



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 20 août 1955-SKIKDA-  
Faculté de Technologie  
Département De Génie Mécanique

N° d'ordre : D012125002D

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

**Doctorat en Sciences**

SPÉCIALITÉ : Electromécanique

Par :

**Mme HANANE KHELFA SAHEL**

### **Simulation et Optimisation Energétique d'un Système Photovoltaïque.**

Soutenue le : 23/01/2025

Devant le Jury composé de :

Président :	METATLA Abderrazek	Professeur	Université de skikda
Encadreur :	LACHOURI Abderrazek	Professeur	Université de skikda
Examineur :	SOUFI Youcef	Professeur	Université de Tebessa
Examineur :	SEBBAGH Toufik	MCA	Université de Skikda
Examineur :	ZAHZOUH Zoubir	MCA	Université de Souk-Ahras
Examineur :	Rahmouni Salah	MCA	Ecole supérieur Azzaba
Invité :	Mehennaoui Lamine	MCA	Université de skikda

Année universitaire  
2024/2025

# Remerciements

*Je tiens premièrement à remercier avec prosternation, **Allah**, le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.*

*Ce travail a été effectué au laboratoire d'automatique, faculté de technologie de l'Université de Skikda, sous la direction de monsieur **Lachouri Abderrazak**, Professeur à l'Université de Skikda. Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques.*

*Je remercie aussi Monsieur **Metatla Abderrazak**, Professeur à l'université de skikda, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de mon jury de thèse.*

*Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir examiner mon travail, Monsieur **SOUFI Youcef**, Professeure à l'Université de Tébessa, Monsieur **Sebbagh Toufik**, Maître de conférences A à l'université de skikda, Monsieur **Zahzouh Zoubir**, Maître de conférences A à l'université de Souk Ahras, Monsieur **Rahmounie Salah**, Maître de conférences A à Ecole supérieure Azzaba. Je vous remercie pour l'intérêt que vous avez porté à mon travail de thèse, pour le temps consacré à la lecture de mon manuscrit et pour les conseils et remarques permettant de corriger et d'améliorer le manuscrit. Encore une fois, je vous remercie pour l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de siéger à ma soutenance.*

*Je remercie ma famille et mon époux d'être à mes côtés comme une source de soins, d'amour, D'encouragement et de motivation, qui m'a rempli de patience et d'engagement.*

*Enfin, je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail.*

*Khelfa-Sahel Hanane*

## **Résumé**

Les systèmes de génération d'énergie autonome sont conçus pour fonctionner indépendamment du réseau électrique public. Les batteries constituent un élément important dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Elles sont utilisées pour stocker l'électricité produite par l'énergie solaire pendant la nuit ou en cas d'urgence lors de la demande en électricité non constante. Notre étude est divisée en trois parties principales. La première concerne la conception d'une méthode intelligente de suivi du point de puissance maximale basée sur un contrôleur logique flou pour améliorer l'efficacité d'un système d'énergie solaire autonome. La deuxième partie décrit l'état de charge de la batterie (SOC). Le modèle proposé, qui reflète mieux la réponse réelle du SOC de la batterie au lithium, est construit en utilisant l'estimateur d'état du filtre de Kalman étendu (EKF). Cette méthode proposée peut être considérée comme une méthode plus précise et fiable pour estimer l'état de charge de la batterie. La troisième partie, se concentre sur la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux hybrides AC/DC. Deux approches sont explorées : le système de gestion heuristique (EMS heuristique) et le système de gestion optimisé par programmation linéaire (PL), pour relever les défis de l'intermittence des énergies renouvelables et de la complexité des environnements autonomes et hybrides. Les performances du système de gestion proposé, en utilisant un contrôleur logique flou pour le suivi du point de puissance maximale (FLC-MPPT) et l'estimateur EKF, ont été simulées dans Matlab/Simulink pour différentes irradiances solaires et températures, en réponse à une demande d'énergie à charge non constante donnée. De même pour la troisième contribution, les résultats ont montré que la coordination entre les sources d'énergie permet de maintenir un équilibre entre production et consommation, tout en réduisant les coûts grâce à une gestion optimisée.

### **Mots-clés :**

Gestion, Système photovoltaïque hybride, Autonome, Convertisseur DC-DC, Estimation de l'état de charge, Filtre de Kalman étendu, Micro-réseau, Programmation linéaire.

## **Abstract**

Autonomous power generation systems are designed to operate independently of the public electrical grid. Batteries play a crucial role in autonomous photovoltaic systems, as they are used to store electricity generated by solar energy for nighttime use or during emergencies when electricity demand is inconsistent. Our study is divided into three main parts. The first part focuses on designing an intelligent method for tracking the maximum power point (MPPT) using a fuzzy logic controller to enhance the efficiency of an autonomous solar energy system. The second part describes the battery's state of charge (SOC). The proposed model, which better reflects the actual response of the lithium battery's SOC, is developed using the extended Kalman filter (EKF) state estimator. This method can be considered a more accurate and reliable approach for estimating the battery's state of charge. The third part focuses on energy management in hybrid AC/DC microgrids. Two approaches are explored: the heuristic energy management system (heuristic EMS) and the energy management system optimized through linear programming (LP) to address the challenges of renewable energy intermittency and the complexity of autonomous and hybrid environments. The performance of the proposed management system, using a fuzzy logic controller for maximum power point tracking (FLC-MPPT) and the EKF estimator, was simulated in Matlab/Simulink for various solar irradiances

and temperatures, in response to a given non-constant load demand. Similarly, for the third contribution, the results demonstrated that coordination between energy sources helps maintain a balance between production and consumption while reducing costs through optimized management.

### Keywords:

Management, Hybrid Photovoltaic System, Stand-alone, DC-DC Converter, State Of Charge Estimation, Extended Kalman Filter, Micro-grid, Linear Programming.

### ملخص

تم تصميم أنظمة توليد الطاقة المستقلة للعمل بشكل مستقل عن الشبكة الكهربائية العامة. البطاريات تعد جزءاً مهماً في الأنظمة الشمسية المستقلة، حيث تستخدم لتخزين الكهرباء المنتجة من الطاقة الشمسية خلال الليل أو في حالات الطوارئ عندما يكون الطلب على الكهرباء غير ثابت. تنقسم دراستنا إلى ثلاث أجزاء رئيسية. الجزء الأول يتناول تصميم طريقة ذكية لتتبع نقطة الطاقة القصوى بناءً على وحدة تحكم منطقية ضبابية لتحسين كفاءة النظام الشمسي المستقل. الجزء الثاني يصف حالة الشحن للبطارية. يتم بناء النموذج المقترح الذي يعكس بشكل أفضل استجابة حالة الشحن الفعلية لبطارية الليثيوم باستخدام مقيم حالة باستخدام مرشح كالمان الممتد. يمكن اعتبار هذه الطريقة المقترحة كطريقة أكثر دقة وموثوقية لتقدير حالة الشحن للبطارية. الجزء الثالث يركز على إدارة الطاقة في الشبكات الصغيرة الهجينة التي تعمل بالتيار المتناوب/التيار المستمر. تم استكشاف نهجين: نظام إدارة الطاقة ونظام الإدارة المحسن باستخدام البرمجة الخطية، لمواجهة تحديات تذبذب مصادر الطاقة المتجددة وتعقيد البيئات المستقلة والهجينة. تم محاكاة أداء النظام المُدار باستخدام وحدة تحكم منطقية ضبابية لتتبع نقطة الطاقة القصوى ومقيم كالمان الممتد في برنامج ماتلاب/سيمولينك لأشعة شمسية ودرجات حرارة مختلفة، استجابة لطلب طاقة بتحميل غير ثابت. بالمثل بالنسبة للمساهمة الثالثة، أظهرت النتائج أن التنسيق بين مصادر الطاقة يساعد في الحفاظ على التوازن بين الإنتاج والاستهلاك، مع تقليل التكاليف بفضل إدارة محوسبة.

### الكلمات المفتاحية

إدارة، نظام ضوئي هجين، مستقل، محول تيار مستمر-تيار مستمر، تقدير حالة الشحن، مرشح كالمان الممتد، البرمجة الخطية.

## LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Définition	Unités
$MPP$	Point de Puissance Maximale	–
$MPPT$	Maximum Power Point Tracking	–
$d_{-mppt}$	Rapport cyclique du convertisseur MPPT	–
$FF$	Facteur de Forme	–
$P\&O$	Perturb & Observe	–
$PV$	Photovoltaïque	–
GPV	Générateur photovoltaïque	–
STC	Fonctionnement dans des conditions standards	–
$k$	Coefficient correcteur de l'algorithme MPPT auto-adaptatif	–
$I_{cel}$	Courant débité par une cellule photovoltaïque	[A]
$I_{ph}$	Photo-courant	[A]
$I_{mod}$	Courant débité par un module photovoltaïque	[A]
$I_{phm}$	Photo-Courant du module	[A]
$I_{pv}$	Courant total débité par les panneaux photovoltaïques	[A]
$I_0$	Courant de saturation inverse de la diode	[A]
$k$	Constante de Boltzmann	[ $J.k^{-1}$ ]
$N_A$	Concentration des trous	[ $cm^{-3}$ ]
$N_D$	Concentration des donneurs d'électrons	[ $cm^{-3}$ ]

$n_i$	Concentration intrinsèque	$[cm^{-3}]$
$N_p$	Nombre de cellules connectées en parallèle	$[cm^{-3}]$
$N_s$	Nombre de cellules connectées en série	$[cm^{-3}]$
$P_c$	Puissance crête des panneaux photovoltaïques	[w]
$P_{mpp}$	Puissance maximale fournie par le panneau	[w]
$P_{pv}$	Puissance fournie par les panneaux photovoltaïques	[w]
$q$	Charge élémentaire d'un électron	[c]
$T$	Température absolue	[K°]
$V_{cel}$	Tension aux bornes d'une cellule photovoltaïque	[V]
$V_{com}$	Tension en circuit ouvert du module	[V]
$V_D$	Tension de diffusion sur une jonction	[V]
$V_{in}$	Tension en entrée du convertisseur boost	[V]
$V_{in\_av}$	Valeur moyenne de la tension d'entrée	[V]
$V_{pv}$	Tension aux bornes du module photovoltaïque	[V]
$V_{mod}$	Tension au point de puissance maximale	[V]
$V_{out}$	Tension en sortie du convertisseur boost	[V]
$V_{mpp}$	Tension aux bornes des panneaux photovoltaïques	[V]
$V_{out\_av}$	Valeur moyenne de la tension de sortie	[V]
$V_T$	Potentiel thermique	[mV]
$Wc$	Watt crête	–
$\eta_{mppt}$	Rendement de l'algorithme MPPT	–

$E_g$	Bande de gap	[ev]
$x$	Setate variable	
$u$	Commande variable	
$K_k$	Gain de kalmen	
$v, w$	Processus stochastiques gaussiens blancs	
$A_k$	Matrice système	
$C_k$	Matrice d'entrée	
$R_{L1} \& R_{L2}$	Charge résistive	
$P_{k/k-1}$	Erreur covariance	

# Sommaire

Sommaire	
Résumé	
Symboles et abréviations	
Introduction générale.....	6

## Chapitre 1 : Etat de l'art sur les systèmes d'alimentation à Energie Renouvelable

1.1 Introduction.....	6
1.2 L'énergie solaire.....	7
1.3 La conversion de l'énergie.....	13
1.4 Electricité photovoltaïque.....	24
1.5 Le module photovoltaïque.....	28
1.6 Le panneau photovoltaïque.....	29
1.7 Le systèmes photovoltaïques.....	29
1.8 Stockage d'énergie.....	32
1.9 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque.....	38
1.10 Conclusion.....	39
1.11 Bilbiographie.....	40

## Chapitre 2 : Algorithme de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT)

2.1 Introduction.....	44
2.2 Définition et principe de fonctionnement de l'MPPT.....	44
2.3 Recherche du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque.....	49
2.4 Critères d'évaluation d'une commande MPPT.....	69
2.5 Le rendement du MPPT.....	70
2.6 Développement d'un algorithme de maximisation de la puissance MPPT Flou...	71
2.7 Conclusion.....	73
2.8 Bibliographie.....	74

## Chapitre 3 : Etude En Modélisation Du Système Photovoltaïque

3.1 Introduction .....	75
3.2 Modélisation des système.....	75
3.3 Photovoltaïque système.....	76
3.4 La modélisation d'un module photovoltaïque.....	77

3.5 Détermination des paramètres de modèle de simple-diode à cinq paramètres.....	82
3.6 La Modélisation des convertisseurs.....	88
3.7 La Modélisation de la batterie.....	91
3.8 Le filtre de Kalman étendu.....	94
3.9 Le système de gestion de l'énergie (EMS).....	97
3.10 Développement d'un système de gestion de l'énergie de micro-réseau à l'aide de méthode basées sur l'optimisation.....	98
3.11 La charge.....	104
3.12 Conclusion.....	104
3.13 Bilbiographie.....	106

## Chapitre 4            Résultats des Simulations et Discussion

4.1 Introduction.....	113
4.2 Modèle d'un système PV autonome sous Matlab-Simulink.....	113
4.3 Test de la cellule photovoltaïque.....	115
4.4 La caractéristique I-V et P-V d'un module SPR-305E-WHT-D.....	119
4.5 Test de convertisseur DC-DC.....	122
4.6 Validation de l'algorithme MPPT P&O.....	123
4.7 Validation de l'algorithme MPPT IC.....	126
4.8 La comparaison entre les réponses de contrôleur P&O et les réponses de contrôleur Flou.....	129
4.9. La comparaison entre les réponses de contrôleur IC et les réponses de contrôleur Flou .....	
4.10 Test de l'estimateur de charge EKF de la batterie.....	131
4.11 Simulation de système PV autonome.....	135
4.12 Etude en simulation d'un micro-réseau hybride AC/DC et son contrôle de.....	137
coordination	
4.13 Conclusion.....	142
Conclusion générale et perspectives .....	151

## Introduction Générale

La consommation mondiale d'énergie croît de manière plus rapide que la production mondiale d'énergie en raison de l'industrialisation croissante, l'augmentation de la population et l'amélioration des conditions de vie. En 2022, la demande mondiale en énergie primaire a atteint 604,04 exajoules, [figure \(1\)](#), enregistrant ainsi une augmentation de 1,1% par rapport à 2021 (et une hausse de près de 3% par rapport au niveau de 2019 d'avant la crise sanitaire de Covid-19. Cet accroissement de la demande a été principalement portée, comme l'année précédente, par les économies émergentes (catégorie qui englobe la Chine selon le rapport).

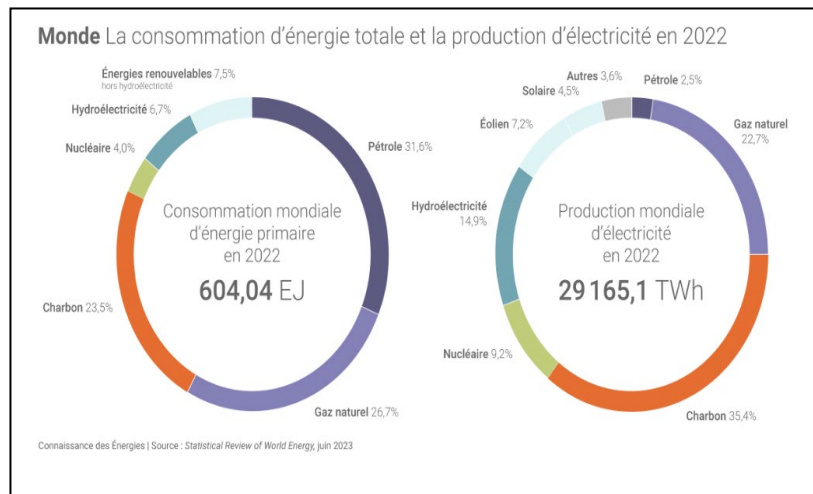
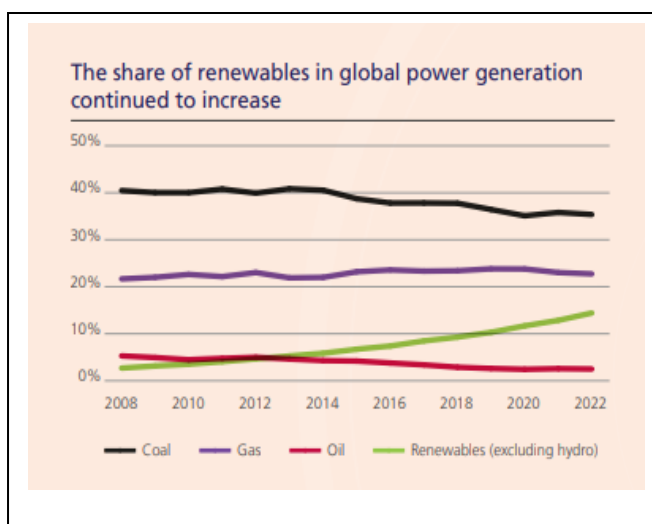


Figure 1. Mondiale consommation d'énergie et production d'électricité en 2022.

L'année 2022 a été caractérisée par des augmentations significatives des prix sur les marchés de l'énergie, principalement en raison du contexte de conflit en Ukraine. Le secteur mondial de l'électricité a connu une série d'évolutions significatives. La production d'électricité à l'échelle mondiale a enregistré une augmentation de 2,3 % au cours de cette année, un taux de croissance qui, bien que notable, s'est avéré être inférieur à celui de l'année précédente, lequel s'était établi à 6,2 %. Une avancée remarquable a été réalisée dans le domaine des énergies renouvelables, avec l'énergie éolienne et solaire atteignant collectivement un niveau historique en contribuant à hauteur de 12 % de la production totale d'électricité. Cette réalisation a été soutenue par une croissance marquante de 25 % pour l'énergie solaire et de 13,5 % pour l'énergie éolienne. Cette combinaison d'énergies renouvelables a une fois de plus dépassé la production issue de sources d'énergie nucléaire.

Malgré ces progrès, le charbon est demeuré le principal moyen de générer de l'électricité en 2022, représentant environ 35,4 % de la production totale, une légère diminution par rapport à la part de 35,8 % enregistrée en 2021. La contribution du gaz naturel à la production électrique est demeurée stable, représentant environ 23 % du mix énergétique. Un élément notable réside dans le fait qu'autres sources d'énergie renouvelable que l'hydroélectricité ont joué un rôle essentiel en couvrant jusqu'à 84 % de la hausse significative de la demande d'électricité au cours de l'année. Ces évolutions dépeignent une dynamique en mutation dans le paysage de la production électrique mondiale, avec des tendances marquées vers des sources plus propres et durables, c'est l'énergie renouvelable. La contribution de l'énergie renouvelable à la production d'électricité mondiale a continué de croître [figure \(2\)](#).



[Figure 2](#). La contribution des énergies renouvelables à la production mondiale d'électricité.

En conséquence, de nombreux pays du monde se tournent vers des sources d'énergie nouvelles, prometteuses, socialement acceptables, renouvelables et durables, notamment l'énergie éolienne, solaire, hydraulique, la biomasse, la géothermie, l'énergie thermique océanique et les sources d'énergie marémotrices. L'énergie photovoltaïque est populaire parmi ces sources renouvelables en raison de sa durabilité, de sa disponibilité locale, de son caractère respectueux de l'environnement, de sa technologie simple, de son coût de plus en plus avantageux et de sa faible empreinte globale. Sans composants mobiles ni émissions de carbone, un système photovoltaïque utilise des matériaux semi-conducteurs pour convertir la lumière du soleil en électricité en courant continu. L'énergie photovoltaïque est désormais

devenue la troisième source d'énergie renouvelable la plus importante, ayant remplacé l'hydroélectricité et l'énergie éolienne. Actuellement, les systèmes photovoltaïques en montage au sol ou intégrés aux bâtiments sont utilisés dans des applications résidentielles, commerciales et de réseau dans plus d'une centaine de pays. L'énergie photovoltaïque en Algérie est en plein essor et représente un secteur clé du développement des énergies renouvelables dans le pays. L'Algérie dispose d'un ensoleillement abondant, ce qui en fait un endroit propice pour l'exploitation de l'énergie solaire.

Le gouvernement algérien reconnaît l'importance de l'énergie solaire et a mis en place plusieurs politiques et initiatives pour promouvoir son utilisation. L'objectif principal est de diversifier le mix énergétique national en augmentant la part des énergies renouvelables, y compris le solaire photovoltaïque. La Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG) a également déclaré que l'Algérie prévoit de produire près de 22000 MW d'électricité à partir des différentes sources d'énergies renouvelables entre 2011 et 2030, dont 10 000 MW pourraient être exportés et 12 000 MW pour le marché national. Selon le programme, 67 projets seront réalisés, dont 27 centrales photovoltaïques connectées au réseau interconnecté nord. La plus grande centrale 48MW sera installée dans la wilaya de Djelfa, suivie de la centrale de Msila qui disposera d'une capacité de 44MW. Les autres centrales photovoltaïques seront mises en place à Ouargla, Tolga, El Bayadh, Mghair, Ain Beida, Naama et Saida. Dans le contexte national, la réalisation de ces projets permettra, d'ici 2030, de fournir 40% des besoins en électricité de l'Algérie à partir des énergies renouvelables, sans oublier les régions isolées qui pourront bénéficier des avantages des énergies renouvelables (le chauffage des serres agricoles, l'électrification rurale, l'éclairage public et domestique, l'alimentation en électricité des ateliers de l'artisanat, le pompage de l'eau...).

À cet effet, les panneaux photovoltaïques (PV), qui sont la principale technologie de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, peuvent être installés comme des systèmes autonomes pour produire de l'énergie électrique dans certaines zones isolées ou être connectés pour alimenter le réseau électrique. Comme l'énergie solaire est instantanée et instable par nature, le système d'énergie PV fonctionne conjointement avec des batteries de stockage pour fournir une alimentation continue et stable dans la configuration des systèmes hybrides autonomes de générateurs photovoltaïques (GPV)/batteries. Le stockage par batterie peut être considéré comme une source d'alimentation auxiliaire pour réduire le risque d'approvisionnement irrégulier du PV et toujours assurer la satisfaction de la demande. En

effet, pour améliorer l'efficacité du système de production PV, des convertisseurs DC/DC sont toujours utilisés pour suivre la puissance maximale extraite (MPP) du système de panneaux PV et adapter la connexion avec un réseau électrique ou une banque de batteries afin d'ajuster la route du flux d'énergie et d'optimiser les performances de l'ensemble du système. Afin de récupérer la puissance maximale délivrée par le générateur PV, les chercheurs travaillent sur l'amélioration des algorithmes MPPT. Dans la littérature, plusieurs algorithmes et techniques ont été développés pour calculer le MPPT, tels que l'algorithme de perturbation et observation (P&O), l'algorithme de conductance incrémentale (InCond), l'algorithme de contrôle par corrélation d'ondulation (RCC), le MPPT fractionnel de tension/courant, l'algorithme MPPT à logique floue et le contrôle MPPT basé sur le réseau neuronal (NN).

Cependant, le MPPT le plus réputé est le contrôleur à logique floue, largement adopté parce qu'il est la méthode la plus simple et la plus robuste parmi toutes les méthodes MPPT. La méthode FLC peut également être introduite dans d'autres contextes pour rechercher le maximum (ou le minimum) d'une fonction. Outre un contrôleur MPPT, des onduleurs pour systèmes PV ou connectés au réseau ou autonomes AC, des convertisseurs DC/DC (buck, boost, buck-boost, Cuk, convertisseur à inductance primaire monophasée SEPIC, etc.) et des éléments de stockage tels que les batteries électriques sont utilisés pour améliorer l'efficacité du PV et réguler la tension de sortie.

Les systèmes d'alimentation hybrides basés sur les énergies renouvelables constituent une bonne alternative aux systèmes conventionnels pour garantir la continuité de l'alimentation en électricité des clients. En général, les batteries sont les plus courantes dans ce contexte. De nombreuses entreprises s'intéressent à la gestion et au stockage de l'énergie solaire et proposent des solutions plus intelligentes pour les marchés de l'énergie solaire, que ce soit pour une utilisation domestique ou pour une utilisation commerciale et industrielle. Cependant, pour répondre à cette exigence, on constate que les batteries constituent les systèmes de stockage d'énergie les plus attractifs en raison de leur grande efficacité et de leur faible pollution. Cependant, les batteries doivent être protégées contre les surcharges et les décharges profondes. Cela nécessite une surveillance continue à la fois de l'état de charge de la batterie et de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Par conséquent, l'état de charge (SOC) de la batterie, qui permet d'estimer sa charge restante, est un paramètre très important pour établir une stratégie de contrôle. Dans ce contexte, un suivi en temps réel avec une estimation précise de son SOC peut non seulement protéger la batterie contre la surcharge et la décharge excessive et améliorer sa durée de vie, mais aussi permettre aux applications de

mettre en place des stratégies de contrôle rationnelles afin de garantir la fiabilité du système de production d'énergie et d'optimiser la gestion de l'énergie.

La dernière partie de cette thèse, se concentre sur la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux hybrides AC/DC. Deux approches sont explorées : le système de gestion heuristique (EMS heuristique) et le système de gestion optimisé par programmation linéaire (PL). Le système EMS heuristique repose sur des règles simples et prédéfinies pour gérer les flux d'énergie, tandis que l'approche PL utilise des algorithmes avancés pour optimiser les coûts, la consommation et l'utilisation des ressources énergétiques locales. Ces deux approches sont étudiées dans le cadre de micro-réseaux intégrant des batteries, des panneaux photovoltaïques et des charges dynamiques.

Ce travail de recherche présente trois principales contributions, la première contribution consiste en la conception d'une méthode intelligente de suivi du point de puissance maximale basée sur des contrôleurs à logique floue. La deuxième décrit l'état de charge (SOC) de la batterie. Le modèle proposé, qui reflète mieux la réponse réelle du SOC de la batterie au lithium, est construit en utilisant l'estimateur d'états du filtre de Kalman étendu (EKF) réalisant un capteur logiciel pour la mesure du SOC de la batterie. L'avantage de cette méthode est que le SOC est estimé de manière optimale même en présence de bruit de mesure à large bande affectant le système.

La troisième contribution majeure réside dans le développement de systèmes énergétiques durables et intelligents, intégrant l'optimisation par programmation linéaire (PL) pour relever les défis de l'intermittence des énergies renouvelables et de la complexité des environnements autonomes et hybrides.

Dans ce contexte, cette thèse est scindée en quatre chapitres

Dans le premier chapitre, nous présentons une étude sur le potentiel solaire en Algérie, soulignant l'importance de cette source d'énergie pour le développement économique de notre pays. Nous avons également mentionné quelques projets qui ont été mis en œuvre dans ce domaine. Ensuite, nous avons abordé le principe du générateur photovoltaïque qui permet de transformer la lumière en électricité, ainsi que les différents paramètres susceptibles d'influencer son fonctionnement. Une description des différents systèmes photovoltaïques est

inscrite à la fin de ce chapitre avec un intérêt particulier sur le système autonome photovoltaïque, y compris la discussion de leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, après une présentation de différentes techniques MPPT, nous présentons l'algorithme flou développé comme solution aux problèmes énumérés plus haut.

Au cours du troisième chapitre, nous présentons notre exposition de manière approfondie, la modélisation de la cellule PV pour la détermination des paramètres de la cellule afin de conclure quel est le modèle le plus représentatif et le plus proche du modèle réel de la cellule, ensuite nous modélisons le système solaire photovoltaïque autonome, avec un estimateur de SOC basé sur l'EKF pour le modèle développé.

Le chapitre quatre présente les résultats des simulations réalisées dans le cadre de l'étude d'un système photovoltaïque autonome et d'un micro-réseau hybride AC/DC. Les analyses s'appuient sur des modèles développés sous MATLAB-SIMULINK pour évaluer le comportement du système sous diverses conditions environnementales.

La première partie est dédiée à la modélisation du système photovoltaïque, aux tests de la cellule PV, et à l'analyse de l'impact de paramètres critiques comme l'éclairement, la température, et les résistances série et parallèle sur la performance du module. Une étude approfondie des convertisseurs DC-DC est ensuite menée, ainsi qu'une évaluation de l'état de charge (SOC) de la batterie à l'aide de la méthode du filtre de Kalman étendu (EKF).

Dans une seconde partie, la performance des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est étudiée sous différentes variations d'irradiance et de température. Enfin, une étude de simulation d'un micro-réseau hybride AC/DC est réalisée, mettant en avant les avantages des algorithmes d'optimisation pour la gestion de l'énergie. Les simulations intègrent des variations de prix dynamiques, des fluctuations de la demande, et l'utilisation d'équipements tels que les batteries et les panneaux photovoltaïques.

Enfin nous terminons notre étude par une conclusion générale et les perspectives.

## Chapitre 1

# Etat de l'art sur les systèmes d'alimentation à Energie Renouvelable

### Table des matières

Chapitre 1 .....	7
1-1. Introduction .....	10
1-2. Le soleil.....	10
1-2-1. Le gisement solaire et l'Algérie.....	10
1-2-2. Les projets des énergies renouvelables en Algérie .....	11
1-2-3. Législation sur environnement.....	12
1-2-4. Impact de la consommation d'énergie solaire sur la société et l'économie .....	12
1-3 Electricité photovoltaïque.....	13
1-3-1. Historique .....	13
1-3-2. Principe photovoltaïque .....	14
1-3-2-1. Le semi-conducteur .....	14
1-3-2-2. La jonction PN.....	15
1-3-2-3. Description de la cellule PV .....	15
1-3-2-4. Les différents types de cellules.....	16
1-3-3. Caractéristiques électriques .....	18
1-3-3-1. La relation courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque.....	18
1-3-3-2. Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque .....	19
1-3-4. Facteurs affectant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	20
➤ L'impact de l'exposition au soleil ou aux rayonnements .....	20
➤ Influence de la température .....	20
1-2. Module PV .....	21
1-4-1. Groupements en série.....	22

1-4-2. Groupements en parallèle .....	22
1-4-3 Protection des modules PV .....	23
➤ Diode By-pass .....	24
➤ La diode Anti-retour .....	25
1-5. String PV .....	25
1-6. Le panneau PV .....	26
1-7. Le système PV .....	26
1-7-1. Système photovoltaïque connecté au réseau.....	27
1-7-2. Système autonome photovoltaïque .....	27
1-8-1. Stockage et l'énergie renouvelable .....	29
1-8-2. Technologie de stockage.....	30
1-8-3. Les batteries .....	32
1-9-1. Les bénéfices [51].....	34
1-9-2. les désavantages [52] .....	34
1-10. Conclusion .....	35
1-11. Bibliographies .....	36

## Liste des figures

Figure. 1. 1	Carte de différentes zones énergétiques de l'Algérie (mois de juillet) [14].....	11
Figure 1. 2 .	Les énergies renouvelables dans la production nationale [16].....	14
Figure 1. 3	Phénomène semi-conducteur [21].....	14
Figure 1. 4	1) cellule photovoltaïque 2) Plan de construction d'une cellule solaire photovoltaïque [25] .....	16
Figure 1. 5	Schéma synthétique de l'effet photovoltaïque [14] .....	16
Figure 1. 6	Le panneau photovoltaïque en silicium amorphe.....	17
Figure 1. 7	Panneau solaire en silicium monocristallin.....	17
Figure 1. 8	Panneau solaire en silicium polycristallin.....	18
Figure 1.9	Les trois zones essentielles.....	18
Figure 1.10	Courbe (I-V) d'une cellule PV avec et sans illumination.....	19
Figure 1. 11	L'impact de l'éclairage sur la courbe I-V d'un générateur PV .....	20
Figure 1. 12	La courbe (I-V) pour une température variable et un éclairement de $1\text{Kw}/\text{m}^2$ [34].....	21
Figure 1. 13	Module PV [25] .....	22
Figure 1. 14	La courbe I-V pour un groupement série de mêmes cellules [27] .....	22
Figure 1. 15	La courbe I-V pour un groupement des cellules identiques en parallèle [35].....	23
Figure 1. 16	Module PV avec une cellule ombragée [36] .....	24
Figure 1. 17	Courbe de puissance pour un l'enselement total et de l'ombrage partiel .....	25
Figure 1. 18	String PV.....	25
Figure 1. 19	Panneau solaire .....	26
Figure 1. 20	Système photovoltaïque connecté au réseau électrique [40].....	27
Figure 1. 21	Système photovoltaïque autonome [40].....	27
Figure 1. 22	Système photovoltaïque autonome hybride [37].....	28
Figure 1. 23	Différentes technologies de stockage d'énergie.....	30
Figure 1. 24	Le stockage d'énergie en MW mondiale de plusieurs technologies de stockage jusqu'en 2017.....	31
Figure 1. 25	Principe de fonctionnement d'une batterie .....	32

## Liste des Tableau

Tableau 1.1	Projets énergie renouvelables en Algérie .....	12
-------------	--	----

## 1-1. Introduction

Une partie du rayonnement solaire est transformée directement en électricité par l'énergie solaire photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque (PV) est utilisée pour convertir cette énergie, en utilisant un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui génère une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension produite peut différer selon le matériau utilisé pour la fabrication d'une cellule. Un générateur photovoltaïque (GPV) est créé en combinant plusieurs cellules PV en série / parallèle, ce qui lui confère une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire et un point de fonctionnement en puissance maximale.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur le potentiel solaire en Algérie, soulignant l'importance de cette source d'énergie pour le développement économique de notre pays. Nous avons également mentionné quelques projets qui ont été mis en œuvre dans ce domaine. Ensuite, nous avons abordé le principe du générateur photovoltaïque qui permet de transformer la lumière en électricité, ainsi que les différents paramètres susceptibles d'influencer son fonctionnement. Une description des différents systèmes photovoltaïques est inscrite à la fin de ce chapitre avec un intérêt particulier sur le système autonome photovoltaïque, y compris la discussion de leurs avantages et inconvénients.

## 1-2. Le soleil

La source d'énergie du soleil est pratiquement abondante et inépuisable car elle envoie un rayonnement à la surface de la Terre, ce qui représente 8400 fois la consommation énergétique annuelle de l'humanité. La puissance instantanée obtenue est de 1 (kWc/m<sup>2</sup>), couvrant l'ensemble du spectre [1]. En seulement 6 heures, les déserts de notre planète, absorbent plus d'énergie solaire que consomme l'humanité en un an [2].

### 1-2-1. Le gisement solaire en l'Algérie

En raison de son climat favorable, l'Algérie dispose d'un gisement solaire considérable. En tout point du pays, la puissance solaire maximale est égale 1kw/m<sup>2</sup>. L'énergie maximale quotidienne moyenne supérieur à 6 /m<sup>2</sup> et l'énergie maximale annuelle en Algérie est d'environ 2500 /m<sup>2</sup> [3]. L'énergie globale reçue est estimé à 169 400 TWh

par an, soit environ 5000 fois de plus que la consommation d'électricité annuelle du pays. Les diverses régions énergétiques de l'Algérie sont illustrées dans la carte suivante (Figure. 1. 1).

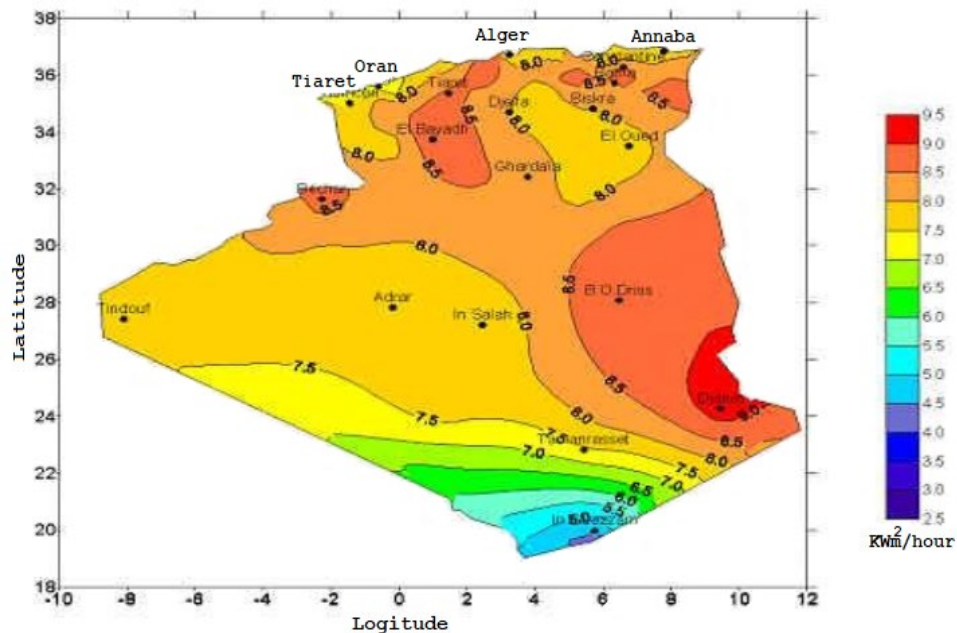


Figure. 1. 1 Carte de différentes zones énergétiques de l'Algérie (mois de juillet)

### 1-2-2. Les projets des énergies renouvelables en Algérie

Un nouveau programme de promotion des énergies renouvelables a été mis en place en Algérie avec des objectifs ambitieux dans sa politique énergétique. L'objectif de ce programme est d'accroître, de 40%, l'apport des énergies renouvelables dans les sources énergétiques nationales en ajoutant une capacité de 22 000 MW à partir des énergies renouvelables dont 15 575 MW d'énergie solaire d'ici 2030 comme indiquée dans le tableau 1.3. Dans la première étape de ce programme (2011-2013), des projets pilotes ont été réalisés afin de tester les différentes technologies disponibles. Dans la deuxième phase (2014-2015), des évaluations de ces projets pilotes et une révision du programme ont été réalisées pour sélectionner les technologies les plus adaptées à l'Algérie. La phase suivante du programme implique la mise en place d'une grande échelle des énergies renouvelable grâce à l'investissement de 20 milliards de dollars durant la période (2015-2020) et 60 milliards de dollars d'ici 2030 [3].

**Tableau 1. 1 Projets énergie renouvelables en Algérie.**

Technologies	2015-2020 (MW)	2021-2030 (MW)	Total (MW)
Solaire Photovoltaïque	3000	10575	13575
Solaire Thermique	-	2000	2000
Eolien	1010	4000	5010
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermal	5	10	15
Total	4525	17475	22000

### **1-2-3. Législation sur environnement**

L'Algérie a rapidement reconnu la valeur des sources d'énergie renouvelables et, à partir de 1999, a adopté des lois et des règlements pour réglementer et promouvoir la production d'électricité intérieure. Le premier document législatif régissant le domaine des énergies renouvelables est la loi n° 99-09, qui établit le cadre général des politiques nationales de gestion et de conservation de l'énergie. Le Fonds national pour les énergies renouvelables et l'énergie combinée (FNERC) a été créé par le décret exécutif n°423-11 (2011) et est utilisé pour financer des projets d'énergies renouvelables. Elle est soutenue par 1% des résidus de pétrole. Le décret exécutif n°218-13 (2013) garantit que la société nationale d'électricité et de gaz (Sonelgaz) achète de l'électricité renouvelable produite par des producteurs privés. Enfin, le décret ministériel du 23 avril 2013 fixe les prix d'achat subventionnés pour l'énergie solaire et éolienne en fonction de l'emplacement et des performances des installations [4].

### **1-2-4. Impact de la consommation d'énergie solaire sur la société et l'économie**

En créant un réseau national pour la fabrication d'outils et de consommables nécessaires à la construction de systèmes solaires, tels que les panneaux solaires, les convertisseurs, les batteries, les transformateurs et les câbles, l'Algérie entend renforcer le secteur de l'énergie renouvelable. L'objectif est de produire 200 MW de modules solaires par an avec un taux d'intégration des biens locaux supérieur à 80%. Cela devrait renforcer l'économie de la nation, réduire le chômage et ouvrir davantage de possibilités d'emploi. En outre, lorsque des composants, des matières premières et des biens semi-finis sont acquis ensemble, des réductions fiscales et douanières s'appliquent aux équipements d'énergie renouvelable en Algérie. Outre les politiques budgétaires mises en œuvre par le gouvernement, le

développement rapide des technologies de conversion des énergies renouvelables et la baisse du coût de leur appareil favorisent l'acceptabilité sociale et facilitent l'assimilation de l'énergie solaire dans divers secteurs de l'économie algérienne.

### **1-3 Electricité photovoltaïque**

#### **1-3-1. Historique**

Lorsque Becquerel découvre l'effet photovoltaïque pour la première fois en 1839, la technologie de conversion d'énergie photovoltaïque (PV) est née. Cela implique la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Becquerel a expérimenté avec des électrodes dans une solution acide et une solution de métal noble [5]. Les appareils à semi-conducteurs photovoltaïques ont été étudiés pour la première fois en 1882. Avec une efficacité de conversion d'énergie ne dépassant pas 2%, le sélénium était la substance utilisée. Avec une cellule mono-cristalline en silicium qui pouvait convertir de l'énergie jusqu'à 6%, Bell Telephone Laboratories a créé le premier type de cellule solaire utilisée en 1954 [1]. Cette découverte a donné à l'industrie spatiale en développement le moyen idéal de fournir aux satellites la puissance dont ils ont besoin [6]. Vanguard I, le premier satellite photovoltaïque, a été lancé en 1959. La première maison alimentée par un système solaire a été construite en 1973 à l'Université du Delaware, grâce au choc pétrolier des années 1970. Mais en raison de la technologie de fabrication prohibitivement coûteuse, les problèmes de rentabilité ont empêché la commercialisation des systèmes photovoltaïques. Jusqu'au début des années 1990, les systèmes photovoltaïques n'étaient utilisés qu'à des fins indépendantes. En 1995, les premiers systèmes connectés ont été lancés en Allemagne, au Japon et aux États-Unis. Depuis lors, des réglementations nationales et internationales visant à réduire l'utilisation des combustibles fossiles conformément aux objectifs environnementaux énoncés dans le Protocole de Kyoto de 1997 ont favorisé l'expansion exponentielle de la technologie solaire. Au cours des dix dernières années (2005-2015), la photovoltaïque connectée à la grille est devenue le choix le plus populaire pour les nouvelles installations. Comme le montre la figure (1.6), la capacité solaire totale installée dans le monde en 2015 a dépassé le seuil de 200GWc, soit 45 fois plus qu'en 2005, selon l'organisation Solar Power Europe SPE. En outre, cette capacité devrait atteindre 500GWc jusqu'à l'an 2020 [7].

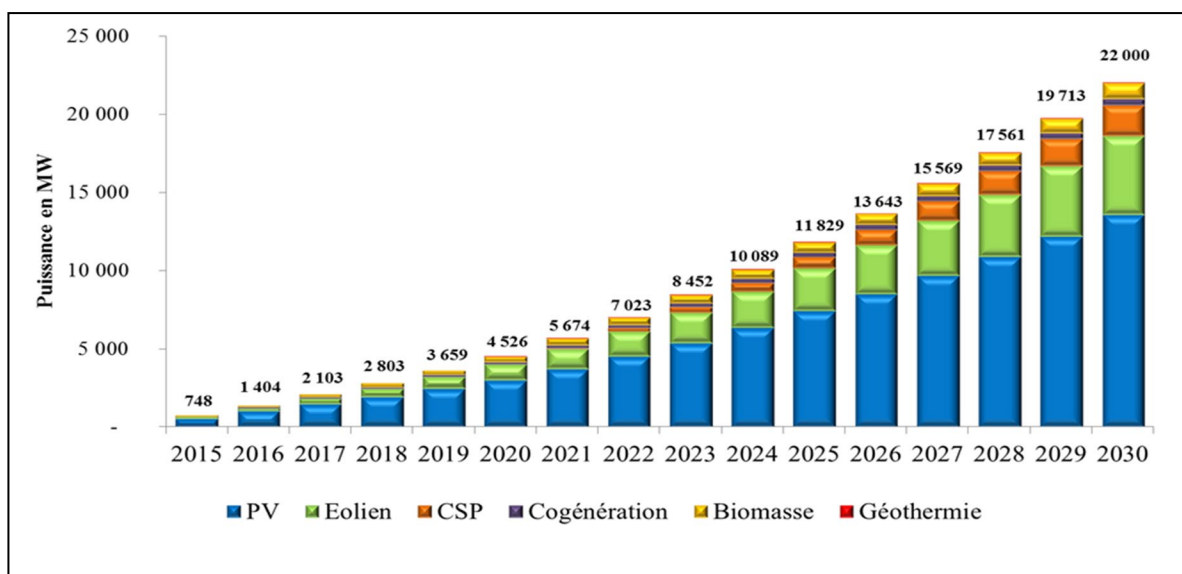


Figure 1. 2. Les énergies renouvelables dans la production nationale

### 1-3-2. Principe photovoltaïque

Une des caractéristiques électriques des semi-conducteurs, l'effet photovoltaïque, est le processus par lequel l'énergie lumineuse du soleil est convertie en énergie électrique [8].

#### 1-3-2-1. Le semi-conducteur

Contrairement aux métaux, la concentration de charges libres dans un semi-conducteur est assez faible. Un électron dans un semi-conducteur doit être donné une quantité minimale d'énergie pour atteindre les niveaux d'énergie plus élevés dans la bande conductrice afin qu'il devienne libre et contribue à la conduite du courant. Un électron est initialement lié à son atome dans la bande de valence. "Band gap" se réfère à cette énergie la plus faible en unités (eV)[9].

