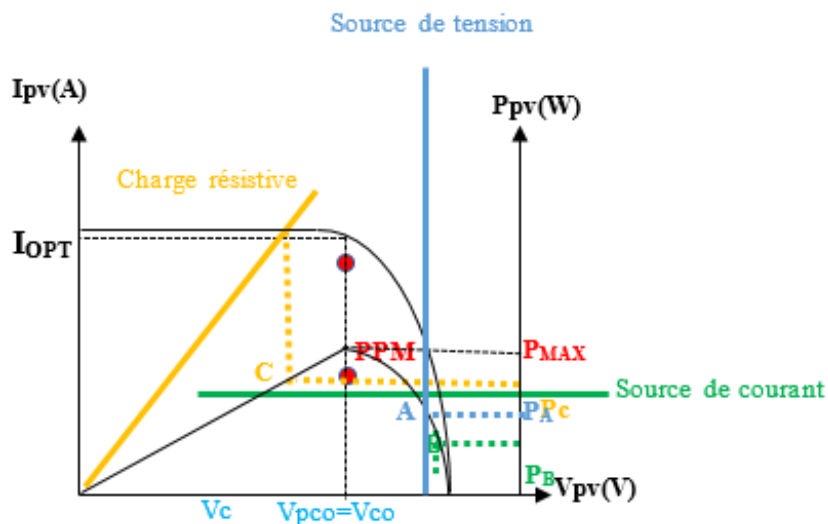


Figure II.15 : Le fonctionnement d'un GPV se base sur la charge liée en direct.

D'après la figure II.15, nous ne pouvons pas créer de connecter directement à un GPV, à l'exception des cas de charge suivants :

- Source de tension continue,
- Source de courant continue,

- Résistance.

La puissance du générateur est inférieure à P_{MAX} pour les points de fonctionnement A, B et C, respectivement PA, PB et PC. Par conséquent, nous enregistrerons la perte d'énergie dans le générateur sous forme de chaleur. Par ailleurs, certaines sortes de charges requièrent une source de tension alternative, cependant le GPV offre un courant continu, ce qui rend impossible une connexion directe dans cette situation. De ce fait, l'emploi de la connexion directe comporte plusieurs inconvénients, notamment des réductions de production et des contraintes associées à son application sur des récepteurs fonctionnant en courant continu [51].

II.10.1.2 La connexion indirecte

Suivant la figure II.16, ce type de connexion nécessite un composant électronique (une phase d'adaptation) : son rôle consiste à générer une puissance optimale qui est ensuite transmise à la charge. Donc, la mission consiste à préserver le plus d'énergie possible et à la transférer vers la charge. En outre, la puissance nominale du GPV est très variée de celle qui est effectivement transmise à la charge [51].

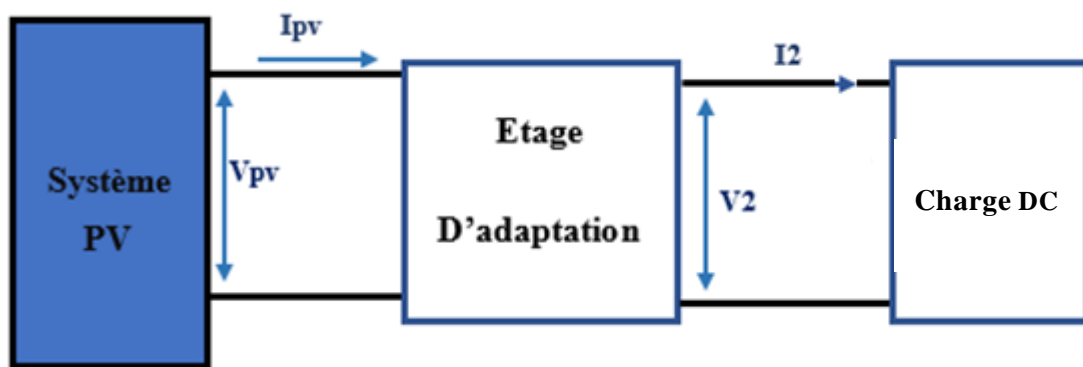


Figure II.16 : Un étage d'adaptation permet d'accoupler un GPV à une charge.

II.11 Convertisseurs de puissance électroniques

Les convertisseurs d'énergie ont pour rôle d'apporter de l'énergie à l'utilisateur dans une forme à haute efficacité. Les convertisseurs électroniques de puissance sont nécessaires dans les systèmes PV pour convertir le voltage DC aux valeurs requises et pour convertir de DC à AC et vice versa [53, 54]. En outre, ils contrôlent la charge et

le déchargement des batteries et supercondensateurs au sein des systèmes où ces éléments sont utilisés comme moyens de stockage.

II.11.1 Hacheur survolteur (Boost)

Ce type est utilisé pour générer une tension supérieure à celle fournie par les panneaux dans le cas du stockage d'énergie. Les interrupteurs de démarrage et de blocage sont utilisés par leur génération (MOSFET, IGBT, bipolaires, etc.) et une diode. Le rapport cyclique du hacheur survolteur est [2-52] :

$$V_0 = \frac{1}{1-a} V_i \tag{II.13}$$

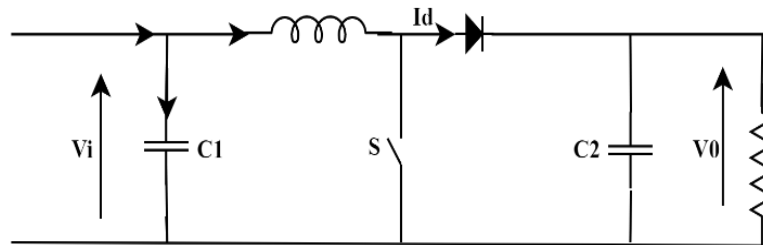


Figure II.17 : Schéma électrique de convertisseur survolteur.

Quand l'interrupteur S est en mode conduction continue, il n'y a pas d'impact sur la diode D par aucun courant, cela conduit à la mise en application de Vi via l'inductance L. Une fois S ouvert, la tension de sortie V0 dépasse celle d'entrée, puisque le courant recueilli dans l'inducteur se déplace vers D et se dirige vers la charge R [31].

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_i - (1 - \alpha) \cdot V_0 \tag{II.14}$$

$$C \frac{dV_0}{dt} = (1 - \alpha) \cdot I_L - \frac{V_0}{R} \tag{II.15}$$

La tension de sortie est déterminée en se basant sur le rapport cyclique moyen α et la tension d'entrée. On peut la décrire par l'équation (II.14). L'utilisation de l'ajustement de la relation cyclique (α) pour le contrôler la tension de sortie.

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} V_i \tag{II.16}$$

$$I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_0 \tag{II.17}$$

- Dimensionnement des composants

L et C sont calculés par les équations suivantes [31] :

$$\alpha = 1 - \frac{V_i}{V_0} \tag{II.18}$$

$$L = \frac{\alpha * V_i}{F * \Delta I} \tag{II.19}$$

$$C = \frac{\alpha * V_i}{F * \Delta V_0} \tag{II.20}$$

Quand le rapport cyclique α atteint 28 %, cela entraîne un transfert de tension des panneaux V_i .

II.11.2 Hacheur dévolteur (Buck)

Un convertisseur Buck est un convertisseur DC/DC bas de toute façon composé d'une induction et de deux interrupteurs (généralement un transistor et une diode) pour contrôler l'induction. It commutations entre la connexion de l'induction à la tension source est utilisée pour accumuler de l'énergie, puis elle est déchargée par induction à la charge [52].

$$V_0 = \alpha V_i \tag{II.21}$$

Où α est le rapport cyclique

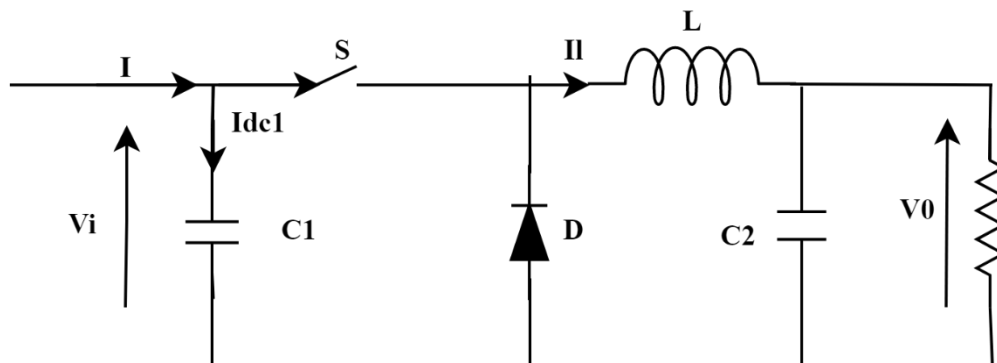


Figure II.18 : Illustration électrique du dévolteur.

II.11.3 Hacheur buck-boost

Les caractéristiques des deux convertisseurs (dévolteur et survolteur) sont regroupées dans ce convertisseur, pour transformer n'importe quelle tension d'entrée DC en n'importe quelle tension de sortie DC requise [2]. Le rapport cyclique du hacheur dévolteur-survolteur est [2] :

$$V_0 = \frac{a}{1-a} V_i \tag{II.22}$$

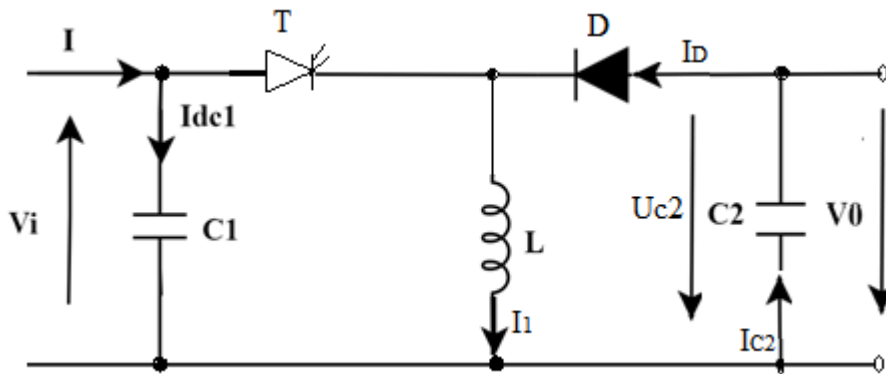


Figure II.19 : Schéma électrique du convertisseur dévolteur-survolteur.

II.12 Commande MPPT

La technique (MPPT) a été développée au cours de 1968. Il est crucial de suivre cette commande afin de garantir un bon rendement du PV [58]. En termes simples, une régulation MPPT, combinée à un étage d'adaptation intermédiaire, permet de mettre en marche un générateur photovoltaïque de manière à générer constamment la puissance max.

Les panneaux solaires sont employés afin de générer de l'énergie dans diverses utilisations électriques. Pour optimiser l'efficacité du panneau solaire, on utilise une régulation MPPT pour contrôler le hacheur. De cette manière, quelle que soit la météo (température et éclairage), Quand on commande le convertisseur, le système atteint son point de fonctionnement maximal (MPPT). Voir la figure II.20.

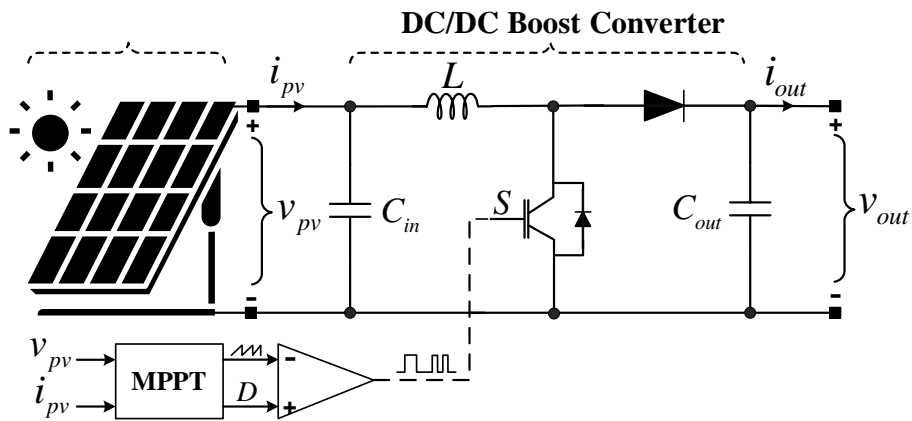


Figure II.20 : Système d'énergie solaire avec convertisseur DC-DC et régulateur MPPT.

II.12.1 Les plus importantes des commandes de MPPT

La littérature contient une multitude d'algorithmes MPPT documentés. On peut le classer en trois types, comme illustrés dans La figure II.21 [61] :

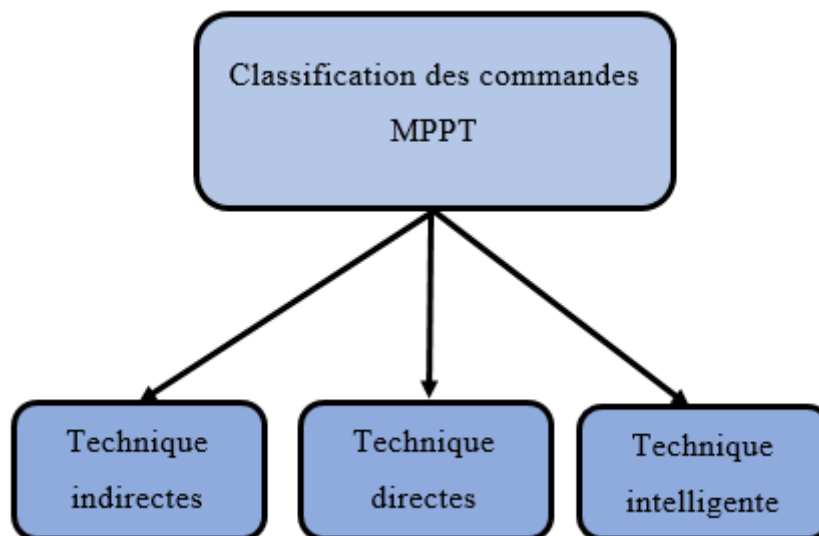


Figure II.21 : Classement des méthodes MPPT généralement utilisées.

II.12.1.1 Techniques indirectes

Il existe deux commandes, qui sont les suivantes : les commandes "directes" utilisent les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}) afin d'évaluer la localisation approximative du MPP sans interrompre le système solaire, et les commandes basées sur un modèle paramétrique préétabli pour estimer le point de fonctionnement du GPV.

En outre, certaines commandes sont exclusivement basées sur la température des cellules pour déterminer la tension idéale à maintenir, mesurée par un capteur. Ces commandes sont faciles à mettre en œuvre et conviennent aux systèmes économiques et peu précis, qui fonctionnent dans des régions où le changement climatique n'est pas d'un problème important. Ces méthodes s'illustrent par la technique de tension de circuit ouvert et la technique de tension de circuit ouvert du générateur.

II.12.1.2 Techniques directes

Les techniques fréquemment utilisées directement pour atteindre le point de puissance maximale sont IncCond et P&O. Dans les techniques directes, la tension sera mesurée en ligne et le panneau sera mesuré périodiquement afin de déterminer le rapport cyclique du convertisseur et de surveiller le point de puissance maximale MPPT.

II.12.1.3 Technique intelligente

La méthode intelligente consiste en une approche avancée pour surveiller le niveau maximal de puissance dans les systèmes photovoltaïques. Cette méthode utilise des algorithmes de contrôle avancés et des modèles mathématiques pour ajuster en temps réel la tension et le courant du générateur solaire afin d'obtenir la puissance maximale disponible. Elle prend en compte les variations climatiques telles que l'éclairement solaire et la température pour assurer un fonctionnement optimal du système PV. Cette technique est souvent utilisée dans des applications exigeant une grande puissance et une précision élevée afin de maximiser la production d'énergie solaire [45]. Les principaux algorithmes intelligents : Logique floue, optimisation de l'essaim de particules (PSO), réseaux de neurones artificiels, ou les deux ensembles (system hybride).

II.12.2 Technique d'incrémentation de l'inductance (IncCond)

Il est indispensable de déterminer la dérivée de la puissance du panneau PV en fonction de la tension en prenant en compte la pente de la relation entre la puissance et la tension au PPM, qui résulte donc zéro. Le point MPP présente une pente positive à gauche et négative à droite [65-66].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{d(I)}{dV} = 0 \tag{II.23}$$

$$\frac{d(I)}{dV} = -\frac{1}{V} \tag{II.24}$$

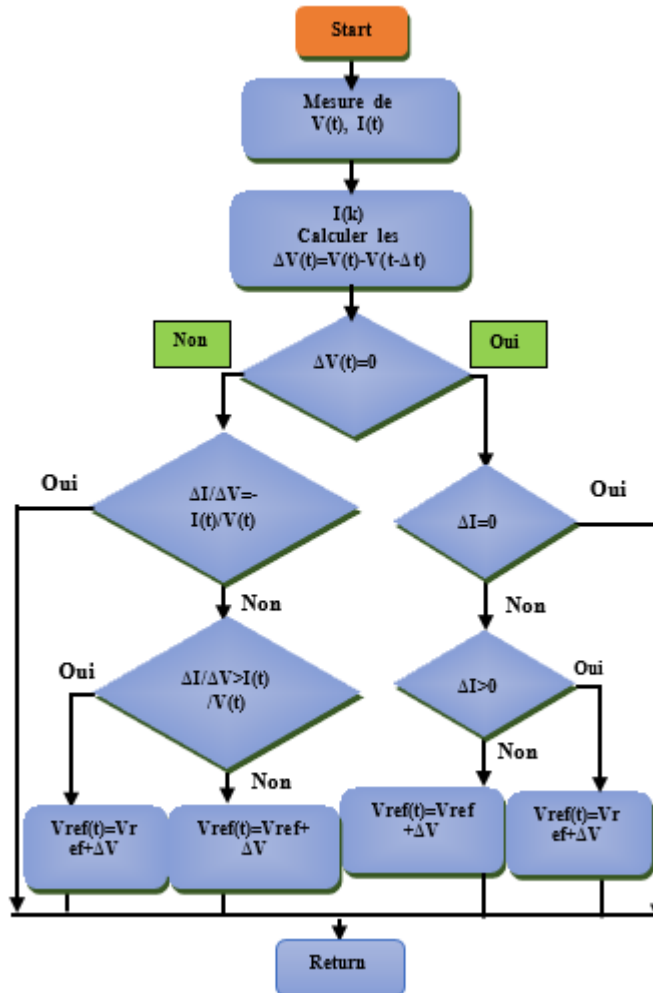


Figure II.22 : Structure de la technique IncCond.

II.12.3 Technique P&O

L'objectif de cet algorithme est de modifier le point de fonctionnement du module PV en augmentant ou en diminuant le rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC. La mesure de la puissance de sortie avant et après la perturbation est requise. En augmentant la puissance, le système est perturbé dans la même direction. Si tel n'est pas le cas, le système est perturbé de manière inverse. Comme son nom le suggère,

cette approche agit en perturbant le système et en étudiant l'effet sur la puissance en sortie du GPV [62].

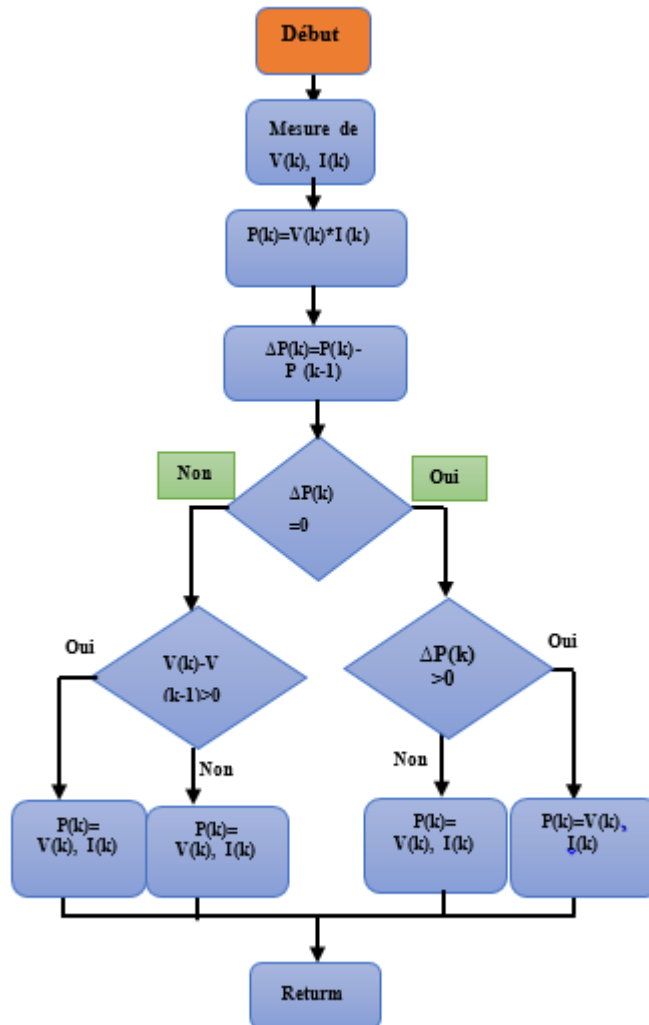


Figure II.23 : Structure de l'algorithme P&O.

II.12.4 Technique de logique floue FLC

Pendant la fuzzification, il est plus simple de transformer des données numériques d'entrée en variables fuzzy lorsque l'on utilise la fonction d'adhésion [63]. Les équations (13) et (14) confirment les spécifications indiquées :

$$E(k) = \frac{P(k)-P(k-1)}{I(k)-I(k-1)} \tag{II.25}$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \tag{II.26}$$

Il est connu que $E(k)$ indique l'erreur, tandis que $\Delta E(k)$, indique la variance d'erreurs dans le temps k de cette méthode. Le point d'exploitation MPP peut être atteint en temps k en utilisant $E(k)$. Cependant, il a été montré que $E(k)$ donne la valeur du point de rendement optimal et la direction du changement. $E(k)$ est toujours zéro, peu importe la dynamique des changements du cycle de fonctionnement en réponse aux conditions climatiques [64].