Pour les applications photovoltaïques, ce seuil, qui varie de 1,0 à 1,8 eV est unique pour chaque matériau semi-conducteur. Pour le silicium cristallin, il est de 1,1 eV, alors que pour le silicone amorphe, c'est de 1,7 eV.

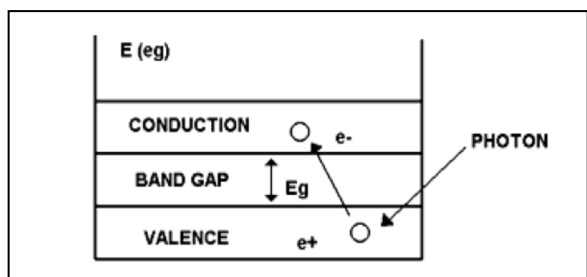


Figure 1. 3 Phénomène semi-conducteur [21]

### 1-3-2-2. La jonction PN

Lorsqu'un semi-conducteur P-dopé (composé de trou) et un semiconducteur N dopé (donateurs d'électrons) entrent en contact, une jonction P-N est formée. Une jonction est le contact qui existe entre ces deux endroits.

Il existe trois types de configurations de jonction utilisées pour créer des cellules photovoltaïques :

- ✚ Une jonction PN (homo-jonction : les deux parties sont composées d'un matériau semi-conducteur commun, généralement du silicium).
- ✚ Une connexion entre deux semi-conducteurs distincts est une hétérojonction.
- ✚ Une union métallique-semi-conductrice [10].

Une barrière potentielle  $V_D$  a été créée à la frontière entre les deux zones dans une homojonction à l'équilibre thermodynamique pendant le processus d'épuisement.

$$V_D = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \quad (1.1)$$

Où :

$V_D$ [V]	: Diffusion tension,
$K = 1.380662 \cdot 10^{-23} J \cdot k^{-1}$	: Boltzmann constante,
$T$ [°K]	: Cristal température absolue,
$q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$	: Élémentaire charge,
$N_D [cm^{-3}]$	: Donneurs concentration,
$N_A [cm^{-3}]$	: Trous concentration,
$n_i [cm^{-3}]$	: Intrinsèque concentration,
Avec $V_T = \frac{kT}{q} = 26$ mV à la température ambiante	

Les jonctions dissymétriques des cellules solaires photovoltaïques sont fréquemment observées, ce qui signifie qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans cette situation, la zone de charge d'espace se situe presque dans la région la moins affectée [11].

### 1-3-2-3. Description de la cellule PV

Une cellule photovoltaïque peut être aussi petite que quelques centimètres carrés ou aussi grande que 100 cm<sup>2</sup>, et elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N. Sa forme est soit carrée, circulaire, soit une combinaison des deux géométries. Seule une petite partie de la surface (5 à 10%) est cachée par les contacts du côté éclairé de la cellule en raison de leur disposition en grille. Il est possible de métalliser complètement le dos. Un revêtement

anti-réflexe couvre uniformément la face avant pour réduire les pertes réfléchissantes des rayonnements entrants [12].

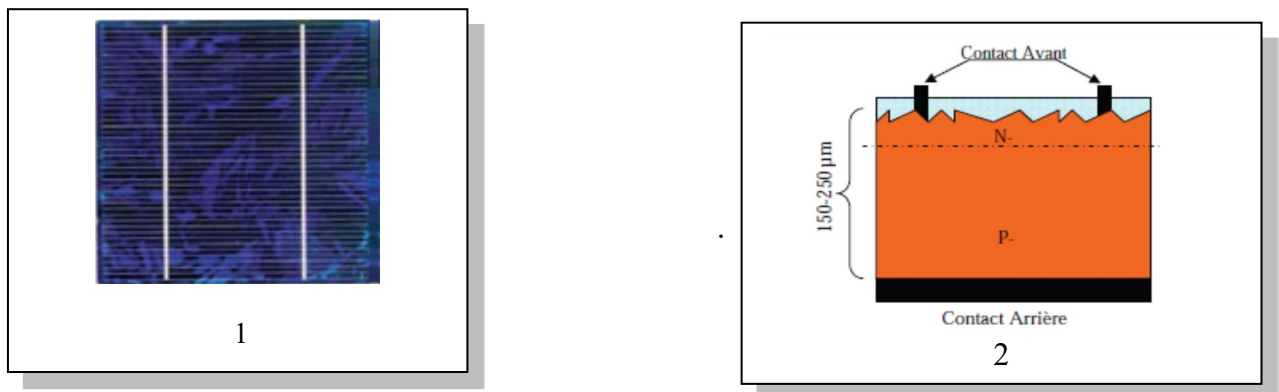


Figure 1. 4 1) Cellule photovoltaïque 2) Plan de construction d'une cellule solaire photovoltaïque [25]

Le processus de capture de la lumière et de production de paires électrons-trous, ainsi que leur diffusion, séparation et référence en utilisant le champ électrique de la jonction, c'est-à-dire les électrons vers le transmetteur (région type N) et les trous vers la base (région type P) sont les fondements de la conversion photovoltaïque dans les cellules solaires [13].

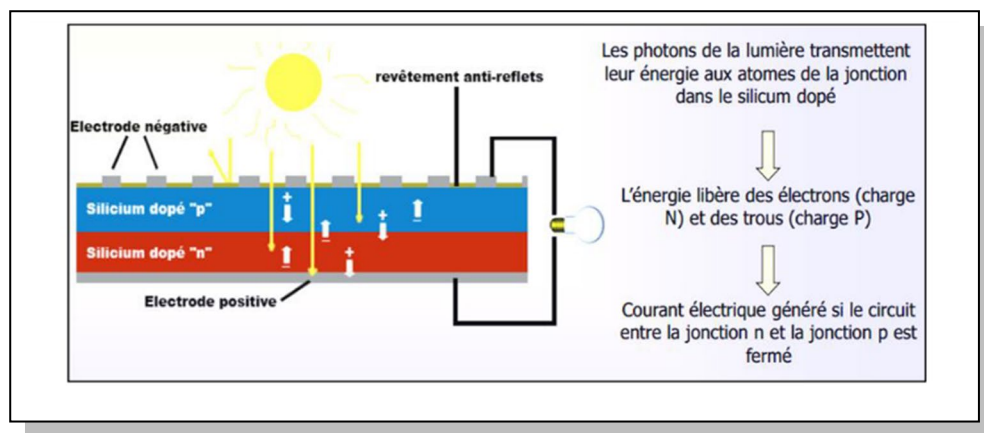


Figure 1. 5 Schéma synthétique de l'effet photovoltaïque [14]

Lorsque les cellules sont reliées en série, les électrons produits par une cellule peuvent être transférés à la cellule suivante. En règle générale, une différence potentielle entre 6 et 24 V est le résultat souhaité [13].

#### 1-3-2-4. Les différents types de cellules

Actuellement, les cellules les plus réceptives sont fabriquées à partir de silicium [14], elle peut être divisée en trois types : les cellules solaire en silicium amorphe, les cellules en silicium monocristallin, et les cellule solaire en silicium polycristallin [15].

### A) Une cellule amorphe de silicium

Le silicium ne se forme pas en cristal, il est placé sur une feuille de verre. Une cellule présente une teinte gris sombre distincte, caractéristique des calculatrices et montres dites "solaires".



Figure 1. 6 Le panneau photovoltaïque en silicium amorphe

Ils fonctionnent dans des circonstances de faible luminosité, comme à l'intérieur ou dans des zones couvertes. Ils offrent un prix plus bas que les autres. Leurs inconvénients par rapport à d'autres variétés, est le rendement (10% environ) est inférieur à la lumière directe du soleil, et leur performance diminue progressivement au fil du temps [16].

### B) Une Cellule monocristalline en silicium

Nous prévoyons que le fondu du silicium se solidifie, en produisant un cristal unique massif pendant qu'il refroidit. Coupez le cristal de façon à ce que les cellules puissent être obtenues. Habituellement, ces cellules ont une couleur bleue constante [17].



Figure 1. 7 Panneau solaire en silicium monocristallin

L'avantage de cette cellule est le rendement de 20%, bon par rapport à d'autres technologies. Mais elles sont coûteuses ; et fonctionnent extrêmement mal dans l'éclairage faible.

### C) Une Cellule polycristalline en silicium

Pendant la période de réfrigération du silicium, plusieurs cristaux s'organisent. Ce type de cellule solaire affiche également une teinte bleue, bien que non uniforme, présentant des motifs résultant des divers cristaux formés.



Figure 1. 8 Panneau solaire en silicium polycristallin

La cellule en silicium polycristallin donne un excellent rendement (13% environ), mais pas aussi bonne que pour le monocristalline mais moins cher que monocristalline. Leurs inconvénients de même que la précédente [18].

### 1-3-3. Caractéristiques électriques

#### 1-3-3-1. La relation courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique  $I(V)$  non linéaire (Figure (1.9))

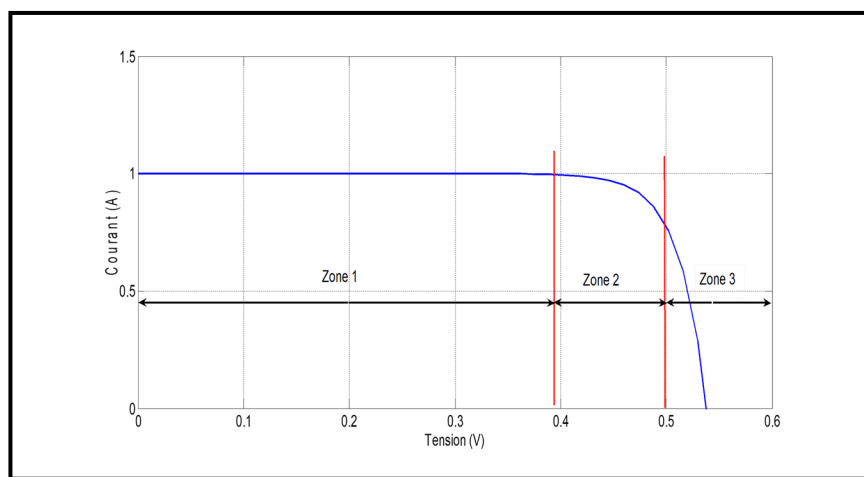


Figure 1.9 Les trois zones essentielles

- **Zone 1** : indépendamment de la tension, le courant reste constant à cet endroit. Le générateur solaire est efficace essentiellement comme une source de courant. à cette période.

- **Zone 2** : Cette zone est située entre les deux premières zones et correspond au coude de la caractéristique. Il désigne la plage dans laquelle le générateur solaire doit fonctionner. C'est là que la puissance maximale, ou le point idéal, peut être trouvé.
- **Zone 3** : Cette zone montre un changement observable du courant correspond à une tension fixe. Un générateur de tension et un générateur photovoltaïque sont comparables.

### 1-3-3-2. Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque

Une courbe I-V typique de la cellule PV pour des conditions ambiantes de fonctionnement fixes ( figure (1.10)), pour une charge résistive, permet de déterminer :

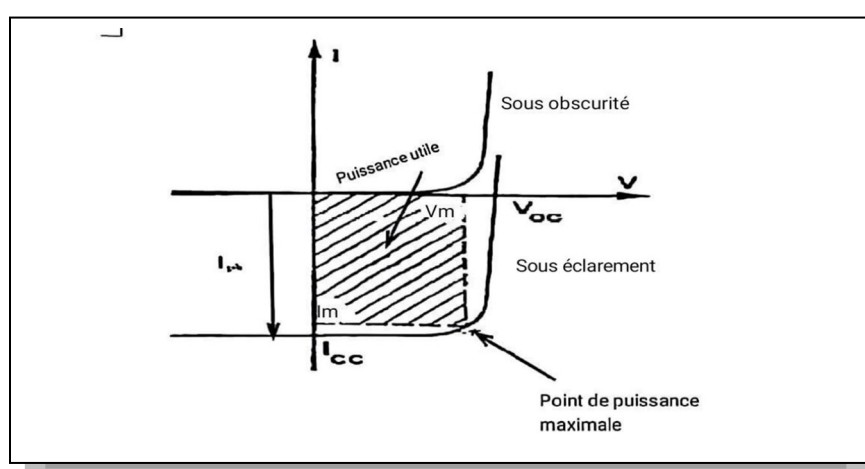


Figure 1.10 Courbe I-V d'une cellule PV avec et sans illumination

- **Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )** : varie de 0,3V à 0,7V, en fonction du matériau, de la température et de l'âge de la cellule photovoltaïque.
- **Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )** : varie principalement selon la dimension de la cellule (entre 5 et 8 Ampères pour le silicium cristallin), de la technologie et de l'intensité de la lumière.
- **Courant photonique ( $I_{ph}$  ou  $I_L$ )** : Sous illumination, les paires électron-trou créés dans le semi-conducteur, sont balayés par le champ électrique interne et produisent un courant  $I_L$ .
- **Point de puissance maximale (MPP)** : est le point de fonctionnement ( $V_{max}, I_{max}$ ) illustré dans la figure (1.10), à laquelle la puissance absorbée dans la charge résistive atteint son maximum [19] :

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (1.2)$$

- **Rendement** : La relation entre la puissance maximale d'une cellule photovoltaïque et la quantité de lumière qu'elle reçoit détermine ses performances. Cette luminosité est égale au produit solaire de la zone cellulaire [20].

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A_C * E} \tag{1.3}$$

- **Facteur de forme** est le rapport entre la tension du circuit ouvert  $V_{OC}$  et le produit du courant à court-circuit  $I_{SC}$  et le point de puissance le plus élevé que la cellule peut fournir dans des conditions d'éclairage à une certaine température [21] :

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{\eta \cdot A_C \cdot E}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \tag{1.4}$$

Une cellule solaire de qualité devrait avoir un facteur de forme de 0,75 à 0,85.

### 1-3-4. Facteurs affectant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

- **L'impact de l'exposition au soleil ou aux rayonnements**

Étant donné que l'énergie lumineuse est la source d'énergie pour la séparation d'électrons et de trous, il semble raisonnable qu'une augmentation de la lumière solaire  $E$  entraînerait également inévitablement une augmentation du nombre de paires d'électrons-trous séparées. En conséquence, le courant  $I_{ph}$  est proportionnel à la lumière du soleil.

$$I_{ph} \propto E \tag{1.5}$$

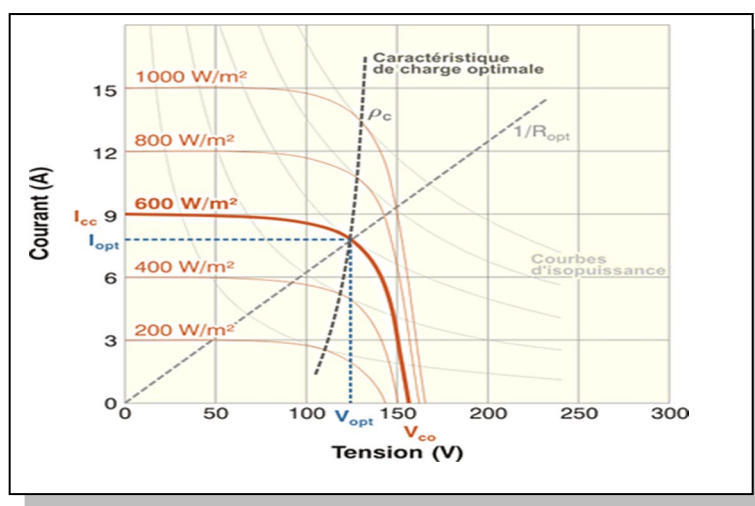


Figure 1. 11 L'impact de l'éclairage sur la courbe I-V d'un générateur PV

Le paramètre de température est critique et a une grande signification puisque le rayonnement solaire expose les cellules à la chaleur. En outre, une partie des rayonnements absorbés se

dissipe En tant que chaleur plutôt que d'être convertie en énergie électrique. En fait, la température de la cellule peut parfois grimper au-delà de 70°C vers midi. Étant donné une hausse considérable du courant direct de la diode, cet accroissement de la température provoquera une baisse de la bande de bande interdite, Cela se manifeste par une augmentation. modeste du courants et une réduction importante de la tension [22].

La courbe suivante montre comment le courant et la tension changent en fonction de la température de jonction de la cellule lorsque tous les autres facteurs externes restent constants.

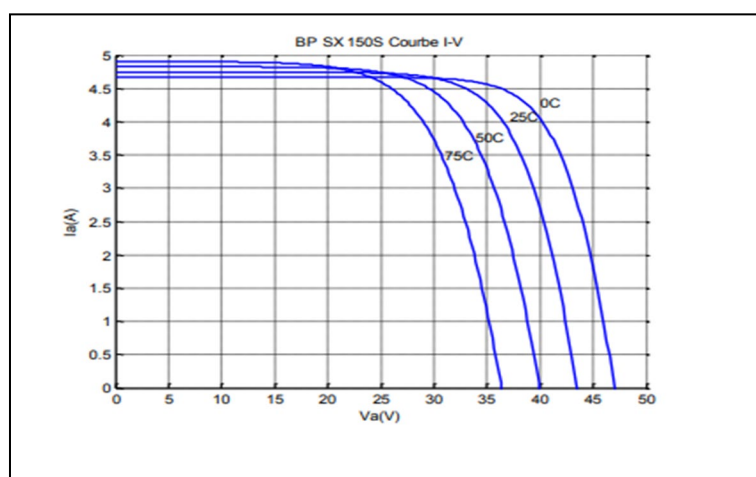


Figure 1. 12 La caractéristique (I-V) pour une température variable et un éclairement de 1Kw /m2

Ainsi, on a deux facteurs essentiels qui modifieront les propriétés d'un générateur photovoltaïque sont la température et l'éclairage. Par conséquent, lors de la configuration d'une installation photovoltaïque, ces deux facteurs doivent être soigneusement considérées.

## 1-2. Module PV

Selon le type de technologie utilisée, les cellules peuvent produire des tensions entre 0,5 et 1,5 V et des densités de courant entre 10 et 50 mA/cm<sup>2</sup>. En tant que tels, ils offrent relativement peu de puissance. Il est nécessaire de les relier en série ou en parallèle, par exemple, pour fournir une puissance et une tension utilisables compatibles avec la charge d'une batterie. Cet assemblage cellulaire doit également être protégé face à des éléments extérieurs tels que l'humidité et les variations de température. Les modules PV sont conçus pour résoudre ces problèmes en encapsulant de nombreuses cellules qui sont liées en série, soit en parallèle, soit les deux [23].

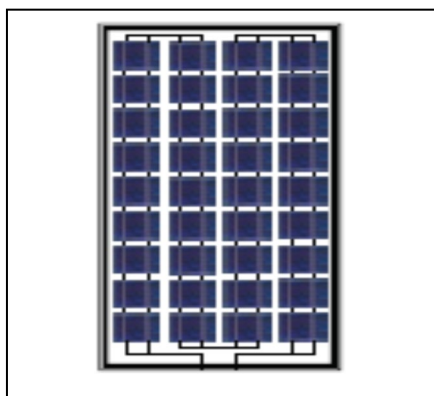


Figure 1.13 Module PV [25]

#### 1-4-1. Groupements en série

Dans un groupement en série, les cellules sont parcourues par le même courant, et la caractéristique globale de l'agencement en série est obtenue en additionnant les tensions à un courant spécifié. La caractéristique d'un regroupement de  $n_s$  cellules photovoltaïques identiques est illustrée dans la Figure ci-dessous :

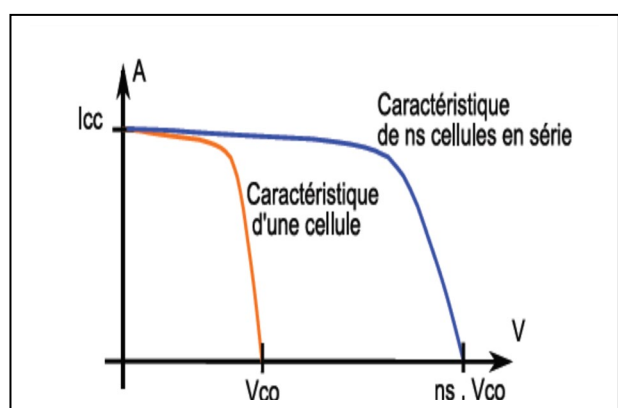


Figure 1.14 La courbe I-V pour un groupement série de mêmes cellules [27]

#### 1-4-2. Groupements en parallèle

Les caractéristiques du regroupement série et du groupement parallèle des cellules sont opposées. En conséquence, lorsque les cellules sont reliées en parallèle, elles éprouvent toutes la même tension, et la caractéristique globale de l'arrangement est déterminée par l'élévation des courants à une certaine tension.

La figure (1.14) illustre la caractéristique qui découle d'une mise en parallèle de cellules PV identiques.

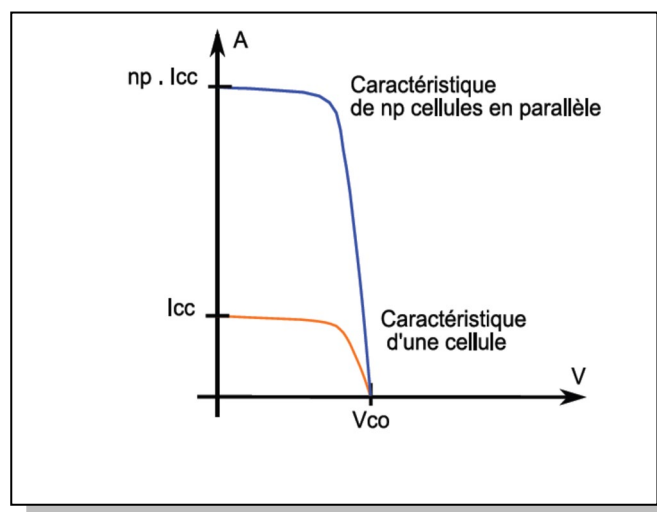


Figure 1. 15 La caractéristique I-V pour un groupement des cellules identiques en parallèle [24]

Pour résumer, afin d'identifier la caractéristique correspondante d'un groupe de cellules photovoltaïques :

- ✓ Il est nécessaire de positionner chaque cellule à une tension spécifique et de plonger ses courants pour fonctionner en parallèle.
- ✓ Cette fois, en série, nous devons nous aligner sur un certain courant et contrôler les tensions des nombreuses cellules.

Donc les formes de la tension ( $V_{mod}$ ) et du courant ( $I_{mod}$ ) du module PV sont :

$$V_{mod} = \sum V_{cel_{mod}} \quad (1.6)$$

$$I_{mod} = n \cdot I_{cel} \quad (1.7)$$

Où

$V_{cel}$  et  $I_{cel}$  Il s'agit respectivement de la tension et du courant d'une cellule photovoltaïque [24].

S'il y a des variations entre les cellules, la cellule plus faible exercera son influence sur l'ensemble du module, causant la performance de la dernière à souffrir. Ce comportement, par exemple, est observé lorsque le module est partiellement ombragé.

### 1-4-3 Protection des modules PV

Afin de maximiser l'efficacité d'un système solaire photovoltaïque, la protection électrique doit être assurée lors de la conception. Cela inclut la prévention des défaillances dommageables qui peuvent résulter de l'incapacité des cellules à fonctionner ensemble. Dans les systèmes solaires, deux formes de protection sont couramment employées à cet effet :

### ➤ Diode By-pass

Au sein d'un module photovoltaïque, où les cellules sont disposées en série, une cellule qui est ombragée ou recouverte éprouve une baisse du courant. Il empêche ainsi le courant généré par les autres cellules allumées de s'écouler. L'apparition d'un surchauffement qui peut entraîner la destruction de cette cellule "masquée" est causée par une augmentation de la tension à ses extrémités. Le terme "point chaud" se réfère à une telle cellule (Hot spot). Les cellules ombragées sont ensuite protégées par des diodes de by-pass ; en l'absence de ces diodes, le panneau présente le risque de lancer un incendie en raison de l'incapacité de la cellule chauffée à disperser la puissance à ses extrémités.

Une diode est positionnée à l'extrémité d'une série de cellules. Si l'ombrage se produit, la puissance passe à travers cette diode, Il est également appelé diode de by-pass, et le groupe de diodes est ensuite éliminé électriquement (Figure (1.16)). En faisant cela, les autres groupes de cellules éclairées retrouvent leur force. Bien qu'il soit souhaitable d'installer une diode de by-pass pour chaque cellule solaire, nous installons au lieu d'un diode pour chaque.

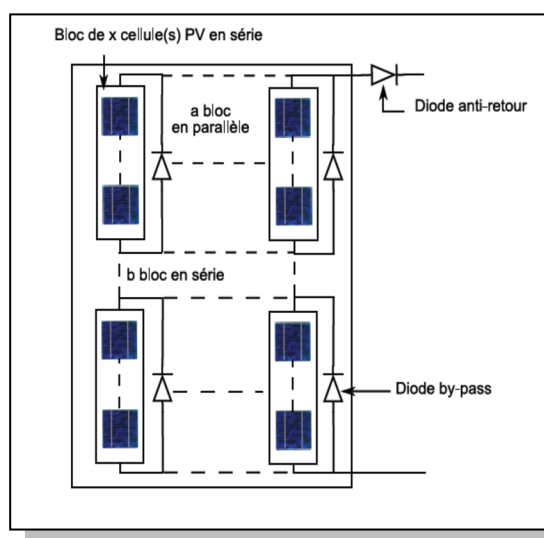


Figure 1. 16 Module PV avec une cellule ombragée

Un panneau photovoltaïque à 60 cellules relié en série avec un diode de by-pass pour chaque évolution de puissance pour 20 cellules est vu dans la Figure (1.17). Lorsqu'il y a une ombre partielle (20 cellules enlevées), deux courbes sont affichées ; la courbe bleue indique le soleil complet, et la corbeille rouge indique l'ombre partielle. Dans ce dernier cas, nous pouvons voir une baisse de puissance, mais le panneau le produit toujours en toute sécurité.

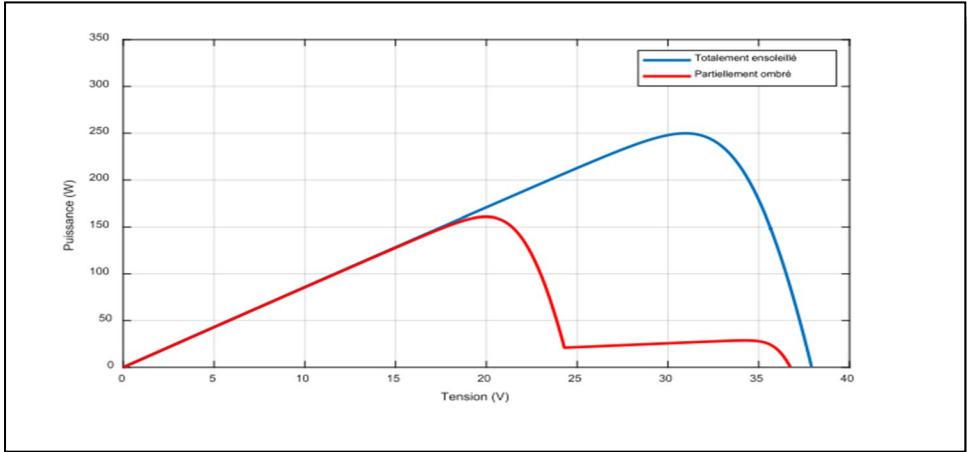


Figure 1.17. Caractéristique de puissance pour un l’ensoleillement total et de l’ombrage partiel

➤ **La diode Anti-retour**

Lorsque les panneaux sont reliés en parallèle les uns aux autres (pour empêcher l'un d'être chargé sur l'autre) ou lorsque le panneau est chargé par une batterie, la diode anti-retour (Figure 1.16) empêche le panneau de devenir un récepteur d'alimentation, par exemple, pendant la nuit [25].

**1-5. String PV**

Une chaîne connecte de plusieurs modules PV en série pour obtenir le niveau de tension requis par l'application est appelée un string. Les diodes anti-retour, ou diodes de protection, sont installées dans la chaîne (Figure 1.18), a l'intention d'empêcher la circulation du courant photovoltaïque en inverse [26]

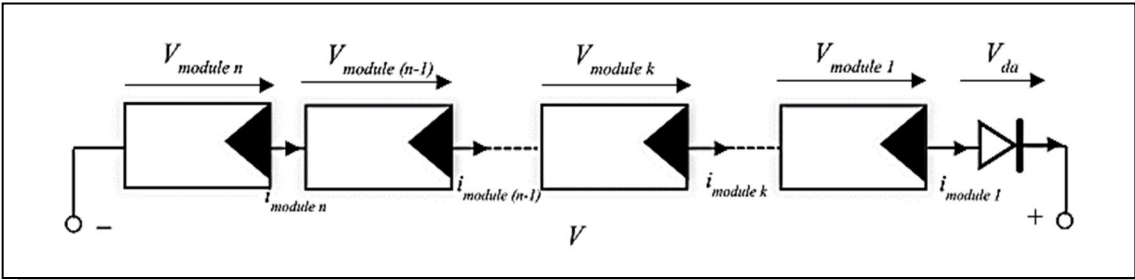


Figure 1. 18 String PV

## 1-6. Le panneau solaire

Pour créer un panneau solaire, les modules photovoltaïques doivent être reliés en série ou en parallèle afin de générer une quantité importante d'électricité. Ils sont construits et reliés électriquement.



Figure 1. 19 Panneau photovoltaïque

La consommation d'électricité dans tous les éléments du panneau solaire photovoltaïque est influencée par :

- ✚ Les exigences en électricité.
- ✚ Du poids du panneau.
- ✚ La luminosité du lieu d'utilisation.
- ✚ De la période d'emploi.

## 1-7. Le système PV

Un système photovoltaïque comprend le générateur mentionné ci-dessus, généralement associé à l'un ou plusieurs des composants suivants : un système de gestion électronique (qui est rare), un système d'orientation ou de suivi, un stockage, un transfert d'énergie, un moulage de courant, un convertisseur DC/AC, une charge pour courant continu à basse tension ou courant alternatif standard, et un dispositif de stockage pour atténuer la nature imprévisible de la source solaire.

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

### 1-7-1. Système photovoltaïque connecté au réseau

L'orientation vers la décentralisation du réseau électrique a abouti à l'installation d'équipements de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (Figure 1.20). La production d'énergie se produit plus près des sites de consommation. Les systèmes connectés au réseau nient la nécessité d'élargir la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il génère sa propre énergie et envoie tout excès au réseau, où il se recharge au besoin. En faisant cela, il n'est plus nécessaire d'acheter ou d'entretenir une batterie. Ces systèmes peuvent toujours être utilisés comme source d'alimentation de secours en cas d'interruption du réseau [27].

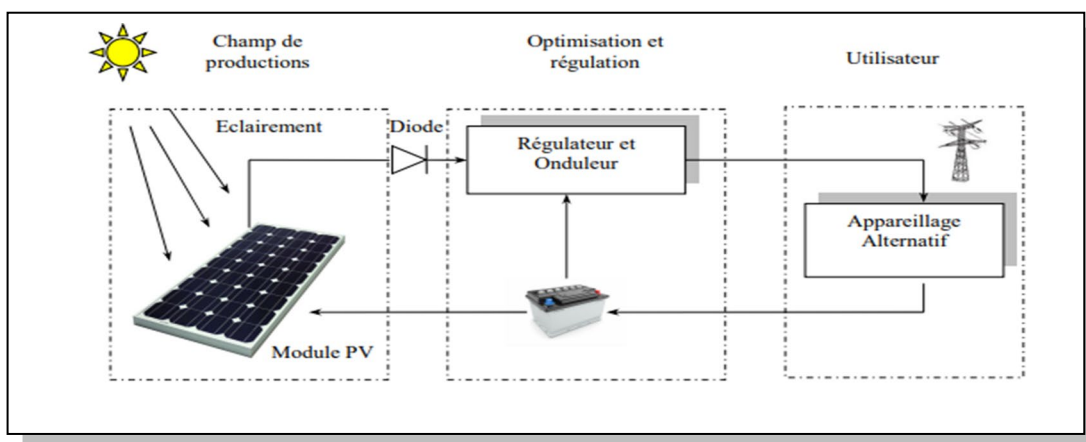


Figure 1. 20 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

### 1-7-2. Système autonome photovoltaïque

L'installation de ces systèmes photovoltaïques assure un fonctionnement indépendant sans avoir besoin de sources d'énergie externes. Ces systèmes sont souvent utilisés à des endroits éloignés au sein du réseau [28]. Ils sont plutôt équipés de batteries qui accumulent l'électricité économisée durant l'éclairement du jour produit par les modules et stocké en cas de besoin.

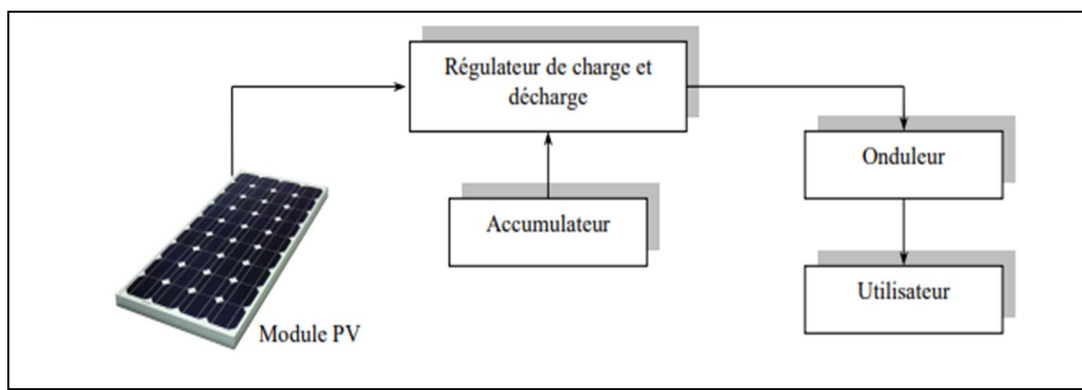


Figure 1. 21 Système photovoltaïque autonome.

### 1-7-3. Système autonome hybride

L'hybride est un système électrique qui intègre plusieurs sources d'énergie, dont au moins l'une est renouvelable, ainsi qu'un groupe électrogène. Cela représente une alternative intéressante aux systèmes conventionnels pour maintenir une alimentation ininterrompue lors de l'alimentation d'une charge. Un système hybride d'énergie peut fonctionner de manière autonome ou être connecté au réseau. Dans le cas d'une application autonome, le système doit avoir une quantité suffisante de stockage pour gérer les fluctuations de puissance des sources d'énergie alternatives impliquées. Un tel système peut être comparé à un micro-réseau.

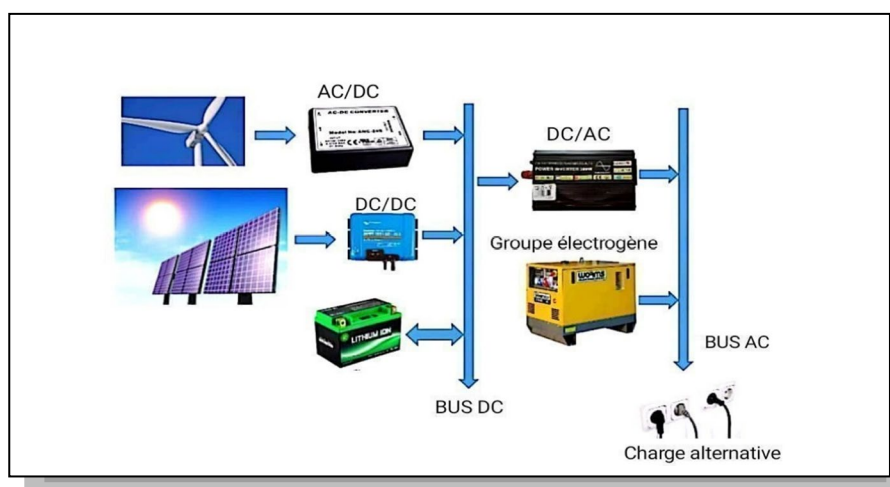


Figure 1. 22 Système photovoltaïque autonome hybride

### 1-8. Stockage d'énergie

La conservation de l'énergie implique de la stocker un certain niveau d'énergie pour une utilisation future, afin de répondre à la demande énergétique lorsque la production d'énergie est faible ou inexistante. Il permet de lisser les fluctuations entre la disponibilité et la demande d'énergie, assurant ainsi une alimentation régulière et stable des consommateurs [29]. Par extension, le stockage d'énergie englobe également la conservation de la matière contenant l'énergie, comme les batteries, les réservoirs d'hydrogène, les volants d'inertie, les supercondensateurs, etc. Ces dispositifs sont utilisés pour stocker et de libérer l'énergie de manière contrôlée, Selon les exigences du système ou des consommateurs.

Il existe deux types d'applications de stockage de l'énergie :

- ✚ Stockage stationnaire (ou fixe) : Cela fait référence au stockage d'énergie dans des installations fixes, telles que les parcs de batteries, les systèmes de stockage d'énergie associés aux réseaux électriques, les réservoirs de stockage d'hydrogène pour les

centrales électriques, etc. Ces systèmes sont utilisés pour stabiliser le réseau, stocker l'énergie renouvelable excédentaire et garantir une alimentation continue en cas de défaillance du réseau [30].

- ✚ Stockage embarqué (ou mobile) : Cette catégorie concerne le stockage d'énergie dans des applications mobiles, telles que les batteries des véhicules électriques, les réservoirs d'hydrogène pour les véhicules à hydrogène, etc. Ces systèmes permettent de fournir de l'énergie aux véhicules pour leur fonctionnement, ce qui contribue à la transition vers une mobilité plus durable et à faible émission de carbone [31].

### 1-8-1. Stockage et l'énergie renouvelable

Un rôle est joué par le stockage d'énergie crucial dans l'intégration efficace et fiable des énergies renouvelables dans les systèmes électriques. Les différentes formes d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire et éolienne, sont intermittentes par nature, c'est-à-dire qu'elles dépendent des conditions météorologiques et peuvent être imprévisibles. Le stockage d'énergie permet de compenser cette intermittence en stockant l'énergie produite pendant les périodes de surproduction et en la libérant lorsque la production est insuffisante [32].

Les rôles essentiels du stockage d'énergie dans le contexte des énergies alternatives sont :

- *Gestion de la demande* : Le stockage d'énergie permet de lisser les variations de la demande en stockant l'énergie excédentaire lorsque la fabrication d'énergie renouvelable est élevée et en la libérant lorsque la demande est élevée ou lorsque la production renouvelable est faible.
- *Gestion de l'intermittence* : Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, peuvent varier considérablement en fonction des conditions météorologiques. Le stockage permet de compenser cette variabilité et de fournir une alimentation stable et fiable.
- *Intégration à grande échelle* : L'intégration à grande échelle des énergies renouvelables dans le réseau électrique est facilitée par le stockage de l'énergie, ce qui permet de fournir de l'énergie lorsque la demande dépasse la production et de la maintenir lorsque la production dépassera la demande.
- *Réduction des émissions de carbone* : En permettant une meilleure utilisation des énergies renouvelables et en évitant le recours à des sources d'énergie fossile d'appoint pour combler les lacunes de production, le stockage d'énergie contribue à diminuer les

émissions de gaz à effet de serre et à encourager une transition énergétique plus propre et durable.

- *Soutien à la stabilité du réseau* : Le stockage d'énergie peut également fournir des services de régulation de la fréquence et de l'équilibre de charge, contribuant ainsi à maintenir la stabilité électrique du réseau.

L'emploi de la solution de stockage d'énergie adaptées peut aider à surmonter les défis liés à l'intermittence des énergies renouvelables et à promouvoir une transition énergétique plus durable et résiliente. Il est essentiel de continuer à suivre les progrès technologiques dans le secteur du stockage d'énergie pour améliorer encore son efficacité et réduire ses coûts, ce qui favorisera davantage l'incorporation des énergies renouvelables dans le cadre de nos systèmes des énergies [33].

### 1-8-2. Technologie de stockage

On a plusieurs technologies de stockage d'énergie [figure \(1.23\)](#) qui peuvent être utilisées en combinaison avec les énergies renouvelables. Certaines des technologies courantes de stockage d'énergie comprennent les batteries (comme les batteries lithium-ion), le stockage thermique, les volants d'inertie, le stockage hydraulique par pompage, le stockage d'hydrogène et d'autres solutions de stockage à l'échelle du réseau [34]

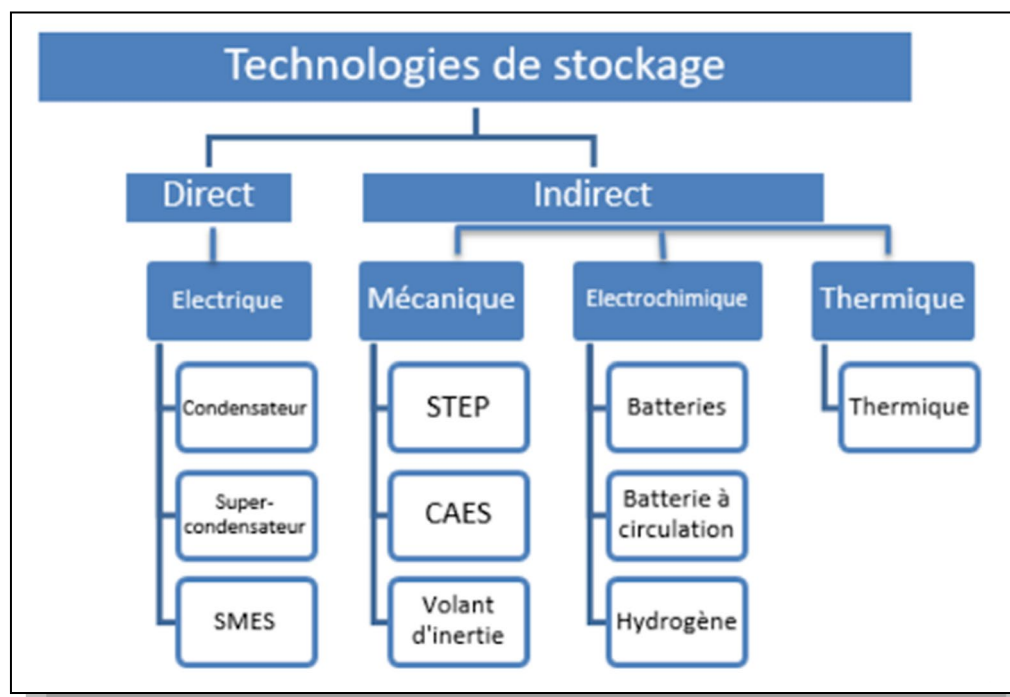
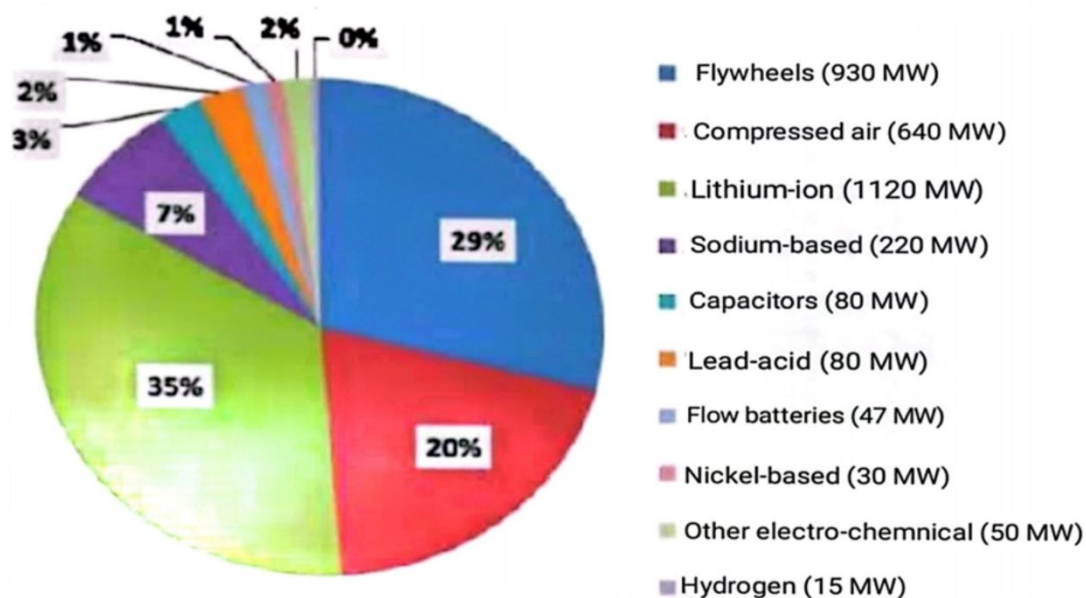


Figure 1.23 Différentes technologies de stockage d'énergie

Où :

- ✓ SMES : Stockage d'énergie magnétique supraconductrice
- ✓ STEP : Station de Transfert d'Énergie par Pompage
- ✓ CAES : Stockage d'énergie par air comprimé

Les parts de stockage mondial pour les différentes technologies sont illustrées sur la [Figure \(1.24\)](#). Les méthodes de stockage les plus avancées dans le stockage électromécanique sont les roues d'air comprimé et d'inertie [35]. Avec 1,12 GW en usage, les batteries lithium-ion représentent la majeure partie de la puissance installée.



**Figure 1.24** Le stockage d'énergie en MW mondiale de plusieurs technologies de stockage jusqu'en 2017

À la lumière de toutes ces comparaisons, il est évident que le stockage par batterie lithium-ion est la solution la plus appropriée pour notre système. Cette technologie offre une densité énergétique élevée ainsi que des performances exceptionnelles par rapport aux autres types de compositions chimiques [36].

### 1-8-3. Les batteries

Les batteries, sont des dispositifs de stockage d'énergie électrique qui fonctionnent sur la base de réactions électrochimiques réversibles. Elles sont utilisées dans diverses applications, allant des petits appareils électroniques aux systèmes de stockage énergétique à grande échelle pour les énergies renouvelables. Le fonctionnement des accumulateurs électrochimiques repose sur des réactions redox (réduction-oxydation) qui se produisent entre les matériaux électrodes et les électrolytes. Les batteries se composent généralement de plusieurs composants [37] :

- ✓ **Électrodes** : Les électrodes sont les parties de la batterie où se produisent les réactions redox. Il y a deux types d'électrodes : l'anode, où se produisent l'oxydation (libération d'électrons), et la cathode, où la réduction se produit. (Captation d'électrons). Les matériaux des électrodes peuvent différer selon le type de batterie.
- ✓ **Électrolyte** : L'électrolyte est un matériau conducteur d'ions qui permet aux charges d'ions de se déplacer entre les électrodes pendant les réactions redox. L'électrolyte peut être solide, liquide ou sous forme de gel, selon le type de batterie.
- ✓ **Séparateur** : Le séparateur est une membrane poreuse située entre les électrodes pour empêcher un court-circuit électrique tout en autorisant le déplacement des ions entre les électrodes.
- ✓ **Boîtier** : Le boîtier est l'enveloppe externe de la batterie, qui contient tous les composants internes et assure l'isolation électrique.

La [figure \(1.25\)](#) montre le fonctionnement d'une batterie

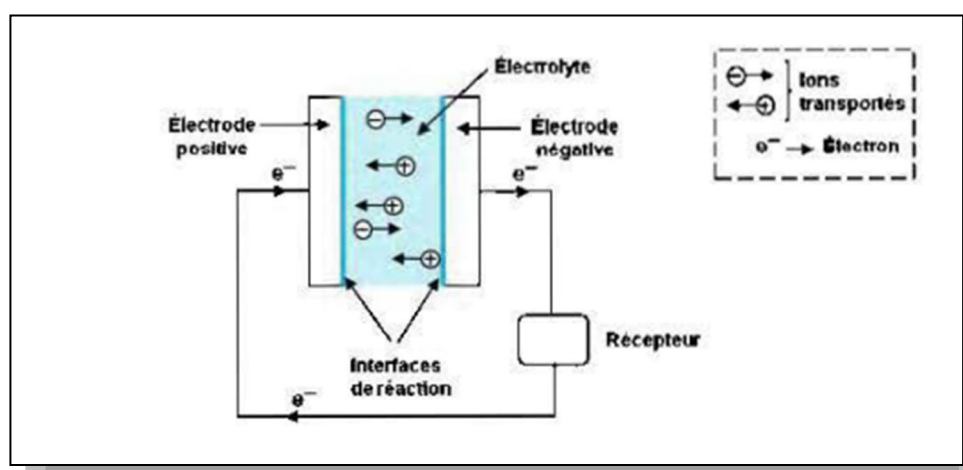


Figure 1. 25 Principe de fonctionnement d'une batterie

Les spécificités d'une batterie, sont les suivantes :

- *Capacité en Ampère-heure (Ah)* : La quantité d'énergie qu'une batterie peut fournir et stocker est appelée sa capacité. Il montre combien d'ampères peut être livré sur une certaine quantité de temps et est mesuré en ampères-heures (Ah). La capacité de la batterie contrôle la quantité d'énergie qu'elle peut contenir et libérer.
- *Facteurs influençant la capacité* : Les taux de charge et de décharge ainsi que la température sont des éléments susceptibles d'influencer la capacité d'une batterie. Les variations dans ces facteurs peuvent entraîner des variations dans la capacité effective de la batterie.
- *Durée de vie* : Le nombre de cycles complets de charge et de décharge qu'une batterie peut supporter avant que ses caractéristiques ne se dégradent au point qu'elle est rendue inutilisable est appelé sa durée de vie. Le nombre de cycles ou d'années est utilisé pour décrire cela.
- *Profondeur de décharge* : est utilisé pour décrire la quantité de capacité de la batterie utilisée dans un cycle de recharge et de décharge. Les batteries à cycle profond peuvent tolérer des taux de décharge plus élevés que les batteries minces, qui sont destinées à des décharges plus légères.
- *Tension d'utilisation* : Correspond à la tension à laquelle l'énergie est conservée dans la batterie est restituée lorsqu'elle est utilisée pour alimenter un appareil ou un système.
- *Rendement* : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par la batterie et l'énergie fournie à la batterie lors de la charge. Donc Un rendement élevé indique une efficacité énergétique élevée.
- *Taux d'autodécharge* : mesure la diminution des compétences de la batterie lorsqu'elle est laissée inutilisée pendant un certain temps. Les batteries avec un taux d'autodécharge plus faible conservent leur charge plus longtemps lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

Il existe différents types d'accumulateurs électrochimiques, chacun avec des propriétés spécifiques adaptées à différentes applications. Les différents modèles de batteries les plus fréquents :

- ✚ **Batteries au plomb-acide** : Utilisées couramment dans les véhicules automobiles et les systèmes de secours, elles offrent une bonne fiabilité et un coût relativement faible.
- ✚ **Batteries lithium-ion (Li-ion)** : Souvent utilisées dans les appareils électroniques, les voitures électriques et les systèmes de stockage d'énergie dans les appartements

et commerciaux. Elles offrent une excellente densité d'énergie et une faible autodécharge.

- ✚ **Batteries nickel-cadmium (Ni-Cd)** : Principalement utilisées dans les applications nécessitant une longue durée de vie, une haute résistance aux températures extrêmes et une capacité de charge et de décharge rapide.
- ✚ **Batteries nickel-métal-hydrure (Ni-MH)** : Utilisées dans des applications similaires aux batteries Ni-Cd, mais Elles accordent davantage d'importance à l'environnement car elles n'utilisent pas de cadmium.
- ✚ **Batteries au sodium-ion (Na-ion)** : En développement pour des applications de stockage d'énergie à grande échelle, elles utilisent le sodium comme matériau actif au lieu du lithium, ce qui les rend potentiellement moins coûteuses.

Chaque type de batterie a ses avantages et ses inconvénients en termes de densité d'énergie, de puissance, de durée de vie, de coût et de durabilité. Le choix de la technologie dépendra de l'application spécifique et des critères importants, tels que la puissance requise, la durée de stockage, l'efficacité et le coût en capital [36]. Le développement continu des batteries vise à améliorer leurs performances, à réduire leur coût et à promouvoir leur utilisation dans un large éventail d'applications, contribuant ainsi à la transition vers une société plus durable et économe en énergie.

## 1-9 L'installation de panneaux solaires : les bénéfices et les inconvénients

### 1-9-1. Les bénéfices [38]

- Premièrement, grande fiabilité. Parce qu'il n'y a pas de composants mobiles dans l'installation, il est approprié pour les emplacements éloignés. C'est la raison pour laquelle il est utilisé à bord d'un vaisseau spatial.
- La conception modulaire des panneaux photovoltaïques permet une installation facile et flexible pour répondre à différentes exigences énergétiques. Les systèmes avec des puissances allant de milliwatts à mégawatts peuvent être évolués.
- Parce qu'il nécessite moins d'entretien et ne nécessite pas d'essence ou de travailleurs hautement qualifiés pour le transport, ses coûts d'exploitation sont assez bon marché.
- La production complète de la technologie photovoltaïque est silencieuse, non polluante, et n'affecte pas l'environnement.

### 1-9-2. les inconvénients [39]

- La production de modules solaires est un processus de haute technologie qui nécessite des investissements financiers considérables.
- Le rendement réel de conversion du module est modeste, allant de 10% à 15%, alors que la limite théorique pour une cellule est de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne peuvent concurrencer les générateurs diesel que dans les régions reculées avec des besoins énergétiques minimales.

Le fonctionnement des cellules lui-même est responsable de la faible efficacité des panneaux solaires. Un électron ne peut être déplacé que par rayonnement avec une énergie au moins équivalente à un électron-volt. Les événements moins énergétiques ne seront pas tous transformés en électricité. Dans une veine similaire, les rayons de lumière ayant une énergie supérieure à 1 eV se disperseront sous forme de chaleur après avoir perdu cette énergie. Dépend du climat. Le coût du générateur augmente lorsqu'un stockage d'énergie chimique, comme le stockage des batteries, est nécessaire. Le stockage de l'énergie électrique pose encore beaucoup de problèmes.

## **1-10. Conclusion**

Ce chapitre a exploré en profondeur les différentes facettes des systèmes d'alimentation à énergie renouvelable, avec un accent particulier sur l'électricité photovoltaïque. Nous avons abordé le potentiel solaire en Algérie, les projets en cours, ainsi que les défis et opportunités liés à l'exploitation de cette source d'énergie. Bien que les technologies photovoltaïques offrent de nombreux avantages, tels que la fiabilité et la modularité, elles sont également confrontées à des limitations notables, notamment en termes de rendement et de coûts initiaux élevés. Ces considérations soulignent la nécessité de poursuivre les recherches pour améliorer l'efficacité et la viabilité économique des systèmes photovoltaïques. La transition vers une énergie plus durable dépendra de notre capacité à surmonter ces obstacles et à tirer pleinement parti du potentiel offert par les ressources renouvelables.

## 1-11. Bibliographies

- [1] R. A. M. Lameirinhas, “A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications Ricardo,” pp. 1–44, 2022.
- [2] T. Belbacem, “Machines Electriques Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d’Energie Electrique,” Batna, Ben Boulaid, 2018.
- [3] A. B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, and Y. Kitamura, “A review on the renewable energy development in Algeria : Current perspective , energy scenario and sustainability issues,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4445–4460, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.04.031.
- [4] B. K. Eddine, “Amélioration des rendements des cellules photovoltaïques à filière silicium,” Univ Oran-1, 2021.
- [5] J. F. TITRE, “Les recherches d ’ Edmond Becquerel sur la nature de la lumiere entre 1839 et 1843 , histoire d ’ une interaction r ’ eussie entre science et photographie To cite this version :,”l’université clude bernard-lyon 1, 2005.
- [6] A. B. Arons and M. B. Peppard, “Einstein ’ s Proposal of the Photon Concept — a Translation of the Annalen der Physik Paper of 1905,” vol. 367, no. 1965, 2005, doi: 10.1119/1.1971542.
- [7] T. Nacer, “Etude de l’impact des systèmes photovoltaïques raccordes au réseau électrique BT sur le bilan électrique des fermes agricoles ,” université de blida 1 Faculté de Technologie Département d’Electronique, 2017.
- [8] L. Hernández-callejo, S. Gallardo-saavedra, and V. Alonso-gómez, “A review of photovoltaic systems : Design , operation and maintenance,” *Sol. Energy*, vol. 188, no. March, pp. 426–440, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.017.
- [9] P. Rawal and S. K. Singh, “Improving the Efficiency of Solar Photovoltaic in Generation,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 2008, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- [10] S. Aboujji, “Électroluminescence en avalanche des jonctions p-n B base de silicium et d’arséniure de gallium , Sidi Aboujja,” université de lorraine, 2000.
- [11] Y. Liu, Y. Li, Y. Wu, G. Yang, and L. Mazzarella, “High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells : Materials , Devices and Applications,” pp. 1–116, 2020.
- [12] J. Muller, “Simulation , fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités,” L’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [13] A. R. Jordehi, “Parameter estimation of solar photovoltaic ( PV ) cells : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 354–371, 2016, doi:

- 10.1016/j.rser.2016.03.049.
- [14] M. Salim, “ Contribution a l'optimisation des installations photovoltaïque par des commandes intelligentes,” Université D’Adrar.
- [15] C. Wang and Y. Lu, “Solar Photovoltaic,” p. 35, 2016.
- [16] N. Houcine, “Etude de gestion d’une mini-centrale solaire et mise au point d’un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l’énergie électrique,” Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 2016.
- [17] P. K. Nayak, S. Mahesh, H. J. Snaith, and D. Cahen, “Photovoltaic Solar Cell Technologies : Bounds and Challenges Introduction :,” *Nat. Rev. Mater.*, vol. 269–285, 2019.
- [18] D. BENATIALLAH, “Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d’information géographique pour le sud d’Algérie,” Université D’Adrar, 2018.
- [19] F. M. González-longatt, “Model of Photovoltaic Module in Matlab TM,” pp. 1–5, 2005.
- [20] R. Couderc, “Étude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration,” L’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2015.
- [21] D. Diop et al., “Influence of Dust Deposition on the Electrical Parameters of Silicon-Based Solar Panels Installed in Senegal ( Dakar Region ),” pp. 174–189, 2021, doi: 10.4236/epe.2021.135012.
- [22] S. Abouda, “Contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage,” l’Université de Reims Champagne-Ardenne et de l’Université de Sfax, 2015.
- [23] Thomas Mambrini, “Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d’implantation et en fonction des différentes technologies,” p. 179, 2014, [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01164783%0Ahttps://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01164783/document>
- [24] S. Vighetti, “Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion Stéphane Vighetti To cite this version : HAL Id : tel-00525110 Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau ;,” 2010.
- [25] S. Hadji, “Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque,” Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018.
- [26] M. S. Fadhel, “Efficacité énergétique et surveillance d ’ un microgrid à courant continu

- alimenté par des panneaux photovoltaïques,” 2019.
- [27] B. L. Sofia, “Cours\_Energie solaire,” pp. 1–62, 2015.
- [28] L. Zhang, “A study of solar photovoltaic systems and its applications in modern power systems,” p. 133, 2019.
- [29] D. M. Rosewater, D. A. Copp, T. A. Nguyen, R. H. Byrne, and S. Santoso, “Battery Energy Storage Models for Optimal Control,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 178357–178391, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957698.
- [30] B. Faessler, “Stationary, Second Use Battery Energy Storage Systems and Their Applications: A Research Review,” *Energies*, vol. 14, no. 8. 2021. doi: 10.3390/en14082335.
- [31] S. Englberger, K. Abo Gamra, B. Tepe, M. Schreiber, A. Jossen, and H. Hesse, “Electric vehicle multi-use: Optimizing multiple value streams using mobile storage systems in a vehicle-to-grid context,” *Appl. Energy*, vol. 304, p. 117862, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117862>.
- [32] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraouli, “Energy storage: Applications and challenges,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 120, pp. 59–80, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.015>.
- [33] Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas, and M. Kay, “Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, pp. 109–125, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047>.
- [34] A. G. Olabi, “Renewable energy and energy storage systems,” *Energy*, vol. 136, pp. 1–6, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.054>.
- [35] M. Aneke and M. Wang, “Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 350–377, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>.
- [36] A. G. Olabi and M. A. Abdelkareem, “Energy storage systems towards 2050,” *Energy*, vol. 219, p. 119634, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119634>.
- [37] J. B. Goodenough, “Energy storage materials: A perspective,” *Energy Storage Mater.*, vol. 1, pp. 158–161, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2015.07.001>.
- [38] T. J. Turakul, “The Importance of Alternative Solar Energy Sources and the Advantages and Disadvantages of Using Solar Panels in this Process,” vol. 3, no. 4, pp. 60–64, 2019.
- [39] D. Maradin, “Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization,”

International Journal of Energy Economics and Policy, 2021, doi:  
10.32479/ijeep.11027.This.

## Chapitre 2

# Algorithmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT)

### Table des matières

2-1. Introduction .....	43
2-2. Définition et principe de fonctionnement de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque : .....	43
2-3. Recherche du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque .....	46
2-3-1. Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance .....	46
2-3-1-1. Les méthodes indirectes.....	47
2-3-1-1-a. La méthode d'ajustement de courbe.....	47
2-3-1-1-b. La méthode « look-up table ».....	48
2-3-1-1-c. La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....	48
2-3-1-1-d. La méthode de court-circuit .....	49
2-3-1-2. Les méthodes directes .....	49
2-3-1-2-a. La méthode de différenciation.....	50
2-3-1-2-b. La méthode Perturb & Observe (P&O).....	50
2-3-1-2-c. L'incrément de conductance.....	56
2-3-2. Contrôleur MPPT flou.....	58
2-3-2-1. La fuzzification.....	58
2-3-2-2. L'inférence.....	60
2-3-2-3. La défuzzification .....	63
2-4. Critères d'évaluation d'une commande MPPT .....	64
2-4-1. Simplicité et Coût .....	64
2-4-2. Réponse dynamique.....	65
2-4-3. Flexibilité.....	65
2-4-4. Compétitivité sur une large gamme de puissance .....	65
2-5. Le rendement du MPPT.....	65
2-6. Conclusion.....	67
2-7. Bibliographies.....	68

## Liste des figures

Figure 2. 1 Chaîne de conversion photovoltaïque .....	44
Figure 2. 2 Le principe d'un contrôleur MPPT .....	44
Figure 2. 3 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 2. 4 Caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ d'un panneau photovoltaïque.....	51
Figure 2. 5 Algorithme type de la méthode P&O.....	53
Figure 2. 6 Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation .....	54
Figure 2. 7 Caractéristique (P-V) d'une cellule photovoltaïque et mise en évidence de $dp/dv$ .....	56
Figure 2. 8 Algorithme de l'incrément de conductance .....	57
Figure 2. 9 Principe du Contrôleur flou.....	58
Figure 2. 10 Fonction d'appartenance des variables d'entrée (a) et (b) et de sortie (c) .....	60
Figure 2. 11 Principe de la MPPT floue .....	62
Figure 2. 12 Organigramme simplifié de FLC .....	64

## Liste des tableaux

Tableau 2. 1 Matrice d'inférences .....	61
Tableau 2. 2 Interprétation des opérateurs logiques .....	63

## 2-1. Introduction

La courbe de la puissance d'une cellule solaire elle 'est non linéaire et en fonction de l'éclairage et de température. En conséquence, une disparité significative entre la puissance potentielle et la force transmise pendant la consommation est démontrée par la connexion directe entre la source et la charge. Maximum Power Point Tracking (MPPT) est conçu pour fournir la meilleure puissance de sortie et une meilleure relation entre le 'GPV' et une charge. Le générateur sera forcé de fonctionner à son point de puissance maximal (MPP), ce qui améliorera les performances du système dans son ensemble. En fait, le point de fonctionnement du GPV lorsqu'il est couplé à une charge est établi par la rencontre entre sa courbe électrique (I-V) et celle de sa charge. Le fonctionnement de ce point fluctue constamment en réponse à des changements de charge et/ou de conditions d'exploitation. Pour cette raison, le MPP n'est souvent pas utilisé, et la charge reçoit moins de puissance que ce qui est autorisé [1].

Le but de ce chapitre consiste à exposer une solution visant à améliorer les techniques de commande MPPT. Pour ce faire, nous commencerons par exposer une synthèse des algorithmes MPPT classiques les plus utilisés, ainsi que de l'algorithme MPPT basé sur la logique floue. Nous avons ensuite évalué les performances de cet algorithme à l'aide une comparaison avec les performances des algorithmes classiques dans des conditions climatiques défavorables.

## 2-2. Définition et principe de fonctionnement de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque :

Le chapitre 1 présente une synthèse des divers comportements d'un générateur photovoltaïque. Il apparaît que, dans la plupart des situations, cette source ne convient pas adéquatement à une charge. En règle générale, un étage d'adaptation est constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques qui convertissent les grandeurs électriques continues en grandeurs adaptées à la charge. Une ou plusieurs lois de commande peuvent gérer cet étage pour optimiser la puissance générée par le générateur, contrôler la charge ou encore garantir diverses fonctions de protection. Afin que cet étage d'adaptation remplisse pleinement son rôle et soit visible par le système, il est nécessaire qu'il ait de faibles pertes de conversion [2].

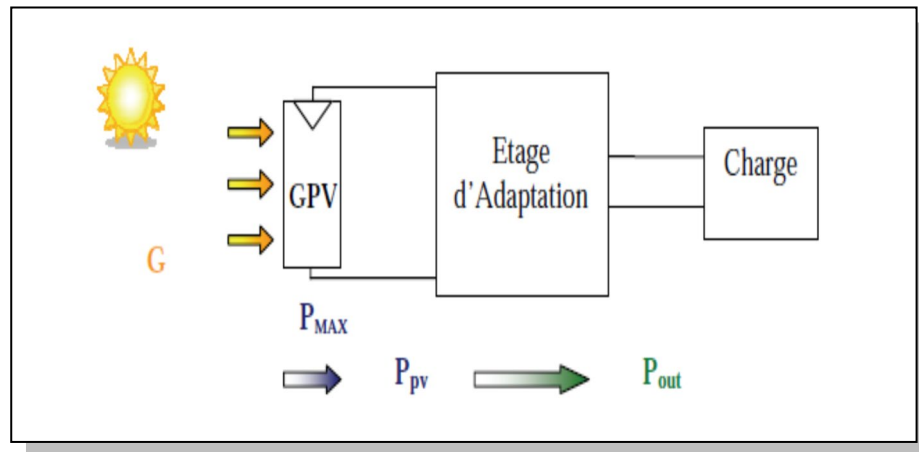


Figure 2. 1 Chaîne de conversion solaire photovoltaïque

On peut définir le MPPT d'un système solaire photovoltaïque comme une commande qui modifie le rapport cyclique d'un convertisseur statique afin que la puissance fournie par le GPV, est la puissance  $P_{max}$  disponible à ses terminaux [3].

Un contrôleur MPPT repose généralement sur le "coude" de la caractéristique P-V. Cette méthode est basée sur le tâtonnement, comme illustré dans la figure (2.2). À un point de la courbe ( $X_1$ ), on se place et on observe si la valeur du point suivant est plus élevée ou non. Dans le cas contraire, on se dirige vers le point suivant ( $X_2$ ), jusqu'à ce que le terme suivant ( $X_n$ ) soit inférieur au précédent ( $X_{n-1}$ ). Au cours de cette période, un intervalle de valeur est établi entre chaque point inférieur et on recommence à partir de ( $X_{n-1}$ ), jusqu'à ce que le MPP soit atteint.

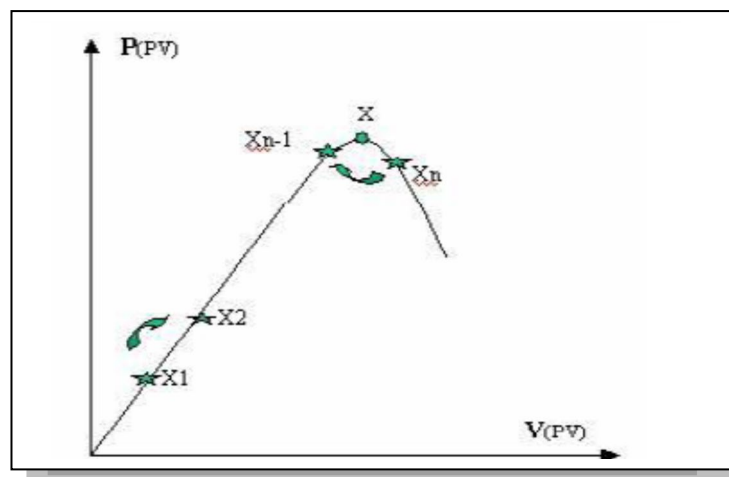


Figure 2. 2 Le principe d'un contrôleur MPPT

Le contrôle dans les régulateurs linéaires repose sur la régulation qui utilise les variables de sortie et d'entrée, notées respectivement comme  $X_s$  et  $X_e$ . Pour la majorité

des systèmes de régulation, une seule mesure est généralement suffisante pour déterminer la relation entre  $X_s$  et  $X_e$ . Cependant, cette condition n'est pas suffisante dans les systèmes où cette relation varie dans le temps.

Lorsque le déplacement de  $X_e$  est considéré, cela compris comme fluctuation dans la régulation du maximum. Donc, si la dérivée de  $X_s$  indique que  $X_s$  s'éloigne du maximum, le contrôleur modifie la direction de la régulation pour ramener  $X_e$  vers le maximum. Cette adaptation constante de  $X_e$  entraîne des oscillations autour de la valeur maximale. Les trois scénarios de perturbations sont présentés par La [figure \(2.3\)](#) :

Selon le changement, le point de fonctionnement passe du point de puissance maximale  $PPM_1$  à point  $P_1$  qui peut être éloigné plus ou moins de l'optimum. En cas d'éclairement variable (scénario (a)), il n'y a qu'à ajuster le rapport cyclique pour atteindre le nouveau point de  $PPM_2$ . Lorsqu'il y a une fluctuation de la charge (scenario (b)), le point d'exploitation change également et peut revenir à un nouvel emplacement idéal à la suite de l'action du contrôleur. Les variations de la température de fonctionnement du générateur solaire peuvent entraîner une situation de fluctuation du point d'exploitation final, mais moins dramatique (scenario (c)). La dernière situation n'a pas les mêmes limites de temps que les deux premiers exemples, même si des modifications sont toujours nécessaires au niveau de la commande [4].

En résumé, le suivi du (PPM) est effectué par une technique spécifique appelée Maximum Power Point Tracking (MPPT). Cette commande agit principalement sur le rapport cyclique du convertisseur statique, afin de rechercher et atteindre le PPM du générateur photovoltaïque.

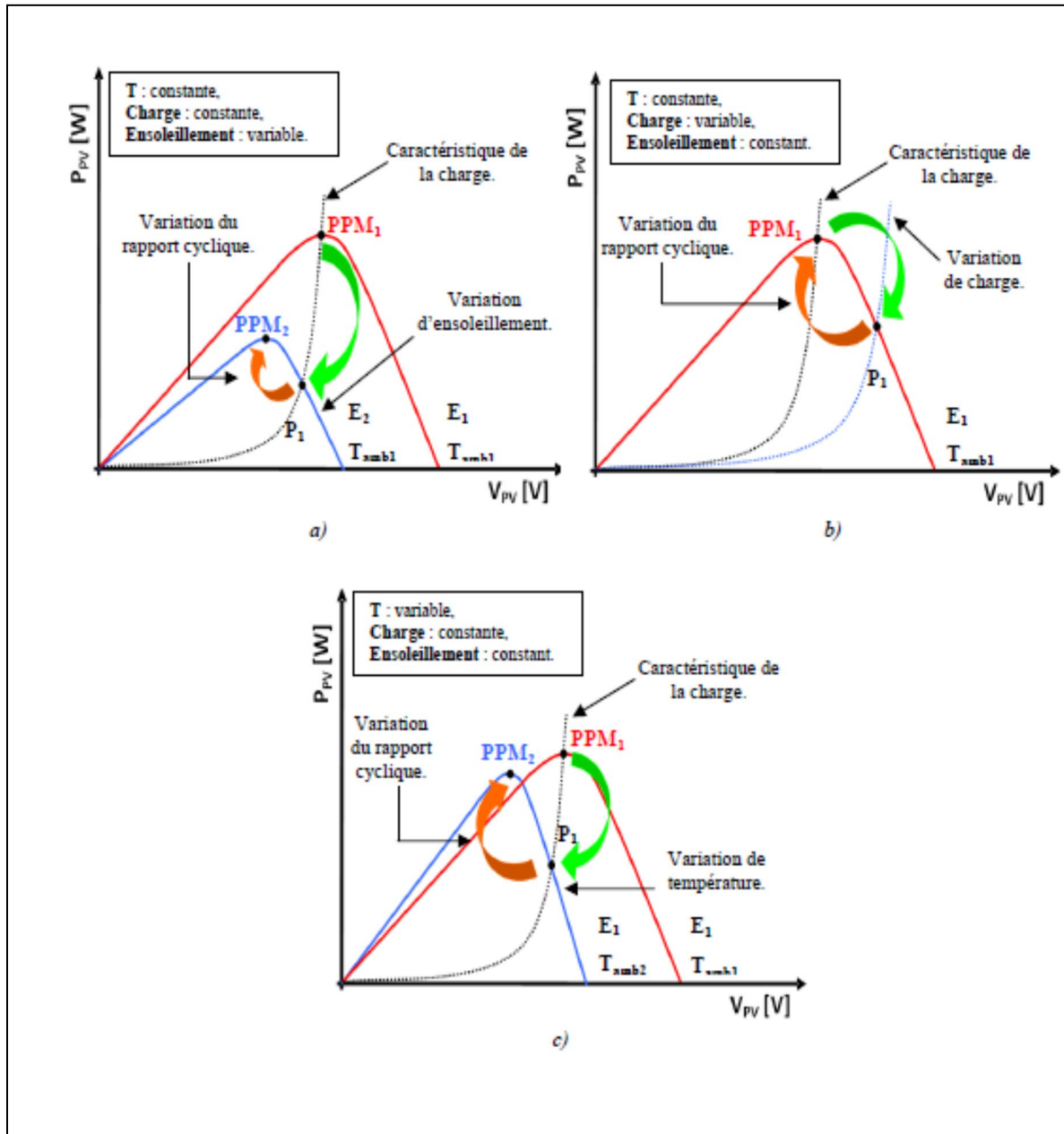


Figure 2.3 Détermination du MPP [5]

- a) pour un ensoleillement variable,
- b) pour une charge variable,
- c) pour une température variable.

## 2-3. Détermination du niveau de puissance maximale du générateur photovoltaïque

### 2-3-1. Méthodes de maximisation de puissance

Nous allons rapidement examiner plusieurs techniques pour maximiser la puissance, qui sont divisées en deux groupes: techniques indirectes et techniques directes [5].

### 2-3-1-1. Méthodes indirectes

Le suivi du MPP à l'aide d'approches indirectes utilise des informations dans des bases qui compilent les courbes PV dans diverses situations météorologiques, y compris l'exposition au soleil et la température. Pour calculer le PPM, ils utilisent également des formules mathématiques empiriques [6]. Cependant, ces techniques sont souvent spécifiques pour chaque genre de panneau, ce qui rend leur généralisation difficile. Voici quelques exemples de ces méthodes :

- Méthode "look-up table" : Cette méthode utilise une table de correspondance qui associe les conditions environnementales aux valeurs du PPM préenregistrées.
- Tension de circuit ouvert du générateur méthode : Mesure la tension de circuit ouvert du générateur PV pour estimer le PPM.
- Méthode de court-circuit : Mesure le courant de court-circuit du générateur PV pour estimer le PPM.

Ces méthodes indirectes offrent différentes approches pour estimer le PPM, mais elles présentent des limitations en termes de précision et de généralisation, car elles dépendent des caractéristiques spécifiques des panneaux photovoltaïques utilisés.

#### 2-3-1-1-a. D'ajustement de courbe méthode

Cette méthode indirecte pour le suivi du PPM repose sur une connaissance précise des caractéristiques photovoltaïques du panneaux. Dès lors de ces caractéristiques, les formules mathématiques sont extraites pour déterminer le PPM. Selon la référence [7], les équations (2.1) et (2.2) permettent de calculer le PPM en utilisant les paramètres a, b, c et d.

$$P_{pv} = a.V_{pv}^3 + b.V_{pv}^2 + c.V_{pv} + d \quad (2.1)$$

$$V_{MPP} = -\frac{b\sqrt{b^2-3.a;c}}{3.a} \quad (2.2)$$

Où :  $P_{pv}$ ,  $V_{PV}$  et  $V_{MPP}$  sont la puissance, la tension et la tension au MPP des panneaux photovoltaïques.

L'énorme nombre de répétitions ainsi que l'importance d'une mémoire importante sont les principaux inconvénients de cette méthode.

Un autre inconvénient est que les caractéristiques physiques exactes des panneaux doivent être connues, car ces spécifications varient en fonction du fabricant et de l'environnement.

### 2-3-1-1-b. La Méthode "look-up table"

Implique de mesurer la tension et le courant des panneaux photovoltaïques, puis on les compare avec les données préenregistrées dans la mémoire pour les mêmes conditions climatiques, afin de déterminer le (PPM) [8]. Néanmoins, elle présente quelques inconvénients. Elle nécessite une mémoire de stockage importante pour enregistrer toutes les caractéristiques correspondant aux différents scénarios climatiques.

De plus, compte tenu de sa difficulté extrême de conserver toutes ces caractéristiques pour toutes les conditions météorologiques possibles, l'algorithme peut ne pas fonctionner dans certaines situations.

### 2-3-1-1-c. La méthode de circuit ouvert du générateur

Cette méthode, tel qu'il est mentionné dans la référence [9], détermine à utiliser la tension du générateur photovoltaïque lorsque la puissance est maximum, ou elle est égale à  $V_{OC}$ . Dans cet algorithme  $k_1$  est la constante de proportionnalité, qui dépend de plusieurs facteurs, notamment l'utilisation de la technologie des cellules solaires photovoltaïques, le facteur de forme du panneau solaire ainsi que les conditions climatiques. Ces variables influencent le rapport entre la tension à la puissance maximale et la tension à circuit ouvert, et donc la valeur de la constante  $k_1$ . Il est crucial de tenir compte de ces facteurs pour obtenir une estimation précise du point de puissance maximale dans le contexte spécifique du système photovoltaïque considéré.

$$k_1 = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cong Cte < 1 \quad (2.3)$$

La méthode consiste à mesurer et à stocker  $V_{OC}$  du générateur PV et en arrêtant le système à intervalles réguliers. Le MPP est ensuite calculé par la formule (2.3), et on ajuste la tension de fonctionnement pour atteindre MPP. Malgré cette approche qui semble facile, il est compliqué de sélectionner une valeur idéale pour le rapport cyclique. Dans la littérature, cependant, la valeur de  $k_1$  est généralement comprise pour les modules PV polycristallins de 0,73 à 0,80. Ensuite maintenant le rapport cyclique

fixe, on ne tient pas compte de l'effet de l'éclairage, de la chaleur et de la dégradation des performances des panneaux avec le temps [10].

Cette méthode présente certaines limitations en termes de précision, mais elle est économique et simple. De plus, l'interruption de service associée à cette méthode est limitée à des systèmes avec batterie. Cela signifie que l'utilisateur ne remarque pas l'interruption de service pendant les phases de mesure et d'ajustement du point de puissance maximale.

#### 2-3-1-1. d La méthode de court-circuit

Sur la base de l'équité proportionnelle actuelle entre le point de puissance la plus élevée et le courant de court-circuit, cette approche est comparable à la précédente.

(équation (2.4)) [11].

$$k_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} \cong Cte < 1 \quad (2.4)$$

En générale, lorsque l'on utilise des polycristallines cellules,  $k_2$  le coefficient qui est généralement déterminer comme étant 0,85, utiliser pour calculer le MPP.

Il convient de souligner que les avantages et les désavantages pour cette approche les mêmes à ceux de la technique précédente. Bien qu'il soit assez facile et abordable à exécuter, il ignore les effets de la température, du soleil et du vieillissement des panneaux solaires.

#### 2-3-1-2. Méthodes directes

Sont des techniques mesurant le courant et la tension PV et reliaient de leur algorithme dont ces lectures varient. Ils ont l'avantage de ne pas avoir besoin de connaissances préalables sur les caractéristiques particulières des panneaux solaires qui sont employés. Ces techniques comprennent l'incrément de conductance, l'approche différenciation et Perturb&Observ (P&O) méthode.

Ces méthodes directes permettent d'effectuer un suivi et une adaptation en temps réel du point de puissance maximale (MPP), en s'appuyant sur les variations des lectures de valeur de courant et de tension, ce qui les rend largement utilisées dans les systèmes de suivi du MPP des panneaux photovoltaïques.

### 2-3-1-2-a. Méthode de différenciation

C'est une approche qui exploite la caractéristique de la dérivée d'une fonction qui est égale à zéro en un de ses extrêmes. En utilisant cette méthode, on résout l'équation (2.5) pour déterminer le point de puissance maximale (MPP).

Cette équation utilisée pour trouver le point où la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle, ce qui correspond au MPP du panneau photovoltaïque. En résolvant cette équation, on peut trouver la valeur de courant et de tension correspondant au MPP. Cependant, il est nécessaire de noter que cette approche peut présenter certaines limitations et qu'elle peut nécessiter des modifications additionnelles à effectuer pour prendre en compte le changement climatique telles que l'ensoleillement et la température.

$$\frac{dP_{pv}}{dt} = V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dt} + I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dt} = 0 \quad (2.5)$$

Cependant, pour parvenir réellement au point maximal de puissance, il faut résoudre cette équation avec une manière rapide et efficace. Cette procédure est détaillée et compliquée car elle nécessite la réalisation de huit calculs et mesures (courant et tension) au moins, qui permettent l'estimation de la puissance, comparer ultérieure avec la valeur zéro. Une direction de recherche MPP peut être établie selon le signe de la différence de puissance si elle n'est pas zéro. En conséquence, cette stratégie exige des techniques de calcul très efficaces [12].

### 2 -3-1-2-b Méthode Perturb & Observe

C'est une technique très employée pour la détermination du point de puissance maximale, car facile, itérative, et nécessite seulement des valeurs de tension  $V_{pv}$ , de courant  $I_{pv}$  photovoltaïque [13]. Cette méthode est reposée sur l'idée d'évaluer les caractéristiques du panneau photovoltaïque, puis d'appliquer une perturbation mineure de tension (ou courant) pour analyser la fluctuation de puissance qui en résulte. L'algorithme P&O peut progressivement modifier la tension (ou courant) pour approcher le point de puissance maximum en gardant un œil sur la fluctuation de la puissance [14], la [figure \(2.4\)](#) illustre ce concept. P&O appréciée de sa simplicité et son efficacité dans des conditions changeantes, mais elle peut présenter certaines limitations, notamment en cas de variations rapides des conditions environnementales en trouve le bruit dans les mesures.

Des conclusions différentes sur l'emplacement du point d'exploitation par rapport au point de puissance maximum (MPP) peuvent être tirées en regardant les résultats de la perturbation. Par exemple, le système est situé à gauche du MPP, si une hausse de la tension entraîne une croissance de la valeur de puissance. Cependant, il indique le dépassement du MPP, quand l'augmentation de la valeur de tension provoque une baisse de la puissance. Lorsque la tension diminue, la même logique peut être utilisée. Il est donc possible de déterminer l'emplacement approximatif du point d'exploitation par rapport au MPP en examinant les effets des fluctuations de tension sur la caractéristique de puissance. La convergence du point de fonctionnement à la puissance maximale est donc possible avec cette commande appropriée. Il est crucial de se rappeler que l'approche P&O pourrait avoir quelques inconvénients dans les situations où il y a des changements brusques dans l'environnement, du bruit dans les mesures, ou des irrégularités dans les caractéristiques du panneau. Pour surmonter ces problèmes et accroître la précision et la stabilité de la surveillance du MPP, des modifications et des ajustements à cette technique ont été proposés. En conclusion, pour une augmentation de puissance photovoltaïque, y a une fluctuation de tension et le chemin de l'interférence est isolée. Si ce n'est pas le cas, il est retourné pour commencer à converger vers le nouveau MPP [15].

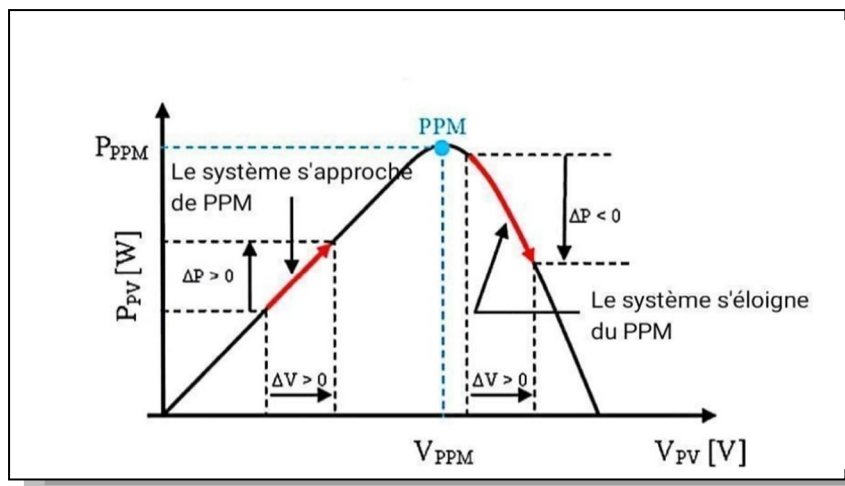


Figure 2.4 La courbe  $P_{pv}$  -  $V_{pv}$  d'un panneau photovoltaïque

La méthode traditionnelle liée à une technique P&O est montrée à la figure (2.5), par laquelle le développement de la puissance est examiné au bout de chaque tension

perturbée. Deux capteurs qui mesurent le courant et la tension des panneaux nécessaires pour ce type de contrôle afin de calculer la puissance de la lumière à un moment donné. En effet, la méthode P&O présente certains inconvénients liés aux oscillations qu'elle peut engendrer autour du MPP quand le système soit en régime stable. Étant donné que la détermination du MPP se fait par une répétition régulière, cela entraîne des oscillations continues du système autour du MPP. Pour réduire ces oscillations, il est possible de diminuer la valeur de la variable de perturbation utilisée dans la méthode P&O. Néanmoins, une croissance de valeur trop faible retarder la détermination du MPP, ce qui peut compromettre la réactivité du système. Par conséquent, Il est nécessaire de découvrir un équilibre entre la rapidité, précision, pour une optimisation délicate.

Effectivement, l'efficacité de la méthode P&O est engendre lorsqu'elle est utilisée dans des conditions où le MPP évolue lentement et de manière proportionnelle à l'ensoleillement. Dans de telles conditions, la commande P&O parvient généralement à suivre les variations du MPP et à obtenir un rendement plus élevé. Cependant, lorsqu'il y a des variations d'irradiation solaire rapides et fréquentes, la méthode P&O présente des limitations. En raison de son temps de réponse relativement lent, il peut y avoir un délai pendant où le MPP change et le temps où la commande P&O parvient à s'ajuster pour atteindre le nouveau MPP. Cela peut entraîner des pertes d'énergie à cause de mauvaise fonctionnalité du système en temps réel.

Malgré ces limitations, la technique P&O elle demeure très répandue en raison de sa simplicité d'implémentation. Cependant, d'autres techniques plus avancées ont été développées pour surmonter les problèmes d'oscillation et améliorer l'efficacité de la recherche du MPP, notamment les méthodes basées sur les algorithmes d'optimisation et les techniques de contrôle avancées [16]

Le diagramme de l'algorithme P&O est illustré dans la figure suivante :

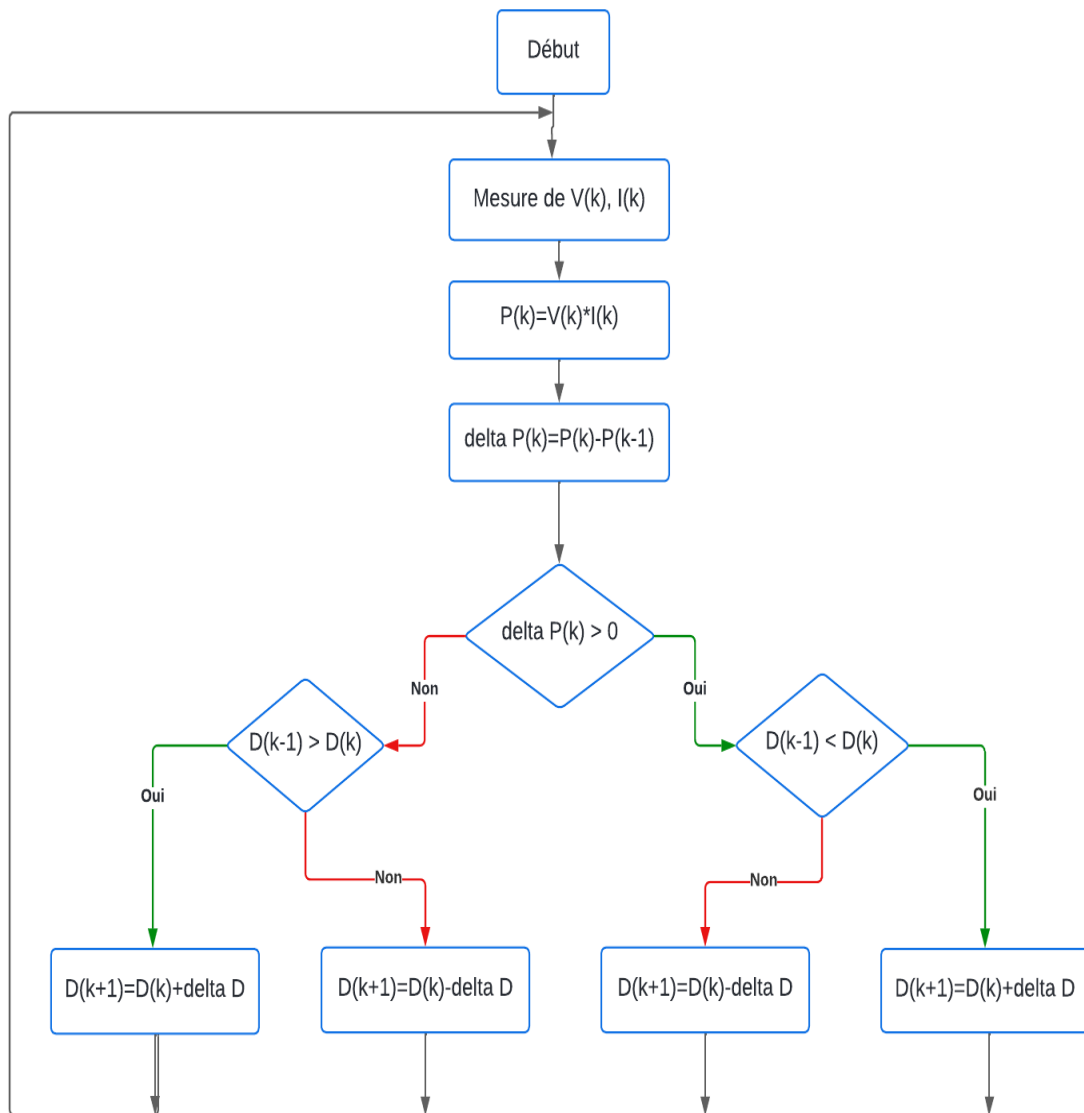


Figure 2. 5 La méthode P&O en algorithme

Si nous examinons de près cette procédure, nous pouvons voir que, comme l'illustre la [figure \(2.6\)](#), il y a des erreurs d'interprétation dans le chemin qui devrait être pris pour arriver au MPP lorsque des changements inattendus dans les conditions météorologiques ou de chargement se produisent.