Selon le tableau II .2, la fonction d'adhésion (MF) pour les variables linguistiques est N = négatif, Z = zéro, P = positif, NB =Négatif Grand et PB = positif Grand [64].

$$\Delta D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j) \Delta D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j)} \quad (II.27)$$

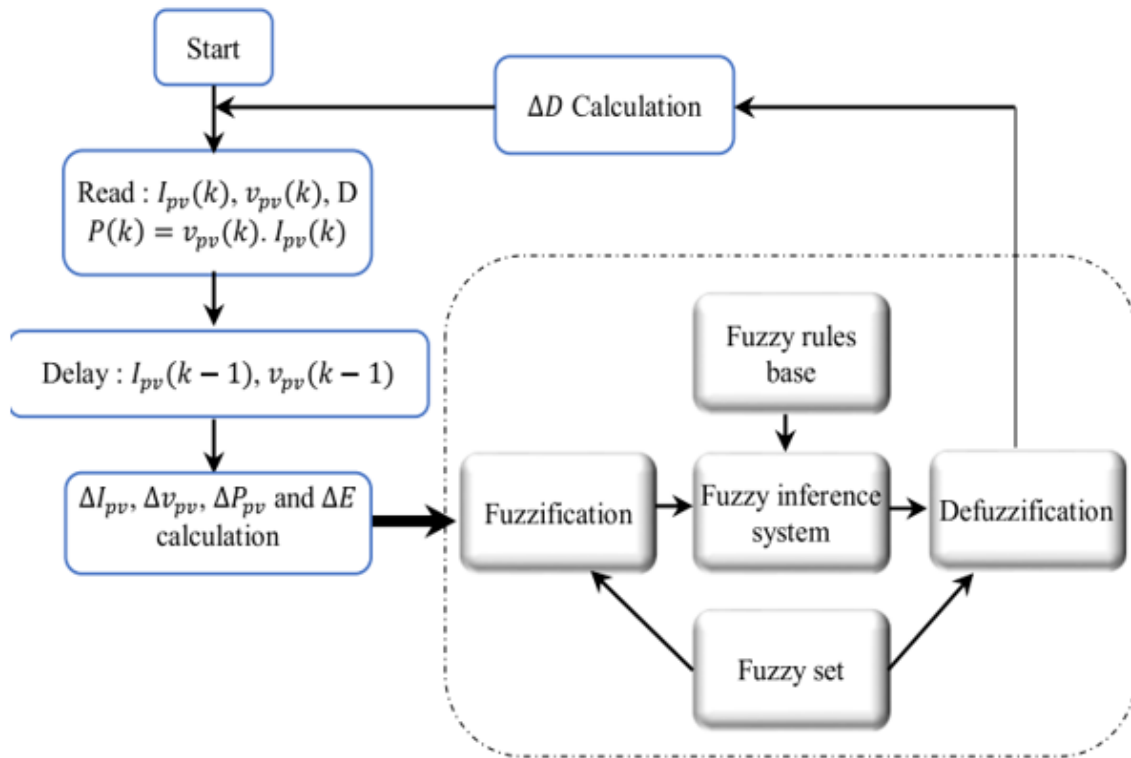


Figure II.24 : Graphique de flux de la technique FLC.

Tableau 1. Principes de règles floues

$\Delta V/\Delta P$	NB	N	Z	P	PB
NB	P	PB	NB	NB	N
N	P	P	N	N	N
Z	Z	Z	Z	Z	Z
P	N	N	P	P	P
PB	N	NB	PB	PB	P

Ce genre de commande offre des avantages par rapport aux autres algorithmes classiques en raison de sa précision et de sa rapidité. Effectivement, cet algorithme opère à son maximum sans oscillations significatives et montre un bon comportement pendant la période transitoire [41]. Toutefois, l'application de ce genre de technique est plus compliquée que les techniques traditionnelles et dépend grandement de la dimension du tableau d'inférence choisi [65, 66].

II.13 Modélisation du système de stockage

Des facteurs fondamentaux, tels que les conditions climatiques, comme la température, l'intensité du rayonnement et la vitesse du vent, font partie des facteurs qui affectent l'énergie générée grâce aux énergies renouvelables, qu'elle soit augmentée ou diminuée. Pour cette raison, il est devenu nécessaire de disposer d'un **ESS** pour éviter de gaspiller l'énergie excédentaire et l'utiliser en cas de besoin. De cette manière, les batteries seraient chargées pour stocker l'énergie supplémentaire générée par la charge par rapport à celle nécessaire en cas de manque d'énergie fournie par le système à la charge, l'énergie stockée serait utilisée comme complément (décharge des batteries) afin que la charge puisse recevoir l'énergie nécessaire, quels que soient les conditions. Finalement, la charge pourra utiliser l'énergie stockée aux moments appropriés [29, 67].

Les batteries sont des appareils de stockage qui requièrent en permanence une multitude d'actions pour maximiser leur efficacité. Les caractéristiques fondamentales des batteries comprennent la résistance interne (R_i), le voltage nominal, le voltage à vide (E_0), le voltage final de décharge, la capacité, le pourcentage de décharge et de recharge, la profondeur de décharge, les effets des conditions externes, la longévité et le nombre de jours d'autonomie. En outre, le statut de charge (SOCb), offre des informations sur la charge de la batterie, Afin de prévenir les décharges profondes ou les charges excessives qui pourraient

nuire aux batteries. Cette raison conduit à minimiser la dégradation de la batterie afin d'étendre sa longévité le plus possible.

D'après l'équation ci-dessous, SOC_b est le rapport entre la capacité disponible et la capacité nominale : [68]

$$SOC_b = \frac{\text{Capacit édisponible [AH]}}{\text{Capacit énominale [AH]}} 100\% \quad (\text{II.28})$$

II.13.1 Modélisation de la batterie

Plusieurs types de batteries au plomb sont disponibles, et leur installation n'est pas simple du fait de la considération de différents facteurs [31]. Selon les applications et les restrictions auxquelles elles sont soumises, ce qui signifie qu'il n'existe pas de modèle unique qui soit précis dans toutes les situations. Nous avons opté pour concerne le modèle R-C [31]. Donc, on peut représenter le modèle de batterie par son circuit équivalent lustré sur la figure II.25 [68].

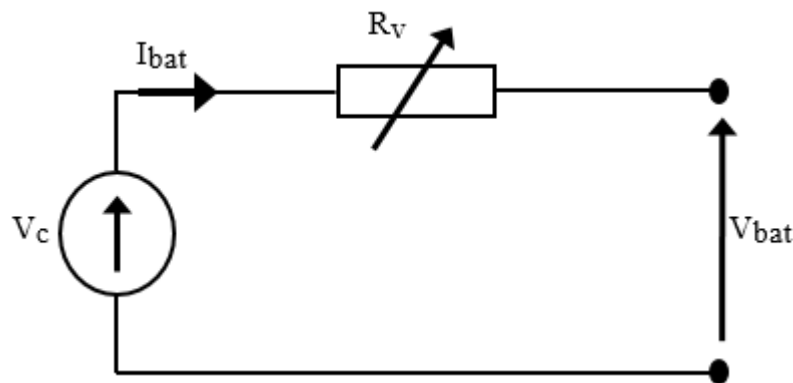


Figure II.25 : Modèle R-C de la batterie.

Où,

V_c : la tension d'entrée idéale (V) ;

V_{bat} : tension aux bornes de la batterie (V) ;

I_{bat} : courant développer par la batterie (A) ;

R_v : résistance variable interne de la batterie (Ω).

Avec,

$$R_v = R_i + K_b \frac{C_{bat}}{C_{bat} - \int_0^t I_{bat} dt} \quad (II.29)$$

R_i : résistance interne (Ω) ;

k_b : coefficient de polarisation ;

C_{bat} : capacité de la batterie (Ah) ;

Selon la figure II.25, on déduit l'équation de tension de la batterie comme suit :

$$V_{bat}(t) = V_C - R_V I_{bat}(t) \quad (II.30)$$

Et la condition de charge (SOC_b) de la batterie se situe :

$$SOC_b = \left(1 - \frac{Q_d}{C_{bat}}\right) \times 100 \quad (II.31)$$

Nous avons examiné le stockage réversible (chargement, déchargement) dans le cadre de cette étude afin de le prendre en compte dans la configuration du système étudié. Dans cette optique, il est crucial que le système de stockage se charge et se décharge de façon appropriée [29-68].

II.13.2 Modélisation du supercondensateur

Dans la littérature, de nombreux modèles sont proposés pour simuler le comportement des super condensateurs. Chaque modèle décrit le comportement cellulaire dans des conditions spécifiques. Ces modèles peuvent être classés selon leur approche [71] : Un supercondensateur peut être illustré en considérant les variations de sa capacité associées à sa fréquence, par le biais d'une suite de circuits RC en cascade intégrant une inductance, voir la figure II.26.

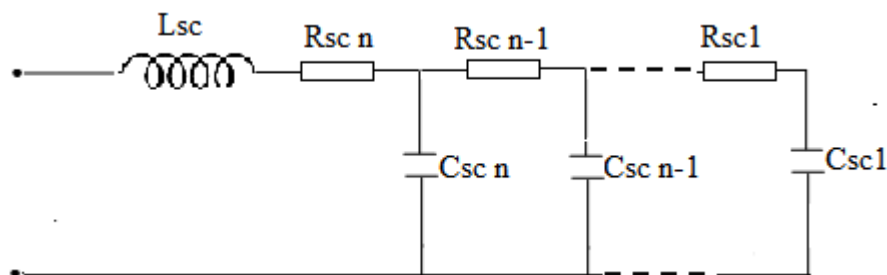


Figure II. 26 : Modèle d'un supercondensateur basé sur des circuits RC en cascade [69].

Bien que cette modélisation puisse illustrer le fonctionnement du système de manière réaliste, elle est souvent simplifiée pour créer un modèle comportant une capacité C_{SSC} en séries et une résistance ESR comparable R_{SSC} . Un banc de supercondensateurs N_{SSC} en série en utilisant une capacité $\frac{C_{SSC}}{N_{SSC}}$ en série avec une résistance $N_{SSC} \cdot R_{SSC}$. L'impédance d'un banc de composants similaire en série est donc, pour ω_e la pulsation électrique du circuit considéré, $Z_{SC} = N_{SSC}(R_{SSC} + \frac{1}{j\omega_e C_{SSC}})$. Une simulation peut être effectuée pour ce modèle, cependant, pour les exigences de synthèse de la commande de leur module, Nous le convertissons en une capacité en C_{psc} en parallèle avec une résistance $R_{psc} = \frac{1}{Y_{SC}}$; l'impédance obtenue par l'équation suivante [71] :

$$Z_{SC} = N_{SSC} \frac{-j + C_{SSC} R_{SSC} \omega_e}{\omega_e C_{psc}} = \frac{R_{psc}}{j R_{psc} C_{psc} \omega_e + 1} = \frac{R_{psc} - j \omega_e C_{psc} R_{psc}^2}{(R_{psc} C_{psc} \omega_e)^2 + 1} \quad (II.32)$$

La déduction de R_{psc} et C lors de la synthèse de commande se fait en résolvant les équations déduites de l'équation n° (II.33) [71] :

$$N_{SSC} R_{SSC} C_{psc}^2 \omega_e^2 - R_{psc}^2 C_{SSC} \omega_e^2 C_{psc} + N_{SSC} = 0 \quad (II.33)$$

$$N_{SSC} R_{psc}^2 C_{psc}^2 \omega_e^2 R_{psc} - R_p + N_{SSC} = 0 \quad (II.34)$$

Cette dernière solution est présentée en détail dans la figure 27. Le banc de supercondensateur est possible de le comparer à un circuit RC ; ainsi, la charge et la décharge de celui-ci en fonction du temps seront de la même manière [71] :

$$V_{sc\ charge}(t) = V_{sc\ max} (1 - e^{-\frac{1}{\tau_{sc}}}) \quad (II.35)$$

$$V_{sc\ charge}(t) = e^{-\frac{1}{\tau_{sc}}} \quad (II.36)$$

$$\tau_{sc} = R_{SSC} C_{SSC} \quad (II.37)$$

τ_{sc} : La constante de temps indique la bande passante que le banc pourra administrer.

R_{SSC} : Elle absorbe les pics de puissance dans une large gamme de fréquences [69].

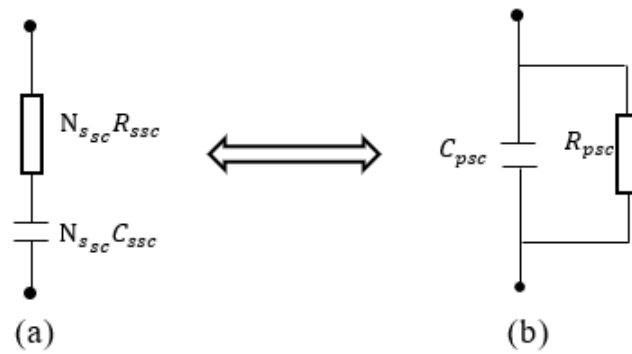


Figure II. 27 : (a) La modélisation d'un supercondensateur en utilisant l'ESR, (b) La modélisation en utilisant la résistance parallèle [71].

II.14 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et les modèles mathématiques des composants de notre système photovoltaïque. Ensuite, nous examinons en détail les caractéristiques des cellules I-V et P-V, de même que les éléments essentiels qui impactent leur performance, tels que la température et l'éclairage solaire.

Nous avons présenté la modélisation mathématique en raison de l'importance de l'étage d'adaptation dans ce type d'application, où il s'agit fréquemment d'un hacheur abaisseur Buck ou d'un hacheur élévateur de tension Boost, ou d'un convertisseur DC-DC abaisseur élévateur Buck-Boost. La batterie et le supercondensateur sont également inclus dans l'ESS, ainsi que les différents types de commandes MPPTs et leur efficacité sur le système photovoltaïque.

CHAPITRE III

SIMULATION D'UN SYSTEME PV AVEC BATTERIE DE STOCKAGE

III.1. Introduction

Aujourd'hui, le monde connaît un développement industriel rapide, ce qui nous rend plus dépendants de l'énergie. Plusieurs recherches sont effectuées dans le domaine des cellules solaires pour atteindre des panneaux présentant le meilleur rapport prix/performance [72]. Les performances des systèmes photovoltaïques peuvent être augmentées grâce aux techniques dites MPPT, qui dépend des propriétés électriques des cellules solaires et de leur connectivité [73,75]. Par conséquent, la méthode MPPT, conçue pour superviser le cycle de service du convertisseur DC-DC, est importante pour que le système PV fonctionne aussi efficacement que possible dans différentes conditions d'utilisation [75]. Le fonctionnement traditionnel du MPPT repose sur la détection de la tension et du courant dans le panneau PV. Sur la base du cycle de service du convertisseur, qui a été réglé sur le PPM, la puissance est déterminée. Les différentes approches MPPT varient considérablement en termes de rentabilité, d'oscillations d'état et de vitesse de convergence, bien qu'elles partagent les mêmes objectifs. P&O, ou IncCond [79,81], a été utilisé sur l'un d'eux. La méthodologie intelligente MPPT basée sur le contrôle FLC est mieux adaptée aux systèmes solaires que les techniques conventionnelles [76,77]. Pour que les dispositifs d'énergie solaire opèrent de façon rentable et pérenne, des mécanismes de stockage d'énergie doivent être utilisés en conjonction avec eux. Dans ce cas, le dispositif de stockage est une batterie au plomb. Ceci est également inclus dans les procédures existantes. Il est important d'effectuer une analyse unique pour chaque type de technologie ou d'application photovoltaïque afin d'atteindre des performances élevées et d'obtenir une énergie maximale dans les systèmes PV [78].

III.2. Étude comparative des techniques MPPTs pour un système PV autonome sans SSE

III.2.1 Détail du système PV analysé

Un système PV consiste principalement en un générateur PV relié à une charge via une interface de convertisseur de puissance DC-DC contrôlée par un contrôleur MPPT, dont le but est de déterminer immédiatement la tension idéale qui sort du générateur en ajustant, de manière automatisée, grâce à un cycle de service du signal, le commutateur de transfert est contrôlé. Le tableau III.1 représente les caractéristiques électriques du système étudié et la figure III.1 représente le PV étudié avec les MPPTs utilisés.

Tableau III.1 Caractéristiques électriques du 1soltech 1sth-215-P

Caractéristiques électriques	Valeur
Tension en circuit ouverte (V_{co})	36.3V
Tension optimale (V_{mp})	29V
Courant de court-circuit (I_{sc})	7.384A
Courant optimal (I_{mp})	7.35A
Puissance maximale (P_{max})	213.5W

✚ Cas n° 02 : Comparaison entre deux cas (la logique flou et incrémentation d'inductance)

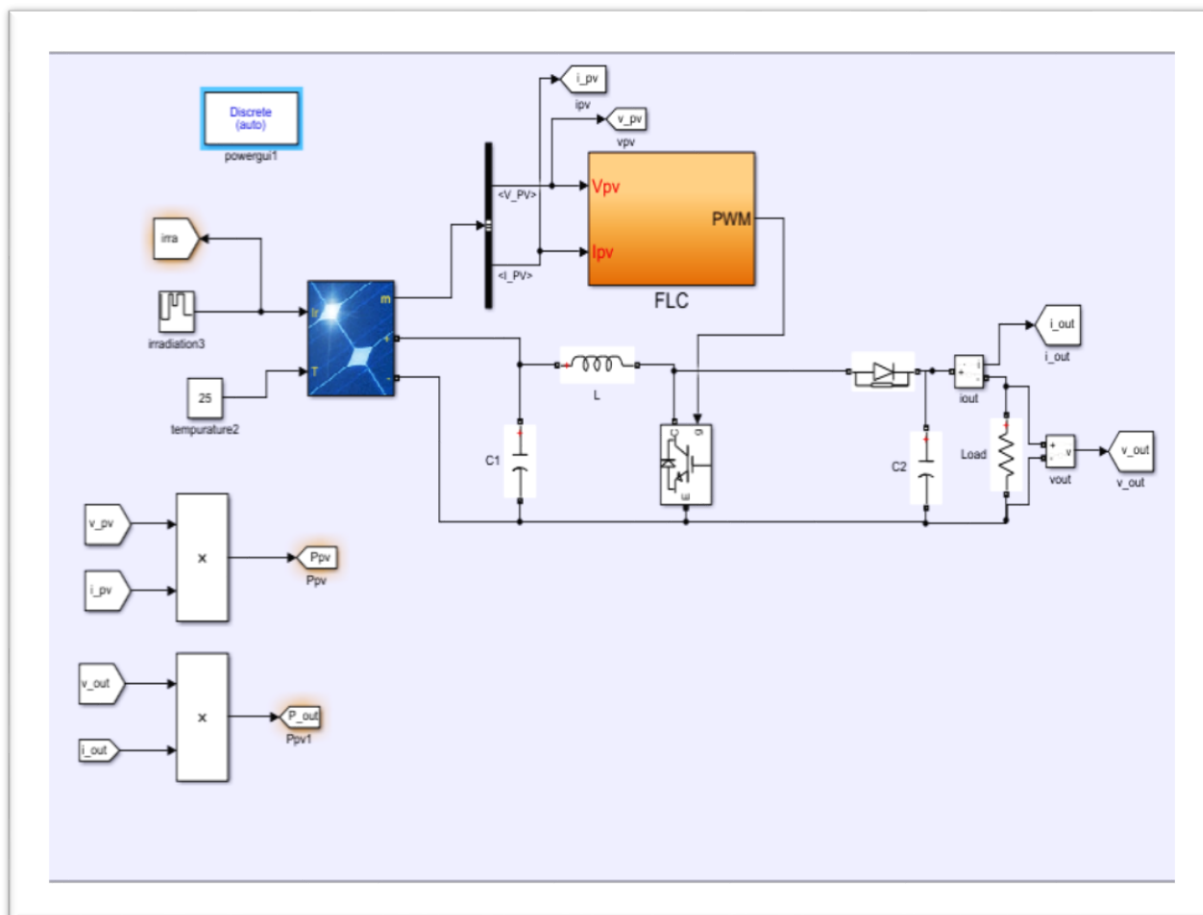


Figure III.1 : PV étudié sous MATLAB/Simulink avec MPPT(FLC).

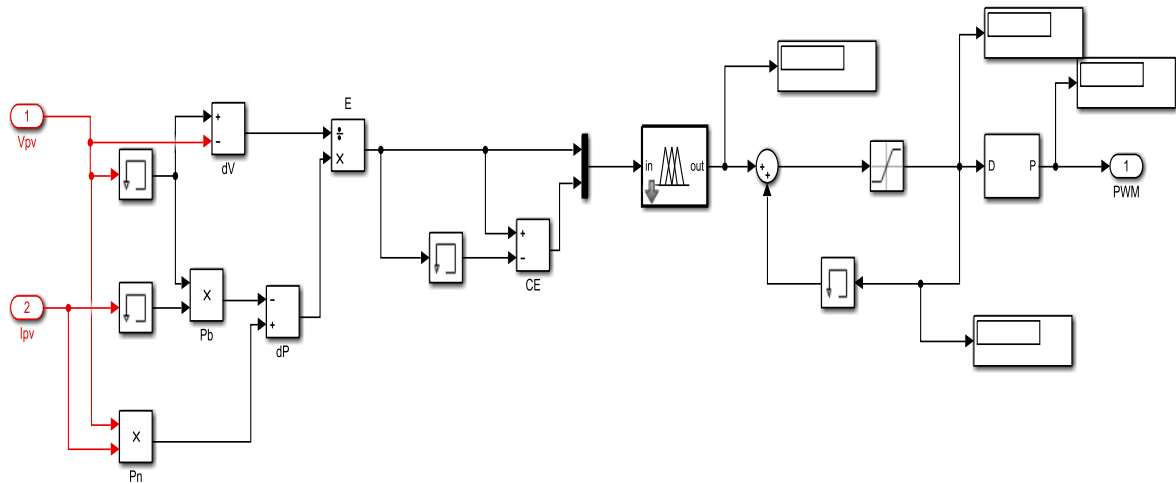


Figure III.2 : Schéma bloc du contrôleur logique flou dans Simulink/MATLAB.