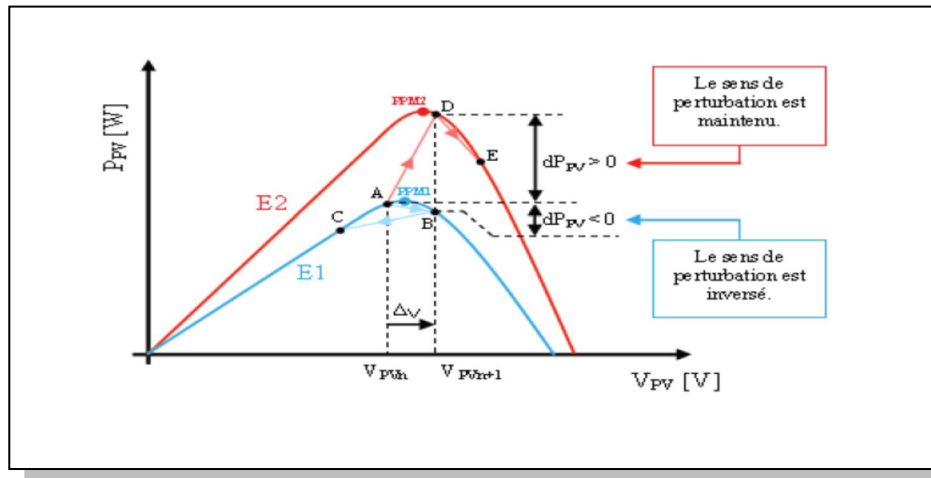


Figure 2.6 La divergence de la technique P&O pendant un changement d'éclairage

Utilisons exemple d'un cas d'éclairage particulier, désigné E1, avec un point d'action à A, pour mieux comprendre ce mode de recherche. Après une perturbation de la tension, celle-ci se déplace à B, ce qui entraîne une inversion du signe de perturbante dans une opération d'éclairage inchangée puisqu'un dérivé de puissance négative a été détecté. Le voyage du point d'exploitation entre les points B et C provoque des oscillations équilibrées autour du MPP en conséquence. Il convient de souligner que, selon l'emplacement des points B et C par rapport au point A, les pertes de transmission de puissance peuvent ou non être importantes. En fait, le point de fonctionnement d'un système MPPT peut changer (de A à D) en réponse à un changement de rayonnement solaire (de E1 à E2). Cela pourrait conduire à un changement de pouvoir. Cette divergence peut parfois être considérée comme une augmentation de la puissance, ce qui pourrait faire que le système s'éloigne brièvement du MPP.

Lorsque le système ne peut pas détecter directement l'erreur de trajectoire causée par le changement de caractéristiques du module photovoltaïque, la perturbation utilisée par la méthode MPPT peut maintenir sa direction initiale, ce qui peut provoquer un éloignement temporaire du MPP en direction d'une autre région de la courbe de puissance. Dans les cas les moins graves, cela peut simplement entraîner une non-optimisation momentanée de la puissance produite. Cependant, dans les pires situations, la recherche du MPP peut être échouée et atteindre les limites du circuit ouvert ou du court-circuit, ce qui peut entraîner une perte permanente du MPP et une

réduction significative de la production d'énergie. Par conséquent, lors de conditions météorologiques défavorables avec des changements rapides et importants d'irradiation solaire, les commandes MPPT conventionnelles telles que la méthode P&O peuvent présenter des limitations et des lacunes dans leur capacité à maintenir un suivi précis et optimal du MPP.

Donc, il doit être pris en considération ces limitations lors de la conception et du choix de la méthode MPPT, en particulier dans des environnements avec des conditions météorologiques instables, afin de minimiser les pertes d'énergie et d'optimiser les performances du système photovoltaïque.

L'étude réalisée par D. Sera [17], met en évidence l'altitude de la technique P&O lors d'un d'ensoleillement variant. Les simulations montrent que lorsque l'irradiation solaire évolue de manière linéaire de  $125 \text{ W/m}^2$  à  $800 \text{ W/m}^2$  sur une période de 25 secondes, la commande P&O est susceptible de s'éloigner temporairement du MPP avant d'atteindre ce dernier. Concrètement, pendant la période de variation d'ensoleillement, la commande MPPT réagit avec un certain retard, ce qui entraîne une perturbation momentanée du point de fonctionnement. Cependant, une fois que l'éclairement se stabilise, la commande parvient à converger vers le MPP. Dans cette étude, les 40 seconds nécessaires pour recouvrer la commande MPPT ce qui signifie qu'il faut 15 secondes supplémentaires après la stabilisation de l'éclairement pour que la commande atteigne pleinement le MPP.

L'efficacité de la commande MPPT dans cet essai est estimée à 94,5 %, ce qui signifie que sur une durée de fonctionnement de 100 secondes, elle parvient à exploiter 94,5 % de la puissance maximale disponible du panneau solaire. Cela démontre que même si la commande P&O présente des oscillations et un temps de réponse relativement long lors de variations d'ensoleillement, elle parvient tout de même à optimiser la puissance dans une certaine mesure.

Il convient de noter que ces résultats peuvent varier en fonction des paramètres spécifiques de la commande MPPT utilisée et des conditions de simulation. Il est donc important de choisir et de configurer judicieusement la méthode MPPT en fonction des caractéristiques du système photovoltaïque et des contraintes opérationnelles spécifiques.

### 2-3-1-2-c. Méthode de l'incrément de conductance

KH Hussein [18] a suggéré cette approche comme un substitut à la technique P&O. Son idée fondamentale est l'annulation de la dérivation puissance-voltage (équations (2.6–2.7), figure (2.7)).

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (2.6)$$

$$-\frac{I_{pv}}{V_{pv}} = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.7)$$

La conductivité dans le signe suivant est représentée par le terme à gauche de l'équation (2,7), et sa variation par le terme à droite.

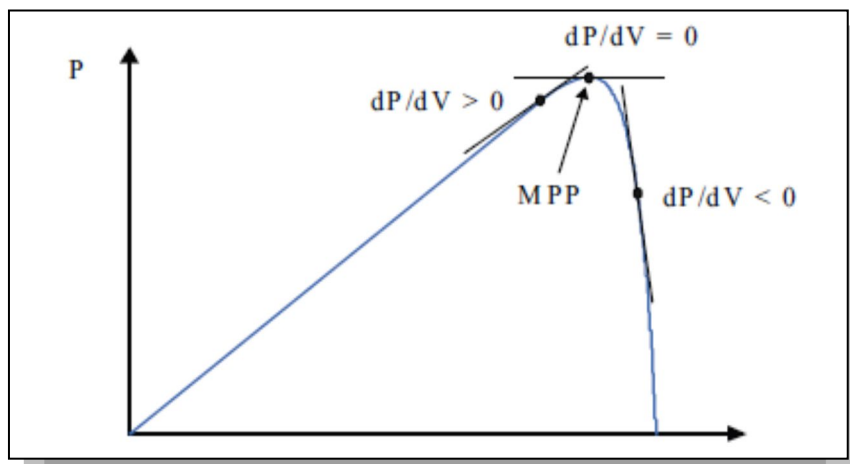


Figure 2.7 Mise en évidence de  $dP/dV$  sur la courbe puissance-tension [17]

Le principal avantage de cet algorithme est son adaptabilité aux conditions météorologiques imprévisibles. Théoriquement, on peut localiser le MPP et s'y immobiliser au cas où la perturbation cesserait. En outre, dans ce cas, il n'y a pas de fluctuation de tension puisque l'intensité de courant fluctue, qui offre une tension de référence modifiable et d'arriver à un nouveau MPP. Contrairement aux deux formes antérieures du MPPT, celui-ci a une caractéristique intrigante en ce qu'il n'y a aucune oscillation autour du MPP sous le régime établi. Un autre avantage de cette stratégie est

qu'il n'y a aucune chance de déviation de MPP. Bien qu'il y ait une oscillation autour du MPP dans la pratique, elle n'est pas aussi forte que l'oscillation P&O.

En fin de compte, les rendements sont substantiellement égaux, avec une optimisation de la P&O méthode [19].

L'incrément de conductance algorithme est illustrée par la [figure \(2.8\)](#)

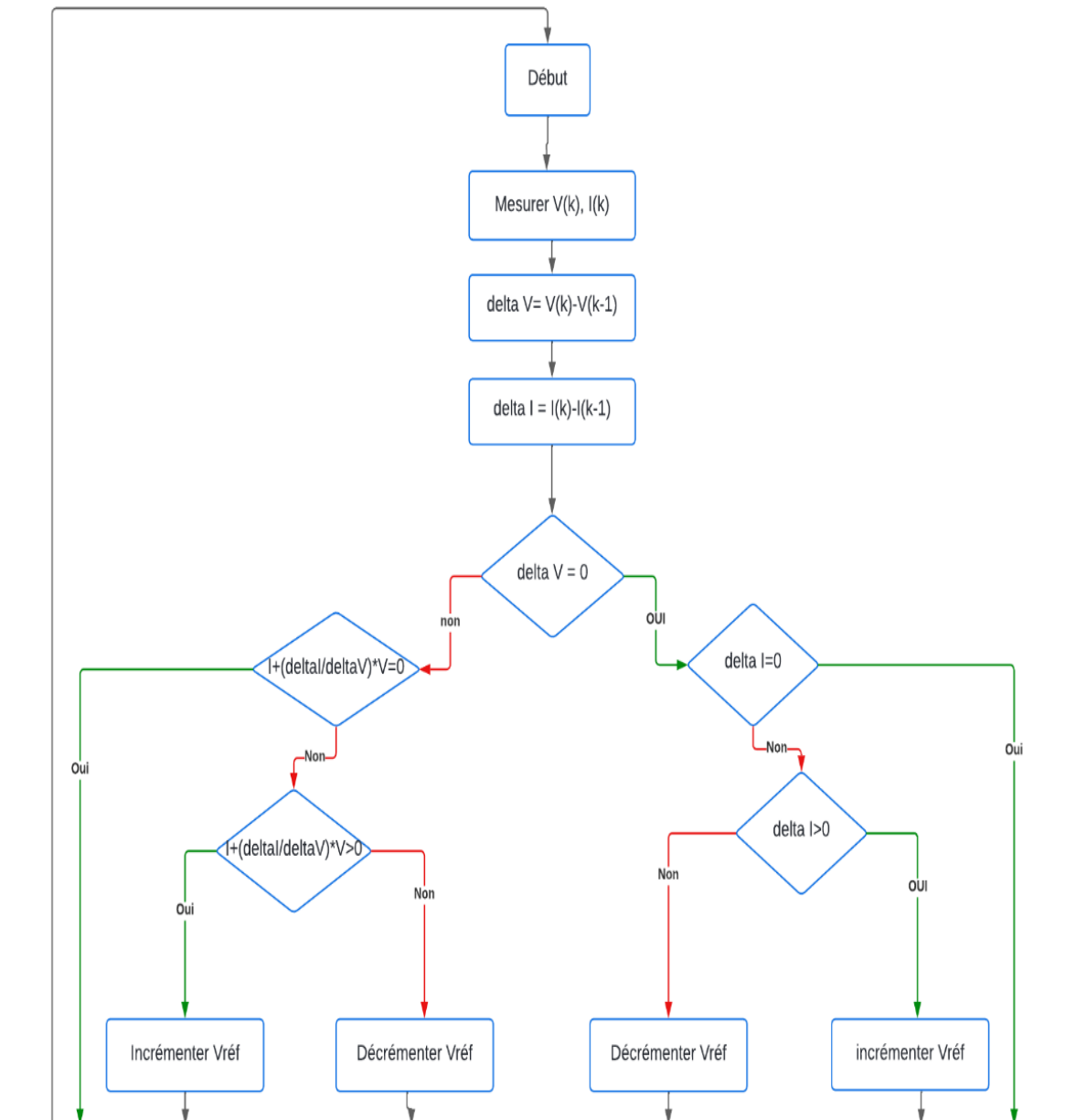


Figure 2.8 Incrément de conductance Algorithme

### 2-3-2. Contrôleur MPPT flou

Systèmes de poursuite du point de puissance maximal (MPP) ont largement utilisé un contrôle de logique floue ces dernières années. Ce contrôle n'exige pas que des informations précises sur le modèle soient modifiées. Néanmoins, la création d'un tel régulateur nécessite une compréhension approfondie du comportement du système [20].

Pour la création d'un contrôleur flou en doit réaliser les étapes suivantes : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification, figure (2.9).

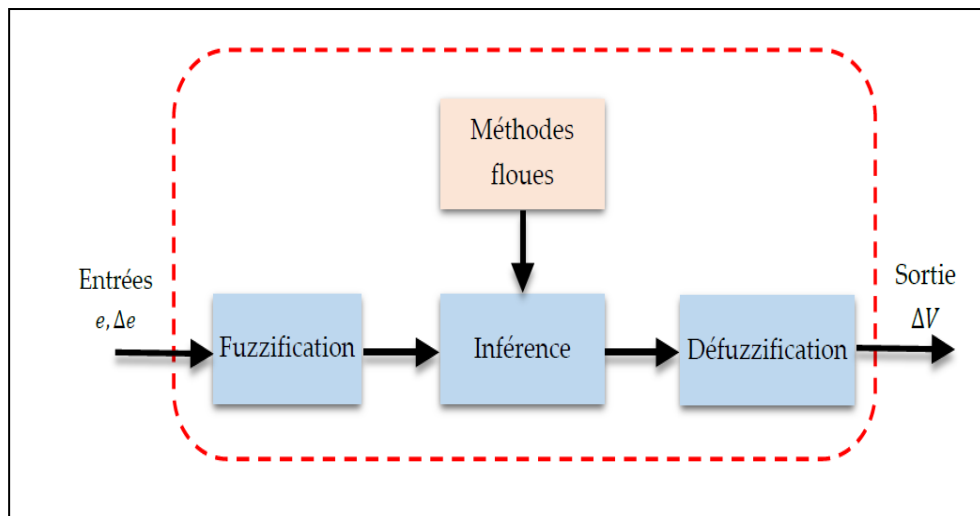


Figure 2. 9 Principe du Contrôleur flou

#### 2-3-2-1. La fuzzification

La fuzzification est utilisée pour permettre la conversion de variables d'entrée numériques en variables fuzzy; elle se produit généralement en trois étapes [21] :

- Établir le plus grand intervalle de variation admissible pour les variables d'entrée (univers de discours),
- Diviser le monde du discours en classes nébuleuses,
- Et définir les fonctions d'appartenance des classes fuzzy antérieures sont les premières étapes.

Partons du principe qu'au point de puissance maximale  $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$  (figure (2.10)) et ceci quelques soient les conditions météorologiques. Donc, la première entrée sera le changement de la puissance par rapport à la tension (pente de la caractéristique

P-V) appelée l'erreur  $e$ . Comme seconde entrée, une information sur le sens et la vitesse de convergence serait nécessaire, donc comme seconde entrée la variation de l'erreur  $\Delta e$  est utilisée. En sortie on a besoin du pas d'incrément de la tension  $\Delta V$  pour attaquer le convertisseur DC/DC.

Les entrées sont données par les équations suivantes :

$$e(t) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(t) - P(t-1)}{V(t) - V(t-1)} \quad (2.8)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (2.9)$$

Avec :

$P(t)$ : actuelle puissance [W] ;

$P(t-1)$ : Précédente puissance [W] ;

$\Delta P$ : Changement de la puissance [W] ;

$V(t)$ : Actuelle tension [V] ;

$V(t-1)$ : Précédente tension [V] ;

$\Delta V$ : Changement de la tension [V] ;

$e(t)$  : Actuel erreur à l'instant  $t$  (dérivée de la puissance) ;

$e(t-1)$  : Précédent erreur à l'instant (dérivée de la puissance) ;

$\Delta e(t)$  : Le changement de l'erreur.

L'univers de discours de chaque variable ( $\Delta e$ ,  $e$ ,  $\Delta V$ ) est partitionné en plusieurs classes (pour simplifier on a pris trois pour chaque variable), elles sont exprimées par des termes ou étiquettes linguistiques ; l'erreur  $e$  peut être : Négative (N), Zéro (Z) ou Positive (P) ; la variation de l'erreur  $\Delta e$  peut être : Décroître (D), Stable (S), Croître (C) ; le changement dans la tension  $\Delta V$  peut être : Diminué (-), Inchangé (0), Augmenté (+). On peut donc écrire :

$$e \in \{N; Z; P\}$$

$$\Delta e \in \{D; S; C\}$$

$$\Delta V \in \{-; 0; +\}$$

Le degré (fonction) d'appartenance  $\mu(x)$  de chaque variable  $x$  d'entrée ou de sortie est montré par la [figure \(2.10\)](#). Afin de simplifier notre exemple, nous avons pris des

fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales, elles peuvent prendre d'autres formes : gaussienne, sigmoïdales.

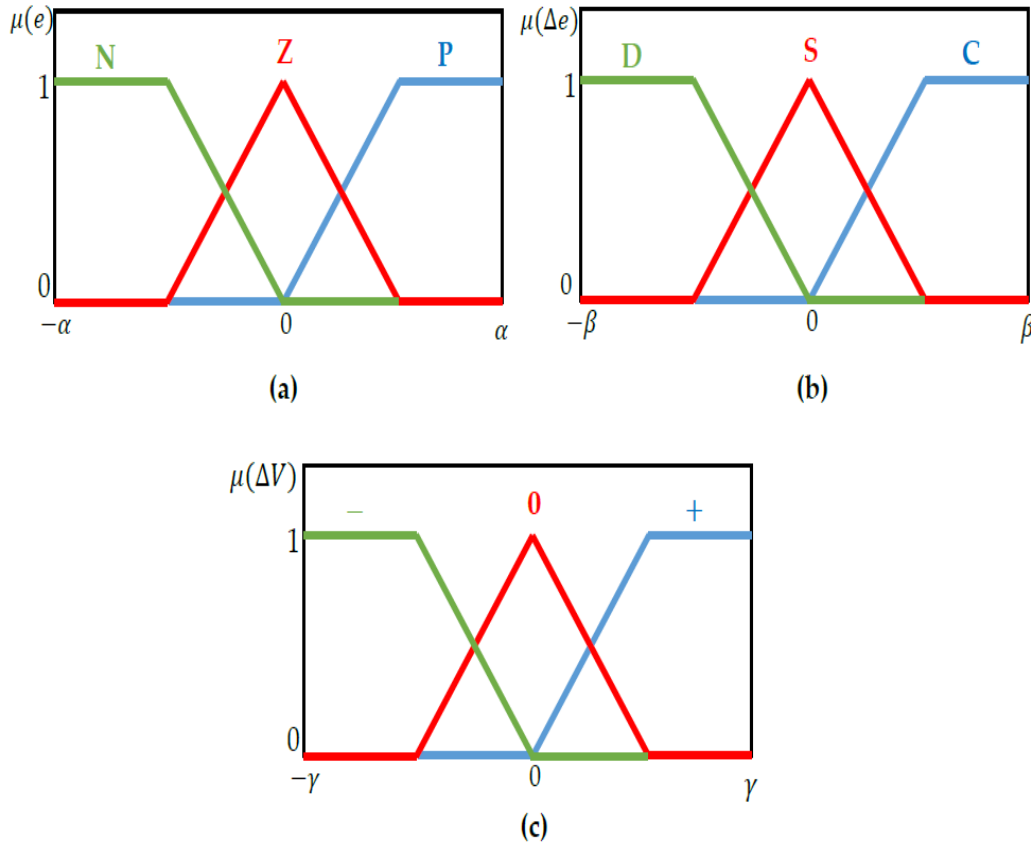


Figure 2.10 La fonction d'appartenance des variables d'entrée (a) et (b) et de sortie (c)

Avec :

$[-\alpha]$ : Variation intervalle de la variable  $e$  (l'univers de discours) ;

$[-\beta]$ : Variation intervalle de  $\Delta e$  ;

$[-\gamma]$ : Variation intervalle de  $\Delta$  ;

$(e)$  : Appartenance fonction de la variable  $e$  ;

$(\Delta e)$  : Appartenance fonction de la variable  $\Delta e$  ;

$(\Delta V)$  : Appartenance fonction de  $\Delta V$  ;

### 2-3-2-2. L'inférence

Déterminer une connexion logique entre les entrées et les sorties est la première étape du processus d'inférence, également connu sous le nom de raisonnement flou [22].

Effectivement, les règles utilisées par la logique floue sont de type : SI ... ET ... ALORS

...Une matrice d'inférence (Tableau 2.1) fournissant la sortie  $\Delta V$  peut être créée en utilisant ces directives imprécises en conjonction avec la spécification de la charge du système, qui dans notre exemple est le placement sur le point de puissance maximale.

Tableau 2. 1 Matrice d'inférences

$\Delta V$		$\Delta e$		
		D	S	C
E	N	-	-	0
	Z	-	0	+
	P	0	+	+

La [figure \(2.11\)](#) illustre le principe de la MPPT avec la logique floue ce qui peut aider à remplir la matrice d'inférence, en effet :

- Si  $e = N$  (négatif), le point est à droite ; ET  $\Delta e = D$  (décroit), on se dirige vers la droite ; Alors  $\Delta V = -$ , il faut changer de direction et se diriger vers la gauche (réduire  $V$ ).
- Lorsque  $e = Z$  (zéro), on se trouve au PPM ; tandis que  $\Delta e = D$  (décroit), on se dirige vers la droite ; tandis que  $\Delta V = -$ , il est nécessaire de revenir au PPM et de se diriger vers la gauche (réduire  $V$ ).
- Si  $e = P$  (positif), le point se trouve à gauche ; Si  $\Delta e = D$  (décroit), on se dirige vers la droite ; Si  $\Delta V = 0$ , il est nécessaire de rester dans cette direction (poursuivre l'augmentation de  $V$ ).
- Lorsque  $e = N$  (négatif), le point est à droite ; tandis que  $\Delta e = S$  (Stable), il n'y a pas de mouvement ; alors  $\Delta V = -$ , il faut se déplacer vers la gauche (réduire  $V$ ).
- Si  $e = Z$  (zéro), nous sommes au PPM ; Si  $\Delta e = S$  (Stable), il n'y a pas de mouvement ; Si  $\Delta V = 0$ , il n'y a pas de mouvement.
- Lorsque  $e = P$  (positif), le point est à gauche ; tandis que  $\Delta e = S$  (stable), il n'y a pas de mouvement ; alors  $\Delta V = +$ , il est nécessaire d'augmenter  $V$ .
- Lorsque  $e = N$  (négatif), le point est à droite ; tandis que  $\Delta e = C$  (croît), on se dirige vers la gauche ; alors  $\Delta V = 0$ , il est nécessaire de rester dans cette direction (continuer à réduire  $V$ ).

- Lorsque  $e = Z$  (zéro), on se trouve au PPM ; tandis que  $\Delta e = C$  (croît), on se déplace vers la gauche ; tandis que  $\Delta V = +$ , il est nécessaire de revenir au PPM et de se déplacer vers la droite (augmenter  $V$ ).
- Si  $e$  est positif, le point est à gauche ; et si  $\Delta e$  est croissant, on se déplace vers la gauche ; et si  $\Delta V$  est positif, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter  $V$ ).

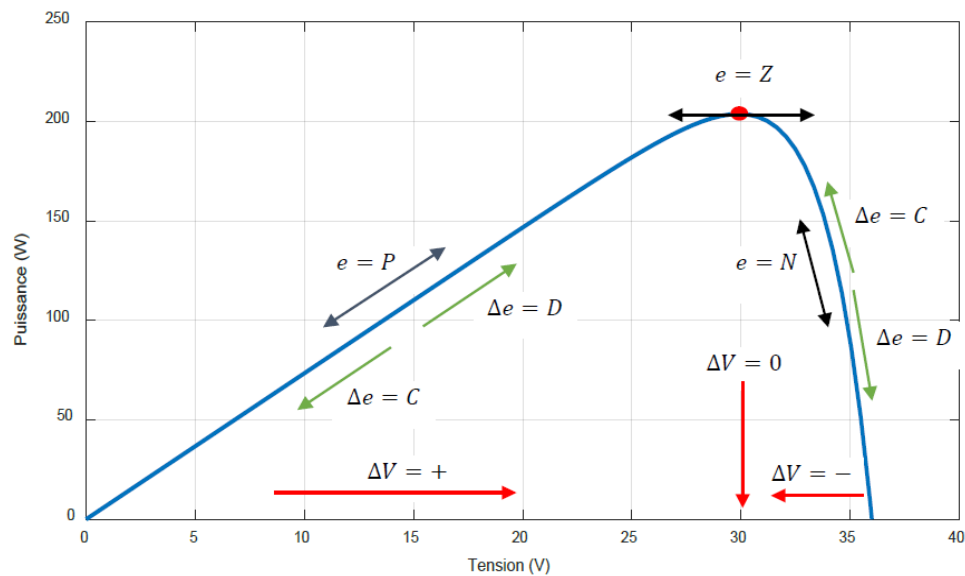


Figure 2. 11 Principe de la MPPT floue

L'identification des règles qui sont actives dans la matrice d'inférence et leur attribution d'un grade d'appartenance est la prochaine étape. En règle générale, deux fonctions fuzzy avec des degrés variables décrivent une valeur d'entrée. Par conséquent, la sortie sera également définie par des fonctions différentes, la seule inconnue étant les degrés de leur affiliation. De nombreuses façons existe pour répondre à cette requête. La technique d'inférence de brouillard la plus populaire en utilisant la règle de combinaison d'opérations MAX-MIN est la méthode Mamdani [23].

### 2-3-2-3. La défuzzification

La défuzzification est le processus de faire l'opposé de la fuszification, cela implique qu'au lieu d'employer une définition claire, nous devons calculer un nombre que le monde extérieur (dans notre exemple,  $\Delta V$ ) peut comprendre [24].

La méthode la plus utilisée de la défuzzification est l'opérateur "centre de gravité", il est donné par l'équation suivante :

$$\Delta V = \frac{\int \mu(\Delta V) \cdot \Delta V}{\int \mu(\Delta V)} \quad (2.10)$$

L'interprétation des opérateurs logiques est comme suit :

Tableau 2. 2 Interprétation des opérateurs logiques

Opérateur logique	Interprétation
ET	Minimum
OU	Maximum
Implication	Minimum

Pour connaître toutes les solutions de  $\Delta V$  il suffit de varier  $e$  et  $\Delta e$  sur l'univers de la parole, nous obtenons une fonction tridimensionnelle. Le logigramme suivant [figure \(2.12\)](#), présente le fonctionnement de la commande MPPT flou.

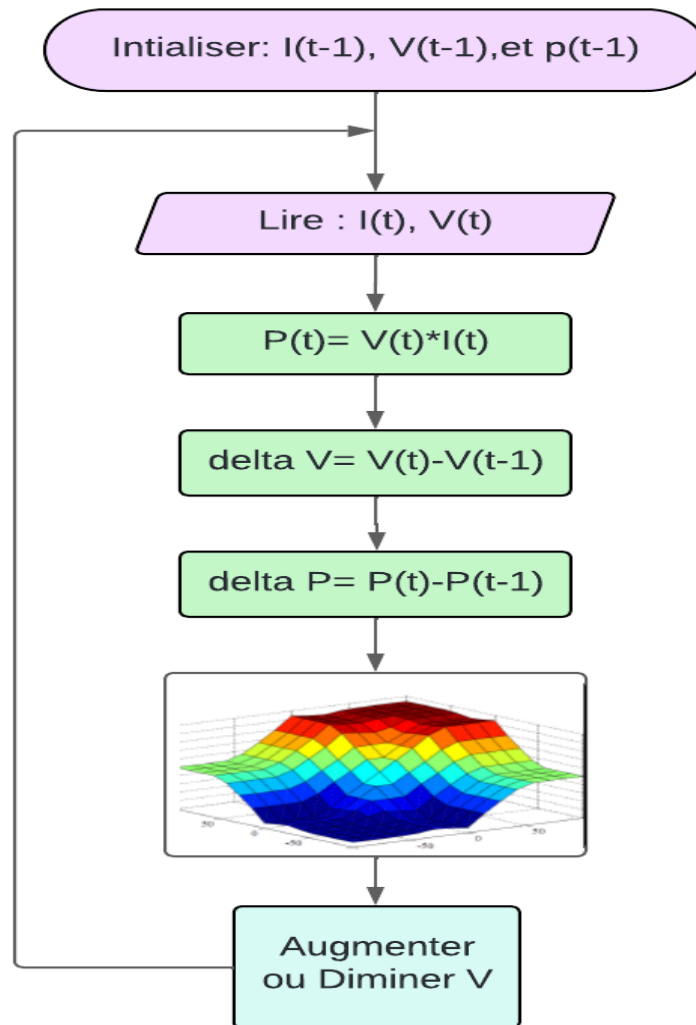


Figure 2. 12 Organigramme simplifié de FLC

## 2-4. Critères d'évaluation d'MPPT

Le lieu de fonctionnement du système par rapport au point de fonctionnement MPP, est représentée par la qualité d'une commande MPPT [25]. La puissance réelle fournie par le GPV dépend de la technologie employée dans les convertisseurs (MPPT, alimentation de tension, connexion directe,...).

### 2-4-1. Simplicité et Coût

En plus de sa performance théorique, il doit comprendre le degré de complexité de la méthode qui conduit à des défis de mise en œuvre et des pertes qui sont directement liées à la quantité de calculs nécessaires. Pour qu'une ordonnance MPPT puisse

compenser les coûts supplémentaires engagés, elle doit être très simple, encourager une faible utilisation et avoir un coût de création équitable. Tout d'abord, nous devons nous rappeler que l'introduction d'un convertisseur d'énergie avec une approche de contrôle MPPT doit avoir un gain énergétique suffisant pour couvrir l'excédent économique dans une économie énergétiques hautement compétitive. Sinon, cette approche ne sera jamais fiable du point de vue industriel. En outre, le contrôle a trop de limites pour être choisi pour ce type d'application, peu importe son efficacité.

#### **2-4-2. Réponse dynamique**

Pour gérer efficacement la période d'adaptation et garantir une recherche rapide du nouveau PPM après des changements de température ou d'éclairage, un contrôle MPPT doit présenter un comportement dynamique fort.

#### **2-4-3. Flexibilité**

Un contrôleur MPPT doit être stable et précis dans toutes les circonstances de fonctionnement. En fait, il ne devrait pas fonctionner uniquement avec un certain type de panneau. Il devrait être aussi adaptable que possible, capable de fonctionner avec des panneaux de diverses technologies avec peu d'ajustements, en maintenant le même niveau de précision et de durabilité.

#### **2-4-4. Compétitivité de puissance**

Dans les applications photovoltaïques, un contrôle MPPT est par définition destiné à surveiller le PPM produit par un module PV, indépendamment de la quantité de soleil. Si l'emplacement du point d'exploitation par rapport au PPM est raisonnablement bas dans une large gamme de puissance, et que le PPM connaît une erreur statique, le contrôleur MPPT est considéré comme concurrentiel.

### **2-5. Le rendement du MPPT**

Le comportement du MPPT peut être examiné selon deux scénarios différents : statique et dynamique. L'efficacité statique du MPPT décrit la capacité du système à localiser le point MPP dans des conditions d'environnement constantes (telles que la lumière et la température), tandis que la performance dynamique de ce système décrit sa capacité à trouver le chemin MPP sous des conditions variables [26].

L'efficacité du MPPT est calculée comme suit :

$$\eta_{MPPT}(t) = \frac{P_{pv}(t)}{P_{MPP}(t)} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Avec :

$P_{pv}(t)$  : La puissance de sortie aux bornes du générateur photovoltaïque.

$P_{MPP}(t)$  : La puissance au point MPP.

En cas de calculs discrets de temps, les variables ci-dessus sont prélevés, ainsi l'efficacité de MPPT à chaque échantillon est calculée comme suit :

$$\eta_{MPPT}(k) = \frac{P_{pv}(k)}{P_{MPP}(k)} \cdot 100 \quad (2.12)$$

En conditions statiques,  $\eta_{MPPT}(t)$  est ramené à une moyenne pour une période où l'état d'équilibre est réalisé, aucune autre variation du  $\eta_{MPPT}(t)$  ne se produit ; et selon les conditions de fonctionnement, la coupure peut prendre plusieurs secondes.

En conditions dynamiques, quand les changements de MPP dus aux variations d'irradiance, le cheminement de MPP est habituellement analysé en utilisant l'escalier ou les profils trapézoïdaux d'irradiance, ayant les valeurs de  $P_{MPP}(t)$  et de  $P_{pv}(t)$  pendant l'essai dynamique, l'efficacité équivalente peut être calculé comme suit :

$$\eta_{MPPT} = 100 \frac{\int_0^{T_0} P_{pv}(\tau) d\tau}{\int_0^{T_0} P_{MPP}(\tau) d\tau} \quad (2.13)$$

Où  $T_0$  est la période d'essai.

En cas de temps discret, le rendement de MPPT à chaque échantillon est calculé comme suit :

$$\eta_{MPPT} = \frac{\sum_{k=1}^N P_{pv}(k) T_S}{\sum_{k=1}^N P_{MPP}(k) T_S} = \frac{\sum_{k=1}^N P_{pv}(k)}{\sum_{k=1}^N P_{MPP}(k)} \quad (2.14)$$

Avec  $T_S$  temps de prélèvement.

## 2-6. Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous avons exploré en profondeur les différentes techniques de commande pour maximiser la puissance des systèmes photovoltaïques (MPPT). L'analyse des méthodes traditionnelles comme les algorithmes de Perturb and Observe (P&O) et d'Incrément de Conductance (IC) a permis de mettre en lumière leurs forces et faiblesses respectives. Ces techniques, bien qu'efficaces dans des conditions climatiques standards, montrent leurs limites lorsqu'il s'agit de gérer des variations rapides de l'ensoleillement ou des ombrages partiels. C'est dans ce contexte que les méthodes de commande basées sur l'intelligence artificielle, notamment la logique floue, prennent tout leur sens. En effet, la flexibilité et l'adaptabilité de ces approches permettent d'améliorer significativement les performances des systèmes MPPT, en optimisant la récupération de l'énergie solaire dans des conditions variées. Cette étude pose ainsi les bases pour les chapitres suivants, où les conclusions théoriques seront validées à travers des simulations. Le travail réalisé ici ouvre la voie à des solutions plus robustes et adaptatives, nécessaires pour maximiser le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques dans un contexte où l'énergie renouvelable est de plus en plus essentielle.

## 2-7. Bibliographies

- [1] M. Kermadi *et al.*, “Recent developments of MPPT techniques for PV systems under partial shading conditions : a critical review and performance evaluation”, doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0454.
- [2] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, “A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 637–648, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.009>.
- [3] M. A. Eltawil and Z. Zhao, “MPPT techniques for photovoltaic applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 793–813, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.022>.
- [4] S. Patel and W. Shireen, “Fast converging digital MPPT control for photovoltaic (PV) applications,” in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–6. doi: 10.1109/PES.2011.6039717.
- [5] V. Salas, E. Olías, A. Barrado, and A. Lázaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555–1578, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.10.023>.
- [6] C. B. N. Fapi, P. Wira, M. Kamta, H. Tchakounté, and B. Colicchio, “Simulation and dSPACE Hardware Implementation of an Improved Fractional Short-Circuit Current MPPT Algorithm for Photovoltaic System,” *Appl. Sol. Energy*, vol. 57, no. 2, pp. 93–106, 2021, doi: 10.3103/S0003701X21020080.
- [7] N. Mutoh, T. Matuo, K. Okada, and M. Sakai, “Prediction-data-based maximum-power-point-tracking method for photovoltaic power generation systems,” in *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289)*, 2002, vol. 3, pp. 1489–1494 vol.3. doi: 10.1109/PSEC.2002.1022386.
- [8] U. A. Dahlan and J. Bahru, “Maximum power point tracking techniques for low-cost solar photovoltaic applications – Part II : Mathematical Calculation and Measurement and Comparison , criteria on choices and suitable MPPT techniques,” vol. 72, no. 2, pp. 299–322, 2023, doi: 10.24425/aee.2023.145410.
- [9] T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no.

- 2, pp. 439–449, 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
- [10] P. Das, “Maximum Power Tracking Based Open Circuit Voltage Method for PV System,” *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 2–13, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.165>.
- [11] K. K. Kumar, R. Bhaskar, and H. Koti, “Implementation of MPPT Algorithm for Solar Photovoltaic Cell by Comparing Short-circuit Method and Incremental Conductance Method,” *Procedia Technol.*, vol. 12, pp. 705–715, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.553>.
- [12] N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, “General review and classification of different MPPT Techniques,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 1–18, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>.
- [13] H. Rezk and A. M. Eltamaly, “A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems,” *Sol. Energy*, vol. 112, pp. 1–11, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.010>.
- [14] H. Rezk and A. M. Eltamaly, “A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems,” *Sol. Energy*, vol. 112, no. December 2017, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2014.11.010.
- [15] O. Singh and S. K. Gupta, “A review on recent Mppt techniques for photovoltaic system,” in *2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ETECHNXT.2018.8385315.
- [16] M. Sarvi and A. Azadian, “A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems,” *Energy Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 281–320, 2022, doi: 10.1007/s12667-021-00427-x.
- [17] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions,” in *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2006, vol. 2, pp. 1420–1425. doi: 10.1109/ISIE.2006.295680.
- [18] K. H. Hussein and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions,” pp. 59–64, 1995.
- [19] D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms,” vol. 62, no. November 2002, pp. 47–62, 2003, doi: 10.1002/pip.459.
- [20] A. K. Pandey, V. Singh, and S. Jain, “Maximum Power Point Tracking

- Algorithm based on Fuzzy Logic Control using P-V and I-V Characteristics for PV Array,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3272536.
- [21] R. I. Jabbar *et al.*, “A Modified P&O-MPPT Technique Using Fuzzy Logic Controller for PV Systems,” in *2023 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/GlobConET56651.2023.10149991.
- [22] H. Abouobaida, Y. Mchaouar, Y. Abouelmahjoub, H. Mahmoudi, A. Abbou, and M. Jamil, “Performance optimization of the INC-COND fuzzy MPPT based on a variable step for photovoltaic systems,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 278, p. 170657, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170657>.
- [23] M. Boutaybi, Y. Khlifi, A. Benslimane, and M. L. Elhafyani, “Optimization of photovoltaic System using Mamdani and Takagi Sugeno MPPT Controls,” in *2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/IRASET52964.2022.9738070.
- [24] N. Priyadarshi, M. S. Bhaskar, and D. Almahles, “Realization of PV Power Structure with PSO Tuned Fuzzy Logic Control,” in *2023 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/GlobConET56651.2023.10150010.
- [25] M. Kordestani, A. Mirzaee, A. A. Safavi, and M. Saif, “Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Photovoltaic Power Systems-A Systematic Literature Review,” in *2018 European Control Conference (ECC)*, 2018, pp. 40–45. doi: 10.23919/ECC.2018.8550117.
- [26] Y. Liu and J. Huang, “A fast and low cost analog maximum power point tracking method for low power photovoltaic systems,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2771–2780, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.08.019.

## Chapitre 3

# Etude en Modélisation d'un système d'alimentation autonome

### Table des matières

3-1. Introduction.....	75
3-2. La modélisation des systèmes PV.....	76
3-3. Photovoltaïque système.....	76
3-4. La modélisation d'un module PV .....	77
3-4-1. Le modèle idéal .....	78
3-4-2. Le modèle de simple-diode a quatre-paramètres .....	79
3-4-3. Simple diode modèle a cinq-paramètres.....	80
3-4-4. Double-diodes modèle.....	80
3-5. Détermination des paramètres de simple-diode à cinq paramètres .....	82
3-5-1. Extraction des paramètres.....	83
3-5-2. Facteurs limitatifs du rendement .....	85
A. L'influence de l'éclairement homogène .....	85
B. Influence de l'éclairement inhomogène .....	85
C. L'influence de la température.....	86
D. L'influence de la résistance série $R_s$ .....	87
E. Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$ .....	88
3-6. Modélisation des convertisseurs .....	88
3-6-1. Les convertisseurs DC/DC (Boost) .....	89
3-6-2. Convertisseur DC/DC (Buck-Boost) bidirectionnel.....	90
3-7. Modélisation de la batterie.....	91
3-8. Kalman étendu filtre .....	94

3-9. Le système de gestion de l'énergie (EMS).....	97
3-10. Développement d'un système de gestion de l'énergie de micro-réseau à l'aide de méthodes basées sur l'optimisation.....	98
3-10-1. Optimisation basée sur le décalage de la demande de pointe :.....	99
A. Fonction objective .....	99
B. Les Contraintes .....	100
3-10-2. Optimisation basée sur un programme linéaire.....	101
3-10-3. Définir les états nécessaires pour l'optimisation par programme linéaire.....	102
3-11. La charge.....	104
3-12 Conclusion .....	104
3-13. Bibliographies .....	106

**Liste des figures**

Figure 3.1 : Schéma illustrant la configuration étudiée du système photovoltaïque autonome.....	77
Figure 3.2 : Idéale cellule PV.....	78
Figure 3.3 : Simple diode modèle cellule PV.....	79
Figure 3.4 : Simple diode modèle cellule PV, avec des deux résistances série et shunt .....	80
Figure 3.5 : Double diodes modèle, avec des deux résistances série et shunt.....	80
Figure 3.6 : Convertisseur DC-DC Boost.....	89
Figure 3.7 : Convertisseur DC-DC Buck-Boost.....	90
Figure 3.8 : Modèle équivalent d'une batterie au lithium.....	91
Figure 3.9 : Structure de filtre de Kalman étendu.....	96
Figure 3.10 : Diagramme de mode de contrôle heuristique pour un système hybride isolé.....	98

### 3-1. Introduction

La modélisation et l'analyse approfondies des systèmes photovoltaïques permettent de comprendre leur fonctionnement, d'optimiser leurs performances et de les adapter à des conditions environnementales variées. Ce chapitre se divise en deux parties principales, traitant à la fois des aspects fondamentaux de la modélisation et des stratégies avancées de gestion de l'énergie.

La première partie du chapitre est dédiée à la modélisation des composantes essentielles d'un système photovoltaïque autonome. Les cellules photovoltaïques sont étudiées en détail, en prenant en compte des paramètres critiques tels que l'éclairement, la température, et les résistances série et parallèle. Ces modèles permettent d'évaluer les performances des modules photovoltaïques dans des conditions variées. Par ailleurs, les convertisseurs DC/DC, tels que les configurations Boost et Buck-Boost, sont modélisés pour leur rôle crucial dans l'adaptation des niveaux de tension et l'optimisation énergétique. Enfin, une attention particulière est portée à la modélisation des batteries, en intégrant le filtre de Kalman étendu (EKF) pour une estimation précise de l'état de charge (SOC).

La deuxième partie se concentre sur la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux hybrides AC/DC. Deux approches sont explorées : le système de gestion heuristique (EMS heuristique) et le système de gestion optimisé par programmation linéaire (PL). Le système EMS heuristique repose sur des règles simples et prédéfinies pour gérer les flux d'énergie, tandis que l'approche PL utilise des algorithmes avancés pour optimiser les coûts, la consommation et l'utilisation des ressources énergétiques locales. Ces deux approches sont étudiées dans le cadre de micro-réseaux intégrant des batteries, des panneaux photovoltaïques et des charges dynamiques.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une base théorique et méthodologique solide pour comprendre et analyser les systèmes photovoltaïques autonomes et les micro-réseaux hybrides. Ces modèles et stratégies de gestion énergétique visent à soutenir le développement de solutions modernes et durables, tout en répondant aux exigences croissantes en matière d'efficacité, de fiabilité et de réduction des coûts dans les systèmes énergétiques modernes.