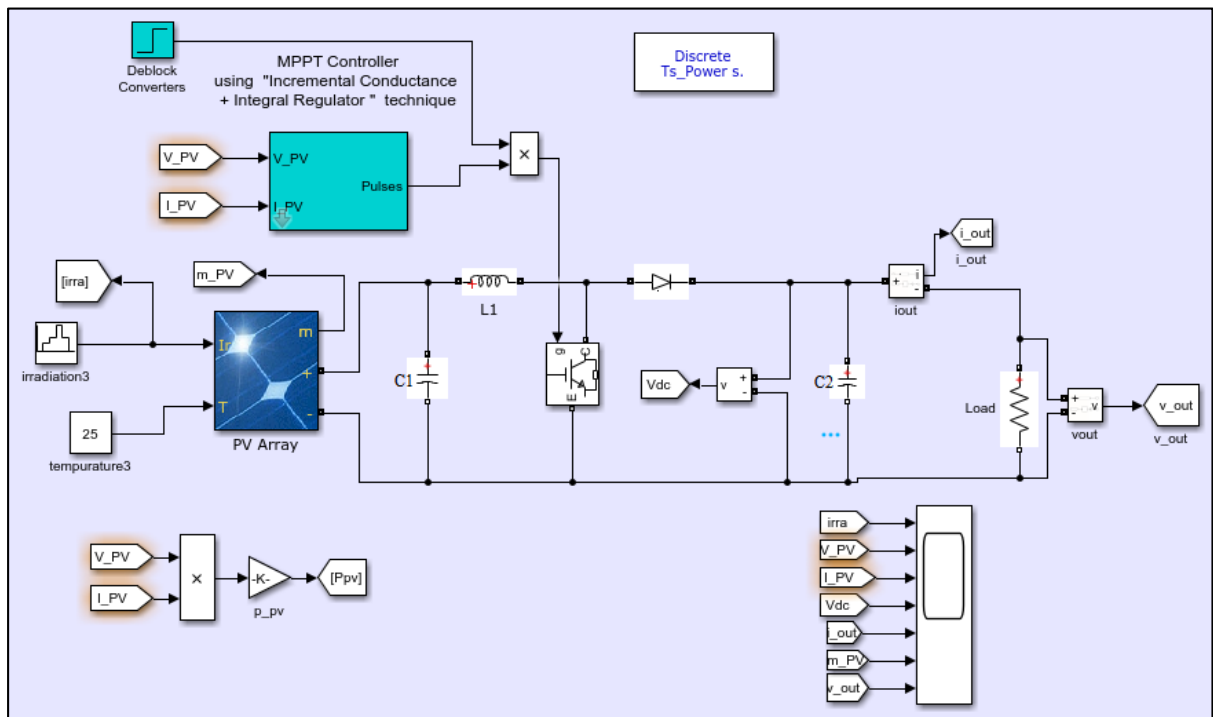


Figure III.3 : PV étudié sous MATLAB/Simulink avec MPPT (IncCond)

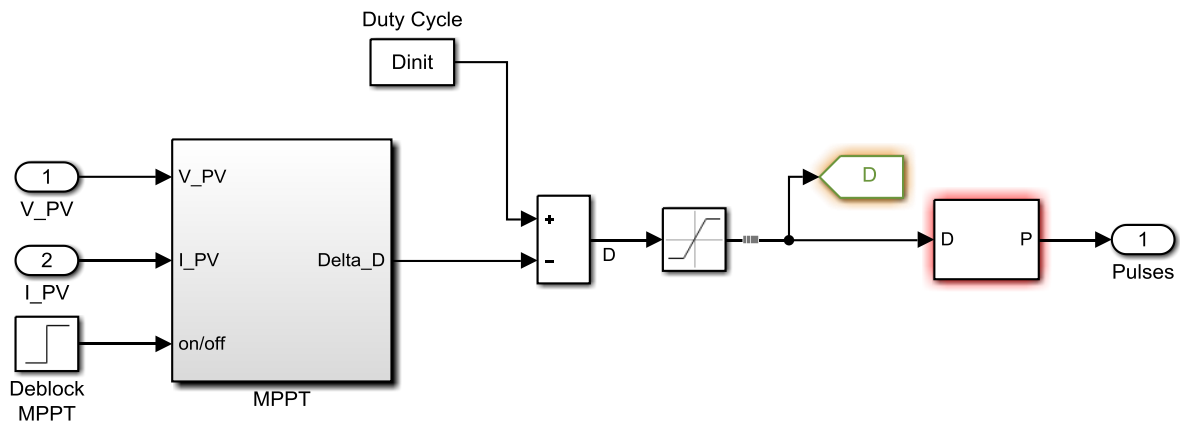


Figure III.4 : Schéma bloc du contrôleur **IncCond** dans Simulink/MATLAB.

Dans cette section, nous commençons à travers l'évaluation du PV en utilisant l'outil de simulation MATLAB/2018/Simulink. Deux autres méthodes MPPT sont ensuite étudiées : l'IncCond et le contrôleur logique flou. Nous obtenons les résultats suivants

III.2.2 Les résultats

Dans cette partie, nous présentons les résultats de la simulation d'un système photovoltaïque autonome pour une charge continue avec deux contrôleurs de MPPT (Logique flou et Incrémentation conductance) avec deux cas d'irradiation (constante et variante) [80,81].

III.2.2.1 Irradiation constante

Respectivement, les figures III.5, III.6 et III.7 démontrent l'excellence du courant, de la tension et de la puissance de sortie par le générateur suivant le temps à température fixe (25° C) et à rayonnement constant (1000 W/m²).

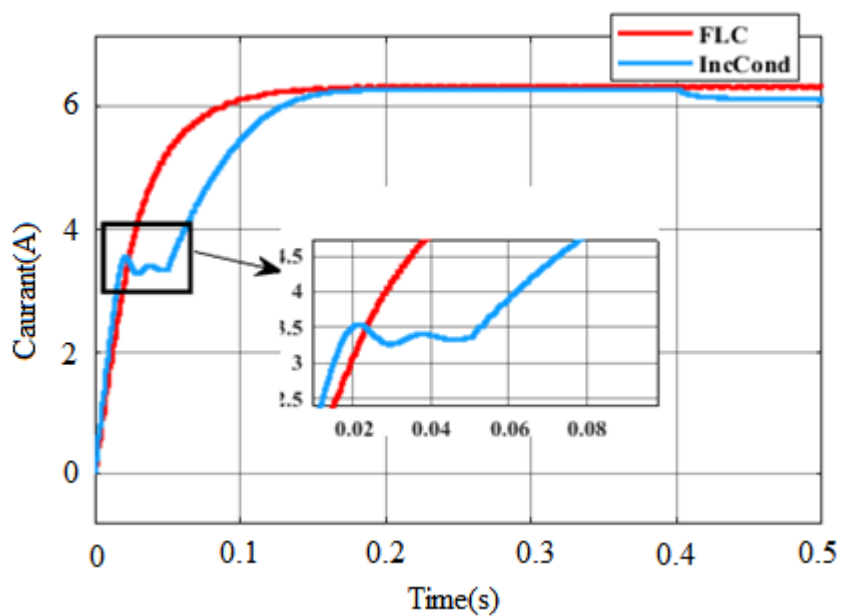


Figure III.5 : Courant à température constante (25°C) et irradiation stable (1000 W/m²).

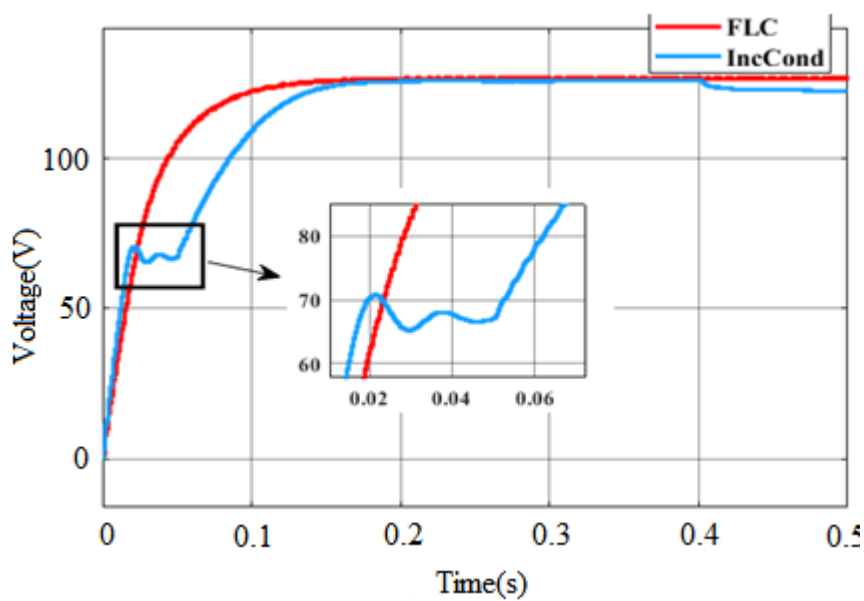


Figure III.6 : Tension à température stable (25°C) et irradiation stable (1000W/m²).

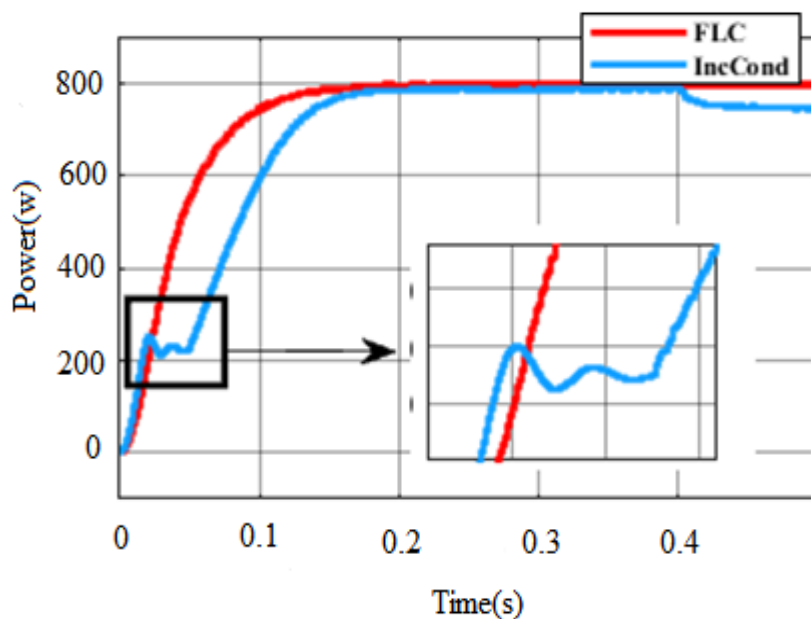


Figure III.7 : Puissance à température stable (25°C) et irradiation stable (1000W/m²).

III.2.2.2 Variation d'irradiation

Respectivement, les graphiques III.9, III.10 et III.11 démontrent la perfection du courant, de la tension et de la puissance de sortie par le générateur selon le temps, à une température fixe (25 °C) avec une irradiance variable. La figure III.8 représente la variation de l'irradiance.

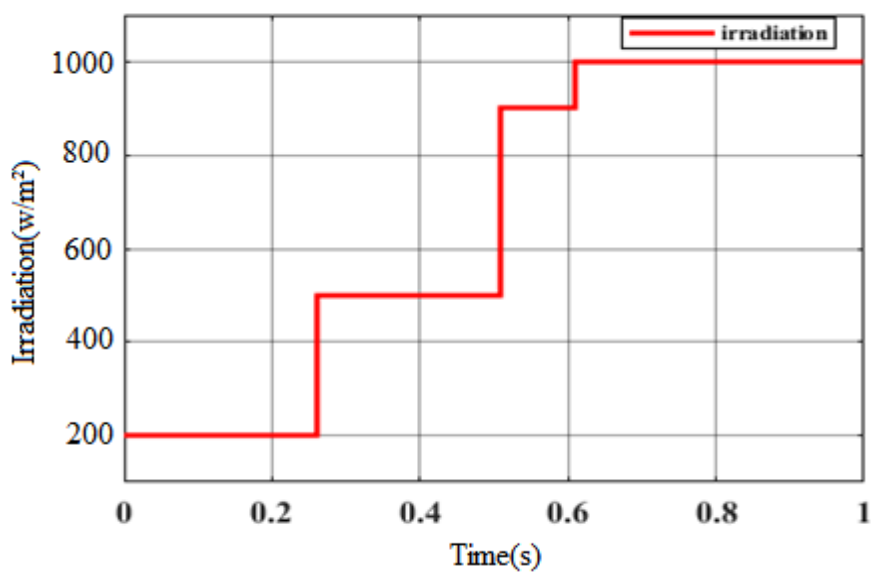


Figure III.8 : Courbe de changement du rayonnement solaire.

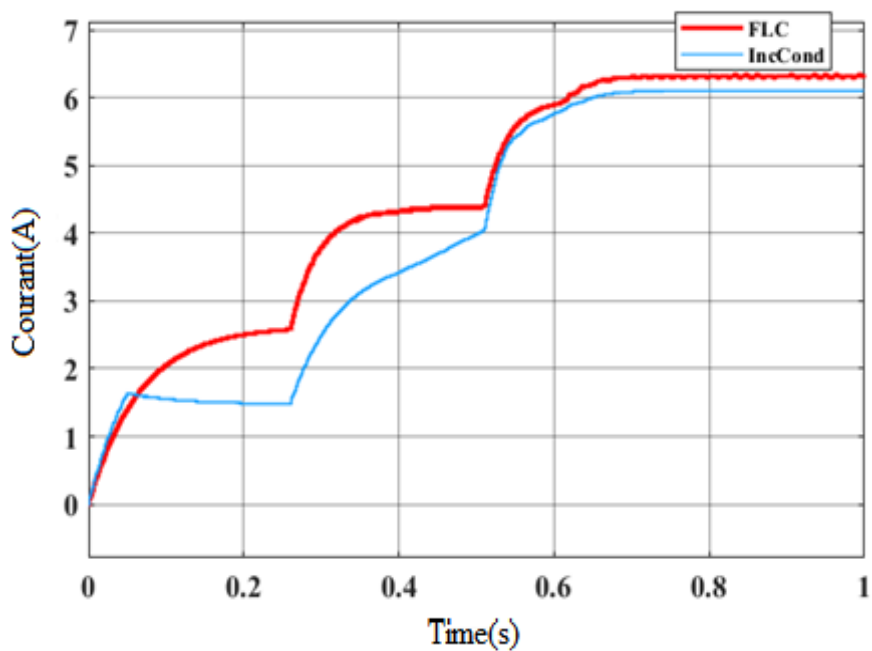


Figure III.9 : Courant à température constante (25°C) et rayonnement variable.

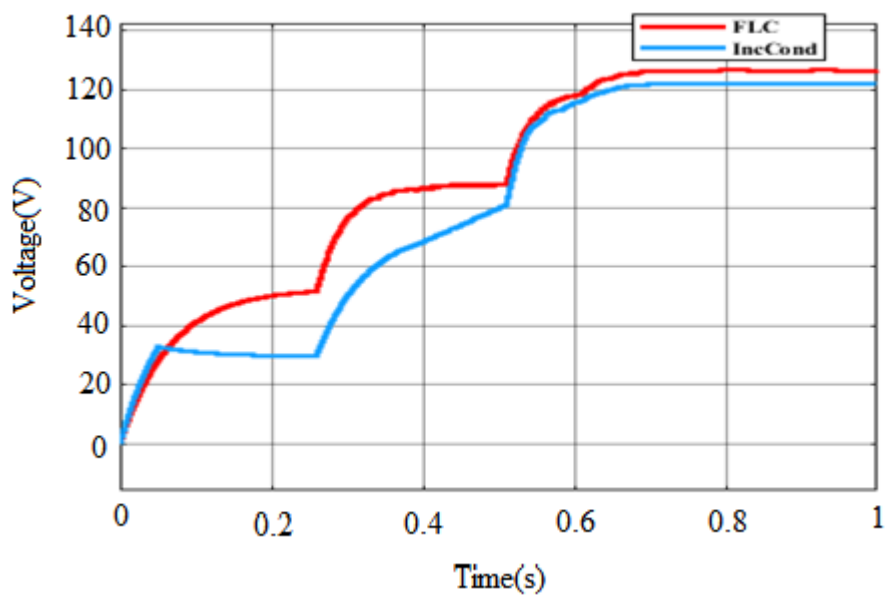


Figure III.10 : Tension à température stable (25°C) et irradiation variable.

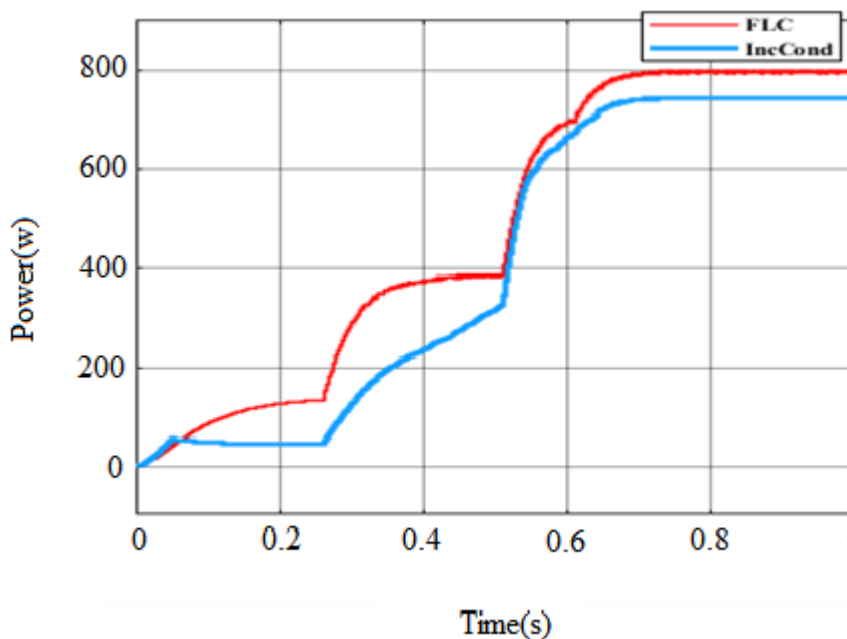


Figure III.11 : Puissance à température stable (25°C) et irradiation variable.

- ✦ Cas n° 02 : Comparaison entre deux cas de MPPT (la logique floue et Perturbation et Observation) [82].

III.3.1 Description du PV étudié (Deuxième cas)

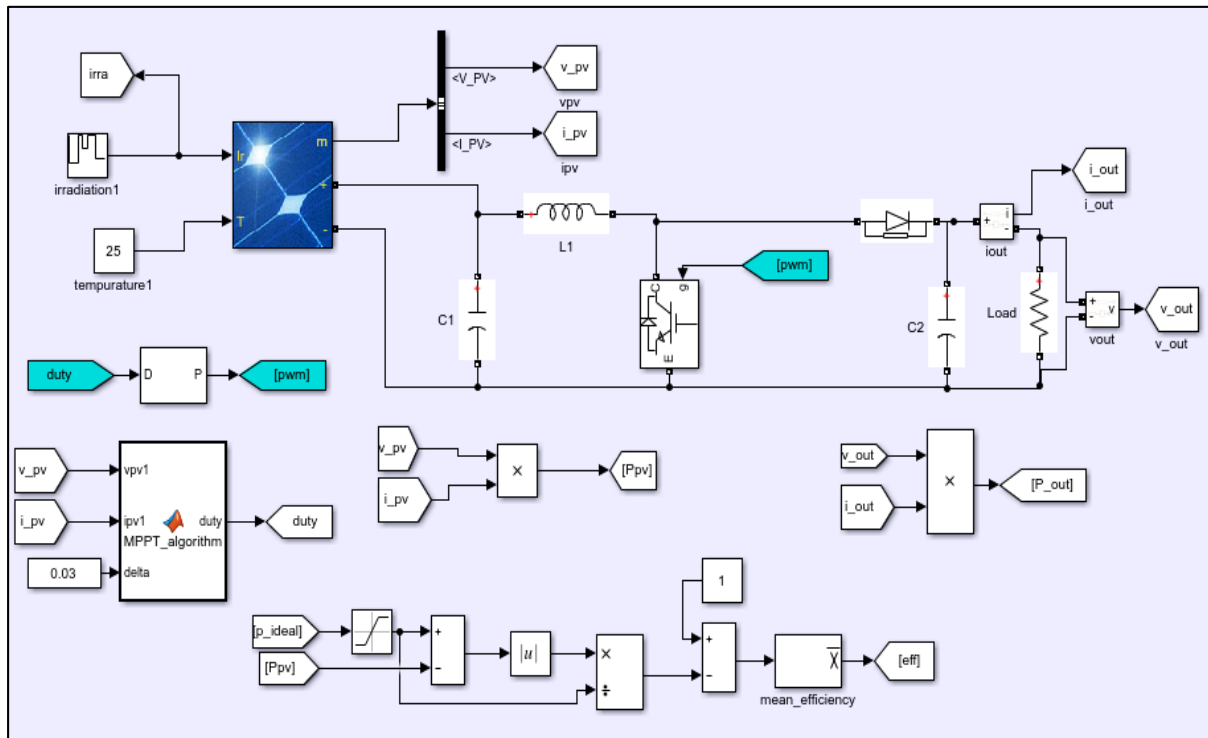


Figure III.12 : Système photovoltaïque étudié sous MATLAB/Simulink avec MPPT (P&O).

Dans cette partie, le même système représenté dans la figure III.1 à MPPT (logique floue) a été comparé au système représenté dans la figure III.12 à MPPT (P&O). Nous avons obtenu les résultats suivants :

III.3.2 Les résultats

III.3.2.1 Irradiation constante

Respectivement, les graphiques III.13, III.14 et III.15 démontrent la perfection du courant, de la tension et de la puissance de sortie par le générateur selon le temps, à une température fixe (25 °C) et d'un rayonnement constant (1000 W/m²).