### 3-2. La modélisation des systèmes PV

Pour modéliser le comportement d'un système PV, composé par des rangées reliées en parallèle, qui à leur tour sont constituées des modules reliés en série. Le but est de prévoir le comportement et le rendement de la puissance de tels systèmes dans diverses conditions environnementales[1], et particulièrement dans le cas d'ombrager partiel. L'application est prôtée à la forme et à la position de l'ombre relativement avec la position des diodes de déviation. Le but d'un tel modèle est de gagner en perspicacité sur les effets d'ombrager[2], de disparité de modules, et d'échec partiel de cellules ou de modules sur la nuisance de sortie du système PV et la caractéristique I-V, et les performances de la technique MPPT en conditions non-idéales.

Pour déterminer l'efficacité d'un système PV (basé sur sa courbe I-V expérimentalement mesurée) sous des contraintes comme les résistances série, présence d'ombrager partiel ou un défaut de fonctionnement de la cellule, ou de mauvaises connexions. Le but est d'obtenir un simple modèle, qui peut avoir une qualité acceptable d'approximation, tout en faisant déterminer ses paramètres analytiques par simples formules, ainsi que la courbe I-V mesurée pour calculer certains paramètres (comme décrit dans le paragraphe suivant), et avoir la possibilité de réaliser une évaluation de la condition physique du module ou du panneau d'après les paramètres fournis par le constructeur, par exemple la température et l'éclairement. Le modèle n'est pas prévu pour pouvoir reconstituer la courbe I-V mesurée, (qui pourrait avoir une forme compliquée selon l'ombrager partiel, décoloration de la feuille en plastique protectrice, etc.), et donc elle peut être maintenue simple.

### 3-3. Photovoltaïque système

Un système d'énergie alternative autonome est constitué d'au moins deux sources d'énergie, dont au moins l'une est renouvelable [3]. Le solaire est une source d'énergie prometteuse, mais son efficacité dépend des conditions climatiques et des zones géographiques[4]. Dans les systèmes de batterie de secours photovoltaïques résidentiels, on retrouve généralement un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie solaire en électricité, des batteries au plomb inondées à décharge profonde pour stocker cette électricité, un contrôleur de charge à modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour réguler le processus de charge des batteries, et un convertisseur de puissance pouvant fonctionner en mode de conversion DC/AC ou

AC/DC. La Figure (3.1) illustre un aperçu global d'ensemble schématique d'un système hybride d'énergie renouvelable photovoltaïque/batterie (REHS) typique. Dans ce système, le générateur photovoltaïque et les batteries sont couplés à l'onduleur et connectés à un système de bus AC, qui alimente directement les charges électriques. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, la batterie peut prendre le relais en tant que source principale pour alimenter les charges.

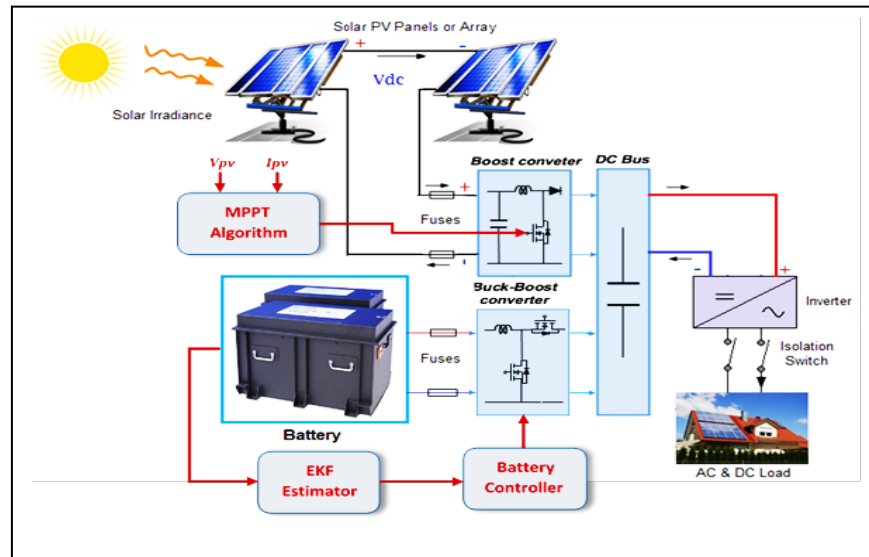


Figure 3. 1 Schéma illustrant la configuration étudiée du système photovoltaïque autonome.

Ces systèmes d'énergie renouvelable avec stockage de batterie offrent une solution efficace pour les zones où l'énergie solaire est intermittente ou insuffisante. Ils permettent de maximiser la consommation d'énergie solaire, de stocker l'énergie excédentaire pour une utilisation ultérieure et d'assurer une alimentation fiable en cas de fluctuations de la production solaire. Ces systèmes dans la promotion des énergies renouvelables jouent un rôle essentiel, et dans l'évolution vers une énergie plus écologique et durable.

### 3-4. La modélisation d'un module PV

Il y a deux modèles bien connus et très répandus, tous les deux avec des niveaux de complexité différents: la simple-diode (simple-exponentiel), et celui des deux-diodes (double-exponentiel). Les deux modèles sont fondés sur l'équation de Shockley de la diode [5]. Les versions les plus communes de ces modèles sont présentées dans le paragraphe suivant.

### 3-4-1. Le modèle idéal

Une cellule photovoltaïque est essentiellement idéale source de courant, connectée en parallèle à une diode qui représente la région de transition p-n de la cellule PV, produisant un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente. Une partie du courant  $I$ , ou  $I_D$ , est envoyée à la diode si une charge résistive est connectée aux terminaux du générateur solaire [6], on a :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (3.1)$$

Pour un générateur PV optimal, il est nécessaire que la tension aux bornes de la résistance soit égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_D \quad (3.2)$$

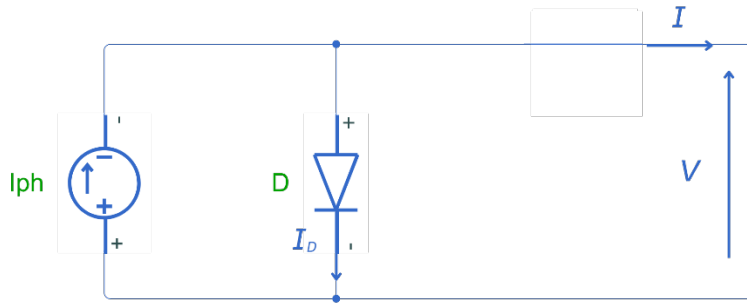


Figure 3. 2 Idéale cellule PV

Étant donné que la diode n'est pas linéaire, sa caractéristique I-V est définie par la relation suivante :

$$I_D = I_0 \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (3.3)$$

Où :

$I_0$  : Diode courant de saturation inverse

$V_T = \frac{kT}{q}$  : Thermique potentiel

$q$  : Electron charge est égale  $1,602 * 10^{-19} C$

$k$  : Boltzmann constante est égale  $1,380662 * 10^{-23} J.K^{-1}$

$T$  : Température (°K)

La relation du courant débité est :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (3.4)$$

Ce modèle demeure essentiellement théoriquement et ne reflète pas le comportement réel d'une cellule photovoltaïque dans des conditions pratiques. Néanmoins, il reste applicable dans quelques suppositions, en ne tenant pas compte de pertes de tension ou de courants de fuite, par exemple. Il trouve également d'autres modèles, bien que théoriquement représentent plus précisément le comportement réel d'une cellule photovoltaïque [7].

### 3-4-2. Le modèle de simple-diode a quatre-paramètres

Ce modèle comprend une source de courant constant qui génère un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente. Elle est connecté en parallèle avec une diode, qui représente la zone de transition P-N de la cellule photovoltaïque [8]. On modélise dans ce modèle, les pertes dues aux contacts et les intercommunications entre les cellules et les modules par la résistance série interne du module. Il a relativement la bonne précision d'approximation, il est peut-être le modèle le plus approprié pour le diagnostic des panneaux PV, comme il offre un excellent équilibre entre la précision d'approximation et la simplicité [9]

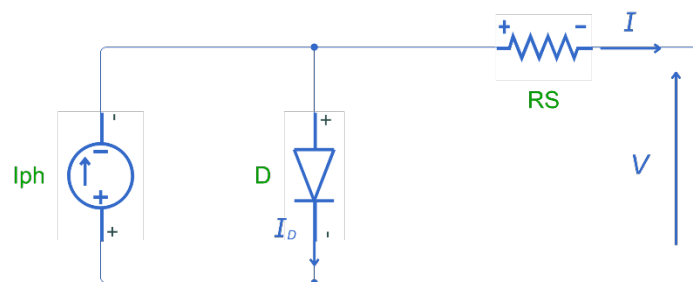


Figure 3. 3 Simple diode modèle cellule PV

La relation suivante régit le courant fourni à la sortie :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_S}{AV_T}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Avec :

- ✚  $R_s$  : Résistance série interne de module (Ohm)
- ✚  $I_o$  : Courant de saturation inverse (Ampère)
- ✚  $A$  : Facteur d'idéalité de la diode
- ✚  $I_{ph}$  : photo -Courant produit (Ampère)

### 3-4-3. Simple diode modèle a cinq-paramètres

Il s'agit d'un modèle basique avec une résistance de shunt du module, qui simule les pertes causées par les courants de fuite à travers la jonction et dans la cellule en raison d'irrégularités cristallines et d'impuretés [10].

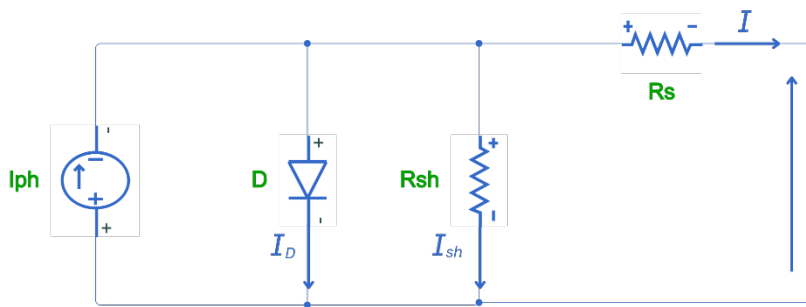


Figure 3. 4 Simple diode modèle cellule PV, avec des deux résistances série et shunt.

La formule I-V typique de ce circuit est :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{A V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

Avec :  $R_{sh}$  résistance de shunt de module (ohm)

### 3-4-4. Double-diodes modèle

La diode supplémentaire dans le circuit analogique représente à la fois les pertes résultant de la recombinaison externe et la recombinaison du porteur dans la zone de charge et d'espace. Le courant de diffusion du composant dans ce modèle est dirigé par le premier diode [11].

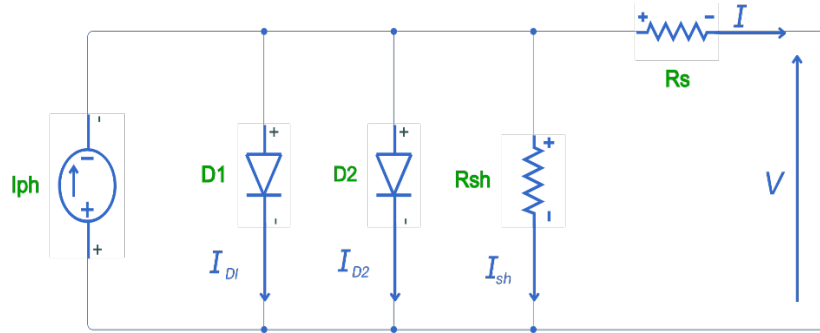


Figure 3. 5 Double diodes modèle, avec des deux résistances série et shunt.

On a :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( \exp\left(\frac{V+IR_S}{A_1 V_t}\right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp\left(\frac{V+IR_S}{A_2 V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \quad (3.7)$$

Avec :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (3.8)$$

- ✚  $I_{01}$  Inverse courant de saturation de la première diode.
- ✚  $I_{02}$  Inverse courant de saturation de la deuxième diode.

Le modèle de simple-diode s'appelle souvent le modèle de quatre-paramètres, car il a quatre paramètres inconnus qui doivent être déterminés, avant que le modèle puisse être établi :

$I_0$ ,  $I_{ph}$ ,  $A$ , et  $R_s$ .

En cas de modèle de double-diodes, un paramètre additionnel est présenté par le courant inverse de saturation de la deuxième diode, mais les facteurs d'idéalité  $A$  de la diode, sont considérés être connus pour les deux diodes, qui sont 1 et 2, respectivement [12].

Des tests ont confirmé que les deux modèles double-exponentiel de 6 et 7 paramètres, donnent un ajustage de précision de qualité le plus élevé, mais il est difficile mathématiquement de déterminer ces paramètres à la suite de la présence de terme exponentielle de l'équation de la jonction PN de la diode.

L'objectif de cette modélisation est de mettre à l'épreuve les méthodes de MPPT ou une prévision qualitative sur le sujet de l'effet d'ombrager partiel ou les modules mal adaptés, de mettre à l'épreuve les méthodes de MPPT ou une prévision qualitative sur le sujet plutôt qu'un modèle très précis d'une cellule. De plus, étant donné les fluctuations intrinsèques des paramètres des cellules, il est impossible de concevoir un modèle très précis pour chaque cellule dans un système de photovoltaïque plus grand. A cet effet, la précision de la représentation du modèle de simple-diode est considérée comme suffisante, et dans notre thèse nous avons utilisé le modèle de simple-diode à cinq paramètres.

### 3-5. Détermination des paramètres de simple-diode à cinq paramètres

A cinq variables ( $I_{ph}, I_0, A, R_S, R_{sh}$ ) est un modèle largement utilisé, Ces paramètres ne peuvent pas être évalués et ne sont pas habituellement intégrés dans les informations des fabricants. Ainsi, il est nécessaire de les déterminer en utilisant l'équation I-V du système pour divers points de fonctionnement (fournis par les fabricants) [13].

On peut écrire l'équation (3.6) pour les trois points distincts de la caractéristique I-V [14] :






Le court-circuit point, la puissance maximale point, et le circuit ouvert point.

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{I_{SC} R_S}{A V_t}\right) - \frac{I_{SC} R_S}{R_{sh}} \quad (3.9)$$

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_S}{A V_t}\right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_S}{R_{sh}} \quad (3.10)$$

$$I_{oc} = 0 = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{V_{oc}}{A V_t}\right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3.11)$$

Avec

-   $I_{SC}$  Court-circuit, courant au STC.
-   $V_{oc}$  Circuit ouvert tension au STC.
-   $V_{mpp}$  Tension au point maximum de puissance (MPP) dans STC.
-   $I_{mpp}$  Courant au MPP au STC.
-   $P_{mpp}$  Puissance au MPP au STC.

Les paramètres ci-dessus sont normalement fournis par le constructeur de panneau.

La dérivée de la puissance par rapport la tension est zéro pour  $V = V_{mpp}$  et  $I = I_{mpp}$  :

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{mpp} \text{ et } I=I_{mpp}} = 0 \quad (3.12)$$

Jusqu'ici on a quatre équations disponibles, mais il y a cinq paramètres à trouver, donc une cinquième équation doit être trouvée, pour cela on utilisera la dérivée du courant avec la tension au court-circuit conditionné, qui est principalement déterminée par la résistance de shunt  $R_{sh}$  [15].

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{SC}} = -\frac{1}{R_{sh}} \quad (3.13)$$

### 3-5-1. Extraction des paramètres

D'après les relations (3,9) et (3,11), on peut exprimer le photo- courant produit  $I_{ph}$  et le courant de saturation  $I_0$  comme suit [16] :

$$I_{ph} = I_0 \exp\left(\frac{V_{OC}}{A V_t}\right) + \frac{V_{OC}}{R_{sh}} \quad (3.14)$$

En insérant l'équation (3.14) dans l'équation (3.9), il prend la forme :

$$I_{SC} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{OC}}{A V_t}\right) - \exp\left(\frac{I_{SC} R_s}{A V_t}\right) \right] + \frac{V_{OC} - I_{SC} R_s}{R_{sh}} \quad (3.15)$$

La deuxième limite dans la parenthèse de l'équation ci-dessus peut être négligée, car elle a une taille insignifiante comparée à la première limite. Donc l'équation (3.15) devient :

$$I_{SC} = I_0 \exp\left(\frac{V_{OC}}{A V_t}\right) + \frac{V_{OC} - I_{SC} R_s}{R_{sh}} \quad (3.16)$$

La solution de l'équation ci-dessus pour le  $I_0$ , a comme conséquence :

$$I_0 = \left( I_{SC} - \left( \frac{V_{OC} - I_{SC} R_s}{R_{sh}} \right) \right) \exp\left(-\frac{V_{OC}}{A V_t}\right) \quad (3.17)$$

Les équations (3.14) et (3.17) peuvent être insérées dans l'équation (3.10), on obtiendra alors

$$I_{mpp} = I_{sc} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s - I_{sc}R_s}{R_{sh}} - \left( I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc}R_s}{R_{sh}} \right) \exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s - V_{oc}}{A V_t}\right) \quad (3.18)$$

L'expression ci-dessus contient toujours trois paramètres inconnus :  $R_s$ ,  $R_{sh}$ , et  $A$ .

La dérivée de la puissance avec la tension à MPP peut être écrite comme suit :

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=v_{mpp} \text{ et } I=I_{mpp}} = \frac{d(PV)}{dV} = I + \frac{dI}{dV}V \quad (3.19)$$

De ce fait, pour obtenir la dérivée de la puissance à MPP, il faut trouver la dérivée de l'équation (3.18) par rapport la tension.

Cependant, l'équation (3.18) est une équation transcendante, et elle a besoin de méthodes numériques pour exprimer  $I_{MPP}$ , donc elle peut être écrite en tant que :

$I = f(I, V)$  En différenciant

$$dI = dI \frac{\partial f(I,V)}{\partial I} + dV \frac{\partial f(I,V)}{\partial V} \quad (3.20)$$

La relation entre le courant et la tension est :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\frac{\partial}{\partial V}f(I,V)}{1 - \frac{\partial}{\partial I}f(I,V)} \quad (3.21)$$

De (3.21) et de (3.19) on trouve :

$$\frac{dP}{dV} = I_{mpp} + \frac{V_{mpp} \frac{\partial}{\partial V}f(I,V)}{1 - \frac{\partial}{\partial I}f(I,V)} \quad (3.22)$$

D'après ce qui précède :

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{I=I_{mpp}} = I_{mpp} + V_{mpp} \frac{\frac{(I_{sc}R_{sh} - V_{oc} + I_{sc}R_s) \exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s - V_{oc}}{A V_t}\right) - 1}{A V_t R_{sh}}}{1 + \frac{(I_{sc}R_{sh} - V_{oc} + I_{sc}R_s) \exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s - V_{oc}}{A V_t}\right) + \frac{R_s}{R_{sh}}}} \quad (3.23)$$

Maintenant, il y a deux équations, l'équation (3.18) et (3.23), avec trois inconnus, on peut utiliser l'équation (3.13) comme troisième équation. Les équations (3.13), (3.22) et (3.23) mènent à :

$$-\frac{1}{R_{sh}} \Big|_{I=I_{SC}} = \frac{\frac{(I_{sc}R_{sh}-V_{oc}+I_{sc}R_s) \exp\left(\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s-V_{oc}}{AV_t}\right) - \frac{1}{R_{sh}}}{AV_t R_{sh}}}{1 + \frac{(I_{sc}R_{sh}-V_{oc}+I_{sc}R_s) \exp\left(\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s-V_{oc}}{AV_t}\right) + \frac{R_s}{R_{sh}}}{AV_t R_{sh}}} \quad (3.24)$$

Maintenant, il est possible de déterminer les trois paramètres inconnus,  $R_s$ ,  $A$ , et  $R_{sh}$  en utilisant les équations (3.18), (3.23) et (3.24). Ces équations ne permettent pas de séparer les inconnus et de les résoudre analytiquement, elles sont résolues en utilisant des approches numériques, comme la méthode utilisée, de newton raphson [17]

### 3-5-2. Facteurs limitatifs du rendement

#### A. L'influence de l'éclairement homogène

Produite par le système de PV (cellule, module ou un panneau) une puissance change quand l'irradiance change. Elle dépend du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) qui est directement proportionnel à l'irradiance [18] :

$$I_{sc}(G) = I_{sc, stc} \frac{G}{G_{stc}} \quad (3.25)$$

#### B. Influence de l'éclairement inhomogène

Dans certaines situations, il est difficile d'assurer une distribution uniforme de l'irradiation sur la totalité du générateur photovoltaïque (PV) en raison de diverses sources d'ombres partielles, telles que à l'automne des feuilles d'arbre tombées ou des infrastructures de bâtiments projetant des ombres. Lorsqu'une ou plusieurs cellules du générateur PV sont exposées à une irradiation différente par rapport à leurs voisines proches, cela entraîne un comportement dégradé. Le surplus de courant fourni par les cellules plus éclairées doit être dissipé par les cellules qui reçoivent moins d'énergie, ce qui peut entraîner des échauffements locaux significatifs, pouvant même provoquer des

dommages sur une partie du générateur PV si ce défaut persiste [19]. En effet, la présence de poussières ou de saletés sur l'ensemble des capteurs peut progressivement entraîner ce genre de problème. Ces phénomènes ont un impact directement sur la production énergétique du générateur photovoltaïque (PV). La puissance électrique délivrée par le générateur peut alors considérablement diminuer par rapport à la puissance produite dans des conditions d'éclairement homogène. Les poussières agissent comme des obstacles à la réception de la lumière solaire par les cellules photovoltaïques, réduisant ainsi leur efficacité globale. Une maintenance régulière et un nettoyage approprié des panneaux sont donc essentiels pour maintenir des performances optimales et maximiser la production d'énergie solaire [20].

### C. L'influence de la température

Pour maintenir des performances optimales, les concepteurs et installateurs de systèmes photovoltaïques, ils doivent tenir compte des conséquences de la température ; car Lorsqu'une cellule est à l'exposition à une irradiation de  $1 \text{ kW/m}^2$ , seulement 12% de cette énergie est transformée en électricité, tandis que les 88% restants sont dissipés sous forme de chaleur. S'il n'y a pas de photopile avec une ventilation adéquate, elle peut rapidement la température augmente, ce qui entraîne une dégradation des performances électriques.

L'efficacité d'une cellule photovoltaïque est évaluée en fonction de la capacité à convertir l'énergie solaire en électricité. À mesure que la température ambiante augmente, la température des cellules photovoltaïques augmente également, ce qui entraîne plusieurs effets néfastes :

- Réduction de la tension : Aux bornes des cellules la tension baisse avec l'élévation de la température. Cela entraîne diminution de la différence de potentiel disponible pour permettre la circulation du courant électrique.
- Augmentation du courant de fuite : À des températures plus élevées, le courant de fuite à travers les cellules augmente également. Cela implique une quantité accrue de courant circule sans aider à générer de l'électricité, entraînant des pertes d'énergie.

- Diminution du rendement global : La combinaison de la réduction de la tension et de l'augmentation du courant de fuite entraîne une diminution du rendement global des cellules photovoltaïques [21].

En général, pour estimer la température de la cellule photovoltaïque Il est important de considérer différents facteurs par exemple la température ambiante, l'intensité du rayonnement solaire, en utilisant la relation suivante [22]:

$$T_j = T_{amb} + E_s \left( \frac{Noct-20}{800} \right) \quad (3.26)$$

Où, le constructeur fournit une température nominale de fonctionnement de la cellule *Noct*.

Pour un module, on estime une baisse de puissance fournie d'environ 0,5% par degré pour un module. La dépendance photo-courant de la température on peut la représenter par l'équation ci-dessous. [23]:

$$I_{ph}(T) = I_0(T) \exp\left(\frac{V_{oc}(T)}{A V_t}\right) + \frac{V_{oc}(T)}{R_{sh}} \quad (3.27)$$

En résumé, Le courant  $I_{ph}$ , il est directement influencé par les rayonnements solaires  $E_s$  et de la température de la cellule  $T_j$  est indiqué par la relation ci-dessous [33] :

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2(E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (3.28)$$

#### D. L'influence de la résistance série $R_s$

Série résistance caractérise les pertes d'énergie qui se produisent en raison de l'effet Joule causé par la résistance intrinsèque du matériau semi-conducteur de la cellule photovoltaïque. Elle comprend également les pertes liées aux grilles de collecte, qui peuvent agir comme des résistances supplémentaires dans le circuit électrique de la cellule.

Les électrodes à résistance élevée avec des contacts semi-conducteurs réduisent considérablement la tension et le courant de sortie, ce qui restreint le rendement de conversion [24].

Reprenant l'équation de base [25] :  $I = I_L - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q(V+I.R_s)}{A.k.T}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}}$  et En ignorant l'impact de la conductance shunt, on obtient la tension de circuit-ouvert:

$$V_{OC} = \frac{AkT}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} \right) \quad (3.29)$$

Elle demeure la même lorsque  $R_s$  accroît et que le courant de court-circuit est égal

$$I_{SC} = I_L - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q.R_s.I_{SC}}{A.k.T}} - 1 \right) \quad (3.30)$$

Varie sensiblement dès que  $R_s I_{SC} \gg A \frac{kT}{q}$  et la puissance optimale devient :

$$P_m = \frac{I_m \cdot V_m}{1 + \frac{R_s}{V_m} I_m} \quad (3.31)$$

### E. Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$

La fuite du courant entre la grille supérieure et le contact arrière est caractérisé par la résistance parallèle  $R_{sh}$ . En général, elle dépasse largement série résistance  $R_s$ .

De plus, shunt résistance correspond aux pertes dans la jonction, autour des bords de la cellule et dans les zones non périphériques, lorsque le cristal présente des défauts et que des substances étrangères impures se précipitent dans la zone de l'intersection.

Donc, nous pouvons conclure que  $R_{sh}$  s'agit d'un processus de fabrication lié [26].

La grandeur de  $R_{sh}$  pour une cellule au Si est :  $R_{sh} = 10^2$  à  $10^4$  (Ohm), Avec le regroupement de cellules solaires en série, il augmente et diminue avec une connexion parallèle [27].

## 3-6. Modélisation des convertisseurs

Le convertisseur est un dispositif qui permet de modifier continue tension fournie par les batteries ou les panneaux afin de l'adapter à des récepteurs qui bénéficient d'une autre valeur de tension continue ou d'une autre forme (alternative). Ainsi, selon cette définition, deux catégories distinctes d'appareils électroniques sont incluses entre le générateur photovoltaïque et les charges :

- Un convertisseur continu-continu sert d'interface entre le générateur et la charge afin de transférer de l'un à l'autre la puissance maximale.

- ▣ Un convertisseur continu-alternatif est un des dispositifs qui convertissent l'énergie de type continu en énergie alternatif provenant du panneau ou du stockage.

Dans notre travail, nous allons nous concentrer sur les convertisseurs continu-continu. (Boost, Buck-Boost), qui est l'un des convertisseurs couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques (PV), pour élever la tension continue d'une source d'énergie, telle que celle provenant des panneaux solaires, à une tension supérieure, adaptée aux besoins du système ou du réseau auquel il est connecté. C'est un composant essentiel afin d'optimiser la consommation d'énergie solaire et pour maximiser l'efficacité globale du système photovoltaïque [28].

### 3-6-1. Les convertisseurs DC/DC (Boost)

Le convertisseur élévateur (boost) est utilisé lorsqu'une tension moyenne contrôlée est requise en convertissant une tension continue ( $V_{in}$ ) en une autre tension continue ( $V_0$ ). Comme le montre la [figure \(3.6\)](#), il comprend une source de tension continue d'entrée  $V_{in}$ , d'une inductance élévatrice L, d'un interrupteur contrôlé (MOSFET), d'une diode D, d'un condensateur de filtrage C et d'une résistance R de charge. Lorsque S l'interrupteur est en position allumée, l'inductance élévatrice stocke l'énergie en provenance du panneau solaire et le courant augmente linéairement. La diode D est inversement polarisée à ce moment-là. Cependant, si l'interrupteur S est éteint, l'inductance stockée l'énergie qui est libérée par la diode vers le circuit d'entrée RC. Comme l'indique le nom du convertisseur, la tension du panneau solaire est ajoutée à la tension de l'inductance (état de décharge) pour la tension de sortie doit toujours être plus élevée que celle d'entrée [29].

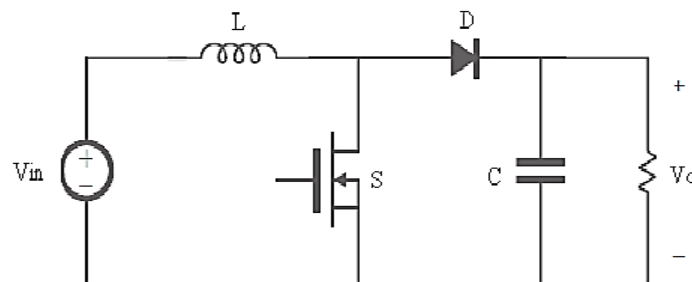


Figure 3. 6 Convertisseur DC-DC Boost

Ce convertisseur est modélisé comme suit [30]

$$V_0 = \frac{V_{in}}{1-\alpha} \quad (3.32)$$

$$I_0 = I(1 - \alpha) \quad (3.33)$$

Où,

$\alpha$ ,  $V_{in}$  et  $I_{in}$ ,  $V_0$  et  $I_0$  sont respectivement le rapport cyclique, la tension et le courant d'entrée PV, la tension et le courant de sortie du convertisseur Boost.

### 3-6-2. Convertisseur DC/DC (Buck-Boost) bidirectionnel

Est un dispositif électronique qui permet de transférer de l'énergie dans deux directions, généralement entre deux niveaux de tension ou deux systèmes d'alimentation.

Le circuit est alimenté par une source de tension  $V_e$ , la sortie étant une charge résistive  $R$  et débite un courant  $I_s$ . L'interrupteur  $K$ , symbolisé ici comme un MOSFET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique ( $\alpha$ ) à la fréquence ( $F = 1/T$ ). Par un tel convertisseur, on cherche à fixer une tension moyenne  $V_s$  de sortie qui réponde aux critères suivants :

- ✓  $V_s < V_e$  Ou bien  $V_s > V_e$  .
- ✓  $V_s$  Réglable à souhait en agissant sur le rapport cyclique ( $\alpha$ ).

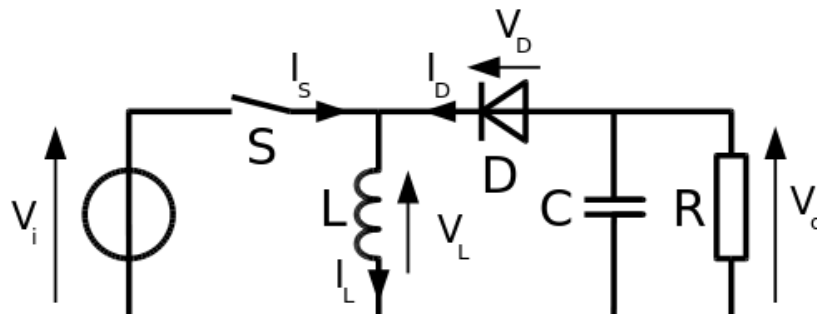


Figure 3. 7 Convertisseur DC-DC Buck-Boost

Durant l'état «  $t_{on}$  », l'énergie apportée par la source ( $V_e$ ) est stockée dans l'inductance  $L$ . Cette énergie est livrée ensuite à la charge pendant l'état «  $t_{off}$  ». En raison de la présence de la diode  $D$ , le courant circule à travers l'inductance  $L$  seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent,  $V_s$  a une polarité opposée à  $V_e$ . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. L'amplitude de  $V_s$  peut être inférieure ou supérieure à celle de  $V_e$  suivant la valeur de  $t_{on}$  et de  $t_{off}$ .

On obtient les équations suivantes :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} * V_e \quad (3.34)$$

$$I_s = (1 - \alpha) * I_l \quad (3.35)$$

La tension de sortie est inférieure à celle de l'entrée lorsque le rapport cyclique est inférieur à un demi ( $\alpha < 1/2$ ) et elle est supérieure à celle-ci dans le cas contraire

### 3-7. Modélisation de la batterie

Effectivement, la batterie remplit un rôle essentiel dans les systèmes autonome photovoltaïque, permettant de conserver l'énergie produite par les panneaux solaires, afin d'être utilisé plus tard lorsque l'irradiation solaire n'est pas suffisante.

La modélisation de la batterie au lithium, comme illustrée dans le circuit équivalent de la représentation simplifiée de son comportement électrique est illustrée par la [figure \(3.8\)](#).

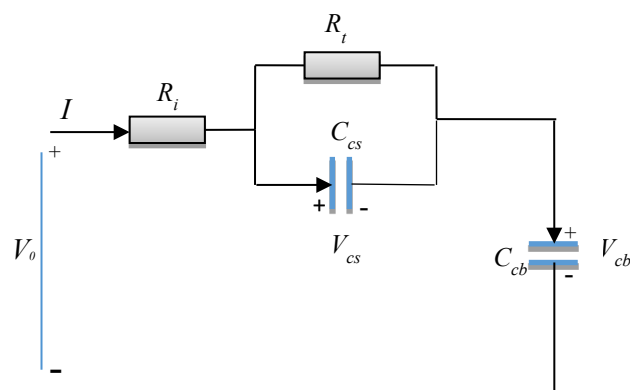


Figure 3. 8 Modèle équivalent d'une batterie au lithium

Où ;

- ✓ Capacités  $C_{cb}$  et  $C_{cs}$  : Elles représentent stockage capacité de la batterie et les effets de diffusion, qui caractérisent les propriétés électrochimiques de la batterie.
- ✓ Résistances  $R_i$  et  $R_t$  :  $R_i$  est interne résistance de la batterie, qui représente les pertes d'énergie internes lors de la décharge et la charge de la batterie.  $R_t$  est la résistance de polarisation, qui est liée aux phénomènes de transfert de charge dans la batterie.
- ✓ Tensions  $V_{cb}$  et  $V_{cs}$  : Ce sont les tensions aux bornes du condensateur de masse ( $C_{cb}$ ) et du condensateur de surface ( $C_{cs}$ ) dans le circuit équivalent.
- ✓ Tension  $V_0$  et courant  $I$  :  $V_0$  représente la tension aux bornes de la batterie, c'est-à-dire la tension réelle disponible pour alimenter les charges externes.  $I$  désigne le courant circulant dans la batterie lors de la charge ou de la décharge [31].

Cette modélisation simplifiée permet de comprendre et de prédire le comportement de la batterie au lithium dans un système photovoltaïque autonome.

Les caractéristiques du modèle figurant à la Figure (3.8) sont régies par les équations suivantes[32] :

$$\dot{V}_{cb} = \frac{I}{C_{cb}} \quad (3.36)$$

$$\dot{V}_{cs} = \frac{1}{R_t C_{cs}} V_{cs} + \frac{1}{C_{cs}} I \quad (3.37)$$

$$V_0 = V_{cb} + V_{cs} + IR_i \quad (3.38)$$

Étant donné que la relation entre l'état de charge (SOC) et la tension à vide de la batterie ( $V_{oc}$ ) n'est que linéaire par morceaux et statique, on peut définir :

$$V_{cb} = kSoc + d \quad (3.39)$$

Où  $k$  et  $d \neq 0$ , ( $k$  et  $d$  ne sont pas constants et varient en fonction de l'état de charge de la batterie (SOC) et de la température ambiante).

En substituant (3.39) dans (3.36) à (3.38), le système final peut être défini comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{Soc} \\ \dot{V}_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I}{kC_{cb}} \\ -\frac{1}{R_t C_{cs}} V_{cs} + \frac{1}{C_{cs}} I \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$V_0 = kSoc + V_{cs} + IR_i + d \quad (3.41)$$

Cependant, les batteries doivent être protégées contre la surcharge et la décharge profonde. Cela nécessite une surveillance continue à la fois du SOC et de l'énergie produite par les panneaux solaires [33]. Par conséquent, l'état de charge de la batterie (SOC), qui est utilisé pour estimer sa charge restante, est un paramètre très important pour établir une stratégie de contrôle [34]. Dans ce contexte, le suivi en temps réel avec une estimation précise de son SOC permet non seulement de protéger la batterie contre la surcharge et la décharge excessive et d'améliorer sa durée de vie, mais aussi de permettre aux applications de mettre en œuvre des stratégies de contrôle rationnelles afin d'assurer la fiabilité du système de production d'énergie et d'optimiser la gestion de l'énergie[35].

Il existe de nombreux types de batteries actuellement utilisées dans l'industrie : batteries au plomb-acide, Ni-MH, Ni-Cd et batteries Li-ion. Toutes ces batteries ont un stockage d'énergie chimique qui ne peut pas être directement accessible et mesuré. Dans la littérature, l'évaluation de l'état de charge (SOC) repose essentiellement sur deux méthodes : méthodes physiques et méthodes électriques :

- **Méthodes physiques** : Sont basées sur l'observation des changements chimiques et physiques qui se produisent dans la batterie pendant la charge ou la décharge en mode opérationnel. Parmi ces méthodes, l'une d'entre elles consiste à mesurer la densité (ou la densité relative) de l'électrolyte.

- **Méthodes électriques** : Ces méthodes sont applicables à la majorité des batteries. Elles sont calculées à partir des mesures de paramètres électriques tels que le courant, la tension, interne résistance et l'impédance. Parmi ces méthodes : la méthode de comptage de charge ou d'intégration du courant, les méthodes basées sur les réseaux de neurones artificiels (ANN), et plus récemment le Filtre de Kalman Étendu (EKF).

Le modèle proposé, qui reflète mieux la véritable réponse SOC de la batterie au lithium, est construit en utilisant le filtre de Kalman étendu (EKF) comme estimateur d'état, réalisant ainsi un capteur logiciel pour la mesure du SOC de la batterie. L'avantage d'une telle méthode est que le SOC est estimé de manière optimale même en présence de bruit de mesure à large bande affectant le système [36].

### 3-8. Kalman étendu filtre

(EKF) Kalman étendu filtre considère les caractéristiques de bruit des capteurs de courant et de tension, et surmonte efficacement les effets des erreurs aléatoires. Il existe plusieurs alternatives au filtre de Kalman, en fonction de la non-linéarité ou de la linéarité du modèle mathématique, ainsi que de sa discrétisation ou de sa continuité. Dans ce travail, la batterie est le modèle dynamique, et l'état de charge constitue la variable d'état à estimer. Si le modèle est non linéaire, nous pouvons utiliser un processus de linéarisation à chaque pas de temps pour approximer le système non linéaire par un système linéaire à variation temporelle (LTV). Ce système LTV est ensuite mis en œuvre par le filtre de Kalman, ce qui aboutit à un Filtre de Kalman Étendu (EKF) sur le vrai système non linéaire. Notez que, bien que l'efficacité de l'EKF ait été validée dans de nombreuses études [35][37][38], dans cette étude, l'EKF, basé sur les équations dynamiques, cela sert à estimer l'état de charge de la batterie [39], comme illustré à la [figure \(3.9\)](#).

Le système non linéaire est présenté comme suit :

$$\dot{x}(t) = f(x, u) + w \quad (3.42)$$

$$y(t) = g(x, u) + v \quad (3.43)$$

Dans l'équation donnée,  $w$  et  $v$  sont des processus stochastiques gaussiens blancs de moyenne nulle avec des matrices de covariance  $\Sigma_w$  et  $\Sigma_v$  respectivement. Maintenant,  $f(x,u)$  est une fonction de transition d'état non linéaire et  $g(x,u)$  est une fonction de mesure non linéaire. L'entrée est définie comme  $u(t) = I$  et la sortie est  $y = V_0$ .

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{u}{kC_{cb}} \\ -\frac{1}{R_t C_{cs}} x_2 + \frac{1}{C_{cs}} u \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$g(x, u) = kx_1 + x_2 + R_i u + d \quad (3.45)$$

À chaque pas de temps,  $f(x,u)$  et  $g(x,u)$  sont linéarisés par une expansion de série de Taylor du premier ordre. Le modèle linéarisé est le suivant :

$$\delta \dot{x} = A_k \delta x + B_k \delta u \quad (3.46)$$

$$\delta y = C_k \delta x + D_k \delta u \quad (3.47)$$

Où ;  $A_k = \left. \frac{\partial f(x,u)}{\partial x} \right|_{x(t),u(t)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_t C_{cs}} \end{bmatrix}$  et  $C_k = \left. \frac{\partial g(x,u)}{\partial x} \right|_{x(t),u(t)} = [k \quad 1]$

Le modèle représenté par les équations (3.44) à (3.45) peut être discrétisé de la manière suivante :

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k \quad (3.48)$$

$$y_{k+1} = C_d x_k + D_d u_k \quad (3.49)$$

Ou,  $A_d \approx E + T_c A_k$ ,  $B_d \approx T_c B_k$ ,  $C_d \approx C_k$ , et  $D_d \approx D_k$ ,  $E$  est la matrice identité et  $T_c$  est la période d'échantillonnage.

L'algorithme de l'EKF comporte trois phases distinctes : Initialisation, Prédiction et Mise à jour [39] :

- *Initialisation* : pour  $k = 0$ , étant donné les valeurs initiales de l'état  $x_0$ , la matrice de covariance  $P$ , les variances de bruit  $\Sigma_w$  et  $\Sigma_v$ .
- *Prédiction* : L'étape de prédiction consiste à utiliser l'estimation de l'état du moment précédent pour calculer une estimation de l'état actuel.

Pour  $k = 1, 2, \dots$ , calculer

Mise à jour de l'estimation de l'état

$$\bar{x}_{k/k-1} = f(\bar{x}_{k-1/k-1}, u_{k-1})$$

Mise à jour temporelle de la covariance d'erreur

$$P_{k/k-1} = A_d P_{k-1/k-1} A_d^T + \Sigma_w$$

- *Mise à jour et correction* : À cette étape, les mesures actuelles sont utilisées pour corriger l'état prédit afin d'obtenir une estimation plus précise de l'état.

Matrice de gain de Kalman

$$L_k = P_{k/k-1} C_d^T [C_d P_{k/k-1} C_d^T + \Sigma_v]^{-1}$$

Mise à jour de l'estimation de l'état basée sur les mesures

$$\bar{x}_{k/k} = \bar{x}_{k/k-1} + L_k [y_k - g(\bar{x}_{k/k-1}, I_k)]$$

Mise à jour de la covariance d'erreur basée sur les mesures

$$P_{k/k} = (E - L_k C_d) P_{k/k-1}$$

Ainsi, en modélisant le système de batterie selon les équations (3.44) et (3.45), les erreurs causées par les variations des paramètres  $d$  et  $k$  peuvent être considérées comme le bruit du système.

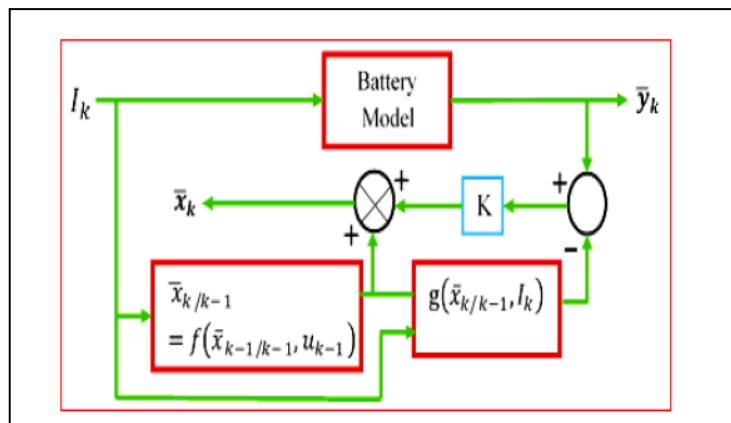


Figure 3. 9 Structure de filtre de Kalman Etendu

### 3-9. Le système de gestion de l'énergie (EMS)

Un système de gestion de l'énergie (EMS) pour un système photovoltaïque (PV) est conçu pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, gérer les ressources disponibles, et assurer la stabilité du système en fonction des besoins énergétiques et des contraintes. Un contrôle à deux niveaux est utilisé pour maintenir une opération stable du système [40] :

- Au niveau système, les modes de fonctionnement des convertisseurs individuels sont déterminés par le système de gestion de l'énergie (EMS) en fonction de la puissance nette du système, des contraintes énergétiques et du taux de charge/décharge de la batterie. Le diagramme logique de contrôle du système est illustré à la [Figure \(3.10\)](#). La  $P_{net}$  variable est définie comme la puissance maximale totale générée, moins la charge totale et moins les pertes. Les contraintes énergétiques de la batterie sont basées sur les limites de l'état de charge (SOC), définies par  $SOC_{min} < SOC \leq SOC_{max}$ . Il convient de noter que le SOC ne peut pas être mesuré directement, mais peut être estimé grâce à l'estimateur d'état EKF. La contrainte sur le taux de charge/décharge est donnée par  $P_b \leq P_{bmax}$ .
- Au niveau local, les convertisseurs individuels fonctionnent en fonction des commandes de mode émises par l'EMS. Le système PV, doit fonctionner en mode hors-MPPT (off-MPPT) pour les cas 1 et 2, et en mode MPPT (on-MPPT) pour les autres cas.
  - ✚ Le convertisseur de batterie peut fonctionner en mode veille, en mode charge ou en mode décharge selon les cas.
  - ✚ Le convertisseur principal fonctionne en mode onduleur, ou en mode convertisseur.
  - ✚ Un délestage de charge est nécessaire pour maintenir l'équilibre énergétique si l'offre d'énergie est inférieure à la demande et que la batterie atteint son SOC minimum.