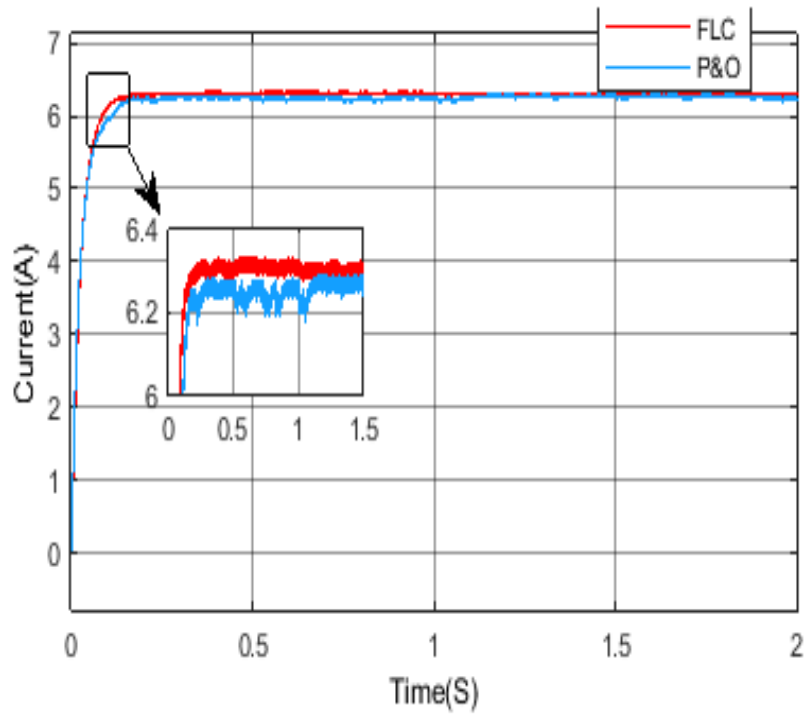


Figure III.13 : Courant à température et irradiation stables.

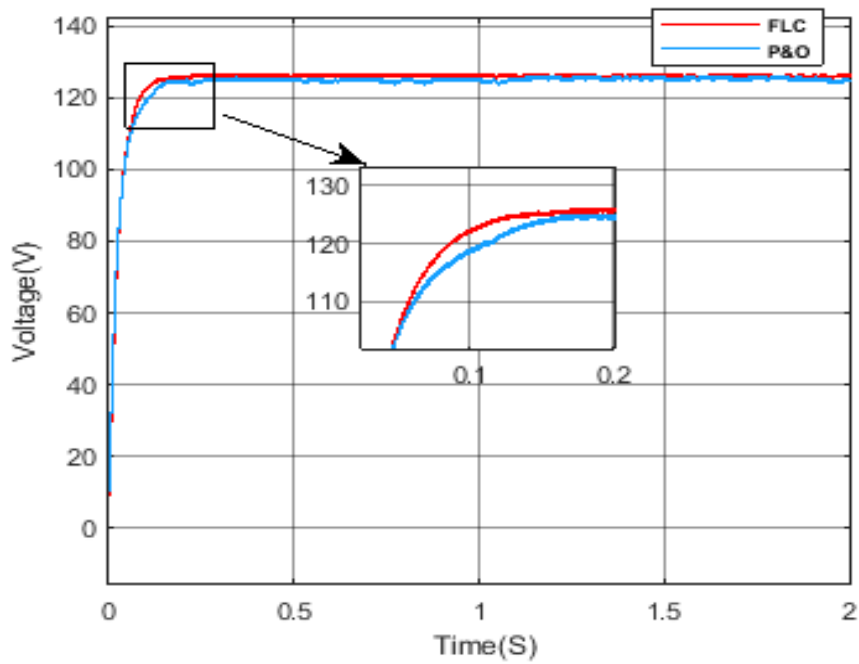


Figure III.14 : Tension à température et irradiation stables.

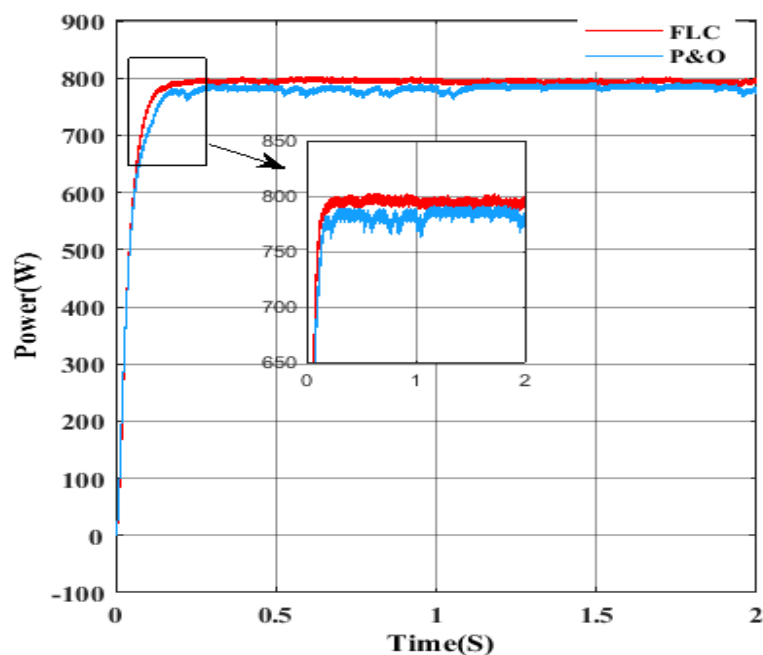


Figure III.15 : Puissance à température stable (25°C) et irradiation stable (1000W/m²).

III.3.2.2 Variation d'irradiation

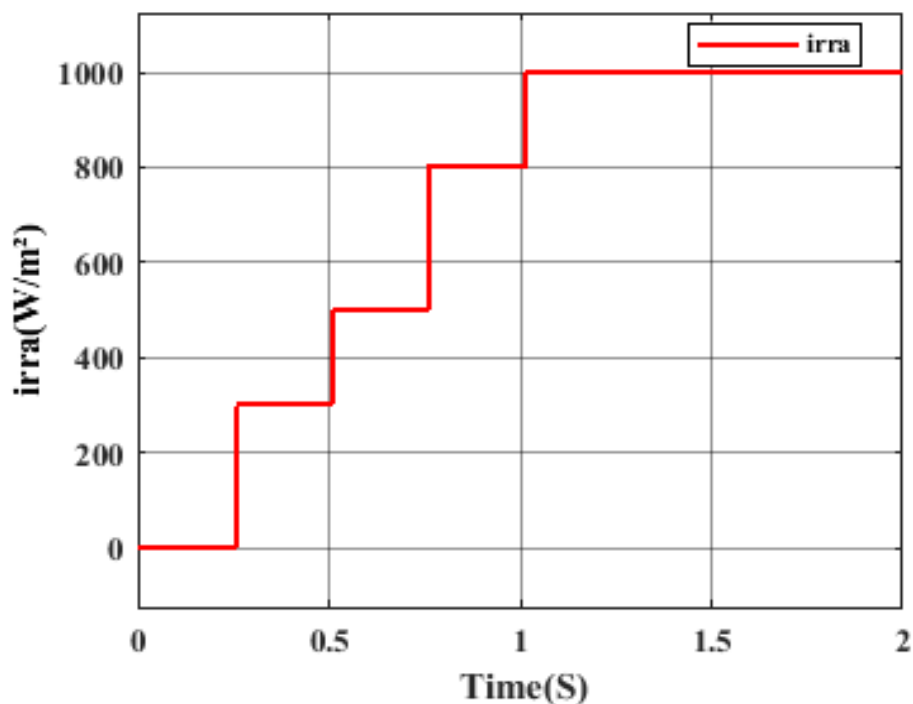


Figure III.16 : Variation du rayonnement solaire.

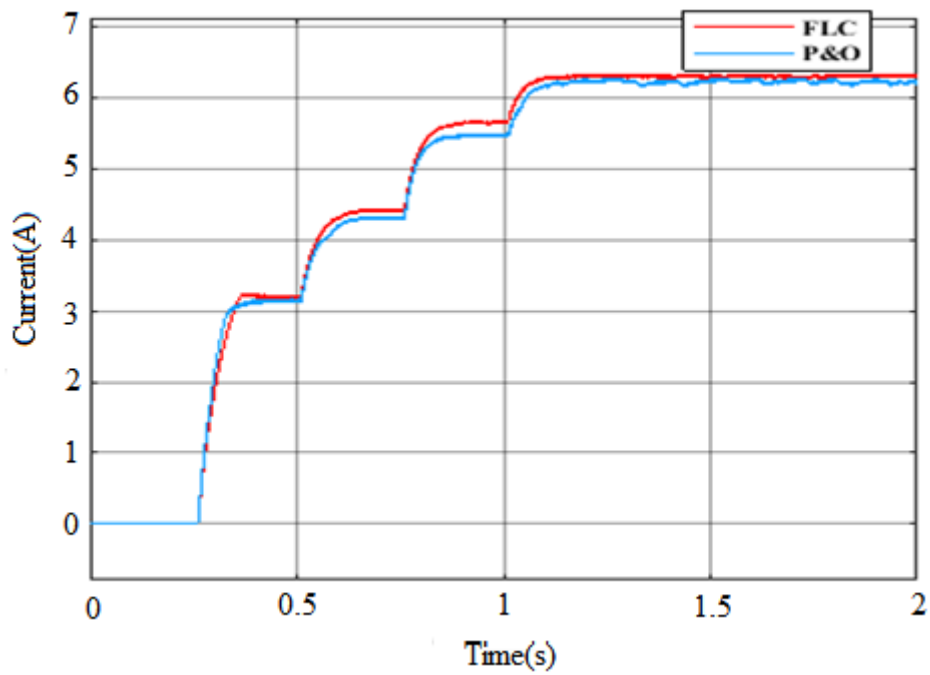


Figure III.17 : Courant à température stable (25°C) et rayonnement variable.

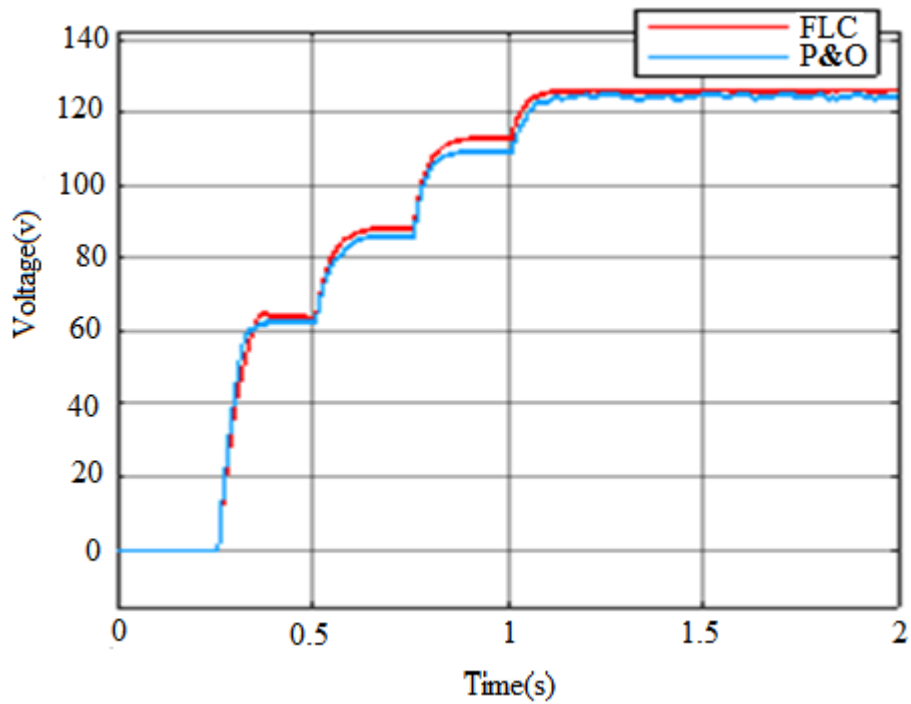


Figure III.18 : Tension à température stable (25°C) et irradiation variable.

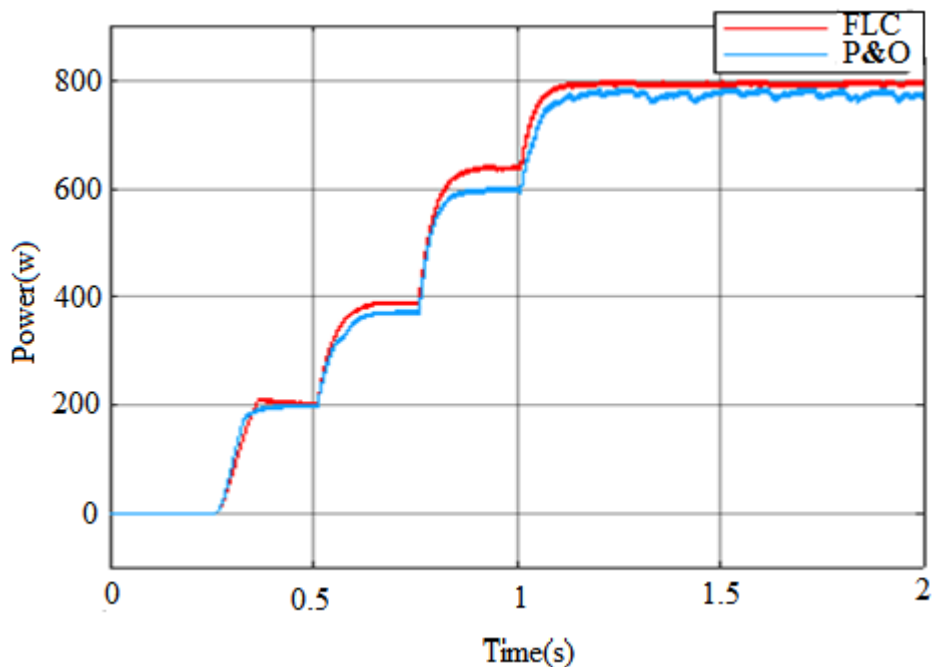


Figure III.19 : Puissance à température constante (25°C) et irradiation variable.

III.4. Interprétations des résultats

Dans la littérature, on étudie différentes sortes de commandes MPPT. Le choix de ces commandes est basé sur leurs besoins (prix, complexité, précision, rapidité de convergence, etc.). Dans cette étude, nous avons examiné en détail les méthodes de contrôle les plus couramment employées. Deux méthodes sont présentées et simulées afin d'analyser le système photovoltaïque sélectionné pendant son fonctionnement à puissance maximale [82, 85, 88,89] :

1. Les commandes IncCond et FLC.
2. Les commandes P&O et FLC.

Pour deux cas : 1ere cas est irradiation constante et le deuxième cas irradiation variante.

Pour examiner comment le système photovoltaïque réagit aux variations climatiques, nous avons tout d'abord effectué une simulation du système en utilisant des valeurs de rayonnement solaire constantes, puis nous avons étudié le cas dans lequel les changements de rayonnement solaire sont brusques. Les simulations ont démontré que le système est en état de

stabilité et atteint l'équilibre en peu de temps grâce à une technique la logique floue que les autres techniques.

III.5. Étude comparative des techniques MPPT pour un système PV autonome avec SSE batterie plomb-acide

Trois approches, incluant les approches traditionnelles et contemporaines, sont simulées dans cette section, Figure III.20 montre le système photovoltaïque étudié.

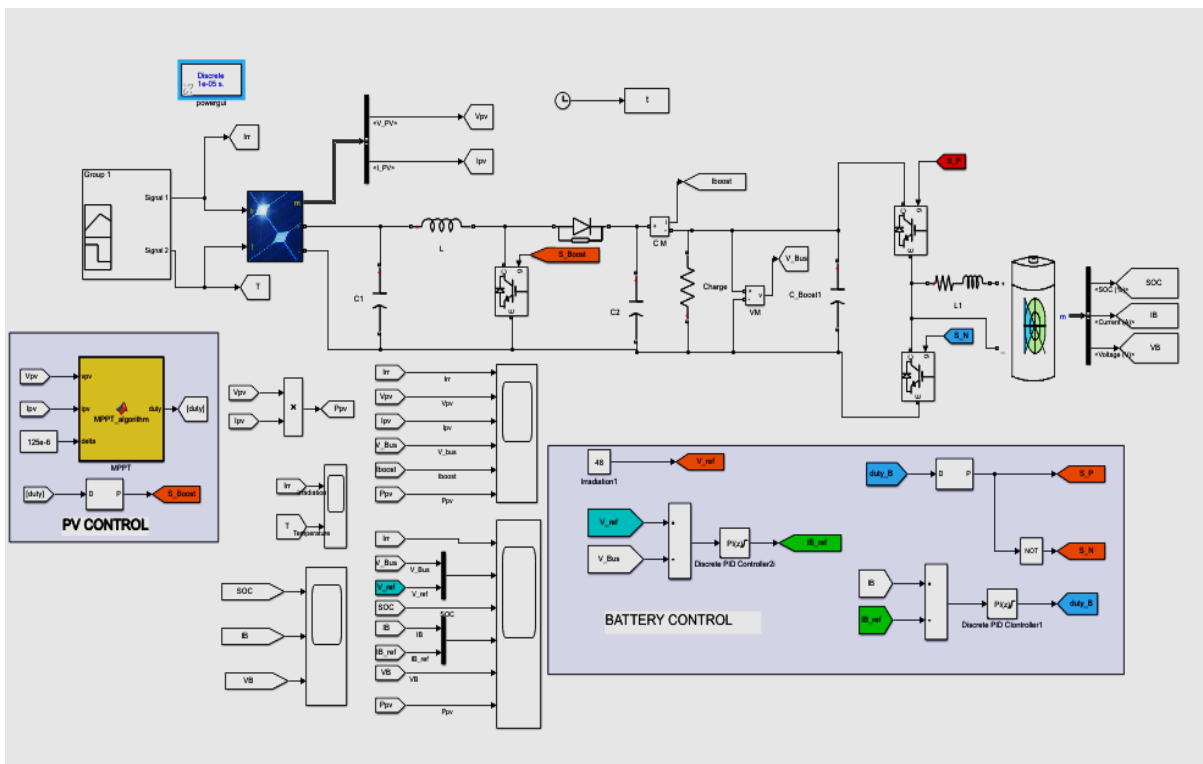


Figure III.20 : Système photovoltaïque avec stockage batterie sous MATLAB/Simulink avec MPPT.

III.5.1. Les techniques des MPPTs

Dans cette partie, on utilise trois techniques :

- Perturbation et Observation (P&O).
- Logique floue (FLC).
- Conductance incrémentale (IncCond).

III.5.2. Gestion du stockage et du contrôle de l'énergie [86, 87, 64] :

Les travaux publiés de W. Greenwood et al explorent des stratégies visant à réduire les pertes d'énergie liées aux SSE et de gestion d'énergie basés sur des batteries, en s'appuyant sur le rythme du changement [64]. Les systèmes à tension constante et photovoltaïques génèrent de l'énergie, par la suite, il est chargé et déchargé selon le volume d'énergie nécessaire (tension et courant), ce qui entraîne un temps de réponse plus rapide. En ne surchargeant pas ou en n'épuisant pas totalement votre batterie, vous pouvez prolonger sa durée de vie Dans différentes conditions climatiques. On peut déterminer le SOC et la tension de la batterie V_{Bat} sur la base de l' I_{Bat} par l'équation ci-dessous [64] :

$$SOC = 100 \left(1 - \frac{\int I_{bat} dt}{C_{Bat}} \right)$$

$$V_{Bat} = V_{Bat-OC} - R_i I_{Bat}$$

L'équation est constituée par :

V_{Bat} : La tension constante de la batterie.

C_{Bat} :Capacité de la batterie (en Ah),

R_i : résistance interne de la batterie,

V_{bat-oc} : Tension de batterie en circuit ouvert.

La figure III.21 illustre l'application de la stratégie proposée fondée sur le pourcentage de régulateurs intégraux (PI). Nous nous penchons sur deux catégories distinctes de boucles de contrôle : Le courant de batterie de référence $I_{Bat-Ref}$ pour contrôler la tension du bus CC et est produit par la première boucle. Et en retour, la deuxième boucle crée le signal de commutation DCC afin de le circuit de charge et contrôler le courant I_{Bat} . Par contre, dans ce cas précis où V_{dc} dépasse la norme, le circuit de charge sert de convertisseur abaisseur. À l'inverse, lorsque V_{dc} est inférieur au nombre normal, le circuit de charge fonctionne comme un convertisseur élévateur lorsqu'il est en mode décharge [64].

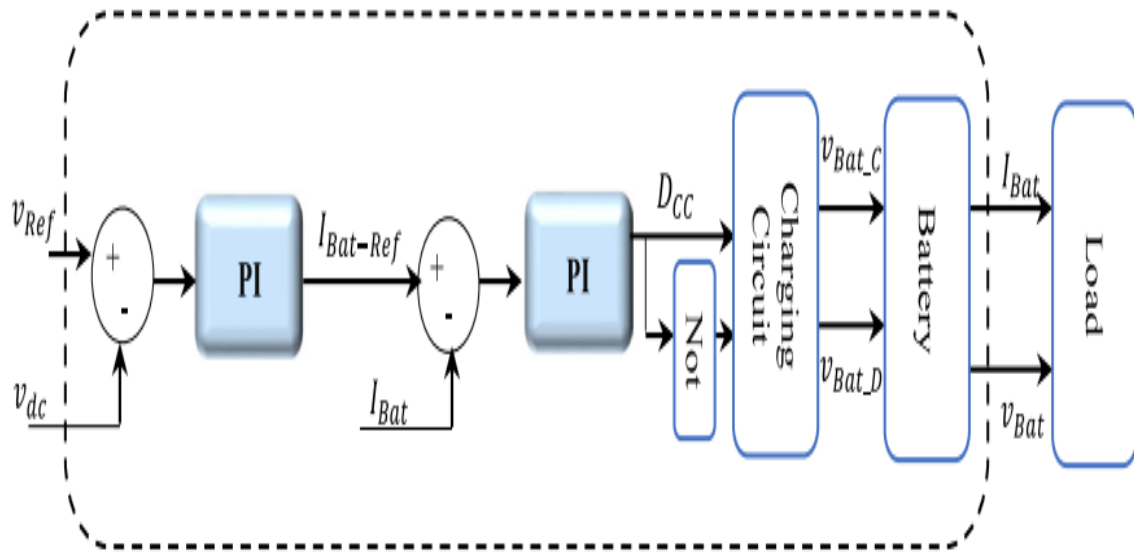


Figure III.21 : La structure de gestion du contrôle.

III.5.3. Résultats de simulation

Avec un éclairage énergétique fluctuant et une température constante de 25 °C, comme lustré dans la figure III.22. Nous l'avons déjà testé. Le processus de simulation en testant les performances des différentes techniques utilisées dans cette étude nous a montré que les performances et la vitesse optimales obtenues à partir de la technique FLC sont meilleures que les commandes P&O et Inc.