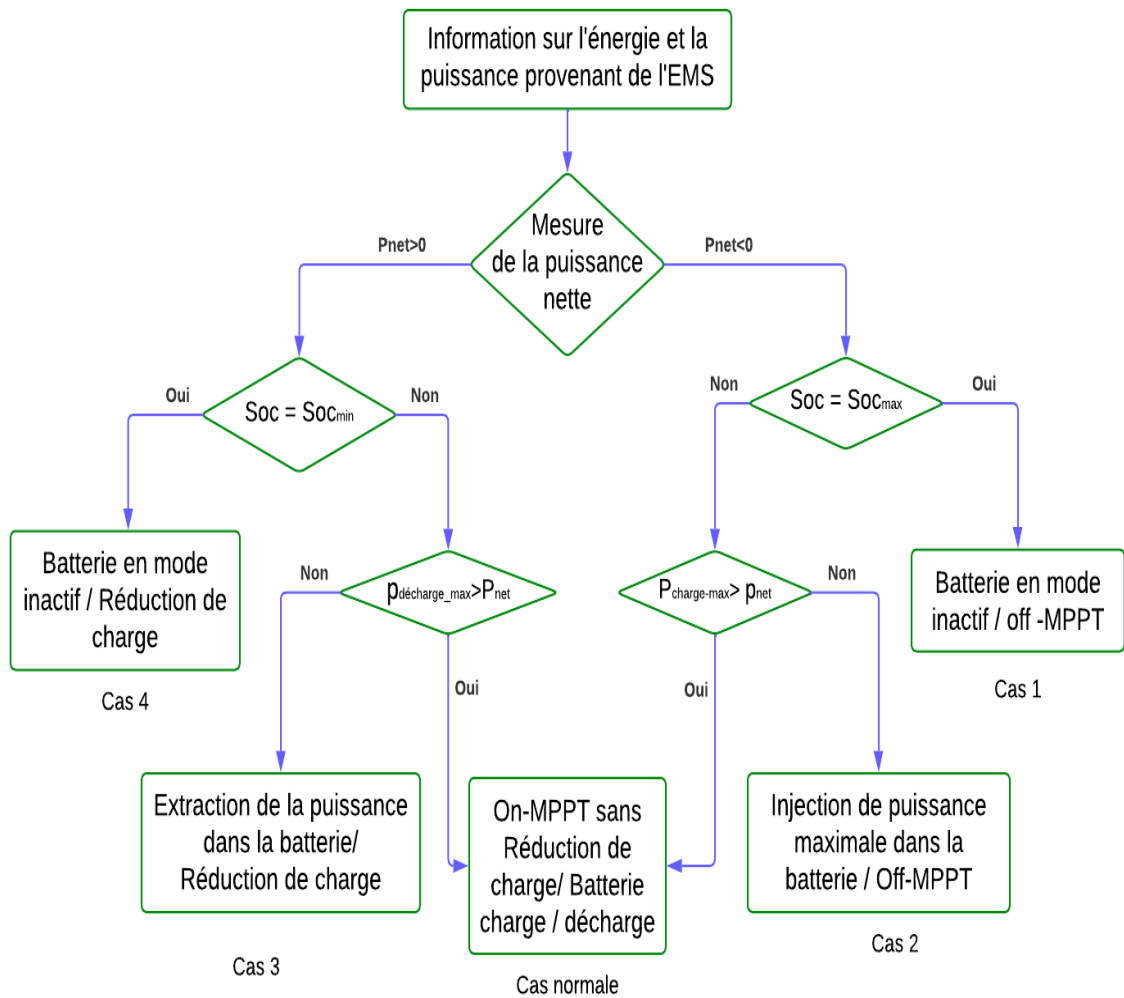


Figure 3. 10 Diagramme de mode de contrôle heuristique pour un Système hybride isolé [40].

### 3-10. Développement d'un système de gestion de l'énergie de micro-réseau à l'aide de méthodes basées sur l'optimisation

Les méthodes basées sur l'optimisation sont largement utilisées pour développer des EMS efficaces pour les micro-réseaux. Ces méthodes visent à minimiser les coûts opérationnels, à améliorer la stabilité du réseau et à garantir une utilisation optimale des ressources énergétiques [41].

### 3-10-1. Optimisation basée sur le décalage de la demande de pointe :

L'objectif ici est de déplacer la demande de pointe d'électricité, en utilisant des stratégies d'optimisation, pour réduire les coûts énergétiques. En d'autres termes, au lieu de consommer beaucoup d'énergie pendant les périodes de forte demande (lorsque les prix sont élevés), l'optimisation cherche à utiliser l'énergie à moindre coût pendant les périodes où la demande est plus faible.

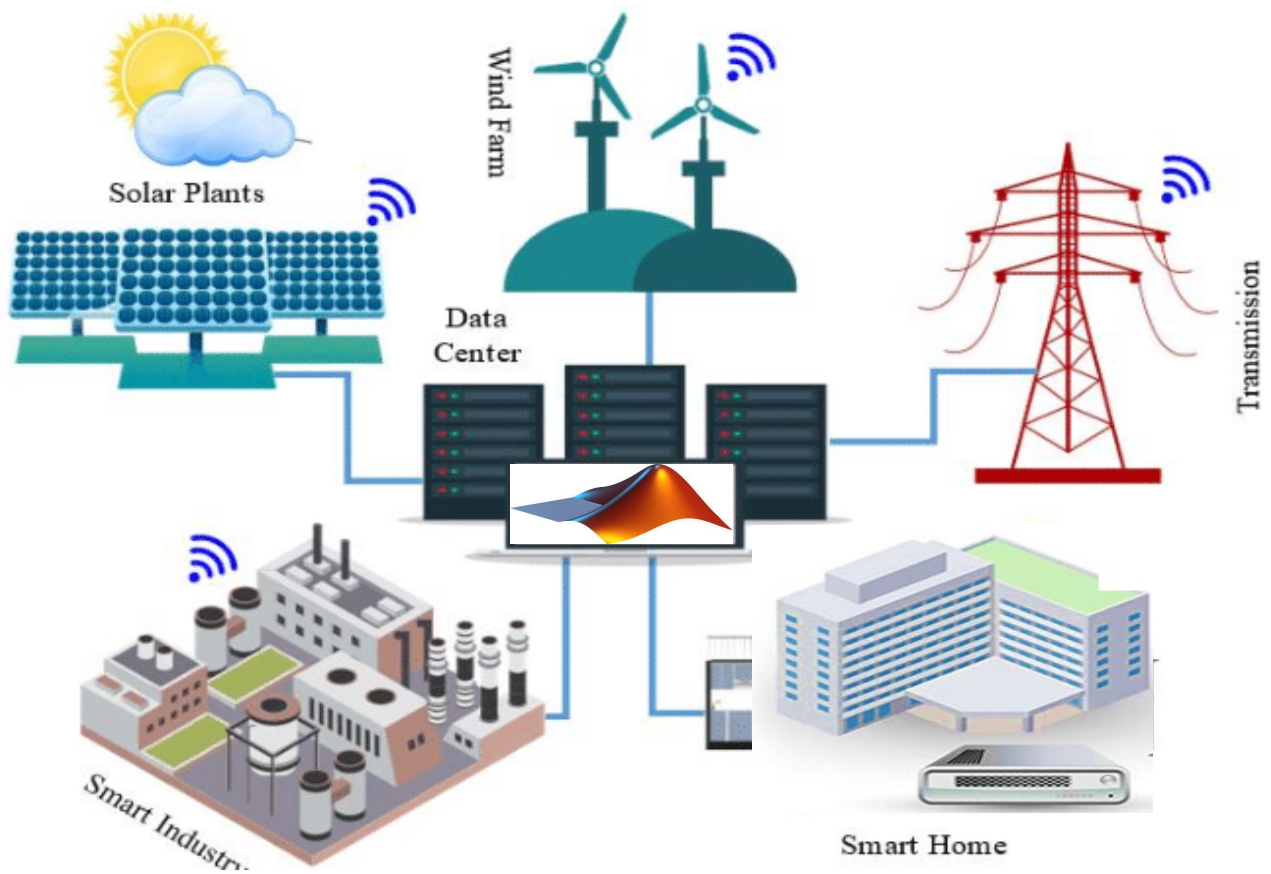


Figure 3. 11. Conception et modélisation d'un système d'optimisation d'énergie

#### A. Fonction objective

L'objectif de l'optimisation dans ce cas est de minimiser le coût total de l'électricité dont le prix varie dans le temps. Cela signifie que l'on cherche à acheter de l'électricité à un tarif plus bas (par exemple, pendant les heures creuses) tout en utilisant

efficacement les sources d'énergie locales, comme une batterie ou un générateur photovoltaïque.

$$C_{tot} = \sum_{k=0}^N C_{grid}(k) * E_{grid}(k) \quad (3.50)$$

- $C_{tot}$  : C'est le coût total de l'électricité.
- $C_{grid}(k)$  : Le prix de l'électricité du réseau à l'instant  $k$ .
- $E_{grid}(k)$  : La quantité d'énergie importée du réseau à l'instant  $k$ .

Cette équation exprime le coût total de l'électricité importée du réseau en fonction du prix du marché consommée à chaque instant  $k$ .

## B. Les Contraintes

Ces contraintes définissent les limites dans lesquelles le système doit fonctionner. Par exemple, elles peuvent inclure les relations entre l'énergie stockée et l'énergie fournie à la batterie, ainsi que l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie.

### ✓ Entrée/sortie d'énergie vers/depuis la batterie :

Ce sont les contraintes qui régissent la façon dont l'énergie est stockée dans la batterie ou utilisée pour alimenter le système. Par exemple, à chaque instant  $k$ , la puissance fournie ou tirée de la batterie doit être suivie et respectée.

$$E_{batt}(k) = E_{batt}(k-1) + P_{batt}(k) * \Delta T \quad (3.51)$$

$E_{batt}(k)$ : L'énergie stockée dans la batterie à l'instant  $k$ .

$E_{batt}(k-1)$ : L'énergie stockée dans la batterie à l'instant précédent.

$P_{batt}(k)$  : La puissance fournie ou reçue de la batterie à l'instant  $k$ .

$\Delta T$  : Le pas de temps (la durée entre deux points dans le temps).

Cette équation représente l'évolution de l'énergie stockée dans la batterie, qui dépend de la quantité d'énergie qui y est ajoutée ou retirée à chaque instant. L'énergie à l'instant  $k$  est égale à l'énergie de l'instant précédent plus l'énergie supplémentaire fournie ou retirée par la batterie pendant l'intervalle de temps  $\Delta T$ .

- ✓ **Équilibre de puissance** : Cette contrainte garantit que la somme des puissances produites par le système PV, par la batterie et par le réseau doit égaler la puissance requise par la charge à chaque instant. Cela assure que l'énergie produite et stockée est suffisante pour satisfaire la demande à tout moment.

$$P_{pv}(k) + P_{grid}(k) + P_{batt}(k) = P_{Load}(k) \quad (3.52)$$

$P_{pv}(k)$ : La puissance générée par le système photovoltaïque à l'instant  $k$ .

$P_{grid}(k)$ : La puissance importée du réseau à l'instant  $k$ .

$P_{batt}(k)$ : La puissance fournie ou reçue par la batterie à l'instant  $k$ .

$P_{Load}(k)$  : La puissance demandée par la charge à l'instant  $k$ .

Cette équation représente un équilibre énergétique, où la production d'énergie totale (panneaux solaires, batterie, réseau) doit être égale à la demande de la charge à tout moment.

### 3-10-2. Optimisation basée sur un programme linéaire

L'optimisation linéaire est couramment utilisée dans les systèmes énergétiques pour optimiser les coûts, la consommation d'énergie, ou la gestion des ressources énergétiques, tout en respectant certaines contraintes.

Un programme linéaire est généralement formulé sous une forme standard, où l'on cherche à minimiser ou maximiser une fonction linéaire sous des contraintes linéaires. La fonction et les contraintes sont formulées de la manière suivante :

#### A. Fonction objectif (minimisation)

Minimiser la fonction  $f^T x$ , où  $x$  est le vecteur des états, et  $f$  est un vecteur de coûts associés aux variables.

$$\min_x f^T x \quad (3.53)$$

- $x$  : Un vecteur de variables de décision, qui représente les quantités à optimiser (dans ce cas, des puissances ou de l'énergie).
- $f$  : Un vecteur de coefficients associés à chaque variable de décision, qui décrit l'importance ou le coût associé à chaque variable de décision.

### B. Contraintes d'inégalité

Les contraintes d'inégalité sont généralement utilisées pour imposer des limites sur les variables de décision. Par exemple, elles peuvent être utilisées pour s'assurer que la puissance importée du réseau, la puissance fournie par la batterie et l'énergie stockée respectent certaines limites maximales et minimales.

$$A * x \leq b \quad (3.54)$$

- $A$  : Une matrice représentant les coefficients des contraintes d'inégalité.
- $x$  : Le vecteur des variables de décision.
- $b$  : Un vecteur représentant les bornes supérieures des contraintes.

### C. Contraintes d'égalité

Les contraintes d'égalité décrivent généralement les relations physiques ou les bilans énergétiques dans le système, comme l'équilibre de l'énergie entre la production et la consommation.

$$A_{eq} * x = b_{eq} \quad (3.55)$$

- $A_{eq}$  : Une matrice représentant les coefficients des contraintes d'égalité.
- $x$  : Le vecteur des variables de décision.
- $b_{eq}$  : Un vecteur représentant les valeurs égales à respecter pour les contraintes d'égalité.

### 3-10-3. Définir les états nécessaires pour l'optimisation par programme linéaire

Dans ce contexte, les états correspondent aux variables que nous cherchons à optimiser dans notre programme linéaire. Ces états sont généralement les variables qui représentent la gestion de l'énergie, comme la puissance et l'énergie stockée.

- $P_{grid}(1:N)$  : La puissance importée du réseau électrique pendant les étapes de temps 1 à  $N$ .
- $P_{batt}(1:N)$  : La puissance provenant de la batterie pendant les étapes de temps 1 à  $N$ .
- $E_{batt}(1:N)$  : L'énergie stockée dans la batterie pendant les étapes de temps 1 à  $N$ .

Ces variables sont définies comme des vecteurs, où chaque élément du vecteur représente la valeur de la variable à un moment donné (à chaque instant  $k$ ).

Le vecteur  $x$  contient les variables qui doivent être optimisées. Dans ce cas, il s'agit de

$$x = [P_{grid} (1:N) \quad P_{batt} (1:N) \quad E_{batt} (1:N)]$$

**Matrice de contraintes :** Les matrices  $\gamma$  et  $\varphi$  définissent les relations dynamiques et les transformations linéaires dans le système.

$$\begin{bmatrix} I_{N*N} & I_{N*N} & O_{N*N} \\ O_{N*N} & \gamma_{N*N} & \varphi_{N*N} \end{bmatrix} * X = \begin{bmatrix} P_{Load} (1:N) - P_{pv} (1:N) \\ E_{batt} (1) \\ O_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$\gamma_{3*3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & \Delta T & 0 \end{bmatrix}$$

Cette matrice pourrait représenter une relation temporelle, où  $\Delta T$  est un intervalle de temps et chaque élément de la matrice pourrait indiquer la façon dont une variable (par exemple, l'énergie) évolue au fil du temps.

$$\varphi_{3*3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

De même,  $\varphi$  pourrait être utilisée pour une relation de transformation entre les variables du modèle, où chaque élément de la matrice  $\varphi$  exprime un coefficient qui lie les variables d'un vecteur de décision à une autre variable (par exemple, la puissance ou l'énergie).

Ces contraintes d'inégalité définissent les limites maximales et minimales des variables dans le système.

$$\begin{bmatrix} O_{N*N} & I_{N*N} & O_{N*N} \\ O_{N*N} & -I_{N*N} & O_{N*N} \\ O_{N*N} & O_{N*N} & I_{N*N} \\ O_{N*N} & O_{N*N} & -I_{N*N} \end{bmatrix} * X \geq \begin{bmatrix} P_{max} \\ -P_{min} \\ E_{max} \\ -E_{min} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

- $P_{max}$  : La puissance maximale que le système peut consommer ou produire.
- $P_{min}$  : La puissance minimale que le système peut consommer ou produire.
- $E_{max}$  : L'énergie maximale que la batterie peut stocker.
- $E_{min}$  : L'énergie minimale que la batterie peut stocker.

Ces contraintes assurent que le système reste dans des limites sûres et réalistes pour son fonctionnement.

### 3-11. La charge

Le système peut alimenter la charge et l'équipement électrique de manière continue, tels que les équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de manière alternative dans les situations d'utilisation domestique, ce qui requiert un onduleur.

Nous utilisons une charge résistive variable dans notre travail.

### 3-12 Conclusion

Ce chapitre a exploré en détail la modélisation des systèmes photovoltaïques autonomes, en se concentrant sur leurs composantes clés et leurs interactions. La modélisation des cellules photovoltaïques a permis de comprendre l'impact de paramètres critiques tels que l'éclairement, la température, et les résistances série et parallèle sur les performances des modules PV. Ces analyses mettent en évidence l'importance de ces facteurs pour maximiser l'efficacité énergétique. Les convertisseurs DC/DC, notamment les configurations Boost et Buck-Boost, ont été modélisés pour illustrer leur rôle fondamental dans l'adaptation des niveaux de tension et l'optimisation du rendement énergétique.

Une attention particulière a été portée aux batteries, avec une modélisation intégrant le filtre de Kalman étendu (EKF) pour une estimation précise de l'état de charge (SOC). Cette approche améliore significativement la gestion du stockage d'énergie, offrant une base fiable pour le fonctionnement autonome et durable des systèmes étudiés. Enfin, ce chapitre a introduit les premières étapes vers une gestion avancée de l'énergie dans les micro-réseaux hybrides AC/DC. Il a mis en lumière l'importance de la programmation linéaire (PL) comme outil d'optimisation pour relever les défis liés à la complexité de ces environnements, tout en garantissant une gestion efficace et durable.

En conclusion, ce chapitre constitue une base essentielle pour les études futures visant à intégrer des stratégies de contrôle et d'optimisation avancées, à simuler des scénarios réalistes, et à évaluer les performances des systèmes dans des contextes opérationnels variés.

### 3-13. Bibliographies

- [1] M. F. Jalil, S. Khatoon, I. Nasiruddin, and R. C. Bansal, "Review of PV array modelling, configuration and MPPT techniques," *Int. J. Model. Simul.*, vol. 42, no. 4, pp. 533–550, Jul. 2022, doi: 10.1080/02286203.2021.1938810.
- [2] A. Mohammedi, N. Mezzai, D. Rekioua, and T. Rekioua, "Impact of shadow on the performances of a domestic photovoltaic pumping system incorporating an MPPT control: A case study in Bejaia, North Algeria," *Energy Convers. Manag.*, vol. 84, pp. 20–29, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.008>.
- [3] M. H. Uddin, M. A. Baig, and M. Ali, "Comparision of 'perturb & observe' and 'incremental conductance', maximum power point tracking algorithms on real environmental conditions," in *2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube)*, 2016, pp. 313–317. doi: 10.1109/ICECUBE.2016.7495244.
- [4] Y. Sera, Dezso; Baghzouz, "On the Impact of Partial Shading on PV Output Power Institute of Energy Technology," *Proc. RES'08*, 2008.
- [5] R. Abbassi, A. Abbassi, A. A. Heidari, and S. Mirjalili, "An efficient salp swarm-inspired algorithm for parameters identification of photovoltaic cell models," *Energy Convers. Manag.*, vol. 179, pp. 362–372, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.069>.
- [6] H. Chen, S. Jiao, M. Wang, A. A. Heidari, and X. Zhao, "Parameters identification of photovoltaic cells and modules using diversification-enriched Harris hawks optimization with chaotic drifts," *J. Clean. Prod.*, vol. 244, p. 118778, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118778>.
- [7] S. M. Ebrahimi, E. Salahshour, M. Malekzadeh, and Francisco Gordillo, "Parameters identification of PV solar cells and modules using flexible particle swarm optimization algorithm," *Energy*, vol. 179, pp. 358–372, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.218>.
- [8] A. Khatibi, "Generation and combination of the solar cells : A current model review," no. September 2018, pp. 305–322, 2019, doi: 10.1002/ese3.292.
- [9] F. Zhang, X. Wang, M. Wu, X. Hou, C. Han, and Z. Liu, "Optimization design of uncertain parameters for improving the stability of photovoltaic system," *J. Power Sources*, vol. 521, p. 230959, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230959>.

- [10] X. Chen, K. Yu, W. Du, W. Zhao, and G. Liu, "Parameters identification of solar cell models using generalized oppositional teaching learning based optimization," *Energy*, vol. 99, pp. 170–180, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.052>.
- [11] I. A. Ibrahim, M. J. Hossain, and B. C. Duck, "A hybrid wind driven-based fruit fly optimization algorithm for identifying the parameters of a double-diode photovoltaic cell model considering degradation effects," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 50, p. 101685, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101685>.
- [12] K. Yu, B. Qu, C. Yue, S. Ge, X. Chen, and J. Liang, "A performance-guided JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module," *Appl. Energy*, vol. 237, pp. 241–257, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.008>.
- [13] V. Lo Brano and G. Ciulla, "An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data," *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 894–903, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.046>.
- [14] A. M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, and H. M. Hamada, "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 494–509, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
- [15] N. M. A. A. Shannan, N. Z. Yahaya, and B. Singh, "Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison," in *2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 2013, pp. 210–214. doi: 10.1109/ICCSCE.2013.6719960.
- [16] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 2392–2396. doi: 10.1109/ISIE.2007.4374981.
- [17] L. Sandrolini, M. Artioli, and U. Reggiani, "Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 442–451, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.022>.
- [18] V. V. DebashishaJena, "An Accurate Modeling of Photovoltaic System for

- Uniform and Non-Uniform Irradiance,” *Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 29–40, 2015.
- [19] N. S. Shah and H. H. Patel, “Evaluating the output power of a PV system under uniform and non-uniform irradiance,” in *2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, 2017, pp. 128–133. doi: 10.1109/ICPEDC.2017.8081073.
- [20] D. Jena and V. V. Ramana, “Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 400–417, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.079>.
- [21] D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, and O. M. Machidon, “Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2018, p. 5945602, 2018, doi: 10.1155/2018/5945602.
- [22] E. Cuce, P. M. Cuce, and T. Bali, “An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters,” *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 374–382, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.025>.
- [23] X. H. Nguyen and M. P. Nguyen, “Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink,” *Environ. Syst. Res.*, vol. 4, no. 1, p. 24, 2015, doi: 10.1186/s40068-015-0047-9.
- [24] J. Atiq and P. K. Soori, “Modelling of a grid connected solar PV system using MATLAB / simulink Modelling of a Grid Connected Solar PV System Using MATLAB / Simulink,” no. March, 2017, doi: 10.5013/IJSSST.a.17.41.45.
- [25] D. Verma, S. Nema, A. M. Shandilya, and S. K. Dash, “Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 1018–1034, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.068>.
- [26] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S. P. Nehra, and M. S. Dhaka, “A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 104–109, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.03.004>.
- [27] H. Bellia, R. Youcef, and M. Fatima, “A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB,” *NRIAG J. Astron. Geophys.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–61, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.nrjag.2014.04.001.
- [28] A. Amir, A. Amir, H. S. Che, A. Elkhateb, and N. A. Rahim, “Comparative

- analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems,” *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 1147–1163, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.089>.
- [29] S. Motahhir, A. Aoune, A. El Ghzizal, S. Sebti, and A. Derouich, “Comparison between Kalman filter and incremental conductance algorithm for optimizing photovoltaic energy,” *Renewables Wind. Water, Sol.*, vol. 4, no. 1, p. 8, 2017, doi: 10.1186/s40807-017-0046-8.
- [30] A. Aoune, S. Motahhir, A. El Ghzizal, S. Sebti, and A. Derouich, “Determination of the maximum power point in a photovoltaic panel using Kalman Filter on the environment PSIM,” in *2016 International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD)*, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/IT4OD.2016.7479322.
- [31] A. Vasebi, M. Partovibakhsh, and S. M. T. Bathaee, “A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications,” *J. Power Sources*, vol. 174, no. 1, pp. 30–40, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.011>.
- [32] H. Rahimi Mirazizi and M. Agha Shafiyi, “Evaluating Technical Requirements to Achieve Maximum Power Point in Photovoltaic Powered Z-Source Inverter,” *Int. J. Eng.*, vol. 31, no. 6, pp. 921–931, 2018, doi: 10.5829/ije.2018.31.06c.09.
- [33] H. Hassani, F. Zaouche, D. Rekioua, S. Belaid, T. Rekioua, and S. Bacha, “Feasibility of a standalone photovoltaic/battery system with hydrogen production,” *J. Energy Storage*, vol. 31, p. 101644, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101644>.
- [34] C. C. Chan, E. W. C. Lo, and S. Weixiang, “The available capacity computation model based on artificial neural network for lead–acid batteries in electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 87, no. 1, pp. 201–204, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00502-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00502-9).
- [35] F. Zhang, G. Liu, and L. Fang, “A battery State of Charge estimation method with extended Kalman filter,” in *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008, pp. 1008–1013. doi: 10.1109/AIM.2008.4601799.
- [36] F. Zhang, G. Liu, and L. Fang, “A battery state of charge estimation method

- using sliding mode observer,” in *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2008, pp. 989–994. doi: 10.1109/WCICA.2008.4593055.
- [37] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, and C. M. Bingham, “Observer techniques for estimating the state-of-charge and state-of-health of VRLABs for hybrid electric vehicles,” in *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2005, p. 10 pp. doi: 10.1109/VPPC.2005.1554646.
- [38] M. S. Soliman *et al.*, “Supervisory energy management of a hybrid battery/PV/tidal/wind sources integrated in DC-microgrid energy storage system,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 7728–7740, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.056>.
- [39] G. L. Plett, “Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation,” *J. Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 277–292, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.033>.
- [40] Xion Liu et al, "A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control" IEEE Transaction on smart grid, vol. 2, no. 2June 2011.
- [41] M.F. Roslan, M.A. Hannana,, Pin Jern Ker, M.N. Uddin, “ Microgrid control methods toward achieving sustainable energy management”  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.070>

## Chapitre 4

### Résultats des simulations et discussion

#### Table des matières

4-1. Introduction .....	114
4-2. Modèle d'un système PV autonome sous MATLAB-SIMULINK .....	114
4-3. Test de la cellule photovoltaïque .....	116
4-3.1 Influence de l'éclairement.....	117
4-3.2 L'influence de la température .....	118
4-3-3. L'influence de la résistance série.....	118
4-3-4. Influence de la résistance shunt .....	119
4-4. La caractéristique V-I et P-V d'un module SPR-305E-WHT-D .....	120
4-5. Test de convertisseur DC-DC .....	123
4-6. Test de l'estimateur de charge EKF de la batterie.....	125
4-8. Simulation d'un système PV autonome sous Matlab/Simulink .....	133
4-8-1. Étude de cas 01 : Variation de l'irradiance et de la température .....	134
4-8-2. Étude de cas 02 : Irradiance variable et température constante.....	141
4-9. Etude en simulation d'un micro-réseau hybride AC/DC et son contrôle de coordination .	147
4-10. Conclusion .....	156

## Liste des figures

Figure 4.1 : Modèle Simulink du système proposé.....	105
Figure 4.2 : Modèle Matlab/Simulink du GPV.....	106
Figure 4.3 : Simulation d'un modèle de cellule PV sous PowerSim.....	106
Figure 4.4 : Effet de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule PV.....	107
Figure 4.5 : Impact de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule PV.....	108
Figure 4.6 : Impact de la résistance série sur la caractéristique P-V d'une cellule.....	109
Figure 4.7 : Impact de la résistance shunt sur la caractéristique I-V d'une cellule PV.....	109
Figure 4.8 : Impact de la résistance parallèle sur la caractéristique P-V d'une cellule PV.....	110
Figure 4.9 : Fenêtre des paramètres du modèle d'un panneau.....	110
Figure 4.10 : Caractéristique I-V et P-V d'un module SunPower SPR-305E-WHT-D.....	112
Figure 4.11 : Caractéristique I-V et P-V d'un panneau SunPower SPR-305E-WHT-D.....	112
Figure 4.12 : Modèle pour tester le convertisseur Boost sous Matlab/Simulink.....	113
Figure 4.13 : Modèle Simulink d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un PID.....	113
Figure 4.14 : Modèle Simulink d'un convertisseur DC-DC contrôlé par mode glissant.....	113
Figure 4.15 : Variation de la tension de référence pour un convertisseur DC-DC.....	114
Figure 4.16 : Évolution de la tension de sortie d'un convertisseur DC-DC.....	115
Figure 4.17 : Modèle pour tester l'estimateur EKF.....	116
Figure 4.18 : Résultats de simulation avec la méthode EKF (courant, tensions terminales, SOC, erreur) .....	116
Figure 4.19 : Résultats de simulation agrandis avec la méthode EKF.....	117
Figure 4.20 : Conception d'un contrôleur flou pour le convertisseur DC-DC et fonctions d'appartenance .....	119
Figure 4.21 : Profil d'ensoleillement injecté dans le GPV.....	120
Figure 4.22 : Bloc de simulation pour la comparaison avec MPPT flou.....	120
Figure 4.23 : Évolution de la tension de GPV commandé par PO et FLC.....	121
Figure 4.24 : Évolution de la tension de GPV commandé par IC et FLC.....	122
Figure 4.25 : Profil de l'irradiance solaire et de la température ambiante.....	124
Figure 4.26 : Comportement de GPV lors d'une charge complète soudaine.....	125
Figure 4.27 : Signal de contrôle du cycle de service, tension Vdc et courant Idc du convertisseur DC-DC .....	126
Figure 4.28 : Mesure et estimation du SOC, courant de fourniture et courant généré.....	127
Figure 4.29 : Tension sinusoïdale triphasée et courant de l'onduleur en fonction de la charge non constante.....	128
Figure 4.30 : Tension de phase à phase de l'onduleur et RMS(Vabc) en conditions variables.....	129
Figure 4.31 : Contrôleur batterie/électrolyseur et commutation entre source PV et batterie.....	130
Figure 4.32 : Bilan de puissance lors de l'intégration du système PV et de la batterie.....	131
Figure 4.33 : Profil de l'irradiance solaire et de la température ambiante (Étude de cas 2).....	133
Figure 4.34 : Comportement de GPV lors d'une charge complète soudaine (Étude de cas 2).....	134
Figure 4.35 : Signal de contrôle, tension et courant du convertisseur DC-DC.....	135
Figure 4.36 : Mesure et estimation du SOC de la batterie.....	136
Figure 4.37 : Tension et courant Vabc de l'onduleur pendant une charge non constante.....	137
Figure 4.38 : Tension Vabc de phase à phase et RMS(Vabc) avec charge non constante.....	138
Figure 4.39 : Bilan de puissance lors de l'intégration du système PV et de la batterie.....	139
Figure 4.40 : Modèle Simulink du système micro-réseau hybride proposé.....	140
Figure 4.41 : Représente : le prix de l'énergie utilisée, la tension de micro-réseaux, évolution temporelle de la puissance (PV, système de stockage, réseaux, charge), SOC%, la tension de micro-réseaux, pour un système heuristique.....	149
Figure 4.42 : Représentation de la tension, des puissances, du SOC, et du coût de l'énergie utilisée dans un micro-réseau pour un système optimisé.....	151

Figure 4.43 : le coût cumulé de l'utilisation du réseau et l'utilisation cumulée de l'énergie provenant du réseau .....154

## 4-1. Introduction

Le présent chapitre est dédié à la présentation des résultats des simulations, effectuées dans le cadre de l'étude d'un système photovoltaïque autonome. Nous y abordons les différents tests et analyses réalisés à partir de modèles développés sous MATLAB-SIMULINK pour évaluer le comportement du système sous diverses conditions environnementales. Les premières sections sont consacrées à la modélisation du système, aux tests de la cellule photovoltaïque et aux effets de paramètres critiques comme l'éclairement, la température, ainsi que les résistances série et parallèle. Ces tests visent à étudier l'impact de ces facteurs sur la performance du module PV.

Ensuite, une analyse détaillée des convertisseurs DC-DC est réalisée, suivie d'une évaluation de l'estimateur d'état de charge (SOC) de la batterie à l'aide de la méthode du filtre de Kalman étendu (EKF). Enfin, nous discutons les résultats de la simulation du système complet, y compris la gestion d'énergie et la performance des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) proposée, sous différentes conditions de variation de l'irradiance et de la température.

En terminerai avec une étude en simulation d'un micro-réseau hybride AC/DC et son contrôle de coordination, pour mettre en évidence les avantages qu'offrent les algorithmes d'optimisation en termes de réduction des coûts et d'efficacité énergétique, comparés à des approches plus conventionnelles. Pour cela, différents scénarios ont été simulés, intégrant des variations de prix dynamiques, des fluctuations de la demande énergétique, et l'utilisation d'équipements tels que les batteries et les panneaux photovoltaïques. Les résultats présentés dans ce chapitre visent à démontrer le potentiel des méthodes optimisées pour améliorer la résilience et la durabilité des systèmes énergétiques modernes.

## 4-2. Modèle d'un système PV autonome sous MATLAB-SIMULINK

La simulation est la technique la plus simple et la plus efficace utilisée aujourd'hui pour l'évaluation des solutions d'ingénierie. Notre modèle MATLAB-SIMULINK, tel qu'illustré dans la [figure \(4.1\)](#), a été conçu pour explorer les performances du système intégré PV/Batterie/Charge AC & DC et de la stratégie de contrôle.

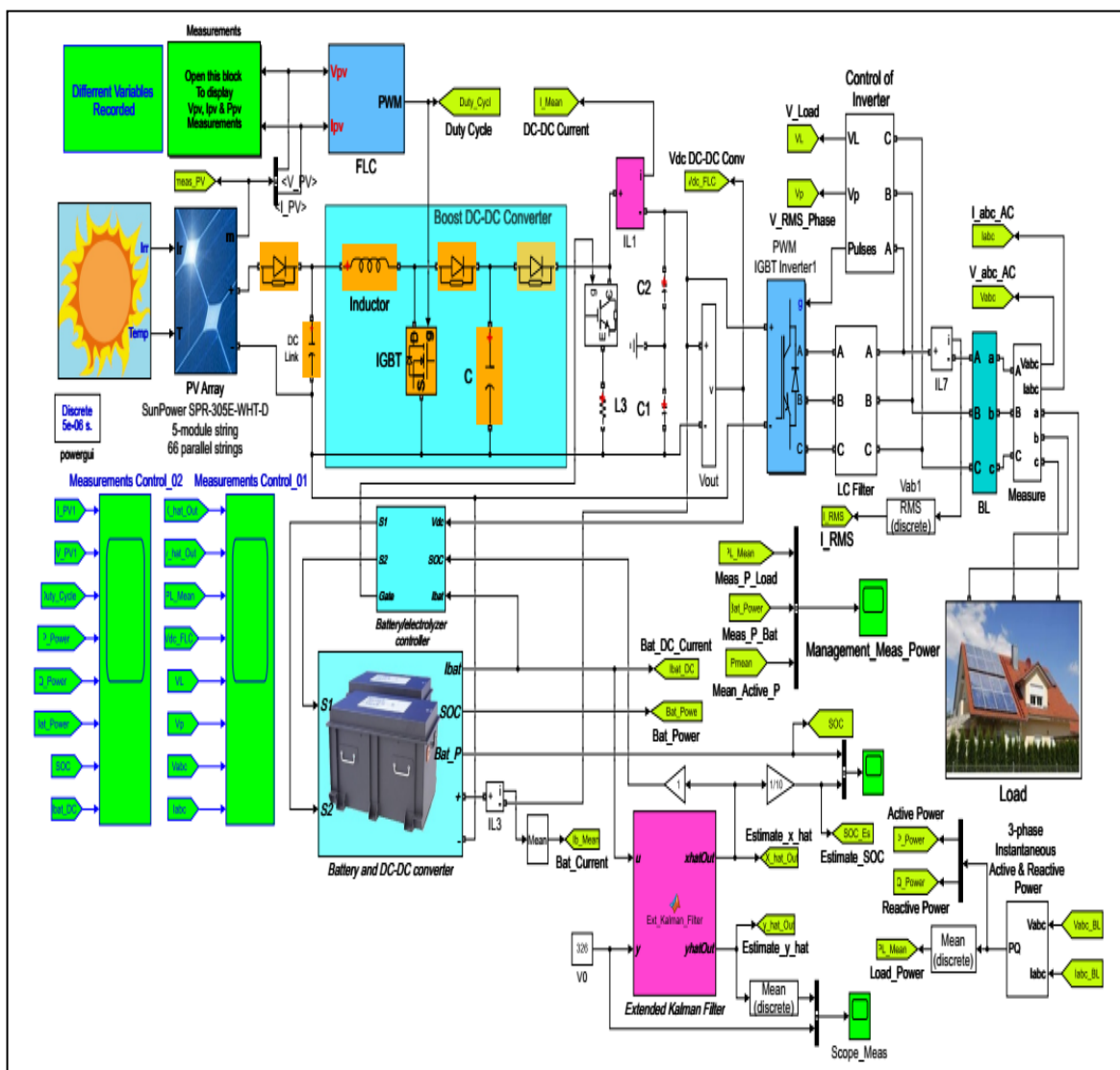


Figure 4. 1 Model simulink de système proposé

Cependant, les composants du système PV autonome proposé sont les suivants : les panneaux solaires et les batteries de stockage sont connectés au bus DC par un convertisseur boost DC/DC et un convertisseur buck-boost DC/DC de manière consécutive.

Ensuite, nous trouvons un onduleur triphasé supervisé par son propre contrôleur, utilisé pour convertir la tension de DC à AC. Enfin, deux charges sont connectées/déconnectées du côté de la tension AC par le contrôleur de l'onduleur, Load 1 représentant la charge critique et Load 2 représentant les charges de moindre priorité. Un contrôleur MPPT flou conventionnel est proposé, et le calcul de l'état de charge (SOC) est évalué par un observateur EKF

### 4-3. Test de la cellule photovoltaïque

Le modèle de panneau solaire est créé dans le logiciel Matlab/Simulink, il est simulé dans des conditions standard de test (STC), et les caractéristiques I-V et P-V sont présentées dans la figure (4.4). Ces courbes, ils diffèrent selon la température et des variations d'irradiance solaire, tel que représenté dans la figure (4.4).

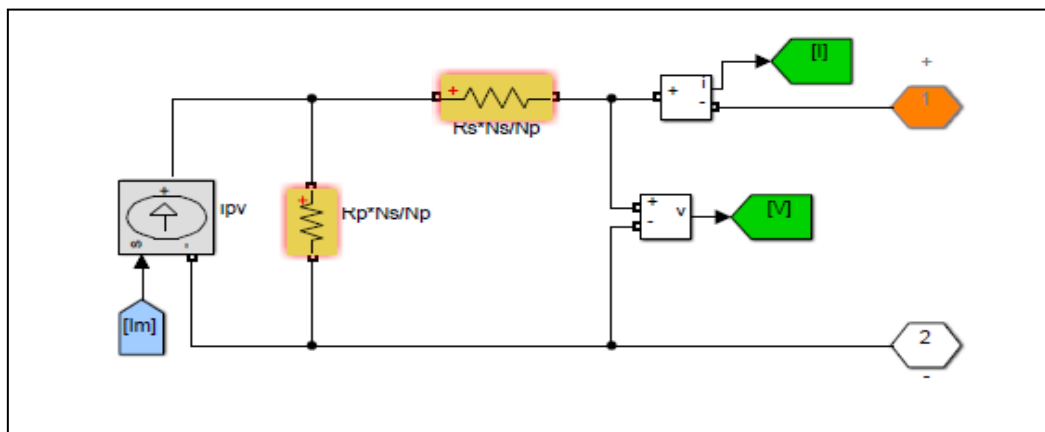


Figure 4. 2 Modèle Matlab/Simulink du GPV

Les développeurs du logiciel Matlab ont incorporé le modèle de la cellule PV dans « PowerSim » Figure (4.3). L'avantage de travailler avec PowerSim réside dans la possibilité de manipuler directement les composants des circuits électriques (câblage, polarisation, etc.) à l'aide de symboles bien connus dans la schématisation de l'électronique de puissance.

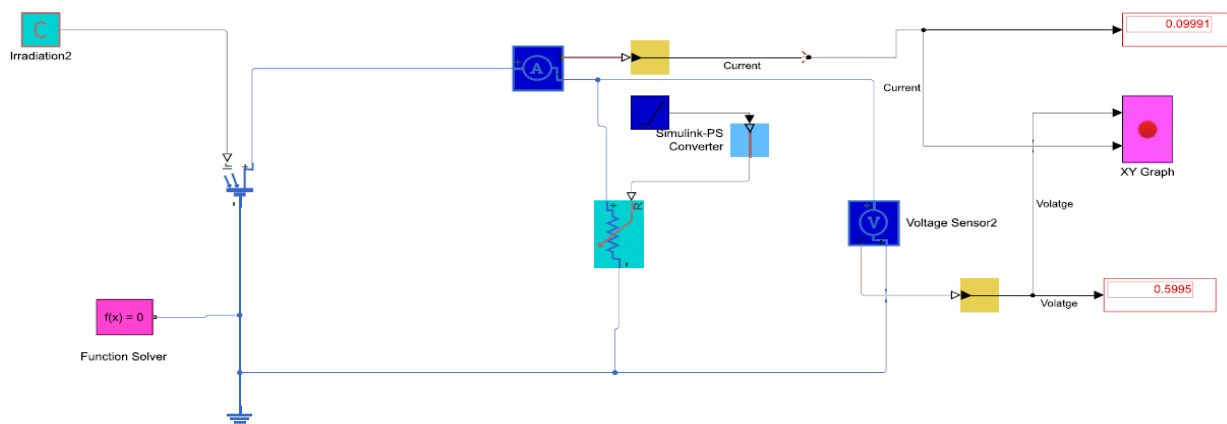


Figure 4. 3 Simulation modèle d'une cellule PV sous PowerSim

### 4-3.1 Influence de l'éclairement

Les figures ((4.4) (a,c)) représentent la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV en fonction de l'éclairement  $G$ , à une température maintenue constante à 25 °C. On remarque que la tension  $V_{max}$  correspondante à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_{max}$  qui augmente fortement avec l'éclairement.

En multipliant la tension et le courant, on obtient la puissance produite pour les différentes intensités et tensions de la cellule. Le graphique permet de déduire les points de fonctionnement optimaux dans les conditions de simulation pour chaque éclairement. On peut ainsi affirmer que l'éclairement est le paramètre le plus important dans le fonctionnement des panneaux solaires.