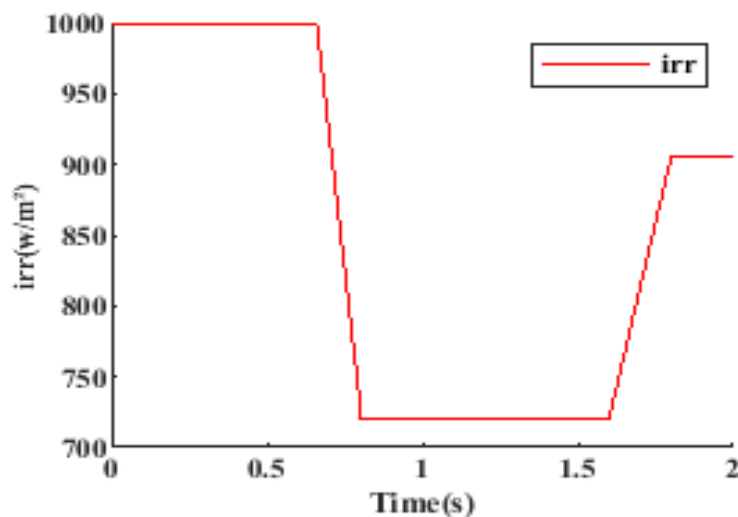


Figure III.22 : La variation de radiation.

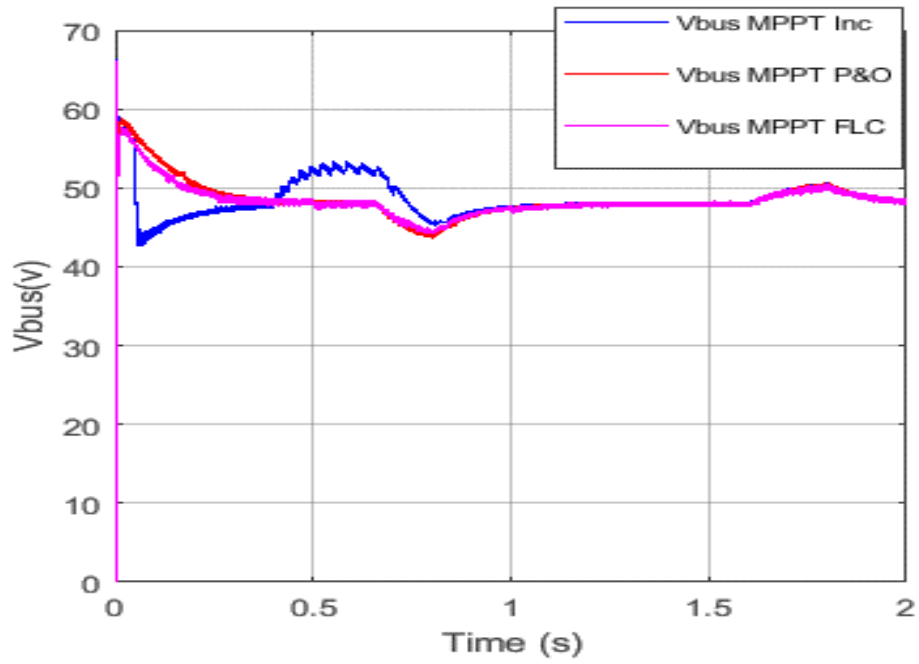


Figure III.23 : V_{bus} avec utilisation différente des MPPTs.

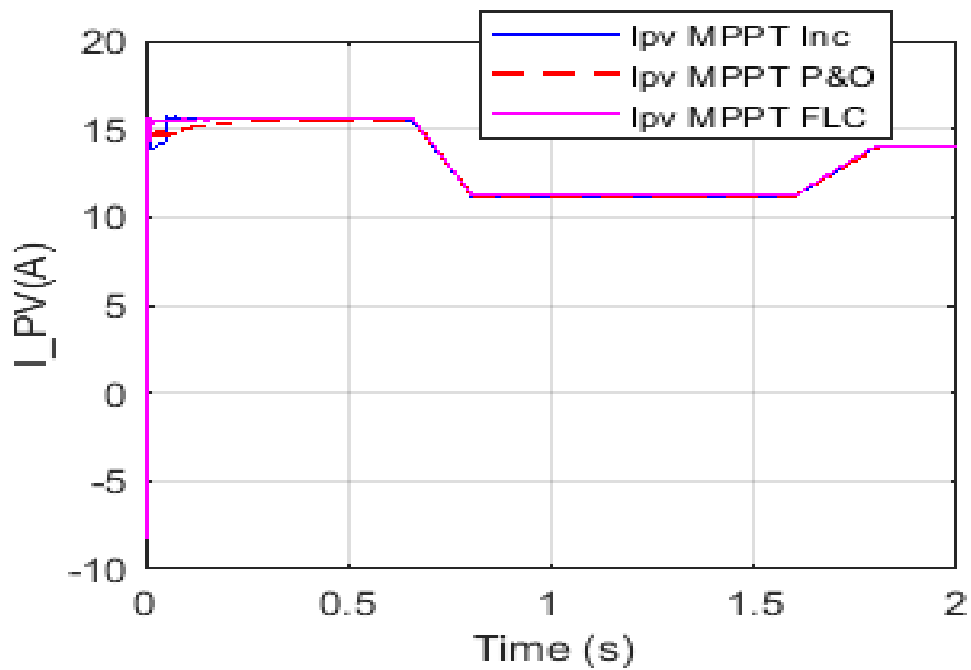


Figure III.24 : I_{pv} avec utilisation différente des MPPTs.

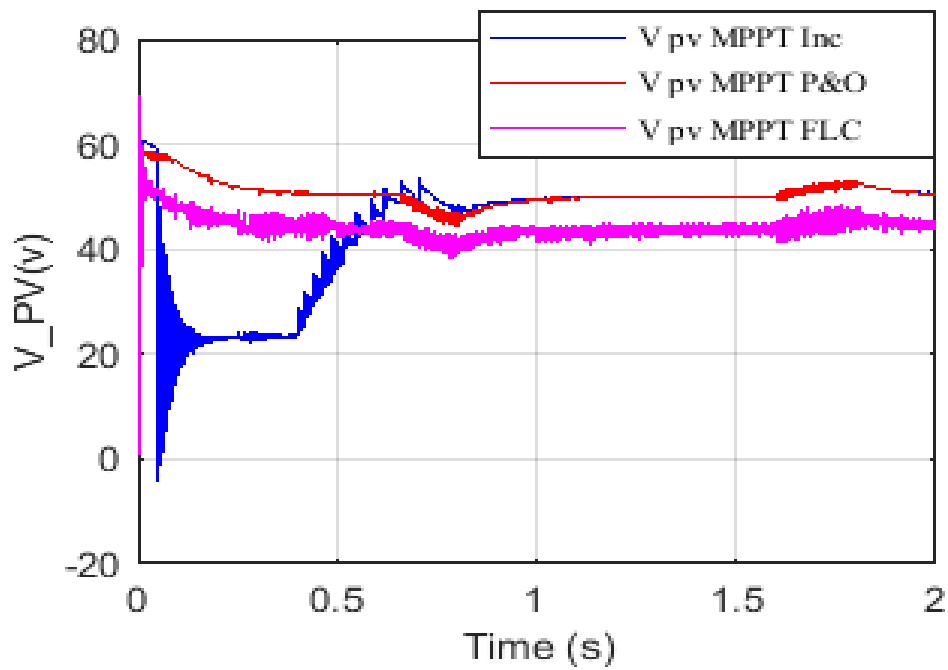


Figure III.25 : V_{PV} avec utilisation différente des MPPTs.

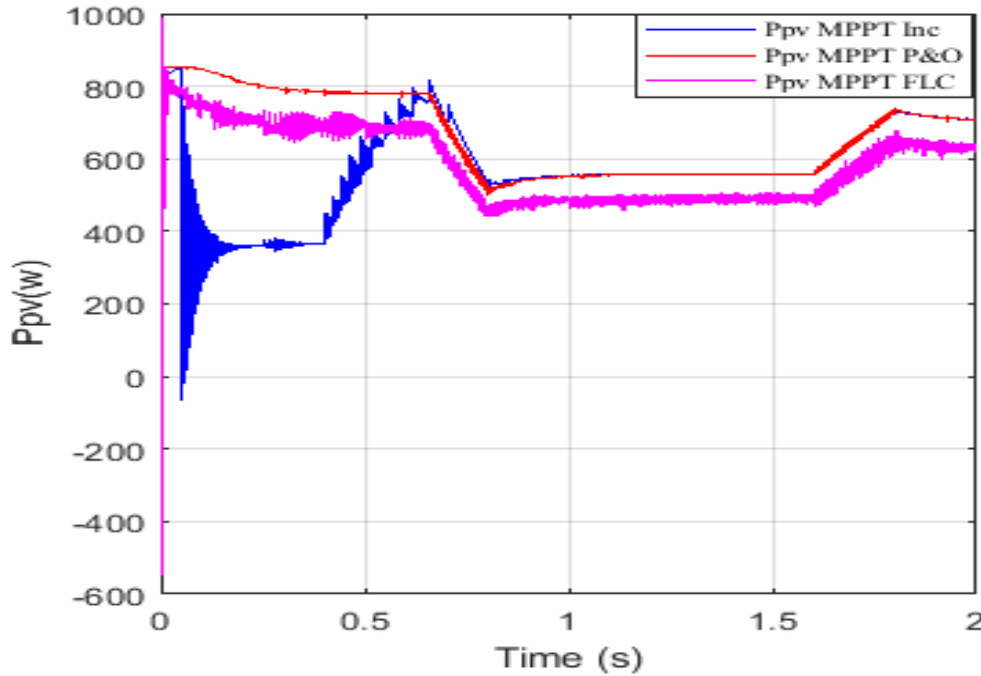


Figure III.26 : P_{pv} avec utilisation différente des MPPTs.

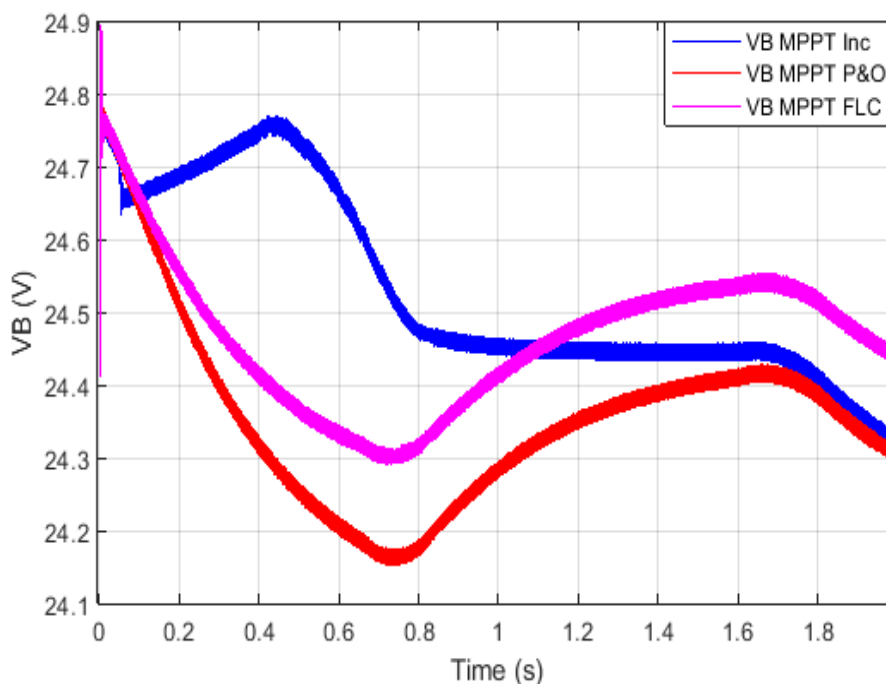


Figure III.27 : Tension de la batterie utilisant divers MPPTs. .

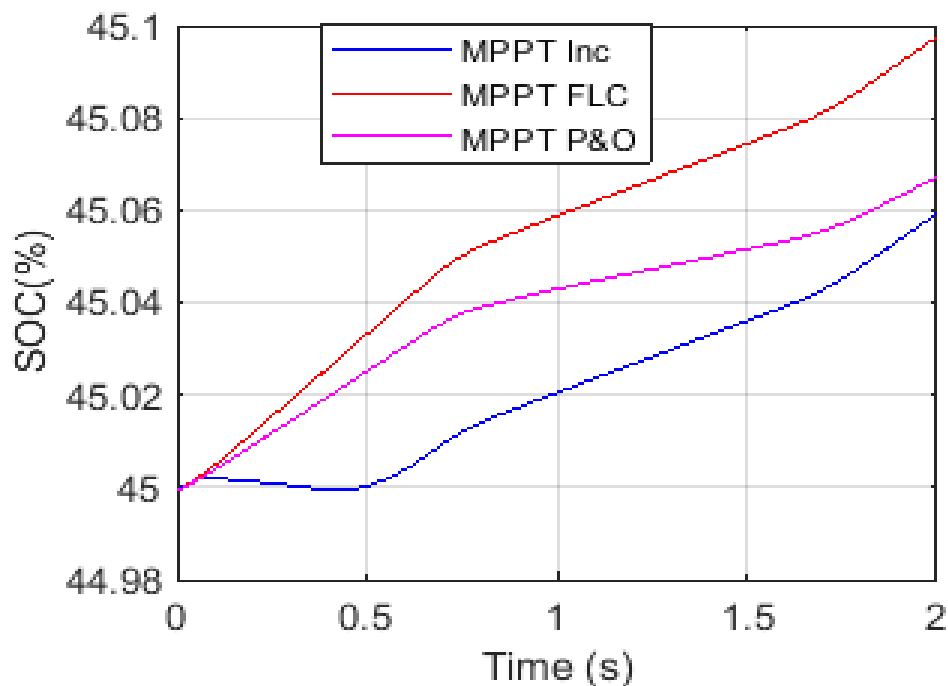


Figure III.28 : L'état de charge de la batterie avec différents MPPT.

III. 6. Conclusion

Dans le travail actuel, une simulation d'un PV avec batterie de stockage : Dans cette simulation, deux cas ont été examinés : Le premier exemple est un dispositif photovoltaïque indépendant sans système de stockage, utilisant 3 méthodes de MPPT et le deuxième cas est un PV avec ESS à batterie et avec 3 techniques de MPPTs.

Concernant le premier cas, une comparaison a été faite entre deux algorithmes MPPT, à savoir L'algorithme basé sur la FLC et la technique (IncCond) afin de contrôler la puissance maximale. Cette méthode simplifie le suivi du MPP sous rayonnement constant et rayonnement variable. C'est la même chose pour les deux techniques (P&O et FLC). Les résultats démontrent que l'emploi de la FLC pour le contrôle donne de bons résultats ainsi qu'une bonne robustesse. Donc, le FLC a les avantages par rapport à l'IncCond et P&O. Quant au deuxième cas, la simulation du système photovoltaïque avec système de stockage batterie nous mène En somme, quelle que soit la variation du rayonnement solaire, la tension de sortie (V_{bus}) demeure invariable. En comparaison avec les contrôleurs IncCond et P&O pour contrôler la tension de sortie, la technique optimum (FLC) réagit plus rapide et plus efficace pour réguler la charge de la batterie dans des conditions idéales. On note clairement l'indicateur de puissance maximale.

CHAPITRE IV

GESTION DE L'ENERGIE D'UN SYSTEME PV AVEC SYSTEME DE STOCKAGE

IV.1. Introduction

Les systèmes de stockage ont une participation cruciale dans les systèmes **PV**, tant sur le plan technique que financier et constituant une part importante, environ 40 à 50 % du coût d'installation. Les SSE de ces systèmes jouent un rôle important, répondant fréquemment dans des conditions difficiles qui peuvent nuire à leur durée de vie et leur viabilité de frais. Ces conditions comprennent les zones où la charge est excessive, saturée, déchargée et épuisée. Par ailleurs, dans le domaine photovoltaïque, les batteries font face à des fluctuations dynamiques provoquées par les variations de rayonnement et de température [90, 91].

Dans le quatrième chapitre, nous procéderons à une analyse comparative de deux modèles de **SSE** [12], l'un comportant une batterie au plomb et l'autre intégrant une batterie au plomb avec un supercondensateur en parallèle. Découvrons l'efficacité du supercondensateur pour résoudre les problèmes rencontrés par les batteries. Et une autre étude concentrée sur la gestion de l'énergie de PV avec stockage hybride batterie /supercondensateur.

IV. 2. Dispositifs de stockage d'énergie (SSE)

Les (SSE) sont largement reconnus comme des solutions pratiques et efficaces pour optimiser la gestion de l'énergie et minimiser le gaspillage d'énergie. Ces systèmes ont un potentiel important pour capter l'énergie issue de diverses origines, en fonction des besoins de diverses applications dans les usages autonomes du photovoltaïque, elle est convertie et stockée, le système de stockage joue un rôle important, non pas seulement sur le plan technique, mais aussi économique, puisqu'il représente généralement 40 à 50 % du coût d'installation. Lors du développement d'un ESS, Il est primordial de tenir compte de plusieurs facteurs, comme la longévité du matériel, le volume d'entreposage, la taille physique, les dépenses technologiques, les capacités d'entrée et de sortie d'énergie, les méthodes de transformation énergétique, etc. Ces prises en compte sont essentielles pour maintenir la performance et l'efficacité du système tout au long de sa durée de vie. Les supercondensateurs et les batteries se démontrent comme des options prometteuses pour fournir des services auxiliaires et améliorer la qualité de l'énergie grâce à leurs réactions promptes et à leur capacité significative de stockage d'énergie [91].

IV.2.1. Batteries

L'aspect le plus difficile et le plus complexe du modèle implique la création de stratégies performantes pour la charge des batteries. Le modèle prend en compte le comportement électrique observé sans entrer dans toutes les réactions électrochimiques et thermiques. Les batteries présentent des taux d'autodécharge minimales et les constructeurs déterminent le courant de charge le plus élevé autorisé pour la batterie. Cependant, les techniques actuelles de charge révèlent que la puissance de charge fluctue tout au long du processus de charge. Bien que les fabricants proposent généralement le courant de charge maximal autorisé pour le parc de batteries, sa modélisation en tant que composant actif pose des problèmes majeurs. Nonobstant, les méthodes actuelles de recharge des batteries mettent en évidence des valeurs de puissance de recharge qui changent tout au long du processus de recharge pour les installations photovoltaïques. Les batteries idéales doivent répondre à des critères spécifiques pour garantir des performances fiables [92].

Pour les installations photovoltaïques, les batteries idéales doivent répondre à des critères spécifiques pour garantir des performances fiables. Premièrement, ils doivent être robustes et capables de résister à différentes conditions météorologiques. De plus, ces batteries doivent avoir des capacités efficaces de charge et de décharge pour maximiser la quantité d'énergie. Un taux bas d'autodécharge et une résistance interne sont essentiels pour réduire les pertes d'énergie quand les batteries ne sont pas utilisées. En outre, les faibles besoins d'entretien contribuent à la rentabilité et à un fonctionnement sans tracas. Ces batteries doivent disposer de réserves d'électrolyte suffisantes et d'une longue durée de vie pour supporter une utilisation prolongée. De en outre, ils doivent être adaptés à une utilisation cyclique, ce qui signifie qu'ils peuvent endurer des périodes régulières de décharge et de recharge sans nuire aux performances.

Dans le cadre de ces applications, les batteries au plomb se distinguent par leur efficacité financière, leur longévité et leur aptitude à générer des courants importants sans subir d'effets de mémoire. De plus, les batteries à décharge profonde sont bien adaptées aux applications nécessitant une puissance de sortie soutenue sur des durées prolongées. Il en existe différents types, spécialement les batteries au plomb, au nickel-cadmium et au lithium-ion. Parmi celles-ci, les batteries au plomb sont

particulièrement appréciées pour leur disponibilité importante, des systèmes PV, leur prix abordable et leur densité d'énergie plutôt élevée par rapport aux autres options. La durabilité de la batterie dépend davantage de l'adaptation des impulsions électriques que de la consommation moyenne d'électricité. Dans certains cas, un circuit de détection à basse tension pourrait mal interpréter une oscillation temporaire de tension due à des changements de courant comme une contrainte soudaine provoquée par une batterie épuisée. Des études ont montré que l'augmentation des courants pulsés provoque une détérioration plus importante de la batterie. Par ailleurs, des modifications brusques du courant peuvent affecter négativement la longévité de la batterie [93].

IV.2.2. Supercondensateur

Les supercondensateurs sont des dispositifs électriques également appelés ultra-condensateurs ou condensateurs à double couche conçus pour stocker de grandes quantités de charges électriques. Contrairement aux condensateurs conventionnels, ils utilisent deux mécanismes distincts pour stocker l'énergie électrique : la capacité à double couches et la capacité de type pseudo. Les supercondensateurs, grâce à leur capacité électrostatique double et à la pseudo-capacité électrochimique, pallient efficacement le décalage entre les batteries et les condensateurs classiques, en donnant des solutions efficaces pour la sauvegarde d'énergie. Un supercondensateur a une capacité qui excède 15 millions de la capacité propre de la planète Terre entière, estimée à seulement environ 710 F. En règle générale, la tension de charge maximale d'un supercondensateur se situe entre 2,5 et 2,7 volts, contrastant avec la tension de fonctionnement maximale élevée d'un condensateur électrostatique classique [94].

Les supercondensateurs présentent plusieurs avantages par rapport aux dispositifs de stockage traditionnels, notamment, des capacités de charge et décharge rapides ainsi qu'une densité de puissance élevée et renforcement des caractéristiques de sécurité telles que la résistance aux explosions lors de connexions courtes. Avec une résistance interne minimale, une longue durée de conservation et un fonctionnement respectueux de l'environnement, ils sont privilégiés pour diverses applications malgré des inconvénients tels que des taux d'autodécharge élevés et une densité énergétique limitée. Les supercondensateurs sont couramment utilisés dans les transports pour les fonctions de démarrage et servent d'alimentation de secours dans des scénarios nécessitant une libération d'énergie rapide, tels

que les mémoires numérisées ainsi que les appareils de récupération d'énergie pour le freinage dans les ascenseurs, tramways et métros.

Malgré leurs avantages, les supercondensateurs sont confrontés à des défis tels que la nécessité de connexions en série pour atteindre des tensions plus élevées et la relation directe entre le niveau de tension aux bornes et le niveau de charge. Bien que ces limitations, leur combinaison unique d'attributs en fait des composants précieux. Dans les SSE, la rapidité du temps de réponse et la sécurité jouent un rôle crucial. Les recherches en cours visent à remédier à ces inconvénients et à améliorer encore les performances et la polyvalence des supercondensateurs pour un large éventail d'applications [95, 96,97].