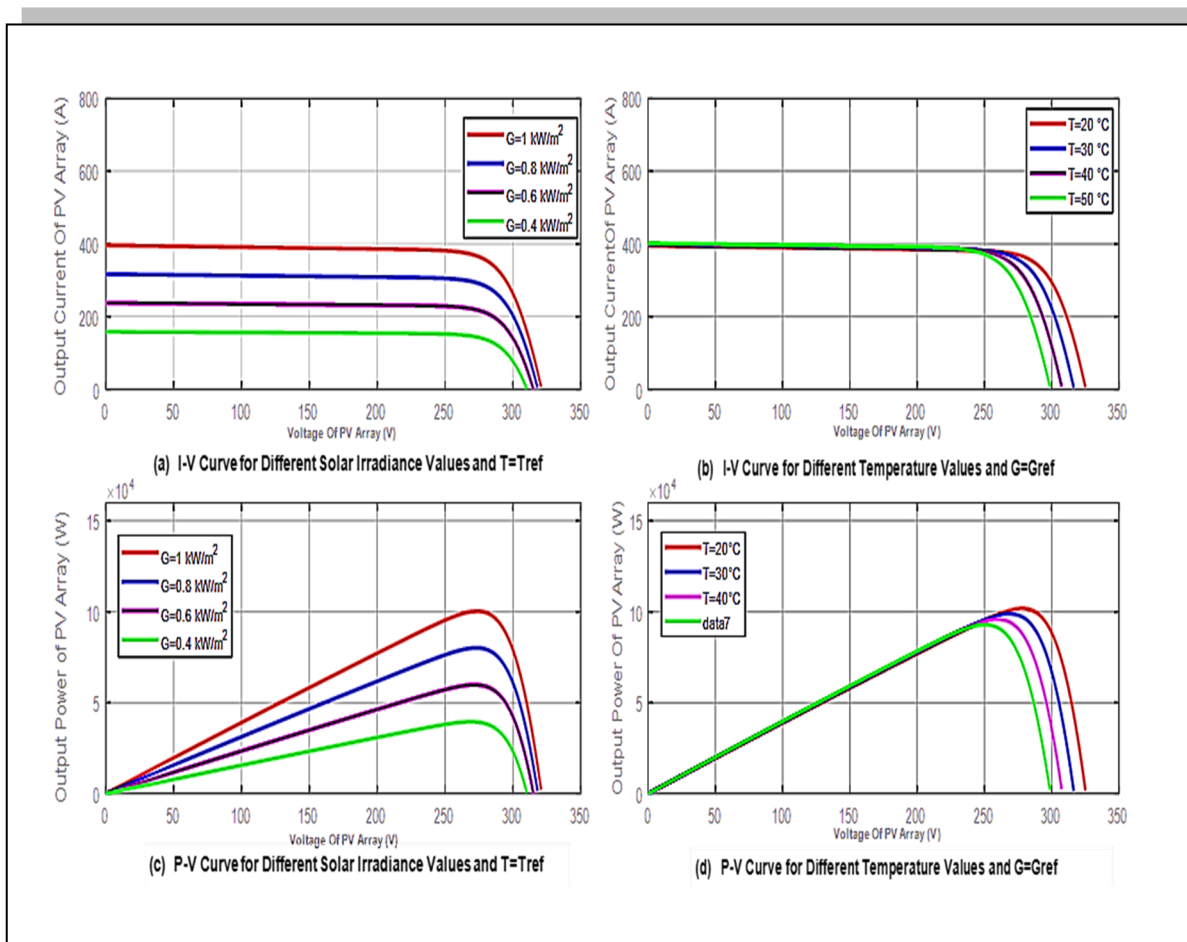


Figure 4. 4 Effet de l'éclairement  $G$  et de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule PV

### 4-3.2 L'influence de la température

Pour un ensoleillement maintenu constant à une valeur de  $1\text{kW/m}^2$  (100 %), nous varions la température et nous enregistrerons la caractéristique I-V en fonction de la température. La figure ((4.4) (b,c)) représente les résultats de simulation obtenus pour une température variant de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  à  $50\text{ }^\circ\text{C}$ .

Nous remarquons qu'à un éclairage donné :

- ✓ Plus la température est élevée plus  $V_{CO}$  est faible.
- ✓ Le courant de court-circuit  $I_{sc}$  augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur  $I_{sc}$  peut être négligée dans la majorité des cas.

### 4-3-3. L'influence de la résistance série

D'après la figure (4.5), la série de résistances influence la pente de la caractéristique I-V et la photodiode joue le rôle d'un générateur de tension. En augmentant sa concentration, elle réduit la valeur du courant de court-circuit.

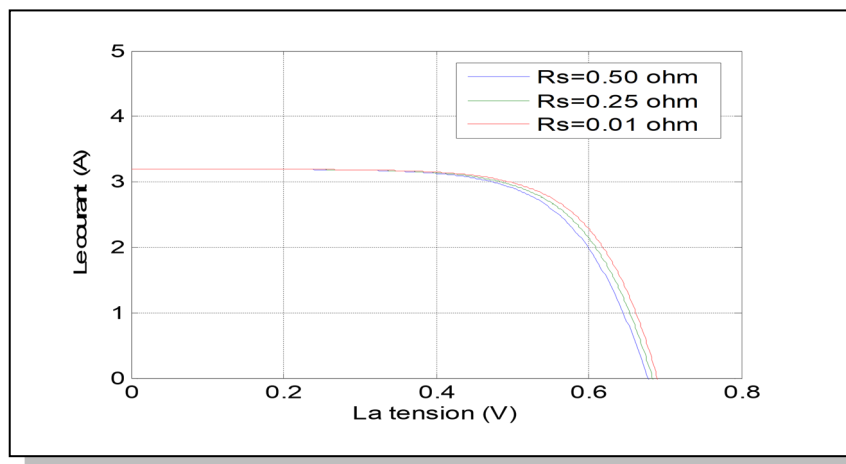


Figure 4. 5 L'impact série résistance sur la caractéristique I-V d'une cellule PV

Et d'après la figure (4.5), on remarque que la diminution de la valeur de la résistance avec le même éclairage « G », augmente le point de la puissance maximale délivrée par la cellule PV et par conséquent elle diminue les pertes par effet Joule ce qui augmente le rendement global du panneau

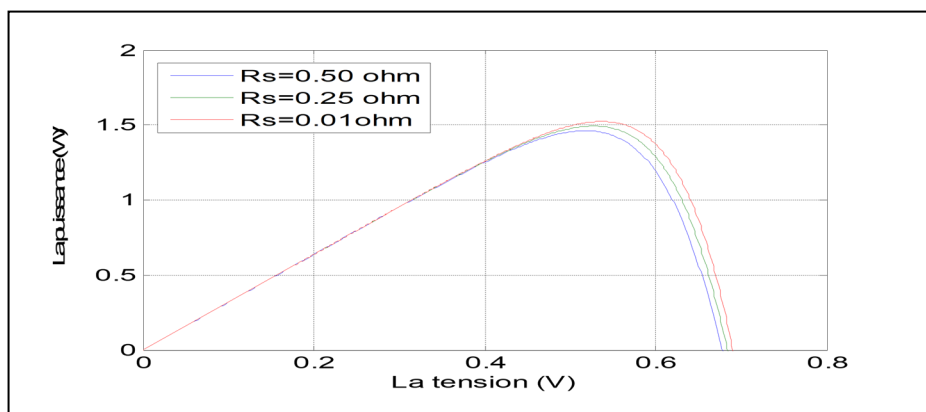


Figure 4. 6 L’impact série résistance sur la caractéristique P-V d’une cellule

### 4-3-4. Influence de la résistance shunt

Selon la figure (4.7), on peut observer l’impact de la résistance shunt sur la caractéristique courant-tension. Cette influence se manifeste par une hausse de la pente de la courbe dans la zone correspondant à un fonctionnement en tant que générateur à courant constant, donc le point MPP augmente.

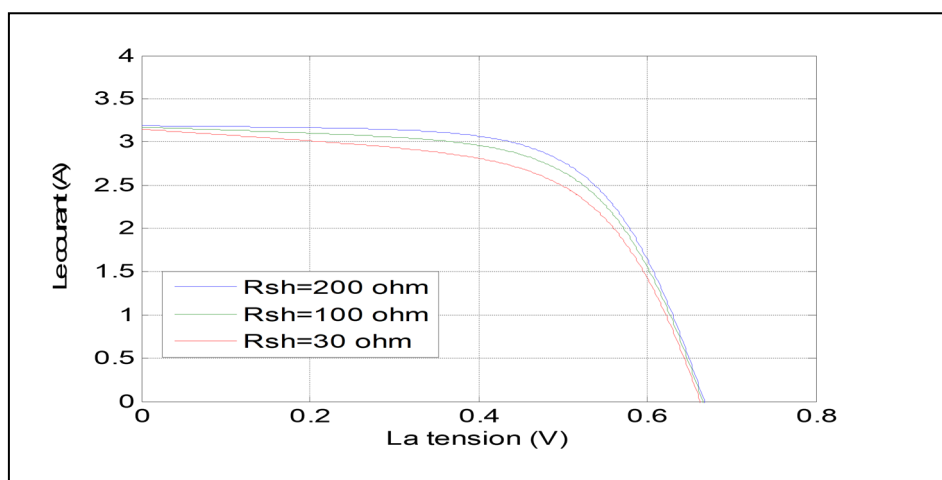


Figure 4. 7 L’impact shunt résistance sur la caractéristique I-V d’une cellule PV

L’effet de la résistance shunt sur la caractéristique P-V est illustré dans la figure (4.8). Cette influence se manifeste par une hausse de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement en tant que générateur à courant constant. Il est donc constaté que pour accroître la puissance de la cellule photovoltaïque, il est essentiel qu’elle ne soit pas trop élevée, ce qui implique l’importance d’optimiser.

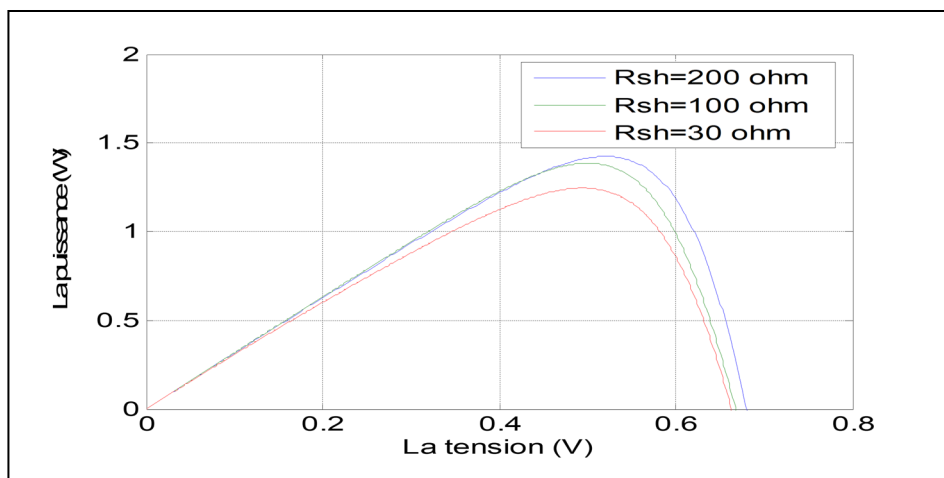


Figure 4.8 L'impact parallèle résistance sur la caractéristique P-V d'une cellule PV

#### 4-4. La caractéristique V-I et P-V d'un module SPR-305E-WHT-D

Dans les versions récentes de Matlab/Simulink, un modèle de panneau PV, nommé « PV Array », a été ajouté à la bibliothèque de Simulink, figure (4.9). Le principal bénéfice de ce modèle est qu'il intègre dans sa bibliothèque les spécifications d'une vaste gamme de panneaux solaires commercialisés sur le marché. Cela offre la possibilité d'adapter les tests de simulation aux tests pratiques.

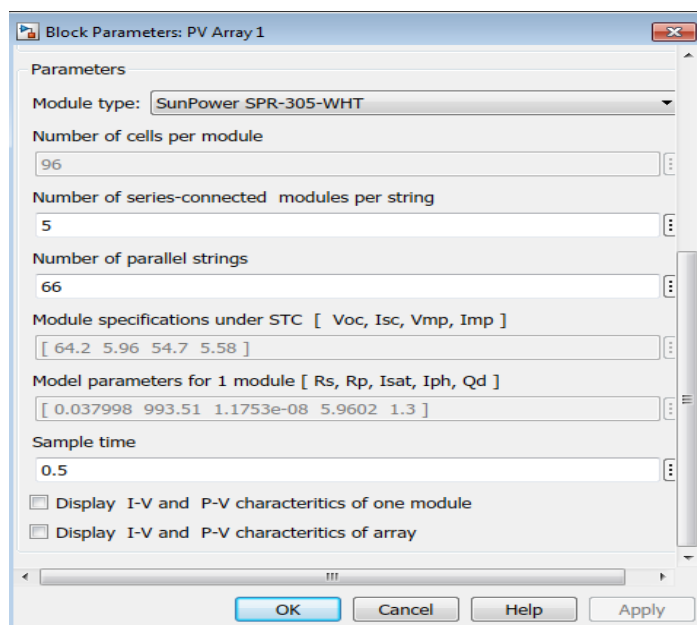


Figure 4.9 Fenêtre des paramètres du modèle d'un panneau

Le module PV considéré dans la simulation est du type Array : SunPower SPR-305E-WHT-D (avec une capacité de 100 kW), composé de 5 modules en série et de 66 chaînes parallèles, dont le Tableau 1 présente les paramètres du modèle.

Tableau 1 : Paramètres du module PV M/s SunPower SPR-305E-WHT-D aux conditions de test standard (STC) (25 °C et 1000 W/m<sup>2</sup>)

Désignation	Valeur
String en parallèle	66
Nombre de module string en série	5
Nombre de cellule par module	96
Nombre de modules	330
Puissance de PV module	305.226W
Isc de PV array	5.96 A
Voc de PV array	64.2 V
MPP Tension a 25 °C $V_{mpp}$	54.7 V
MPP Courant a 25 °C $I_{mpp}$	5.58 A
Coefficient de Température de Voc (%/deg.C)	-0.27269
Coefficient de température de Isc (%/deg.C)	0.061745
Résistance parallèle ( $R_p$ )	269.5934 $\Omega$
Résistance série ( $R_s$ )	0.37152 $\Omega$
Facteur de diode	0.94504

Après avoir simulé le module PV M/s SunPower SPR-305E-WHT-D dans des conditions standard de test (STC) (25 °C et 1000 W/m<sup>2</sup>) sous Matlab/Simulink, Les résultats obtenus sont illustrés à travers les figures (4.10) et (4.11).

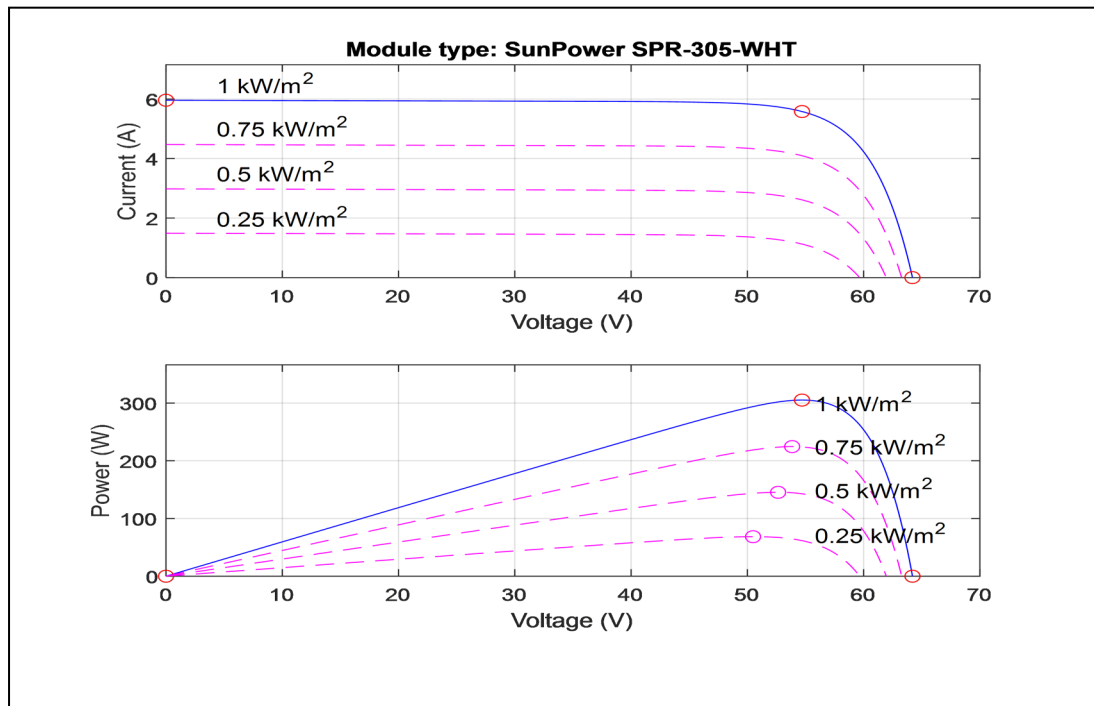


Figure 4. 10 La caractéristique I-V et P-V d'un module SunPower SPR-305E-WHT-D

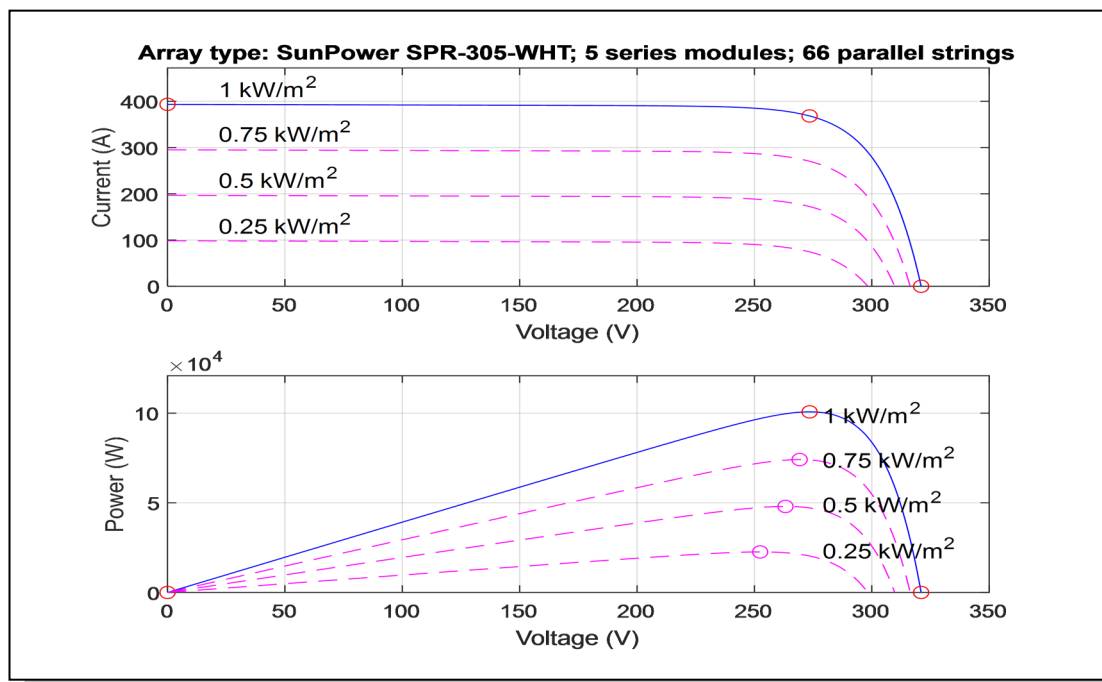


Figure 4. 11 La caractéristique I-V et P-V d'un panneau SunPower SPR-305E-WHT-D

### 4-5. Test de convertisseur DC-DC

Le convertisseur généralement employé dans notre système photovoltaïque autonome est le convertisseur élévateur de tension (Boost). Le schéma de principe d'un Boost en fonctionnement est illustré par la figure (3.7). Il se compose d'une bobine L, d'une diode D, d'un condensateur C et d'un interrupteur à semi-conducteur contrôlable K.

Le convertisseur élévateur (boost) est évalué sous Matlab/Simulink avec le modèle illustré à la figure (4.12).

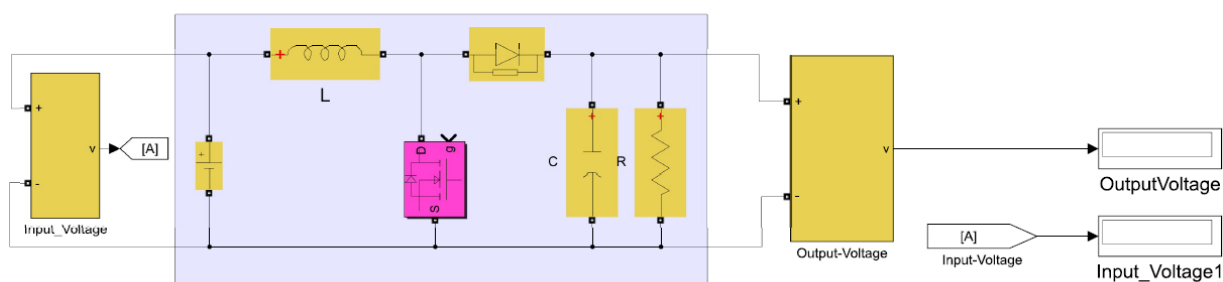


Figure 4. 12 Modèle pour tester le boost sous Matlab/Simulink

Des tests ont été effectués sur le Boost, avec le contrôleur PID figure (4.13) et le contrôleur mode Glissant, figure (4.14). On constate que la tension de sortie vérifie l'équation (3.62)

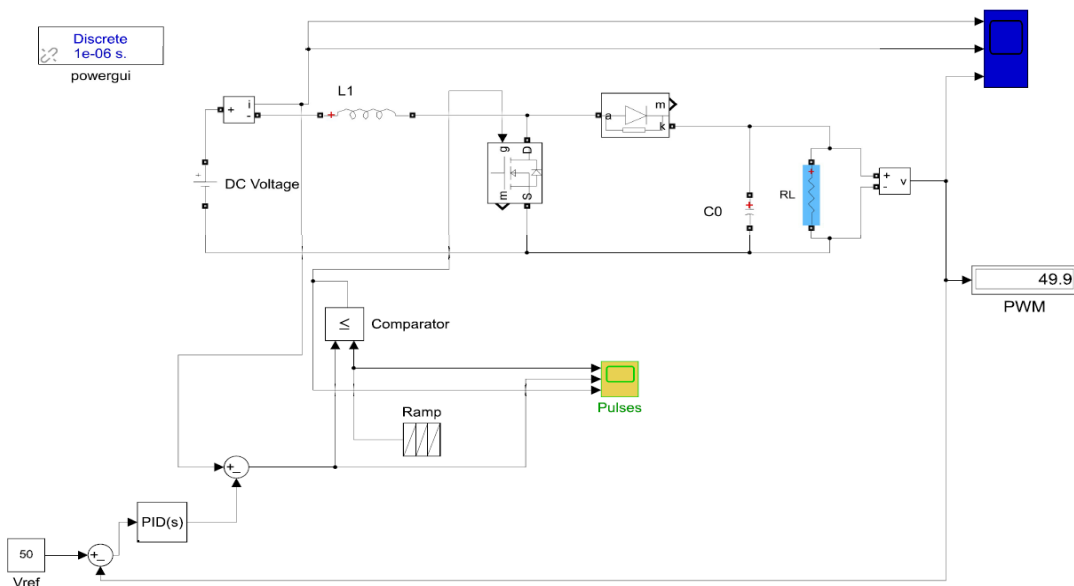


Figure 4.13 Modèle simulink d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un PID

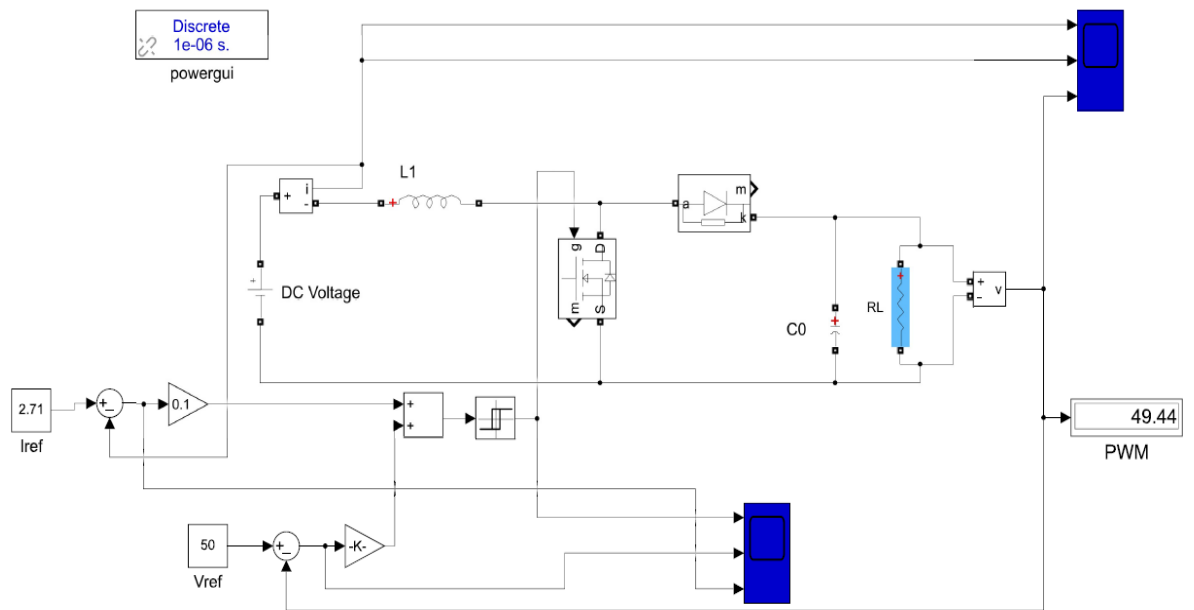


Figure 4.14 Modèle simulink d'un convertisseur DC-DC contrôler par mode de glissant

La figure (4.15) illustre l'évolution de la tension de sortie pour un convertisseur DC-DC contrôler par un PID et Mode Glissant, la tension de référence  $V_{ref}= 48V$ , figure (4.15)

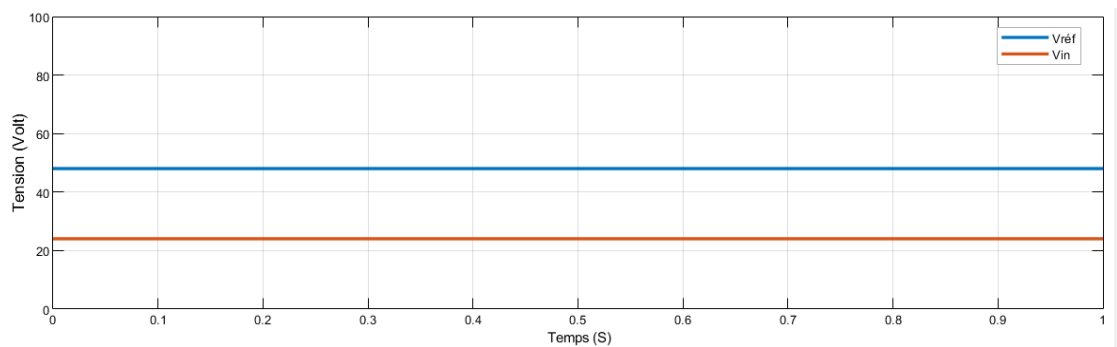


Figure 4.15 La variation de la tension de référence pour un convertisseur DC-DC

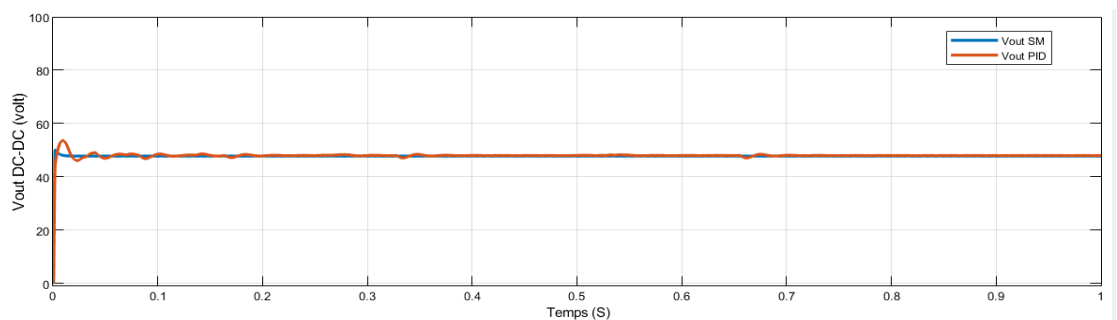


Figure 4.16 L'évolution de la tension de sortie d'un convertisseur DC-DC

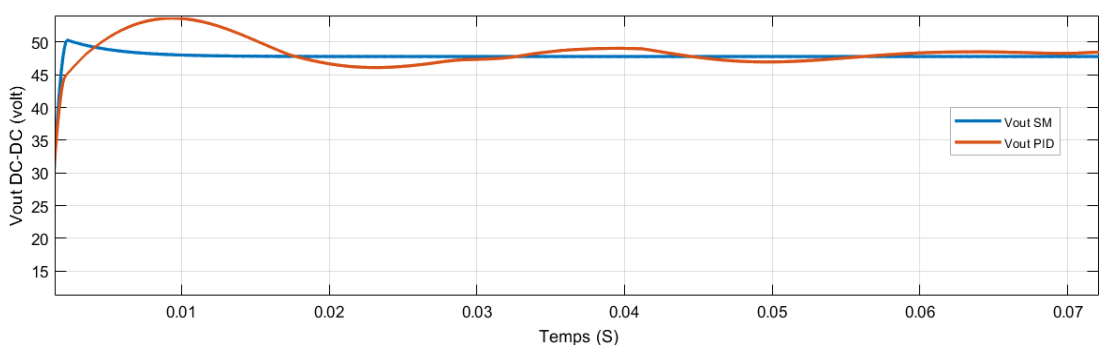


Figure 4.17 Zoom de la courbe d'évolution de la tension de sortie d'un convertisseur DC-DC

On remarque que pour le contrôleur mode glissant donne une réponse plus rapide à la variation de la tension de référence, avec une efficacité de maintenir la stabilité du système par rapport au contrôleur PID.

### 4-6. Test de l'estimateur de charge EKF de la batterie

Le filtre de Kalman étendu (EKF) prend en compte les caractéristiques du bruit des capteurs de courant et de tension, et surmonte efficacement l'effet des erreurs aléatoires. Dans ce travail, la batterie constitue le modèle dynamique, et l'état de charge constitue la variable d'état à estimer. L'efficacité de l'EKF ait été validée dans de nombreuses études, dans cette étude, l'EKF, basé sur les équations dynamiques, est utilisé pour estimer l'état de charge de la batterie. Le modèle Matlab/simulink pour tester les performances de l'estimateur EKF est le suivant :

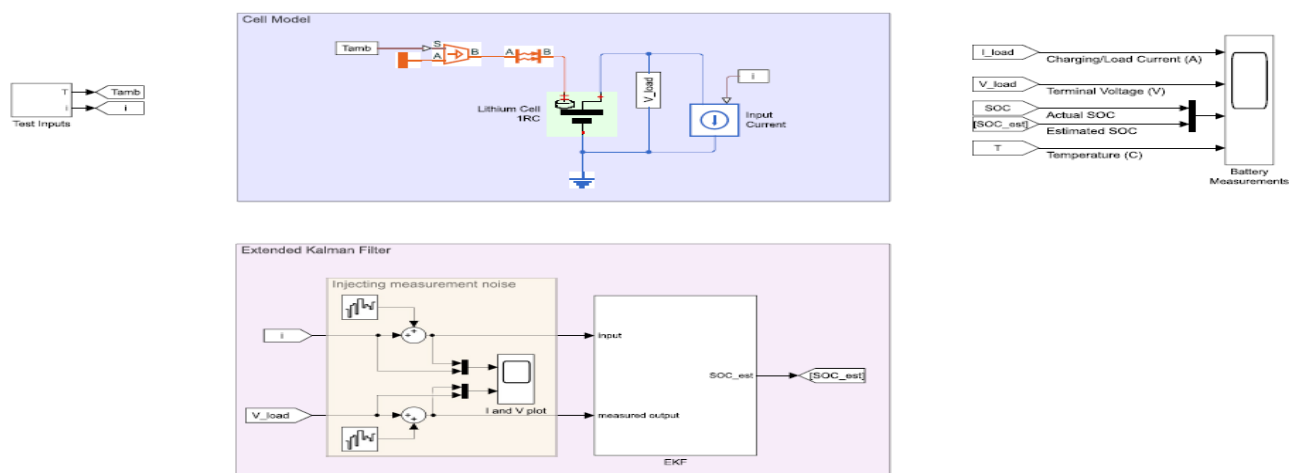


Figure 4. 18 Modèle pour tester l'estimateur EKF

Les valeurs d'initialisation de la méthode EKF et les paramètres du modèle de batterie pour la simulation sont donnés dans le tableau 2. Les résultats de simulation sont présentés dans la [figure \(4.18\)](#). Les résultats illustrés dans la [figure \(4.19\)](#) sont agrandis.

Tableau 2 Paramètres utilisés dans la simulation

Variabes	Valeurs
$T_c(s)$	1
$R_t(\Omega)$	0.1645
$R_i(\Omega)$	0.1174
$C_{cb}(F)$	11252.4
$C_{cs}(F)$	27.31
$k$	5.38
$d$	23.45
$Soc_0$	0.865
$\Sigma_v$	2
$\Sigma_w$	$\begin{bmatrix} 0.005 & 0 \\ 0 & 0.4191 \end{bmatrix}$
$P$	$\begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$

À partir de la [figure \(4.18\) \(b\)](#) et de la [figure \(4.19\) \(b\)](#), la tension terminale estimée avec la méthode EKF est presque identique à celle mesurée. De la [figure \(4.18\) \(c\)](#) et de la [figure \(4.19\) \(c\)](#), on peut voir que l'état de charge de la batterie avec la méthode EKF peut être estimé avec précision, avec une erreur d'estimation de moins de 0,4% par rapport au comptage de charge.

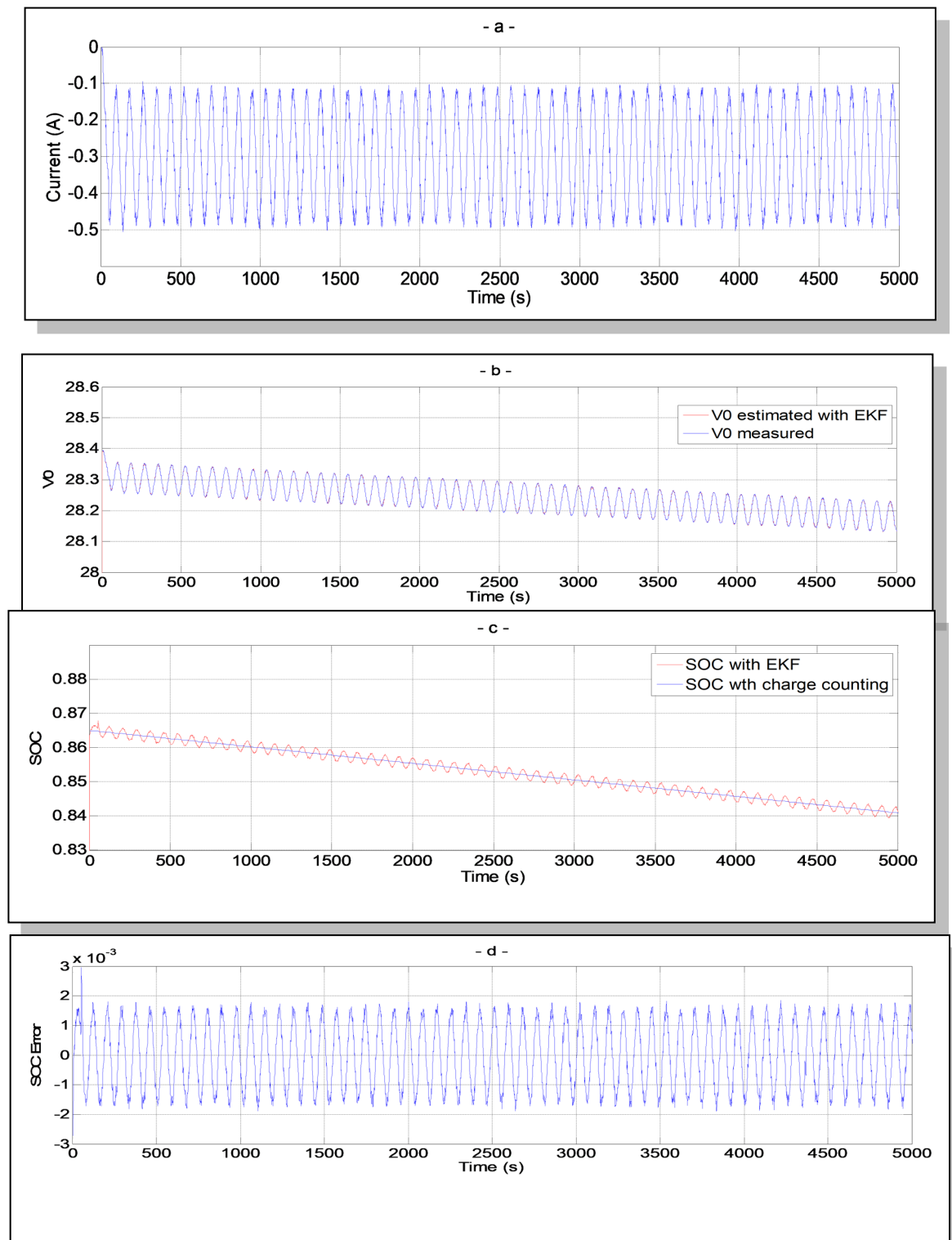


Figure 4. 18 Résultats de la simulation avec la méthode EKF. a) courant ; b) tensions terminales mesurées et estimées ; c) état de charge (SOC) ; d) erreur de SOC

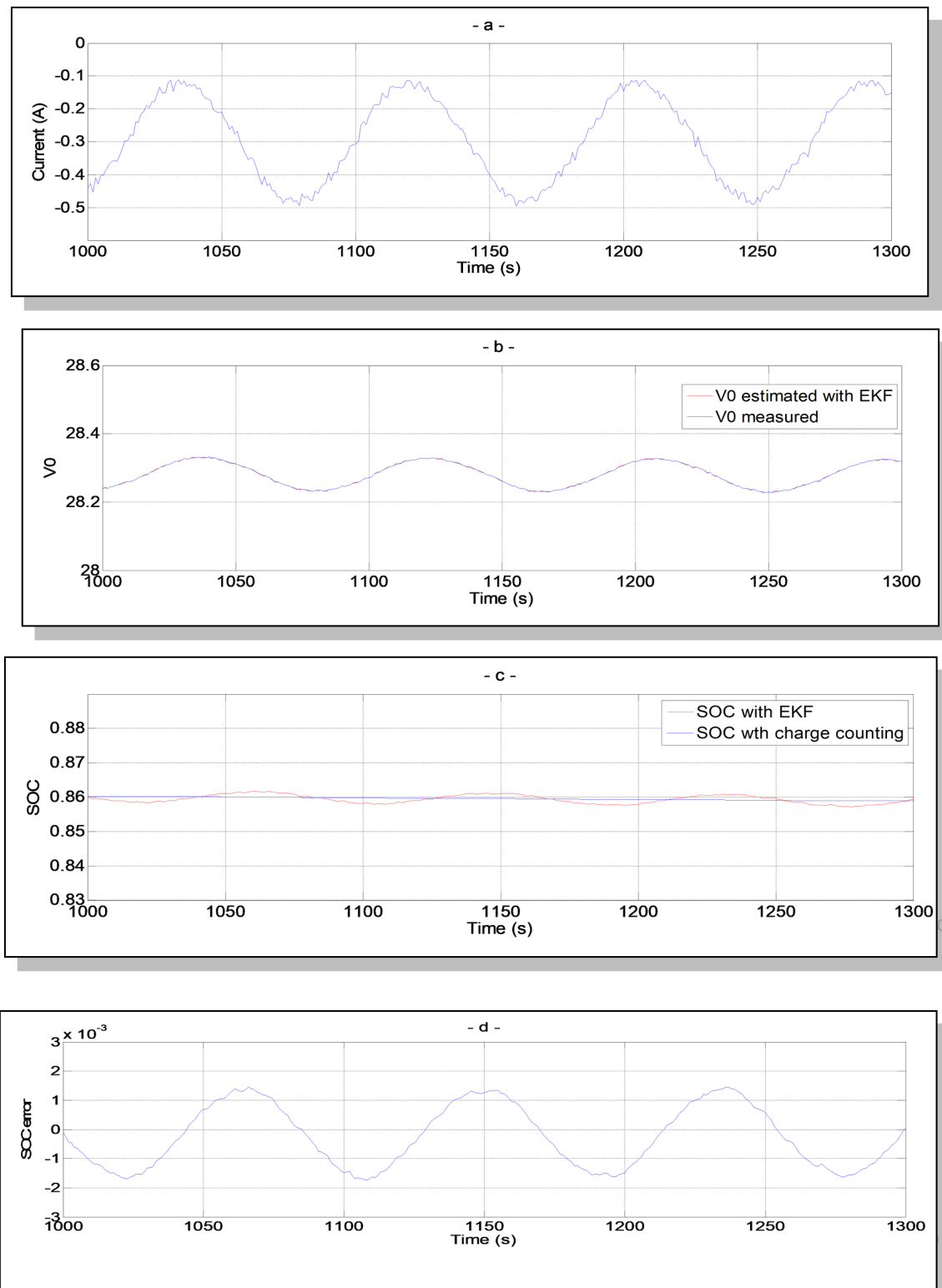
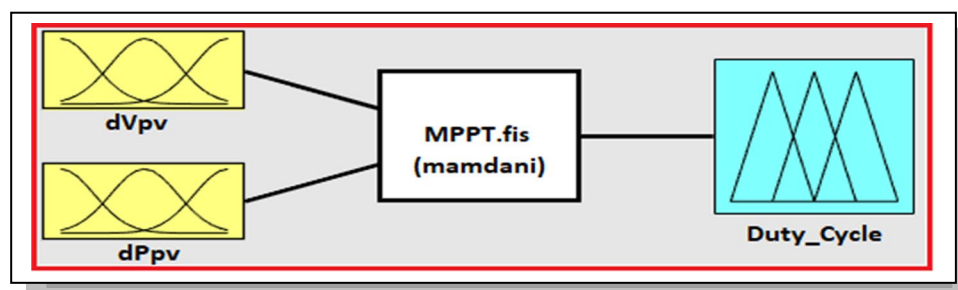


Figure 4. 19 Résultats de simulation agrandis avec la méthode EKF. a) courant ; b) tensions terminales mesurées et estimées ; c) état de charge (SOC) ; d) erreur de SOC.

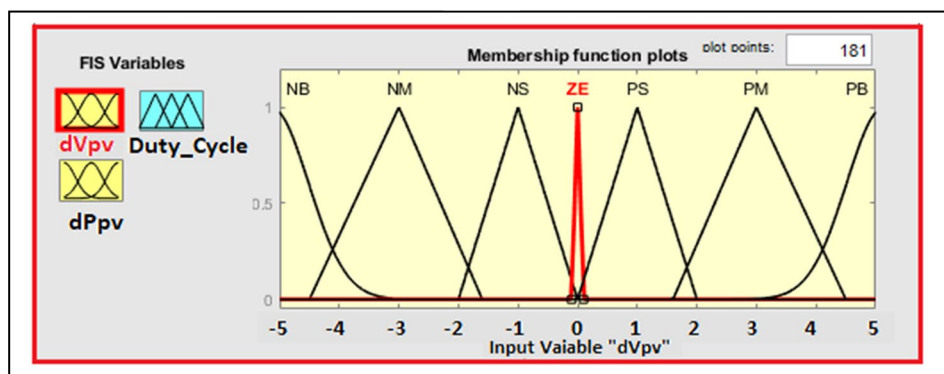
En résumé que les résultats des simulations montrent que la méthode d'estimation du SOC basée sur l'EKF est efficace et peut estimer avec précision le SOC de la batterie.