IV.2.3. Hybridation du stockage

Elle implique de regrouper différentes sources de stockage dans un circuit unique pour diverses raisons, comme la réduction des coûts, promouvoir l'économie d'énergie et accroître l'indépendance des composants du système. Il est envisageable de lier les différentes sources de différentes manières, qu'il s'agisse d'intervenir simultanément selon les fluctuations de charge ou en alternance au cours du temps. Donc, pour accroître l'autonomie de la batterie, qui est l'équipement le plus fréquemment employé pour stocker l'énergie électrique dans les systèmes industriels, En raison de leur énergie spécifique élevée, ils peuvent contenir une grande quantité d'énergie. Toutefois, elles possèdent une puissance spécifique limitée, ce qui les rend difficiles à gérer en cas des fluctuations de charge accéléré. De cette façon, les mécanismes employés pour administrer les effets des délais du client ou des changements climatiques peuvent entraîner un vieillissement prématuré des batteries, étant donné qu'elles ont déjà une durée de vie limitée. On peut trouver d'autres méthodes de stockage, par exemple, les supercondensateurs, en raison de leur grande puissance spécifique et d'une faible énergie spécifique. La longévité des composants qui devraient devenir économiquement rentables dans les années à venir est bien avec une capacité de charge et de décharge presque 100 000, elle dépasse celle des batteries. Pour cette raison, ces éléments de grande puissance peuvent améliorer la résistance des batteries en absorbant ou en produisant des niveaux de puissance extrêmement élevés. Ainsi, l'emploi de supercondensateurs hybrides pour les batteries permet de dépasser les limites entre les supercondensateurs et les batteries [98]. Il diminue les règles imposées aux batteries, ce qui permet d'améliorer leur longévité. Voici quelques bénéfices de l'hybridation des SSEH :

- Augmentation de la longévité de la batterie au plomb.
- Le volume du système de stockage d'énergie intégré installé diminue.
- Baisse des dépenses liées aux sources intégrées [99, 100, 101,102].

IV. 3. Description du système et schéma de contrôle

Dans cette partie, on analyse deux cas : Système photovoltaïque avec batterie de stockage et système photovoltaïque avec stockage hybride SSEH.

IV. 3.1 Système photovoltaïque avec stockage de batterie

Les principaux composants du schéma fonctionnel sous sont le module PV, le convertisseur Boost, Buck Boost. Convertisseur et contrôle MPPT.

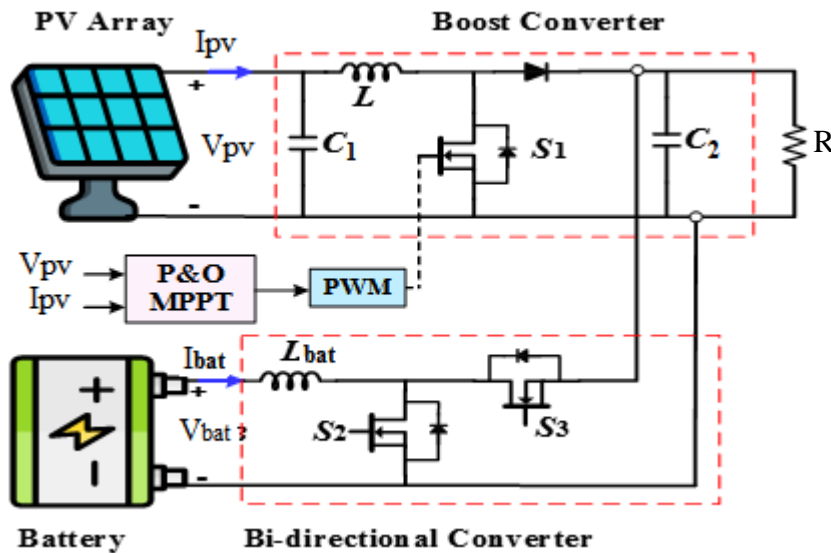


Figure IV.1 : Système PV avec SSE de batterie.

IV. 3.2 Système photovoltaïque avec SSEH

Les principaux composants du schéma fonctionnel sont le module PV, les convertisseurs boost et buck boost, le contrôle MPPT.

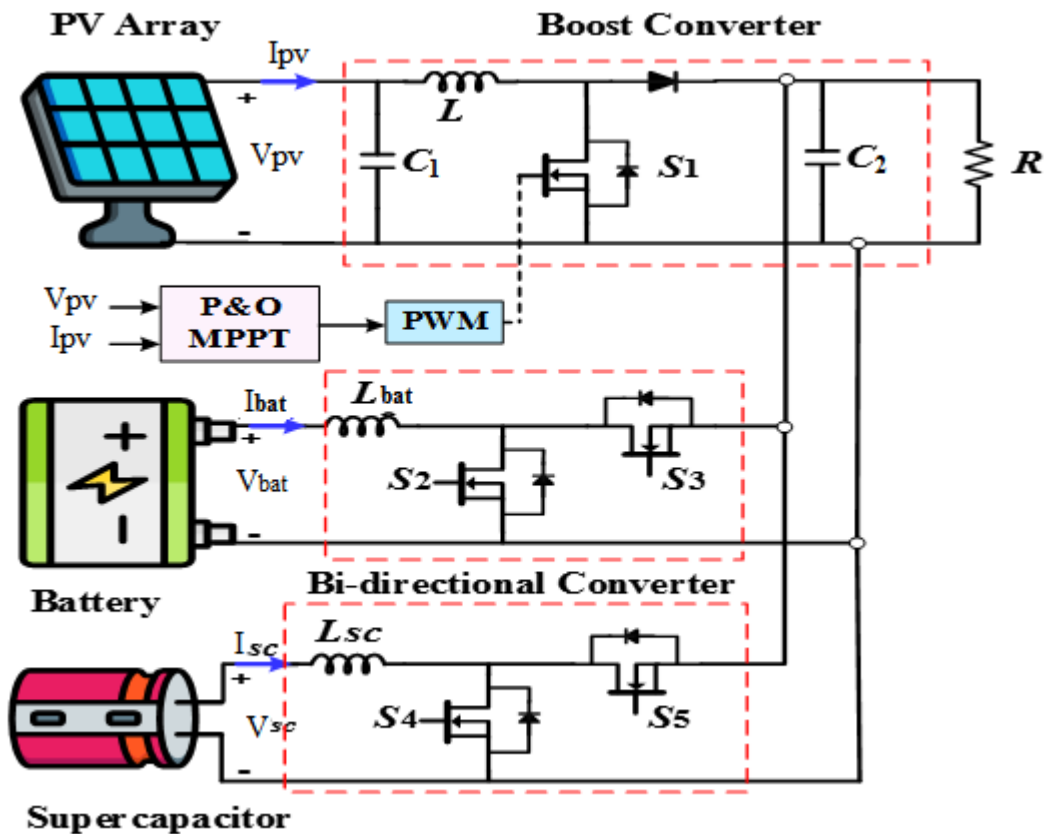


Figure IV.2 : Système PV avec système SSEH.

Le module PV fournit une alimentation CC pour établir une liaison avec le médiateur Boost. Le besoin de charger de l'énergie est obtenu depuis de l'énergie photovoltaïque obtenue en circulant dans le circuit intermédiaire. Utilisé par la charge ou stocké dans une batterie, il est également pris en charge par un supercondensateur. Buck boost le convertisseur de batteries et le super condensateur sont utilisés pour réguler la puissance des batteries et du super condensateur. À l'intérieur et à l'extérieur, l'alimentation électrique répond aux besoins de la charge.

IV. 3.3 Paramètres de système PV

Le tableau IV.1 résume les paramètres de système PV avec stockage de batteries et supercondensateur.

Tableau IV.1 : Paramètres de système PV

Paramètres de système PV	
Paramètres	Value
V _{mp}	29V
I _{mp}	7.35A
P _{max}	213.15W
V _{co}	36.3V
I _{sc}	7.384 A
Paramètres de Batterie	
Type de batterie	Plomb-acide
Voltage	24.6 V
Capacité nominale	6.6 Ah
État de charge initiale	100%
Paramètres du supercondensateur	
Voltage	16 V
Capacité	500 F
Nombre de condensateurs dans les cellules en série	6
Nombre de condensateurs dans les cellules parallèles	1
Convertisseur DC/DC	
RL(IGBT)	R=0.1(Ohms), L=5e-3(H)
C ₁	100e ⁻¹ (F)
C ₂	3300e ⁻⁶ (F)

IV.4. La stratégie de gestion de l'énergie

La gestion énergétique est un domaine qui nécessite plusieurs compétences personnelles du responsable, car un organigramme de gestion efficace peut avoir un impact considérable sur l'efficacité énergétique pendant une année.

IV.4.1 L'intérêt de la gestion

Il est obligatoire de s'assurer que la batterie alimentée par un panneau solaire soit chargée de façon efficace et sûre, tout en maximisant son longévité.

IV.4.2 La batterie est en état de charge

Pour garantir une bonne fourniture de courant pour recharger la batterie tout au long du jour, il est impératif de prendre en compte les mesures de la plaque photovoltaïque. Il est essentiel de gérer la charge de la batterie afin d'éviter toute surcharge, car cela peut réduire sa longévité.

IV.4.3 Ajustage de charge

Un système de régulation de charge est essentiel pour réguler la tension et la température de la batterie et ajuster sa charge en fonction. En évitant une surcharge, cela augmentera la longévité de la batterie.

IV.4.4 Protéger contre les surtensions

Un système de protéger contre les surtensions est essentiel pour prévenir une surcharge des batteries en présence d'une surcharge.

IV.4.5 Gestion de la décharge

Il est essentiel de ne pas décharger totalement les batteries, car cela pourrait également réduire leur longévité. Par conséquent, Il est essentiel d'avoir un processus de décharge qui régule la tension de la batterie et élimine les charges lorsqu'elle atteint une valeur haute.

IV.4.6 Contrôle de la capacité

Avec le temps, la capacité de la batterie pourrait diminuer, il est donc primordial de contrôler fréquemment sa capacité restante et de la recharger lorsque cela est besoin. En résumé, pour une gestion optimale d'une batterie alimentée par une plaque photovoltaïque, il est essentiel de disposer d'un système pour contrôler et réguler la charge, en protégeant contre les surtensions et en contrôlant la capacité, ainsi on peut optimiser l'autonomie de la batterie tout en garantissant un fonctionnement sans problème.

IV.5. Stratégie de gestion du système

Dans ce cas, Il est pratique et simple de fonctionnement de la manière suivante :

Lorsque l'énergie photovoltaïque ne permet pas de compenser la charge, les SC commencent à se décharger. ($P_{pv} < P_{load}$), et les batteries ont du mal à absorber ce différence de puissance. En outre, Lorsque la puissance générée par les panneaux photovoltaïques dépasse la demande ($P_{pv} > P_{load}$) et que la batterie ne peut pas charger la surcharge en peu de temps, le condensateur commence à se charger. Les SC répondent directement aux besoins de la charge en détectant les pics de courant. La figure IV.3 expose en détail la technique de gestion énergétique utilisée pour réguler la tension du bus DC [69].

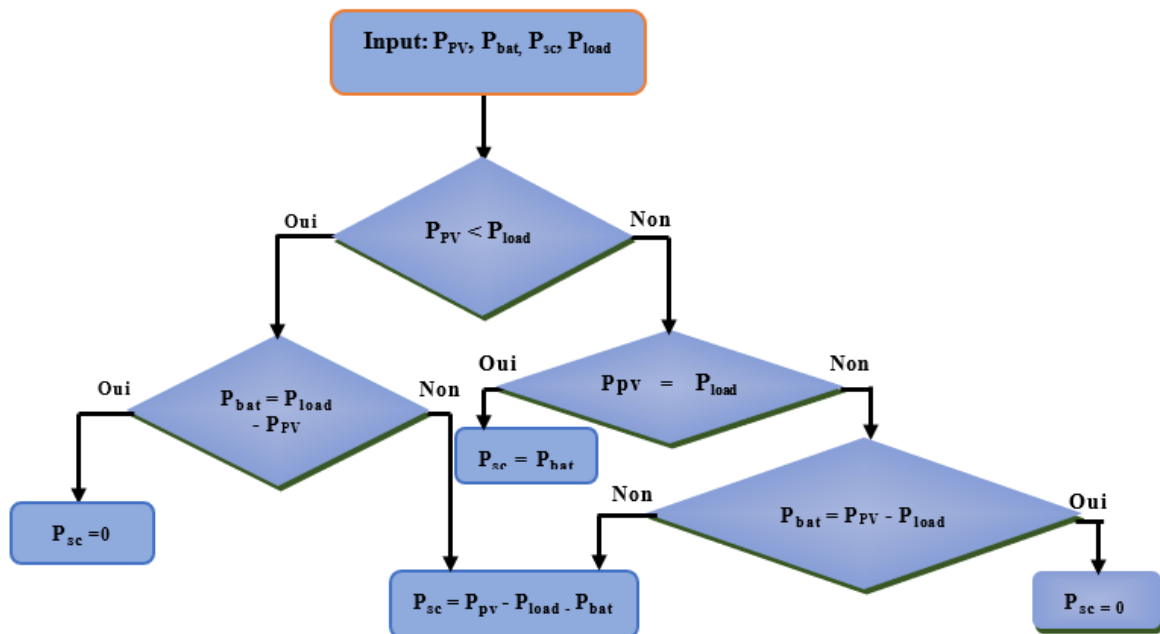


Figure IV.3 : Stratégie pour la gestion d'énergie du surveillé du bus DC.

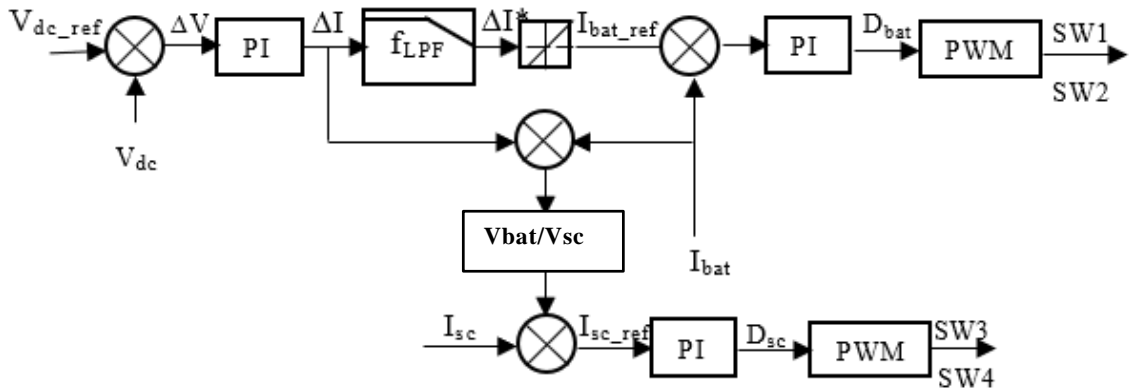


Figure IV.4 : Structure de gestion du système SSEH.

L'erreur de tension entre (V_{dc-ref} et V_{dc}) est envoyée au contrôleur PI pour générer une erreur de courant total, qui correspond au courant total que le SSHE (batteries et supercondensateurs) doit délivrer. On la détermine dans l'équation (III.1).

$$\Delta I = I_{PV} - I_{Load} = I_{bat} - I_{sc} \quad (III.1)$$

Où, ΔI symbolise à la fois la composante haute fréquence que le SC atteint et celle basse fréquence que les batteries atteignent. Pour cette raison, en employant un filtre passe-bas, on obtient la composante basse fréquence, c'est-à-dire le courant de référence déficitaire. On la détermine dans l'équation (III.2).

$$\Delta I^* = f_{LPF}(\Delta I) \quad (III.2)$$

Où f_{LPF} c'est le rôle de transfert du filtre passe-bas. Un limiteur de charge alimente le courant d'alimentation des batteries. Que l'équation détermine [10] :

$$I_{bat_ref} = f_{LPF}(\Delta I^*) \quad (III.3)$$

Cette mesure de base on compare I_{bat_ref} à la valeur réelle (I_{bat}), L'erreur de courant est signalée au contrôleur PI, afin de générer le taux cyclique D_{bat} pour les switch PWM du convertisseur de batteries (SW1 et SW2).

Par conséquent, la distribution de la puissance non compensée de la batterie se fait comme suit :

$$P_{bat_UC} = (\Delta I - I_{bat})V_{bat} \tag{III.4}$$

Le supercondensateur a pour fonction d'apporter la puissance non compensée aux batteries. Alors, le courant de référence du supercondensateur est spécifié comme suit :

$$I_{bat_ref} = \frac{P_{bat_UC}}{V_{SC}} = \Delta I - I_{bat} \frac{V_{bat}}{V_{SC}} \tag{III.5}$$

Comme c'est le cas pour la régulation des batteries, cette mesure de base on compare I_{sc_ref} à la valeur réelle (I_{sc}), et cette erreur est transmise à l'unité de contrôle PI, Le rapport cyclique Dsc est produit par les commutateurs du convertisseur de supercondensateur (SW3 et SW4).

IV.6. Résultats et discussion

Afin de confirmer l'efficacité du contrôle, deux modèles distincts du système PV autonome, un pour le système à batterie seulement, tandis que l'autre est destiné au système batterie/supercondensateur, sont construits dans MATLAB Simulink, comme indiqué dans la figure 7. On met l'accent sur les spécificités de charge et de décharge des batteries au plomb.

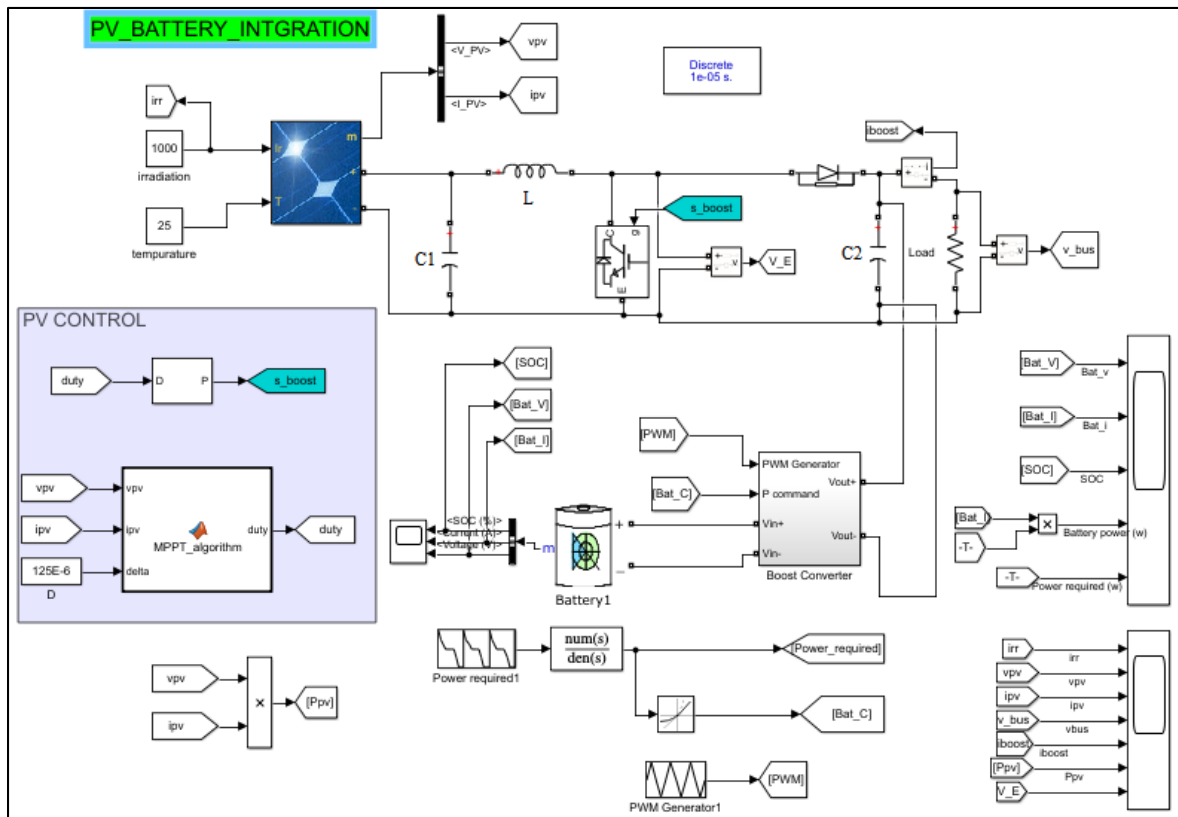


Figure IV.5 : Système PV avec batterie uniquement pour le stockage dans MATLAB/Simulink.

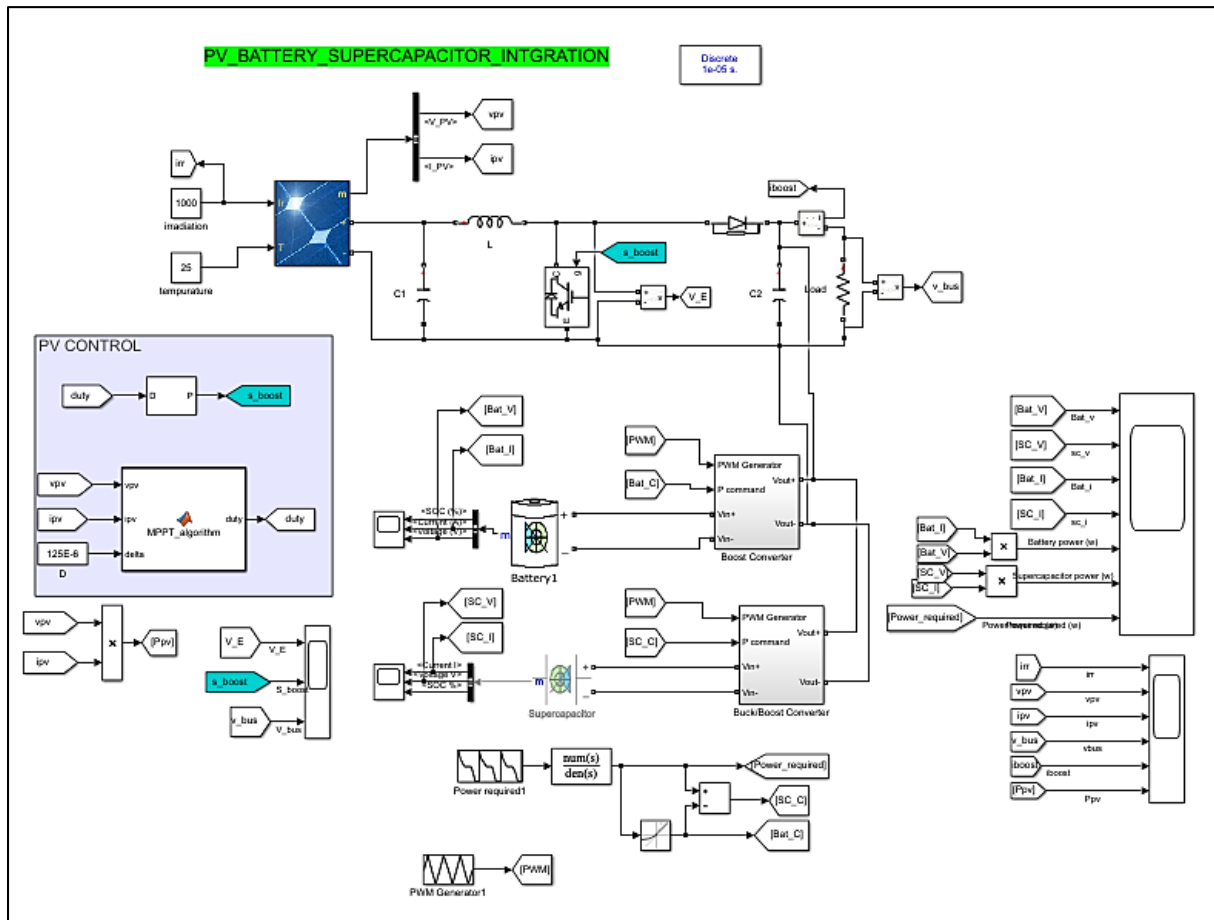


Figure IV.6 : Modèle de système PV avec batterie/supercapaciteur pour stockage dans MATLAB/Simulink.

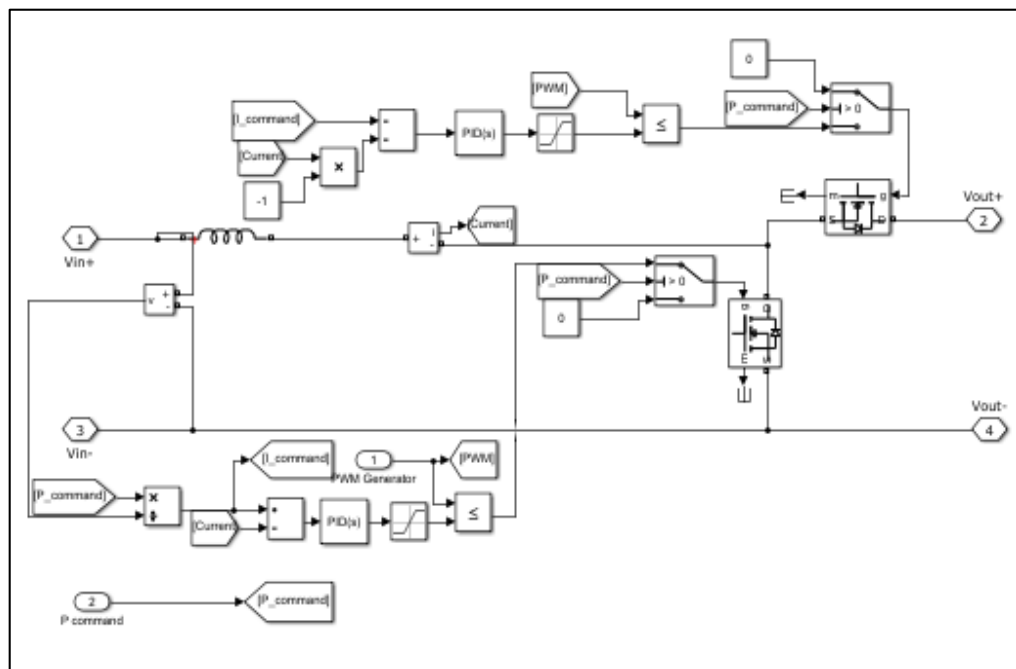


Figure IV.7 : Illustration du schéma du circuit de charge de la batterie dans MATLAB/Simulink.

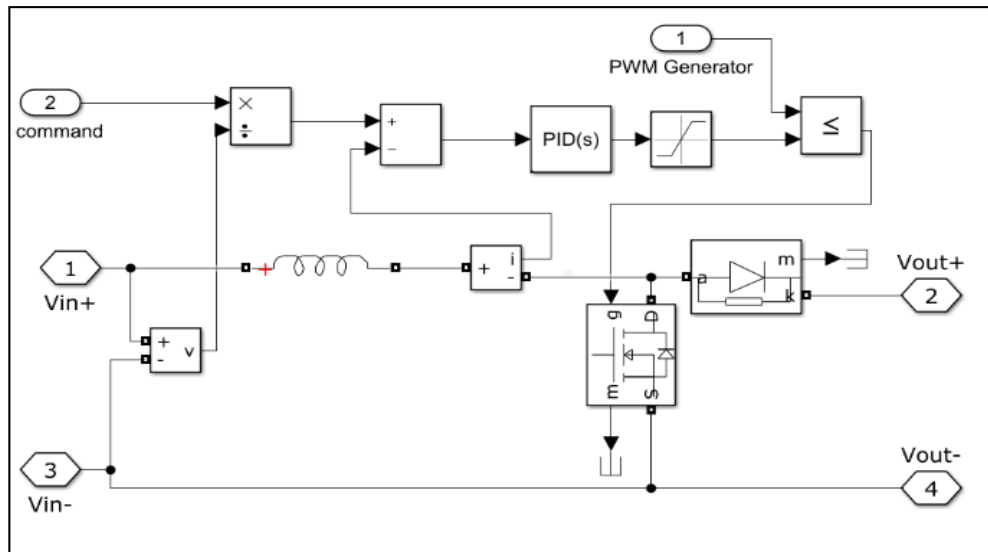


Figure IV.8 : Diagramme schématique du circuit de charge de la batterie dans PV avec batterie/supercapaciteur.

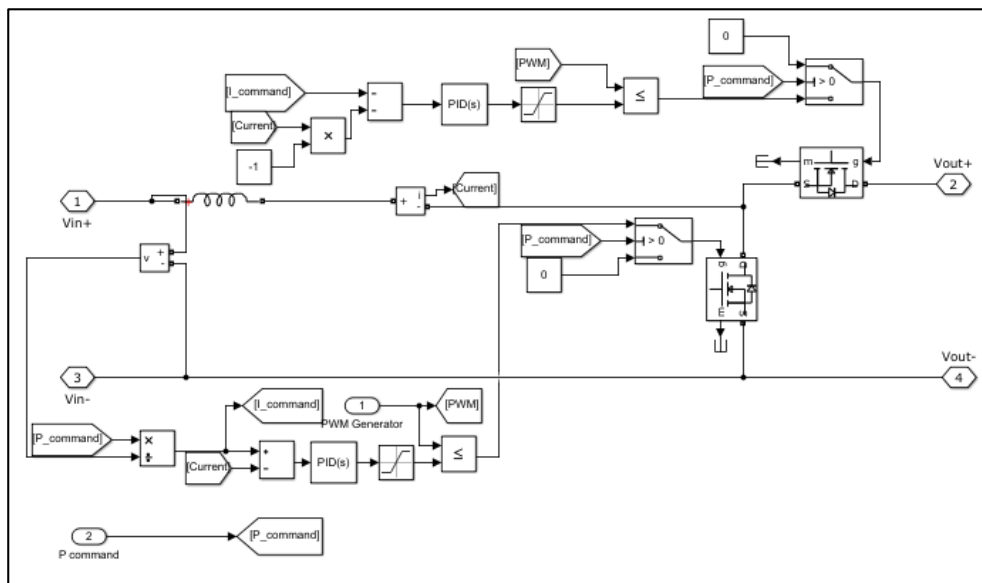


Figure IV.9 : Diagramme schématique du circuit de charge du supercondensateur dans PV avec batterie/supercapaciteur.

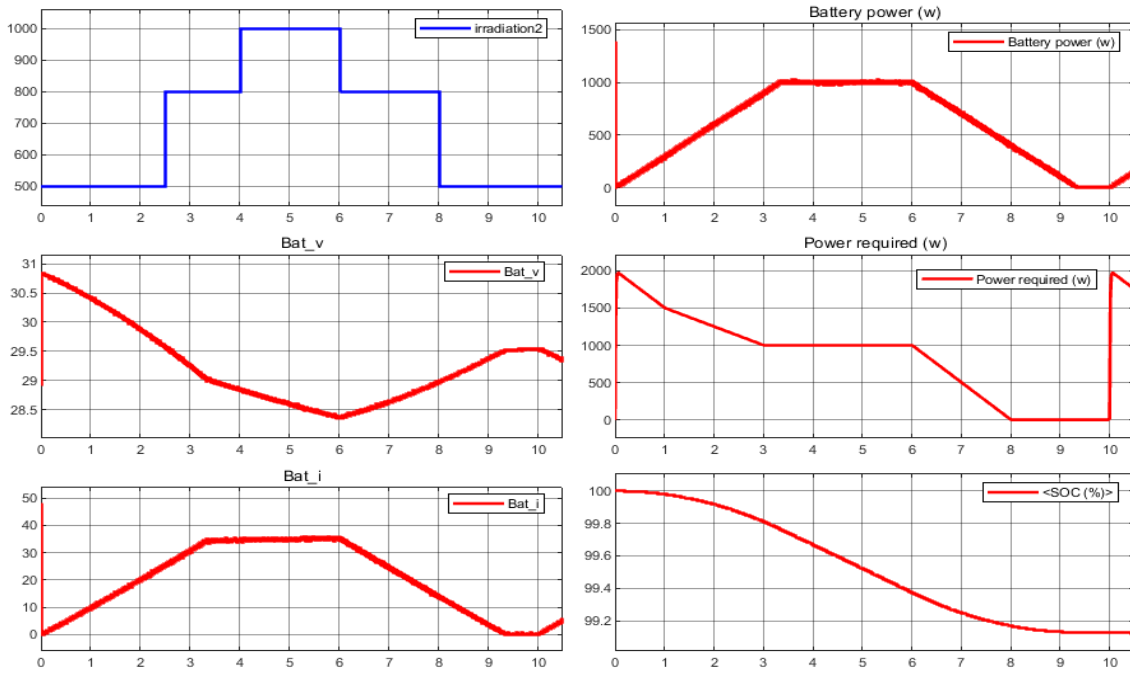


Figure IV.10 : Test 01 : (a) Irradiation ; (b) Tension de la batterie ; (c) Courant de la batterie ; Alimentation par batterie ; Puissance requise ; État de charge (SOC) de la batterie.

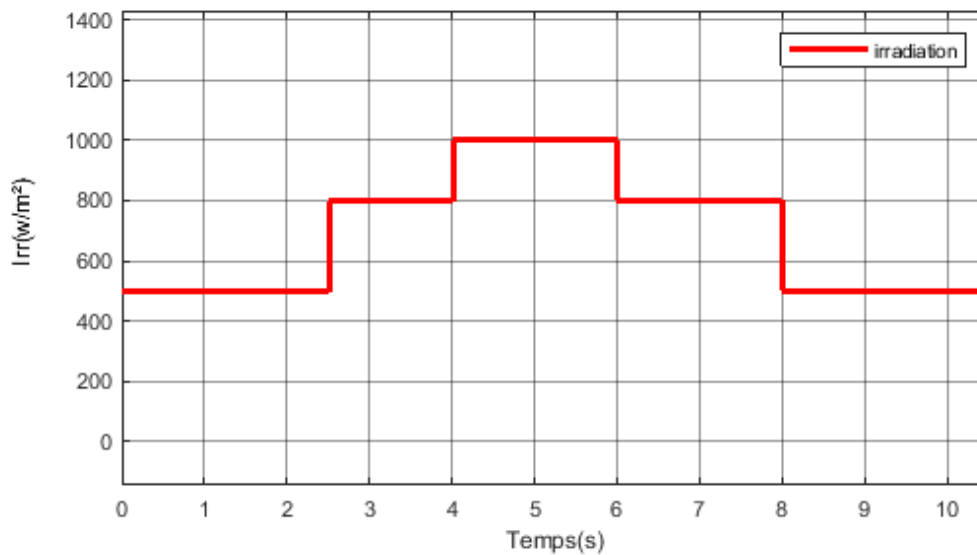


Figure IV.11 : Irradiation.

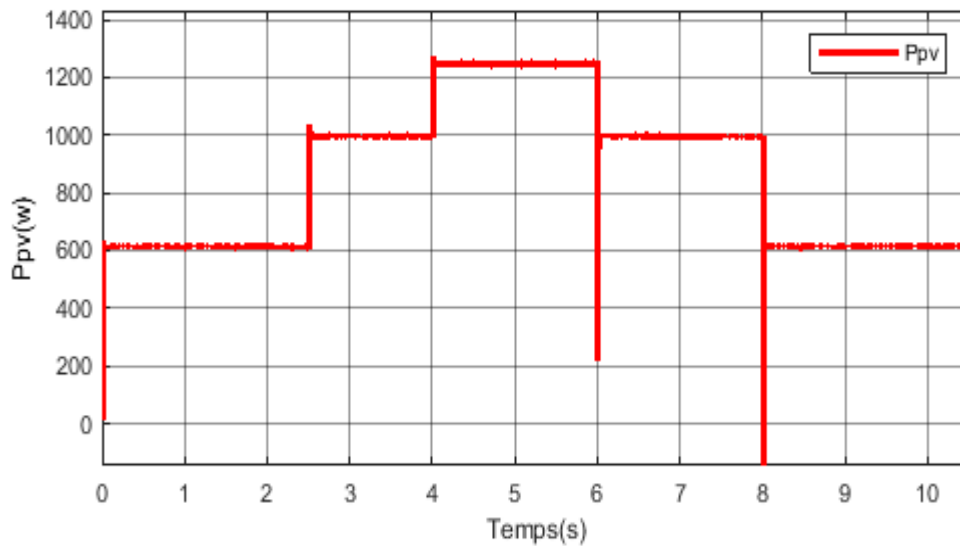


Figure IV.12 : La puissance de sortie de panneau.

Dans nos données simulées (figures IV.10, 11 et 12), on a remarqué que lorsque l'irradiation augmente ($irr = 800 \text{ w/m}^2$) à $t = 2$ secondes, indicatif d'une augmentation de la puissance ($P_{pv} = 1000 \text{ w}$), la batterie fournit une puissance qui ne devrait pas être variable. Cependant, dans l'intervalle de temps de $[3s-6s]$ quand la puissance nécessaire est identique à celle de la batterie, l'irradiation atteint son apogée tandis que le potentiel photovoltaïque devrait idéalement atteindre son maximum (12500 W).

Comme nous le savons, dans les systèmes PV de batteries, la batterie est incitée par une faible irradiation à satisfaire la demande de charge, tandis qu'une irradiation croissante entraîne une production d'énergie photovoltaïque plus élevée et, par conséquent, la batterie perd sa capacité de production et commence à se recharger.

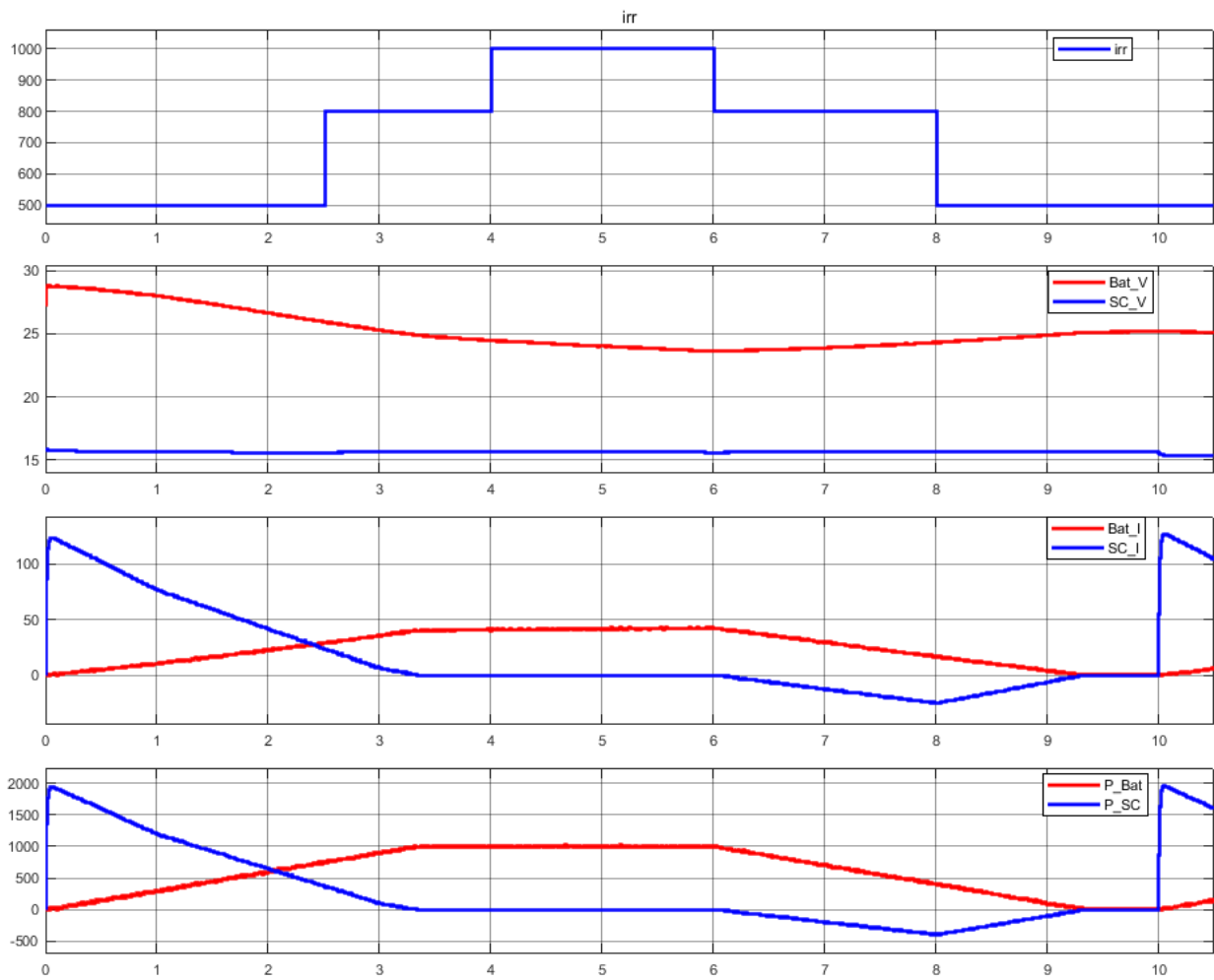


Figure IV.13 : Test 02 : (a) Irradiation ; (b) Tension de la batterie ; (c) Courant de la batterie.

Tableau IV.2 Résultats

Système PV	Temps	Paramètres Maximale	Temps	Paramètres Maximale
Avec batterie uniquement	t=0.00s	Bat_Vmax=30.9V	t=6.009s	Bat_Vmin=28.4V
Avec Batterie/ supercondensateur	t=0.048s	Bat_Vmax=28.79V	t=6.048s	Bat_Vmin=23.59V
Avec Batterie uniquement	t=5.992s	Bat_I _{max} =4.331e ⁺⁰¹ A	t=0.048s	Bat_I _{min} =-9.462e ⁻⁰² A
Avec Batterie / supercondensateur	t=5.998s	Bat_I _{max} =4.331e ⁺⁰¹ A	t=0.048s	Bat_I _{min} =-1.5141e ⁻⁰¹ A

Discussion

Sur la base des résultats de simulation résumés dans les figures No 10, 11,12 et 13, et sur la base du tableau No 05, nous pouvons résumer les résultats suivants :En raison des fluctuations climatiques soudaines et constantes, telles que la température et l'irradiation, la batterie subit en permanence des fluctuations de charge et de décharge sévères, ce qui la rend moins affectée par une tension plus basse due à une décharge profonde et à des courants forts. Les systèmes qui reposent uniquement sur la batterie subissent des charges et des décharges irrégulières lors du stockage. En comparant les systèmes fonctionnant uniquement sur batterie à ceux avec stockage sur batterie/supercondensateur, on constate une légère amélioration de la contrainte dynamique exercée sur la batterie. Le supercondensateur ne peut fournir ou absorber que partiellement les composantes dynamiques de la demande de puissance. Quand on utilise une batterie en parallèle avec un supercondensateur comme système de stockage, la batterie affiche un courant de pointe réduit. Cela conduit à une charge et à une décharge du supercondensateur en suivant des instructions préétablies.

IV.7. CONCLUSION

Cette recherche met en évidence les avantages les plus importants de l'intégration de supercondensateurs avec des dispositifs de stockage d'énergie hybrides, spécialement avec les batteries. En atténuant la pression exercée sur les batteries, les supercondensateurs améliorent non seulement leur efficacité opérationnelle, mais prolongent également leur durée de vie, réduisant ainsi les coûts d'investissement à long terme. Ce qui peut affecter positivement la capacité de la batterie, cela accroît le nombre de cycles pour prolonger la durée de vie de la batterie. Par ailleurs, une étude se concentre sur la gestion de l'énergie PV grâce à un stockage hybride entre batterie et supercondensateur.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Du fait du besoin grandissant d'énergie engendré par le développement technologique et le fonctionnement de machines modernes, il est devenu nécessaire de développer un système efficace pour stocker cette énergie et la réutiliser en cas de besoin. Dans cette thèse, nous discutons d'une étude approfondie du système de stockage d'énergie solaire en tant qu'énergie renouvelable dans un système solaire autonome parce que les énergies renouvelables ont été appliquées dans différents secteurs de l'ingénierie. Les panneaux solaires constituent l'une des solutions inépuisables et performantes qui permettent de générer de la puissance active gratuite dans les réseaux électriques.

Dans un premier chapitre, on porte sur des informations générales sur les énergies renouvelables, en particulier sur l'énergie solaire photovoltaïque et Sur les techniques de stockage de ce système, notamment les batteries de type plomb-acide et les supercondensateurs, ainsi que sur notre exposition au stockage hybride (batteries plomb-acide / supercondensateurs). Nous avons exposé le mode d'action et les utilisations de ces méthodes liées aux énergies renouvelables, ainsi que les bénéfices majeurs.

Par ailleurs, au cours de deuxième chapitre, nous avons exposé la modélisation et les modèles mathématiques des éléments constitutifs de notre système solaire photovoltaïque. Nous avons ensuite étudié les caractéristiques du photovoltaïque IV et PV, ainsi que leurs principaux essentiels qui impactent leur performance, tels que la température et l'éclairage solaire. Nous avons présenté la modélisation mathématique en raison de l'importance de l'étage d'adaptation dans ce type d'application, où il s'agit fréquemment d'un hacheur abaisseur Buck ou d'un hacheur élévateur de tension Boost, ou d'un convertisseur DC-DC abaisseur élévateur Buck-Boost. La batterie et le supercondensateur sont également classifiés dans le système de stockage d'énergie, alors que les diverses catégories de commandes MPPTs et leur efficacité sur le système photovoltaïque. Plus précisément, les contrôles utilisant l'intelligence artificielle tels que la logique floue sont couramment utilisés dans différents secteurs en raison de leur aptitude à reproduire le raisonnement et les jugements humains.

D'autre part, au cours du troisième chapitre, nous avons fait une étude et une simulation d'un système **PV** avec batterie de stockage : Dans cette simulation, deux cas ont été étudiés : le premier cas est un système photovoltaïque autonome sans **SSE** avec 3 techniques de MPPTs et le deuxième cas est un système **PV** avec système **SSE** et avec 3 techniques de MPPTs.

Concernant le premier cas, nous avons fait une comparaison a été faite entre deux algorithmes MPPT, à savoir, les deux méthodes l'IncCond et la FLC dans le suivi de la puissance maximale. Ces techniques facilitent le suivi du MPP sous rayonnement constant et rayonnement variable. C'est la même chose pour les deux techniques (P&O et FLC). Selon les résultats, l'utilisation de la technique (FLC) est démontrée pour le contrôle, donne de bons résultats ainsi qu'une bonne robustesse. Donc, le FLC a les avantages par rapport à l'IncCond et P&O. Quant au deuxième cas, la simulation du système photovoltaïque avec système de stockage batterie nous conduit à conclure que, peu importe la quantité de rayonnement solaire qui varie, la tension de sortie (V_{bus}) reste constante. En comparaison avec les contrôleurs IncCond et (P&O) pour contrôler la tension de sortie, la technique Optimum (FLC) réagit plus rapidement et plus efficacement, il permet de réguler la charge de la batterie dans des conditions optimales. Il est évident de noter le maximum de puissance.

Ainsi, dans le quatrième chapitre, nous avons abordé la question des supercondensateurs. Ces appareils servent à conserver de l'énergie électrique pour satisfaire des demandes d'électricité considérables sur une durée de 1 à 10 secondes. Cette recherche met également en lumière les bénéfices importants liés à l'intégration de supercondensateurs dans les systèmes hybrides d'énergie de stockage, particulièrement en conjonction avec des batteries. En atténuant la pression exercée sur les batteries, les supercondensateurs améliorent non seulement leur efficacité opérationnelle, mais prolongent également leur durée de vie, réduisant ainsi les coûts d'investissement à long terme. Par ailleurs, le recours à batterie et au supercondensateur dans un dispositif hybride présente plusieurs bénéfices notamment la limitation d'un courant électrique excessif, protection contre les décharges profondes qui pourraient affecter la capacité de la batterie et augmenter le nombre d'cycles. De plus, cela contribue à prolonger la longévité de la batterie. En outre, une analyse centrée sur la gestion de l'énergie du système PV avec SSEH : son objectif est d'assurer une charge efficace et sécurisée de la batterie alimentée par un panneau photovoltaïque, tout en prolongeant sa durée de vie.

Perspective :

- ✚ Mettre au point des techniques utilisant l'intelligence artificielle afin de contrôler le flux d'énergie dans un micro-réseau à courant continu.
- ✚ Étudier d'autres méthodes de stockage d'énergie et leurs applications les plus importantes, comme les transports et la voiture électrique.
- ✚ En étudiant et en analysant les structures des installations solaires massives et leur connexion au réseau électrique, on utilise des méthodes intelligentes pour contrôler les onduleurs, qui sont l'équipement indispensable pour garantir cette opération.
- ✚ Conception d'un banc d'essai pour mettre en place le système de contrôle de la logique floue en temps réel, dans le but de vérifier expérimentalement l'efficacité de cette méthode et de comparer avec P&O et IncCond.
- ✚ Créer une plateforme de test pour élaborer un dispositif de stockage hybride, dans le but d'évaluer de manière expérimentale son efficacité et de le mettre en parallèle avec un dispositif exclusivement basé sur batteries.
- ✚ L'analyse et l'étude des techniques de l'intelligence artificielle ainsi que son impact sur le système de stockage d'un système PV.

Bibliographiques

- [1] Xuan Linh Dang, « Contribution à l'étude des systèmes PV/Stockage distribués : impact de leur intégration à un réseau fragile », thèse doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan. Français. 2014.
- [2] Boudia Assam, « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseaux électrique avec un système de stockage à base d'une inductance supraconductrice(SMES), université Mohamed Boudiaf-Msila, Alegria, 2020.
- [3] KHOUDIRI Saïd, « Commande et Optimisation d'un Système Energétique Hybride (SEH) : Application à l'Énergie Renouvelable ». Thèse Doctorat, université MOHAMED KHIDER BISKRA. Algérie, 2018.
- [4] world-nuclear.org. « Stockage D'électricité Et D'énergie ».
- [5] Attar, "Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau. Gisement solaire – Alain Ricaud – Septembre 2009.
- [6] Bessemoulin P, Olivieri J. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. Physique Atmosphérique. La Météorologie 8ème Série - N° 31 - Sept 2000 :42–59.
- [7] Nyamsi W.W, « Vers une méthode automatique d'estimation de la distribution spectrale du rayonnement solaire. Cas du photosynthèse et ultraviolet », thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris- ParisTech, 2016.
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal.
- [9] <https://www.energy.gov.dz> .ministère de l'énergie et des mines.
- [10] Sara Cherifi, Mohamed Haddad, « l'énergie solaire : un moteur du développement durable en Algérie », les cahiers du cread, vol. 35 - n° 03 – 2019.
- [11] Bidjar Samira, "Contribution des énergies renouvelables dans les réseaux électriques», thèse de doctorat, université Ahmed Draïa, Adrar, 2022.
- [12] Sameer Hameer, Johannes L, van Niekerk, « A review of large-scale electrical energy storage », International journal of energy research Int. J. Energy Res". (2015). DOI : 10.1002/er.3294.
- [13] Nedjma Aouchiche, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », thèse doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [14] P. Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de Doctorat, université Paul Sabatier, Toulouse 2009.

- [15] Amarou ayache Mohamed, « Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », thèse de magistère, Université Constantine 1, Algérie, 2014.
- [16] Parishwad GV, Bhardwaj RK, Nema VK. Estimation of hourly solar radiation for India. *Renewable Energy* 1997 ; 12(3) :303-313.
- [17] Kumi EN., « Technical and economic analysis of a 1mw grid-connected solar », thesis Submitted to the School of Graduate Studies, KNUST. 2012.
- [18] Andrea Padovan, Davide Del Col Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. *Energy* Volume 84, Issue 12, December 2010, Pages 2068-2084.
- [19] Tiris M, Tiris C. Optimum collector slope and model evaluation: case study for gebze, turkey. *Energy Conversion and Management* 1998 ; 39(3-4) :167-172.
- [20] J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', 3rd Ed. JohnWiley and Sons, 2006.
- [21] Bouzeria Hamza, « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque » thèse doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, Algérie.
- [22] Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse doctorat, Université de Constantine, Algérie.
- [23] Billel Amiri, « Estimation Temporelle du Rayonnement Solaire au Nord et au Sahara Algérien à Partir de Données de Mesures Sélectionnées. Application de la Méthode RNA », at : <https://www.researchgate.net/publication/358676241>,2021.
- [24] Ali Mohammad Noorian Isaac Moradi, Gholam Ali Kamali. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *REney* Volume33, June 2008, Pages 1406-1412.
- [25] Mohamed Ansoumane Camara, « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs », thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de CONAKRY – Université Gamal Abdel NASSER – GUINEE.2011.
- [26] Lyes Berrached, « Etude prospective de la demande d'énergie finale en Algérie à l'horizon 2030 », mémoire de magister management des projets énergétiques, université de BOUMERDES, 2010 -2011, p (17)
- [27] Petibon S. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat. Université de Toulouse III T-Paul Sabatier, 2010.
- [28] Beauvais A, Chevillard N, Paredes MG, Heisz M, Rossi R, Schmela M. Global Market Outlook For Solar Power / 2019 - 2023: Power FS. Mobilizing Investments in Emerging Markets. *Sol Power Eur* 2019.

- [29] Bun L, « Détection et localisation de défauts pour un système PV », thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2011.
- [30] Akassewa Tchapo Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », thèse de doctorat, Ecole Doctorale IAEM Lorraine ,2010.
- [31] D. Hansen, P. E. Sørensen, L. H. Hansen, and H. W. Bindner, "Models for a stand-alone PV system," Risø National Laboratory, Roskilde, Danemark, Technical report, 2001.
- [32] Boualem Bendib, « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », thèse de Doctorat, Université ferhat abbas — setif 1ufas (Algérie).
- [33] A. Labouret and M. Viloz, *Energie Solaire Photovoltaïque - 4ème édition*. France: Dunod, 2009.
- [34] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [35] Dris Mida, « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra Algérie.
- [36] B. Brousse, « Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique », Thèse Doctorat, Université De Limoges, 2004.
- [37] Y. Pankow, « Etude De L'intégration De La Production Décentralisée Dans Un Réseau Basse Tension. Application Au Générateur Photovoltaïque», Thèse De Doctorat, Ecole Doctorale De L'ensam Ed 432, Lille, 2004.
- [38] Eric Korsaga, Dominique Bonkougou, Z. Koalag, Zougmore François, Article « Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne », *Research* · June 2018 DOI : 10.18145/jitipee.v4i1.161.
- [39] Necaibia Salah, « Stockage de l'énergie par batterie d'une installation photovoltaïque appliquée à un pompage solaire », Université badji Mokhtar – ANNABA, Algérie, 2019.
- [40] Mohamed Ghebbache, « stratégies de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie ».
- [41] M. Arrouf, "Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque," Thèse de Doctorat en Électronique, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2007.
- [42] B. Wafa, "Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV connectés au réseau », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Option : Énergies renouvelables, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.

-
- [43] Énergie Plus. A available : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>.
- [44] Krismadinata, N. A. Rahim, H. W. Ping, and J. Selvaraj, "Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 17, pp. 537–546, 2013, doi : 10.1016/j.proenv.2013.02.069.
- [45] M. Behadj, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome," Centre Universitaire De Bechar Institut des Sciences Exactes, Mémoire de magister, Algérie, 2008.
- [46] M. L. Louazene, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla," Université de Batna 2, 2008.
- [47] H.Hadi, "Photovoltaic water pump system", Ph.D. dissertation, Dept. Intell. Mech. Syst. Eng., Faculty Kochi Univ. Technol., Kochi, Japan, Aug. 2003.
- [48] Lazizi Aldjia, « Modélisation, contrôle et gestion énergétique d'une installation de pompage solaire », Thèse doctorat, université m'hamed bougara-boumerdes, Algérie, 2018.
- [49] T. Tafticht, "Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien", Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2006.
- [50] A. O. M. Yahya, A. O. Mahmoud, I. Youm, « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483.
- [51] Youcef Abdelaziz, « Contribution à l'Optimisation des Performances d'un Générateur Photovoltaïque en Présence d'Ombrage Partiel », thèse doctorat, Université djillali liabes de sidi-bel-abbes, 2018.
- [52] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [53] T. Wildi and G.Sybille, *Electrotechnique 4em Edition*. De boeck, 2005.
- [54] W. Xiao, A modified adaptive hill climbing maximum power point tracking (MPPT) control method for photovoltaic power systems. PhD thèses, Vancouver : University of British Columbia Library, 2003.
- [55] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. Portillo Guisado, M. A. M. Prats, J. I. Leon, and N. Moreno-Alfonso, "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [56] M. Lavabre, *conversion de l'Energie cours et exercices résolus*. Editions Casteilla, 2001.
- [57] Sabah Benamane Siad, "DC Micro Grids Control for renewable energy integration", Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay 2019.

- [58] S. Astier, B. Dakyo, « Les système photovoltaïques autonomes non embarqués pour la production d'énergie électrique », Journées électrotechniques du club EEA, 28-29 Janvier1999, paris (France), pp 1- 19.
- [59] Belkaid Abdelhakim, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », thèse doctorat, Université Ferhat Abbas .Algérie ,2015.
- [60] Kechar EL-Khanssa, « Influence des rayonnements parasites sur le rendement des panneaux solaires », thèse doctorat, Université BADJI Mokhtar-Annaba, 2020.
- [61] Djelailia Okba, « Gestion des synergies d'une alimentation électrique autonome multi-sources à base d'énergies renouvelables », thèse doctorat, Université Badji-Mokhtar Annaba, 2020.
- [62] S. Li, H. Liao, H. Yuan, Q. Ai, and K. Chen, "A MPPT strategy with variable weather parameters through analyzing the effect of the DC / DC converter to the MPP of PV system," Sol. Energy, vol. 144, pp. 175–184, 2017.
- [63] Mouna Abarkan, M'Sirdi Nacer Kouider. « Modélisation et Analyse du comportement d'un Bâtiment équipé d'un Système Multi Sources d'énergie ». Physique [physics]. Aix Marseille Université et l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. Français, 2014.
- [64] A. Brahmi, A. Abounada et M. Ramzi, "Application de la commande 'Perturb and Observe' pour L'extraction de la puissance maximale des cellules photovoltaïques", Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 121 – 124.
- [65] KhouLOUD Bedoud, Hichem Merabet, Tahar Bahi. "Power control strategy of a photovoltaic system with battery storage system", Journal of Engineering and Applied Science, 2022.
- [66] Sihem Bouri, Tariq Boudaoud, Tayeb Boudjela. Article « PI CONTROLLER FOR CONTROLLING A THREE-PHASE INVERTER OF A PV SYSTEM CONNECTED TO THE ELECTRICAL NETWORK”, University Aboubekr Belkaid Tlemcen BP 119 -13000, Algeria, 2021.
- [67] T.Boutabba, “Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien, ” Thèse de doctorat. Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd., Batna., Algérie, 2018.
- [68] Belakehal.S, « Conception & Commande des machines à Aimants Permanents Dédiées aux énergies Renouvelables » Thèse de doctorat. Université Constantine. Alegria, 2010.
- [69] Lakhdara Amira, « Contribution à la gestion d'énergie dans un système hybride à énergies à énergies renouvelables », thèse doctorat, université 8 mai 1945.Guelma, 2022.
- [70] Guentri, Hocine, et al. "Power management and control of a photovoltaic system with hybrid battery-supercapacitor energy storage based on heuristics methods." Journal of Energy Storage 39 (2021): 102578.

-
- [71] P. Harsha, P.M. Dhanya, K. Karthika, "Simulation & Proposed Hardware Implementation of MPPT controller for a Solar PV system", *International Journal of Advanced Electrical and Electronics Engineering*, (IJAEED) Vol.2, Issue-3, 2013.
- [72] Lila Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs ». Université de Poitiers, 2013, France.
- [73] Abdelhamid Ksentini, Zakaria Hadeif, El-Bahi Azzag, Salah Necaibia et Ammar Necaibia, « Technico and Economic Optimization of the Injection of a Photovoltaic System on a Low Voltage Network », *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 2023, <https://doi.org/10.2478/sbeef-2023-0001>.2023.
- [74] Saliha Maarouf, Abdelhamid Ksentini, El Bahi Azzag, Rachida Kebbache, Ghania Boukerche. "Improved Artificial Neural Network Design for MPPT Grid-Connected Photovoltaic Systems", *the Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 2022.
- [75] Wail Rezgui, L. H. Mouss and M. D. Mouss, « modeling of a photovoltaic field in malfunctioning », in the *Proceedings of the 2013 IEEE CoDIT (International Conference on Control, Decision and Information Technologies)*, pp.788-793, Hammamet Tunisia, 06-08 May 2013.
- [76] M. Ahmed., Y. Abdelaziz, Y. Almoataz "Implementation of perturb and observe MPPT of PV system With direct control method using buck and buck-boost converters", *Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation engineering: An international Journal (EEIEJ)*, Vol. 1, N°.1, p. 31- 44, February 2014.
- [77] J. Lianliu, J. Hsiao chen, Y. Hua liu and Z. Zen yang. «An asymmetrical fuzzy-logic-control-based MPPT algorithm for photovoltaic systems». *Energies*, Vol. 7, N°. 4, pp. 2177-2193, 2014.
- [78] W. Yuan-Kang, L. Jih-Hao, and L. Huei-Jeng. "Standards and guidelines for grid-connected photovoltaic generation systems: A review and comparison". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, N°. 4, p. 3205-3216, July 2017.
- [79] Ait Kaki Lamia Ghanima, Bellel Nadir. "Efficiency evaluation of experimental (photovoltaic -wind) hybrid system with the effect of Maximum power point tracking charge controller to the production of Valve regulated lead-acid batteries in Constantine-Algeria", *Journal of Energy Storage*, 2021.
- [80] Elabbes Maatallah, Brahim Berbaoui. "Modelling and Control of Photovoltaic System using the incremental conductance method for maximum power point tracking», *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 2019.
- [81] Salah Eddine Mountassir, Oumaymah Elamri, Saad Sarih, Abdelouahed Tajer, Abdellah Oukassi. "Instantaneous Reactive Power Control Based on Five-Level Inverter for Grid Connected PV System Improvement», *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 2022.

-
- [82] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Perturb and Observe MPPT Technique Robustness Improved", proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, pp. 845-850, 2004.
- [83] Dan Craciunescu, Laurentiu Fara « Investigation of the Partial Shading Effect of Photovoltaic Panels and Optimization of Their Performance Based on High-Efficiency FLC Algorithm», Article, <https://doi.org/10.3390/en16031169>.
- [84] How Digital Twin Technology is changing the Solar Power. 2020. Available online: www.pratititech.com (accessed on 20 October 2022).
- [85] Digital Platform. 2020. Available online: <https://www.record-evolution.de/> (accessed on 20 October 2022).
- [86] Mahmoud Mostefa. Tounsi,Bouziane, Meliani,Noreddine Benaired, Fatiha Djaafar. "Fuzzy logic controller of photovoltaic panel-unified power quality conditioner with voltage compensation and stability", International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), 2023.
- [87] WWW.mdpi.com.
- [88] Mohammed Zerouali, Abdelghani El Ougli, Belkassem Tidhaf, Hafida Zrouri," Fuzzy logic MPPT and battery charging control for photovoltaic system under real weather conditions", Article, Team of Embedded Systems, Renewable Energy and Artificial Intelligence – National School of Applied Sciences, Mohammed First University. Oujda, Morocco.
- [89] R.A.Muhammed,D.R.Sulaiman,article "Optimization (PSO)Based MPPT controller Modeling and Design of Photovoltaic Modules, Article of Majlesi Journal of Electrical Engineering,2022.
- [90] ESRAM T, Chapman PL. "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques". IEEE Trans Energy Convers, Vol. 22, pp. 439–49, 2007.
- [91] F. J. Sepulveda, I. Montero, F. Barrena, M. T. Miranda and J. I. Arranz," Design and Energy Analysis of Photovoltaic-Battery Prototype Considering Different Voltage Levels», Article of the journal Batteries,2023,Batteries2023,9,16.<https://doi.org/10.3390/batteries9010016>.
- [92] Pinit Wongdet, Terapong Boonraksa, Promphak Boonraksa, Watcharakorn Pithurat,Article "Optimal Capacity and Cost Analysis of Battery Energy Storage", of the journal Batteries,2023, <https://doi.org/10.3390/batteries9020076>.
- [93] Eason, B. Noble, « On certain Integrals of Lipschitz-Hankel Type Involving Products of Bessels Functions »,
- [94] Stoica Dorel, Mohammed Gmal Osman , Cristian-Valentin Strejoiu, Gheorghe Lazaroiu ,Article "Exploring Optimal Charging Strategies for Off-Grid Solar Photovoltaic Systems: A Comparative Study on Battery Storage Techniques", Article of the journal Batteries,2023, <https://doi.org/10.3390/batteries9090470>

- [95] Mustafa Ergin , Sahin, and Frede Blaabjerg, “A Hybrid PV Battery/Supercapacitor System and a Basic Active Power Control Proposal in MATLAB/Simulink”, *Electronics* 2020, 9, 129; doi: 10.3390/electronics9010129, <http://www.mdpi.com/journal/electronics>.
- [96] Supercapacitor (EDLC) Basics (Part 1): What is a Supercapacitor (EDLC)? Murata Manufacturing Co, Ltd.<https://www.murata.com/products/emiconfun/capacitor> , /2015/03/24/20150324-p1 (accessed on 20 November 2018).
- [97] http://www.maxwell.com/images/documents/bcseries_ds_1017105-4.pdf
- [98] Hocine Guentri, Tayeb Allaoui, Mustafa Mekki, Mouloud DENAI. «Power management and control of a photovoltaic system with hybrid battery-supercapacitor energy storage based on heuristics methods” .Article de journal “Energy Storage”, 2021<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102578>.
- [99] S.K. Kollimalla, M.K. Mishra, N.L. Narasamma, “Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 5 (4) (2014) 1137–1144, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2336896>.
- [100] Patrick Kobou Ngani, Jean-Régis Hadji-Minaglou,Article,” Model Predictive Control for Residential Battery Storage Sys-tem: Profitability Analysis”, *Article of the journal Batteries*,2023, <https://doi.org/10.3390/batteries9060316>.
- [101] Lee Wai Chong, Yee Wan Wong, Rajprasad Kumar Rajkumar, Dino Isa,” An optimal control strategy for standalone PV system with Battery Supercapacitor Hybrid Energy Storage System”, *Journal of Power Sources* 331(2016)553e565, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.061>.
- [102] MAAMIR Madiha, « Techniques de supervision d’énergie d’un système d’entraînement Electrique hybride ». thèse doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra, 2020.
- [103] Fouzia Brihmat, « L’Etude conceptuelle d’un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien »,2012