#### 4-7 Test et comparaison de MPPT Flou

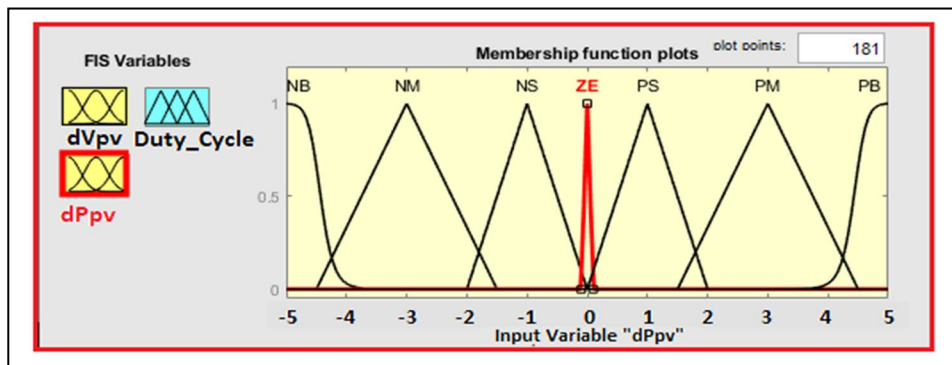
Le contrôleur logique flou a été développé avec deux entrées et une fonction de sortie, telles que  $dV_{pv}$ ,  $dP_{pv}$  et le cycle de service du convertisseur d'impulsion PV, comme le montre la figure (4.20) (a). La fonction d'appartenance  $dV_{pv}$  est classée en sept plages, à savoir  $dV_{pv}$  négatif,  $dV_{pv}$  moyen négatif,  $dV_{pv}$  petit négatif,  $dV_{pv}$  zéro,  $dV_{pv}$  petit positif,  $dV_{pv}$  moyen positif et  $dV_{pv}$  positif, comme présenté dans la figure (4.20) (b). La fonction d'appartenance  $dP_{pv}$  de la PV floue est classée en sept plages, à savoir  $dP_{pv}$  négatif,  $dP_{pv}$  moyen négatif,  $dP_{pv}$  petit négatif,  $dP_{pv}$  zéro,  $dP_{pv}$  petit positif,  $dP_{pv}$  moyen positif et  $dP_{pv}$  positif, comme présenté dans la figure (4.20) (c). La fonction d'appartenance de sortie du cycle de service floue est classée en sept plages qui sont cycle de service négatif, cycle de service moyen négatif, cycle de service petit négatif, cycle de service zéro, cycle de service petit positif, cycle de service moyen positif et cycle de service positif, comme présenté dans la figure (4.20) (d). La forme d'onde de la surface des règles floues est présentée dans la figure (4.20) (e)



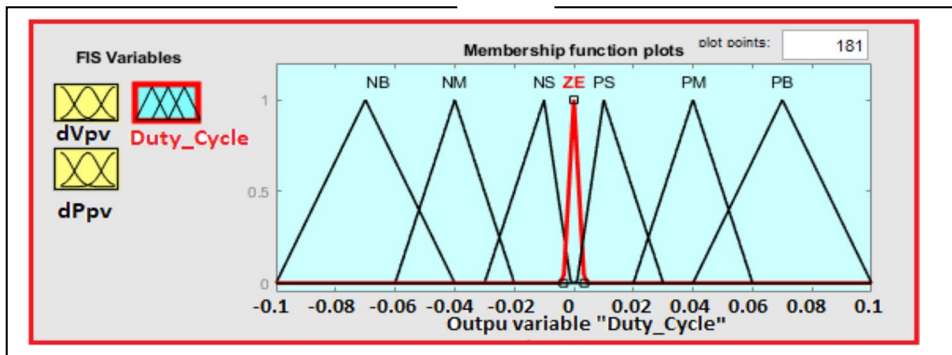
(a)



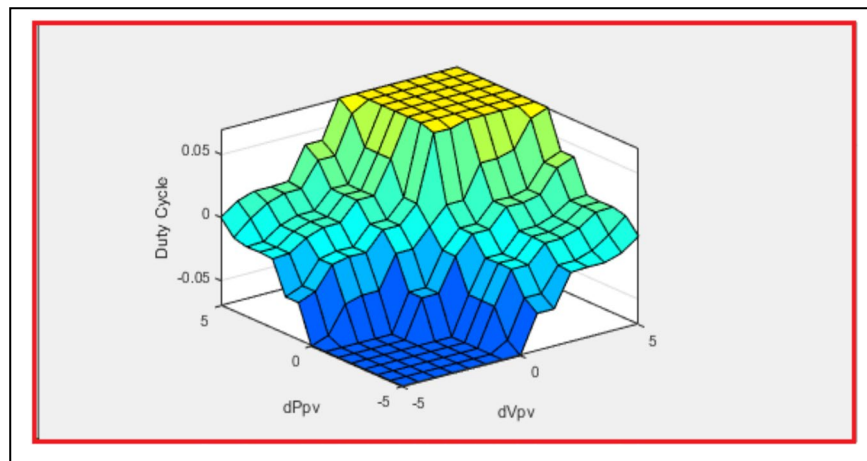
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 4.20

- (a) Conception d'un contrôleur flou pour le convertisseur DC-DC
- (b) Fonction d'appartenance  $dVpv$  de l'entrée
- (c) Fonction d'appartenance  $dPpv$  de l'entrée
- (d) Fonction d'appartenance du cycle de service de sortie
- (e) La forme d'onde de la surface des règles floues

Pour tester et comparer la technique proposée, un profil d'ensoleillement [figure \(4.21\)](#) est injecté dans le GPV [figure \(4.22\)](#).

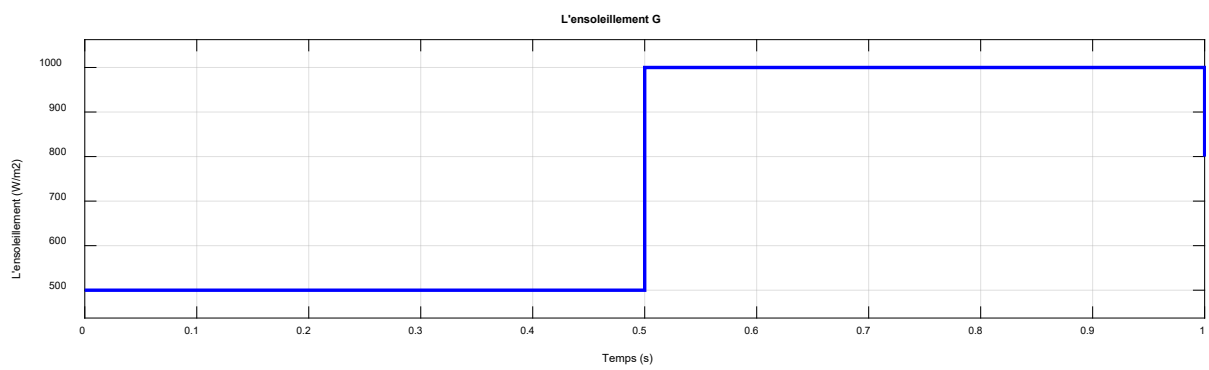


Figure 4.21 .Profile d'ensoleillement injecté dans le GPV

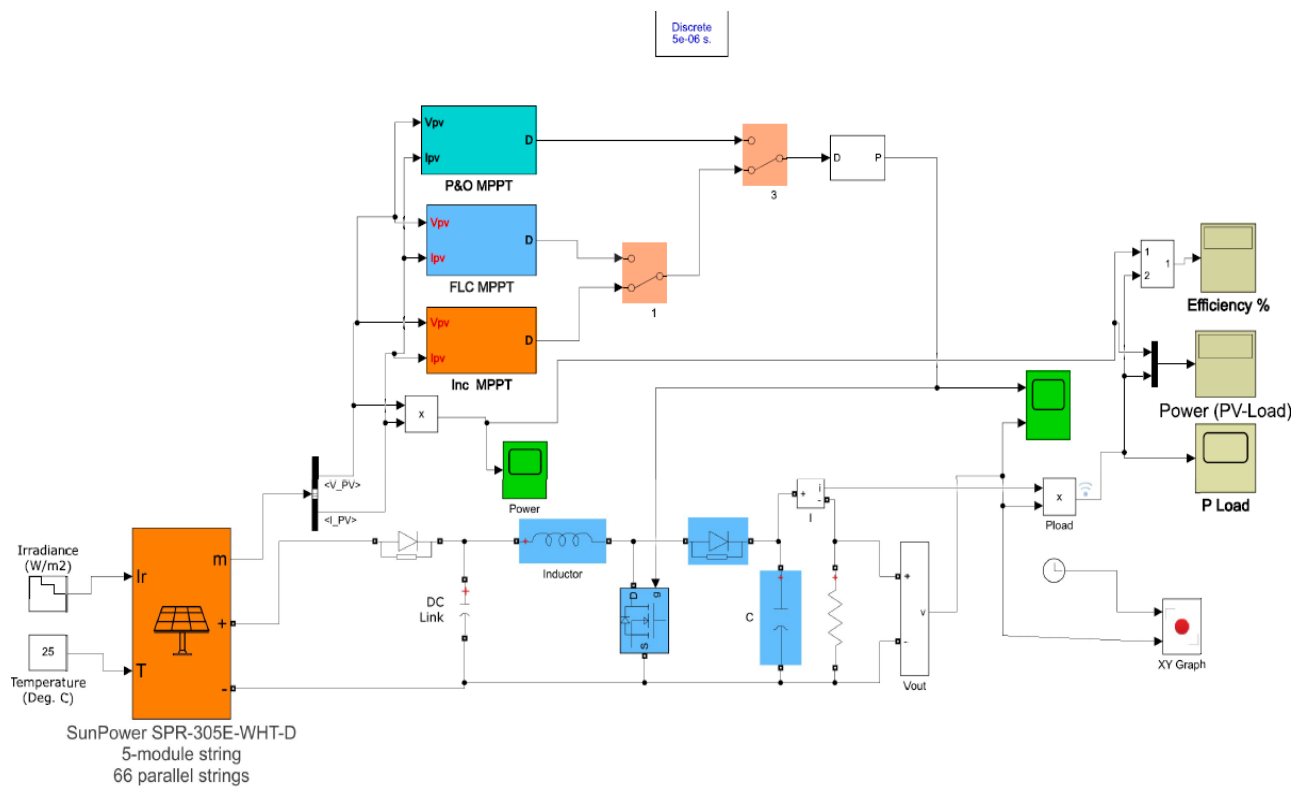


Figure 4.22 Bloc de simulation pour la comparaison avec MPPT fluu

#### 4-7-1 Comparaison avec PO

L'évolution de la tension de sortie du convertisseur Boost commandé par la méthode proposée est présentée par la [figure \(4.23\)](#), On peut voir le changement rapide de la tension suivant le changement de l'ensoleillement. Le résultat montre une caractéristique très importante qui est la stabilité, avec la technique proposée la tension est parfaitement stable en comparaison avec la méthode PO qui présente des oscillations qui dépassent **4%** alors qu'avec l'algorithme développé elle est d'ordre de **0.1%**, donc on remarque clairement l'amélioration de la rapidité et la stabilité du système avec la commande développée

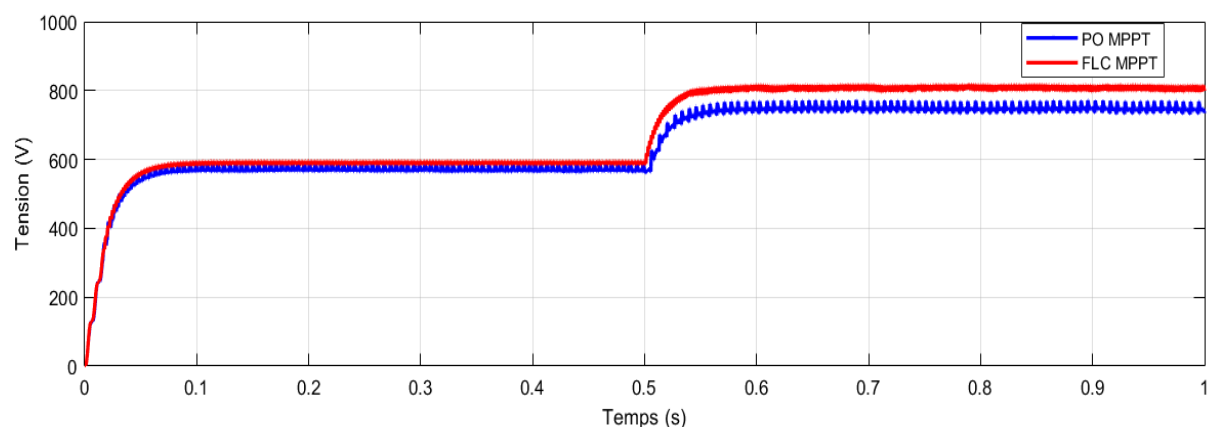


Figure 4.23 Evolution de la tension de GPV commandé par PO et FLC

#### 4-7-2 Comparaison avec IC

Les mêmes conditions sont appliquées avec la technique IC, l'évolution de la tension est représentée par la [figure \(4.24\)](#), là aussi on remarque clairement l'amélioration de la rapidité et la stabilité du système avec la commande développée.

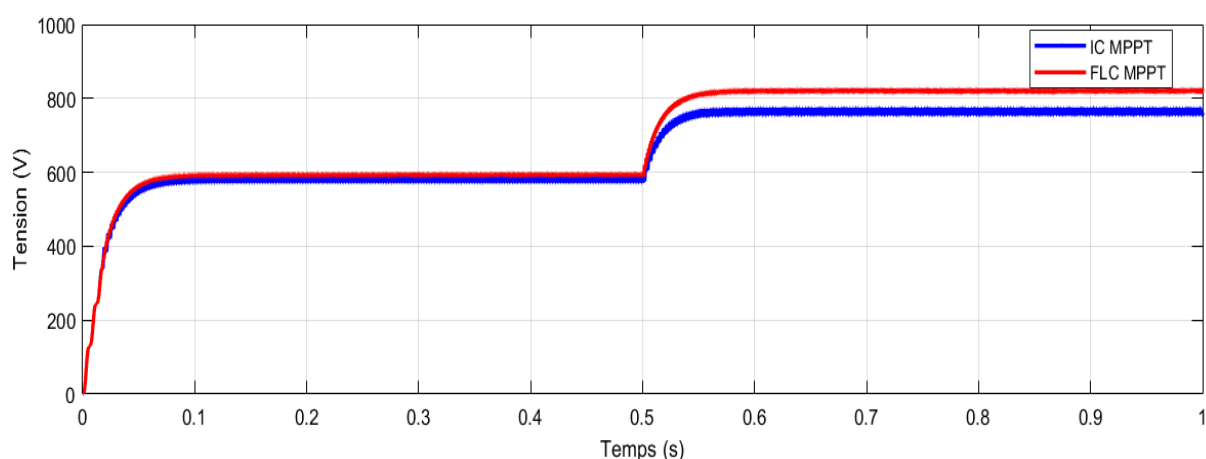


Figure 4.24 Evolution de la tension de GPV commandé par IC et FLC

#### 4-8. Simulation d'un système PV autonome sous Matlab/Simulink

Un système autonome n'implique aucune interaction avec le réseau électrique. De nombreux scénarios sont pris en compte pour simuler le système autonome avec des variations locales de charge. Tout d'abord, nous considérons une température constante avec une irradiance variable, et ensuite une irradiance constante avec une température variable appliquée au panneau solaire SunPower SPR-305E-WHT-D.

Pour le bloc de panneaux solaires de 100 kW, nous avons utilisé 330 modules SunPower SPR-305E-WHT-D, connectés en une combinaison de 66 cellules en parallèle par 5 cellules en série. Une connexion en série des cellules donne des tensions plus élevées, tandis qu'une connexion en parallèle donne un courant plus élevé. Cet ensemble génère 100,7 kW à une irradiance de 1 kW/m<sup>2</sup> à une température de 25°C. Sa tension MPP varie d'environ 250,2 V à 296,6 V en fonction des conditions environnementales données. Le convertisseur DC-DC fonctionne à une fréquence de commutation de 5 kHz et fournit une sortie à 640 V DC.

Les condensateurs de liaison C1 et C2 jouent un rôle d'amortissement afin de maintenir la stabilité du MPPT pendant ces perturbations transitoires. Cet aspect est important car cette ondulation est directement perçue comme une pollution électrique à la tension de sortie du module PV. En effectuant des variations brusques dans le rayonnement solaire S et la température T, le système de génération d'énergie proposé de la figure (4.1) a fourni les caractéristiques I-V et P-V telles qu'illustrées dans la figure (4.11). Ainsi, comme indiqué, le temps d'échantillonnage  $T_s$  est de 50  $\mu$ s et les données simulées correspondent aux caractéristiques mentionnées dans le Tableau 1.

#### 4-8-1. Étude de cas 01 : Variation de l'irradiance et de la température

Pour la première étude de cas appliquée au type de réseau PV SunPower SPR-305E-WHT-D, le contrôle de supervision prend en compte la demande énergétique prévue des utilisateurs finaux et prend des décisions instantanées sur la production d'énergie autonome. L'objectif principal de la gestion du système autonome est de satisfaire les besoins énergétiques des charges. Les entrées de simulation pour le modèle de panneau solaire sont l'irradiance solaire incidente et la température ambiante. Ces paramètres sont mis à jour à chaque intervalle de temps, et ils sont sujets à la variabilité des données. Les sorties de simulation du réseau de panneaux solaires à chaque pas de temps sont le courant, la tension et la puissance générée. Le réseau PV génère la quantité maximale d'énergie, environ 100 kW, dans l'irradiance donnée ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Un modèle de charge R (impédance constante) est utilisé pour examiner le comportement du système PV sous l'algorithme MPPT FLC. Les charges dans un système autonome sont généralement catégorisées en fixes et flexibles, en fonction des choix de confort définis par l'utilisateur. Le modèle simplifié de charge R non constants se compose d'une résistance R connectée en parallèle ( $RL1$  et  $RL2$ ) avec des valeurs de  $30000 \text{ } \Omega$  et  $10000 \text{ } \Omega$  respectivement. Le profil de charge adopté dans cette étude est le suivant :

- De 0 à 2.5 s : charge1 =  $30000 \Omega$ ,
- De 2.5 à 5 s : charge1 + charge2 =  $40000 \Omega$ ,
- De 5 à 6 s : charge1 =  $30000 \Omega$ .

Les résultats de simulation obtenus sont résumés dans les figures (4.25) à (4.30). La figure (4.25) montre le profil d'irradiance solaire incidente et de température ambiante.

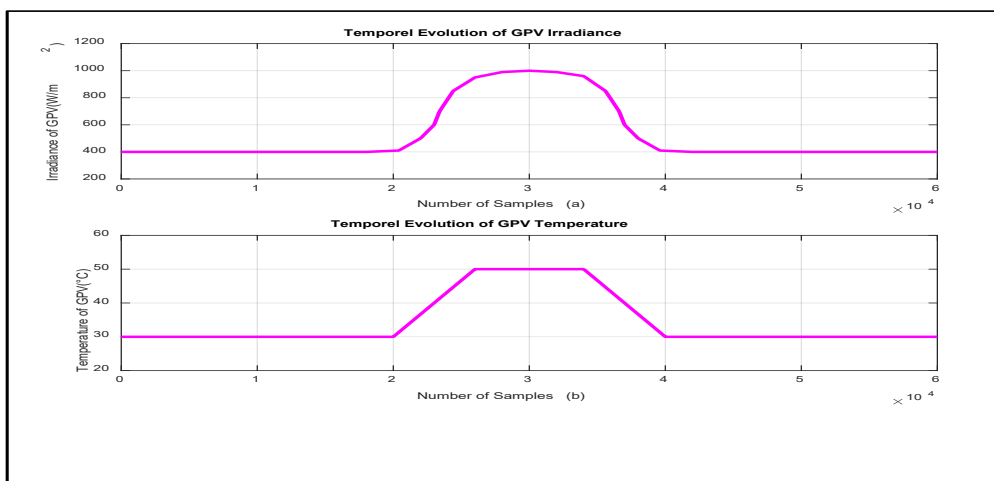


Figure 4. 25 Le profil de l'irradiance solaire incidente (a) et de la température ambiante (b)

La figure (4.26) représente la tension  $V_{pv}(t)$  (Figure (4.26) (a)) et le courant  $I_{pv}(t)$  (Figure (4.26) (b)) du réseau PV en réponse.

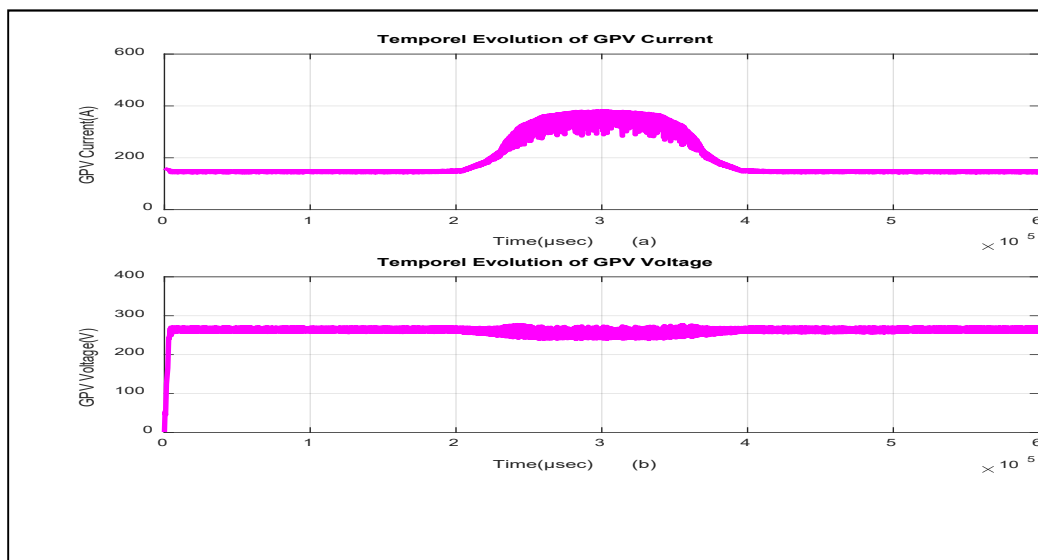


Figure 4. 26 (a)Comportement de GPV ( $I_{pv}$  &  $V_{pv}$ ) lors d'une charge complète soudaine, (b) évolution temporelle de  $I_{pv}$  (a) et  $V_{pv}$  (b)

La figure (4.27) illustre également la tension et le courant du convertisseur DC-DC respectivement. La figure (4.27) (a) montre l'évolution temporelle du cycle de service calculé à partir du signal PWM, puis la figure (4.27) (b) donne la tension du convertisseur DC-DC et la figure (4.27) (c) illustre les courants générés par le convertisseur DC-DC, le courant moyen et les courants *rms* respectivement.

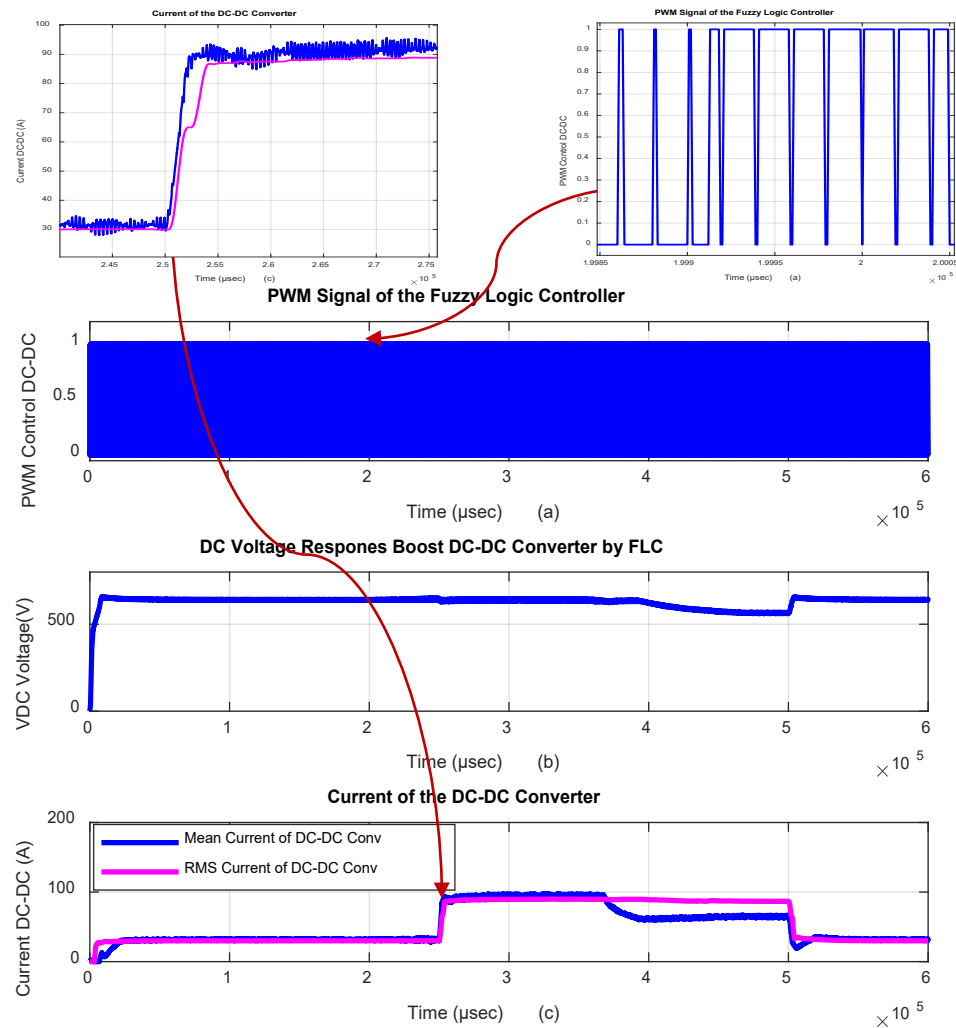


Figure 4. 27 (a) Le signal de contrôle du cycle de service, (b) la tension Vdc, (c) et le courant Idc du convertisseur DC-DC [1].

Les graphiques des résultats dans la figure (4.27) montrent le cycle de service (d), calculé à partir d'un régulateur de point de puissance maximale flou conventionnel (FLC MPPT), et son effet sur la performance prometteuse et le suivi précis du système autonome selon le changement de profil d'irradiance et de température.

Les résultats de simulation qui sont présentés dans la figure (4.28), montre l'état de charge (SOC) et le courant de la batterie. La figure (4.28) (a) montre que la courbe SOC estimée suit de près la SOC mesurée. Par conséquent, la figure (4.28) (b) représente le courant de batterie mesuré et estimé avec ses vues agrandies. La figure (4.28) montre clairement comment la SOC réelle reflète précisément le fonctionnement de la batterie, que ce soit en mode charge ou décharge.

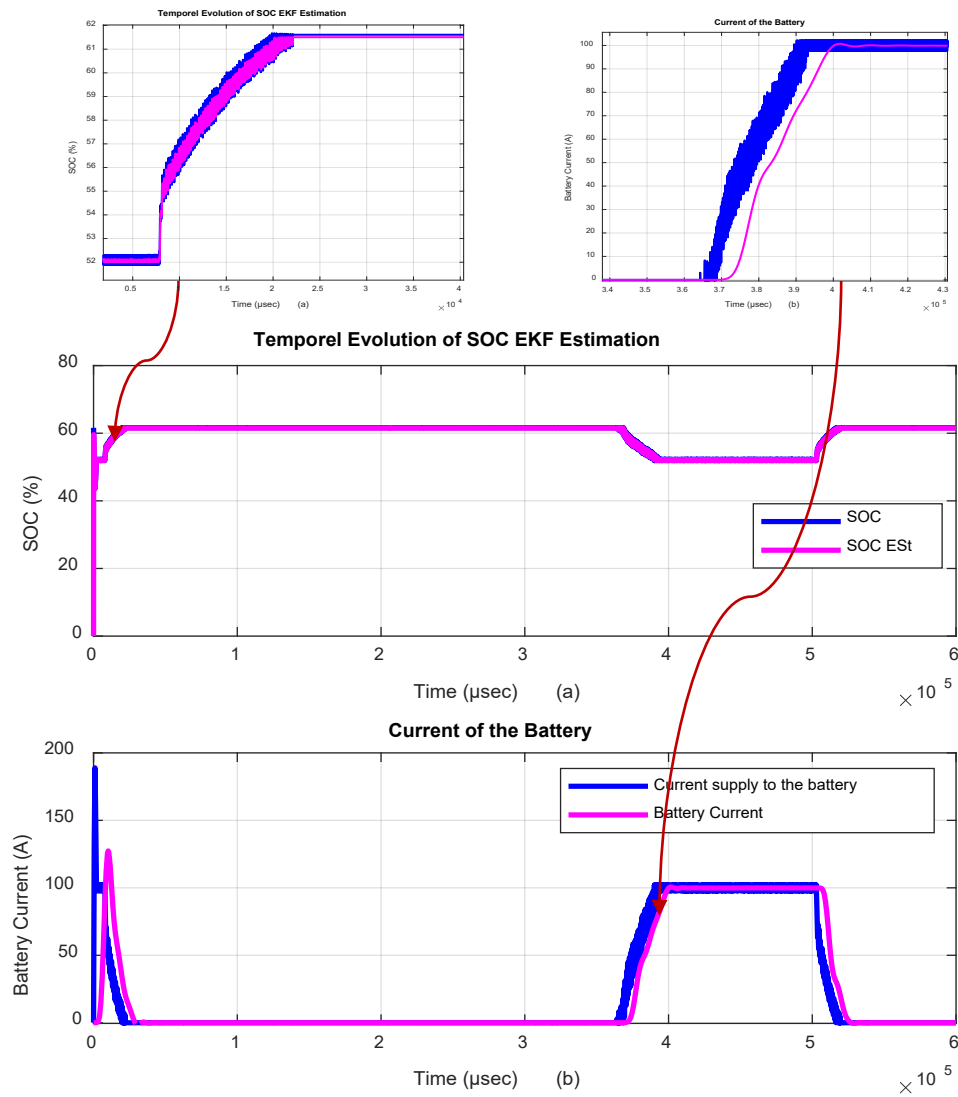


Figure 4.28 (a) Mesure et estimation du SOC, (b) courant et le courant estimé de la batterie

La figure (4.29) montre la tension de sortie de l'onduleur avant filtrage, qui contient les composantes harmoniques. De plus, on peut facilement voir que la stabilité de la tension de sortie de l'onduleur est toujours assurée même avec la variation de charge.

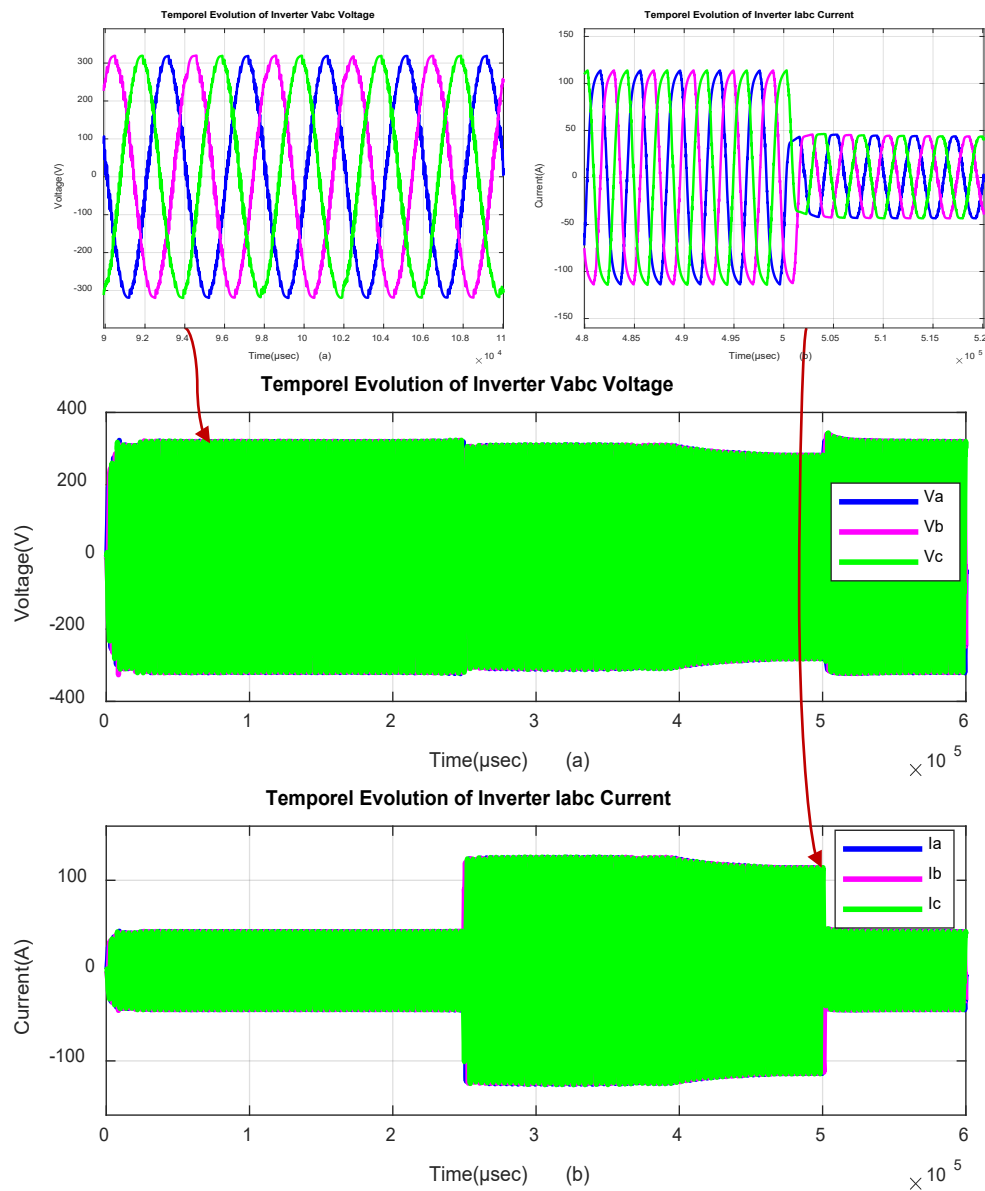


Figure 4. 29 (a)Tension sinusoïdale triphasée de l'onduleur, et (b) courant en fonction de la charge non constante selon l'irradiance solaire et les conditions de température ambiante [1]

Cependant, la figure (4.30) montre la tension de sortie Vabc de l'onduleur (a) et RMS(Vabc) (b) avec des valeurs variables d'irradiance et de température sans constante.

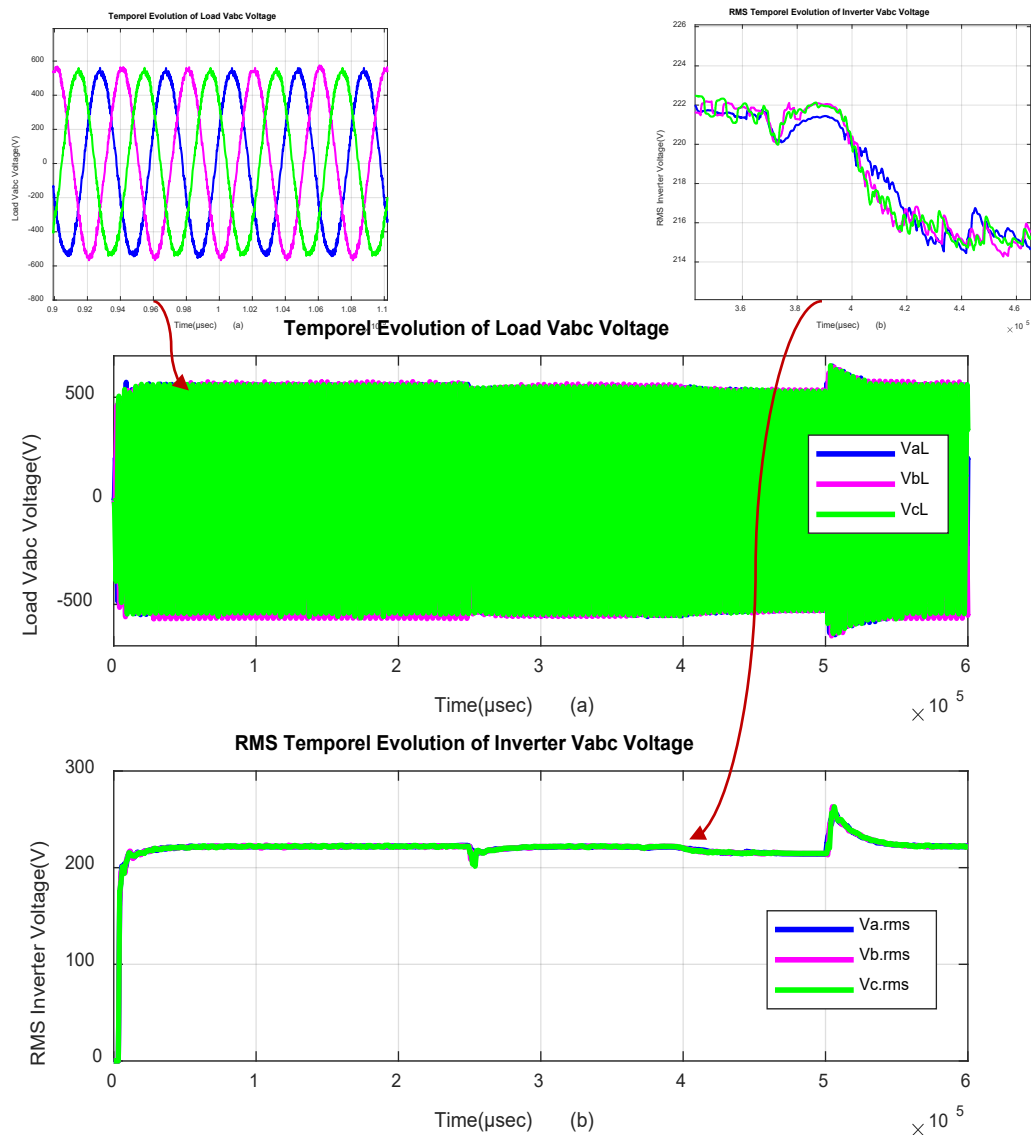


Figure 4. 30 (a)Tension de phase à phase de l'onduleur Vabc, et (b) RMS (Vabc) avec des valeurs variables d'irradiance et de température sans charge constante [1].

L'objectif principal de la gestion du système autonome est de satisfaire les besoins de la batterie et de la charge. Pour cette hypothèse, l'algorithme de contrôle commence par la sélection du mode de connexion, puis il vérifie l'état de charge (SOC) de la batterie. Ensuite, il passe à la comparaison entre la puissance du panneau solaire et celle requise par les demandes de charge, figure (4.31). Ces comparaisons sont effectuées selon les principaux cas suivants

- ✚ Cas 1 : La puissance solaire couvre la demande de charge et charge les batteries.
- ✚ Cas 2 : La batterie aide le générateur PV à fournir la demande de charge.

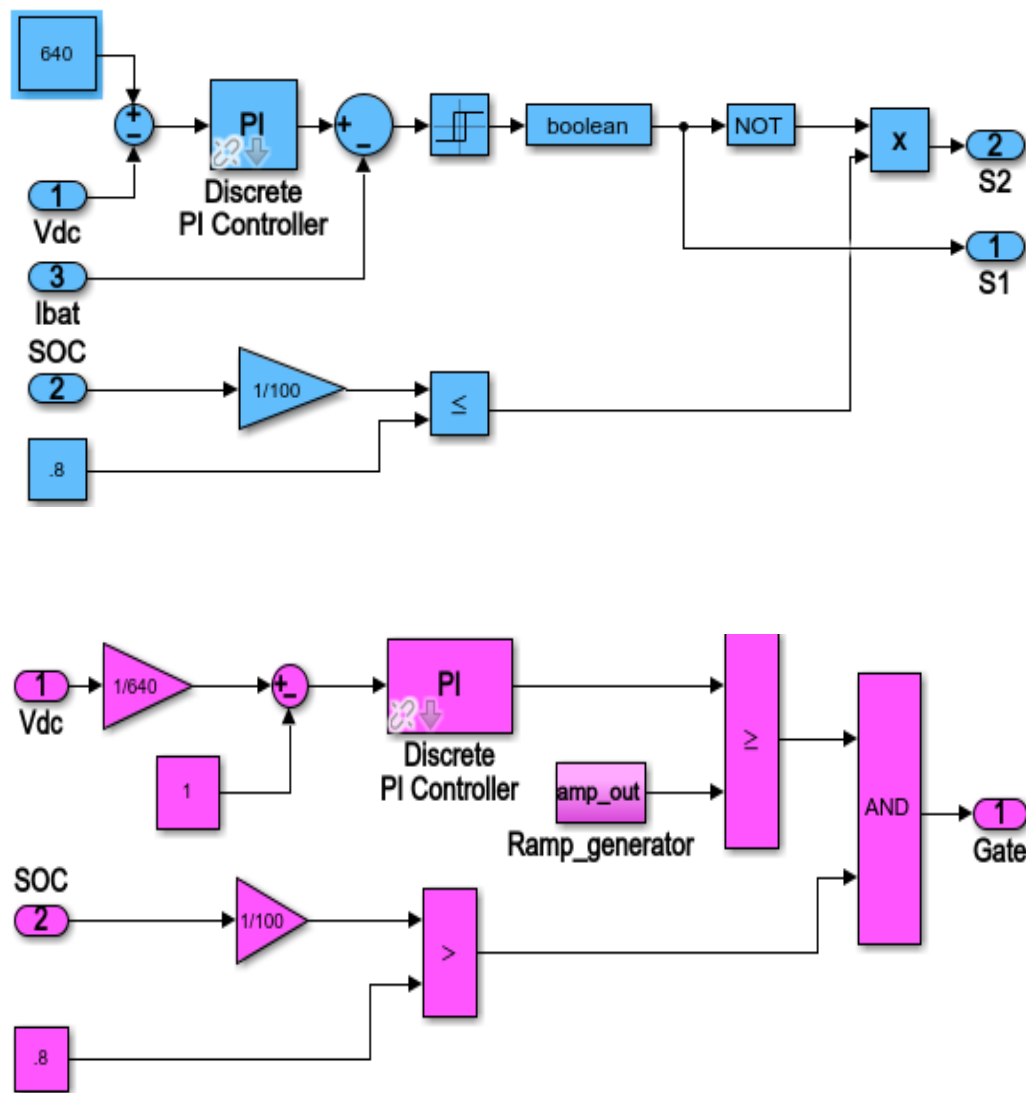


Figure 4. 31 (a) Contrôleur batterie/électrolyseur (b) Contrôleur PI pour la commutation entre la source PV et la batterie

La figure (4.32) montre les trajectoires de puissance produites pour les trois composants autonomes, les panneaux solaires PV, la batterie et la charge

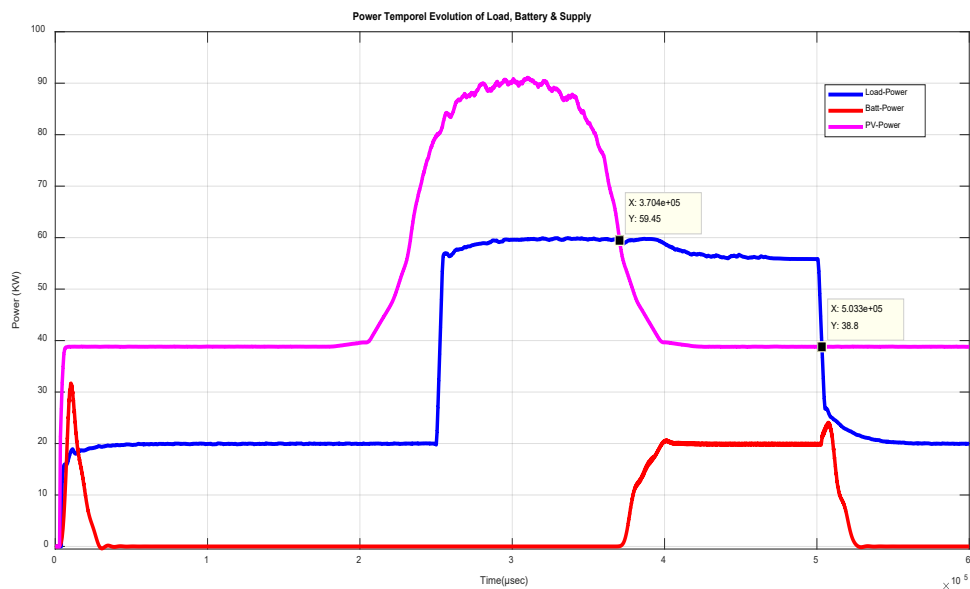


Figure 4. 32 Bilan de puissance lors de l'intégration du système PV et de la batterie en utilisant une charge non constante [1].

Comme le montre la figure (4.32), le panneau solaire génère de l'énergie en fonction des conditions climatiques données (irradiation, température). Les graphiques résultants seront discutés selon des intervalles de temps, comme suit :

- De 0 à 3. 7020s: Pendant cette période, l'énergie solaire générée est supérieure à la demande de charge, et la batterie est complètement chargée.
- De 3. 8520s à 5. 0365s: L'énergie solaire ne peut pas couvrir les besoins énergétiques malgré l'augmentation de la demande de charge. La batterie fournit la puissance manquante pour alimenter la charge.
- De 3. 0365s à 6s : Pendant cette période, l'énergie solaire couvre les besoins énergétiques de la charge. La batterie est complètement chargée et l'énergie fournie par la batterie doit être nulle.

#### 4-8-2. Étude de cas 02 : Irradiance variable et température constante

Les simulations représentées dans les figures (4.33),(4.39) illustrent le cas avec une irradiance variable, une température constante et avec le même profil de charge. Toutes les formes d'onde

de ces figures illustrent la réponse du réseau PV de type SunPower SPR-305E-WHT-D. Cependant, on peut facilement conclure que le générateur PV est très sensible aux changements environnementaux rapides et, il est bien connu qu'un changement d'irradiance a un effet beaucoup plus important sur les caractéristiques du réseau que le changement de température. Lorsque l'irradiance change, la caractéristique courant-tension du panneau PV et son point de puissance maximale (MPP) sont reformulés simultanément. Par conséquent, le régulateur FLC MPPT doit suivre rapidement le MPP modifié.

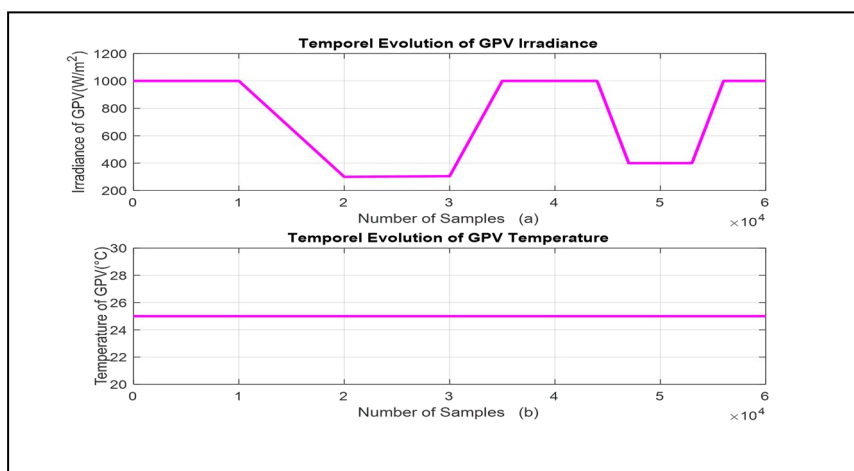


Figure 4.33 Le profil de l'irradiance solaire incidente (a) et de la température ambiante (b)

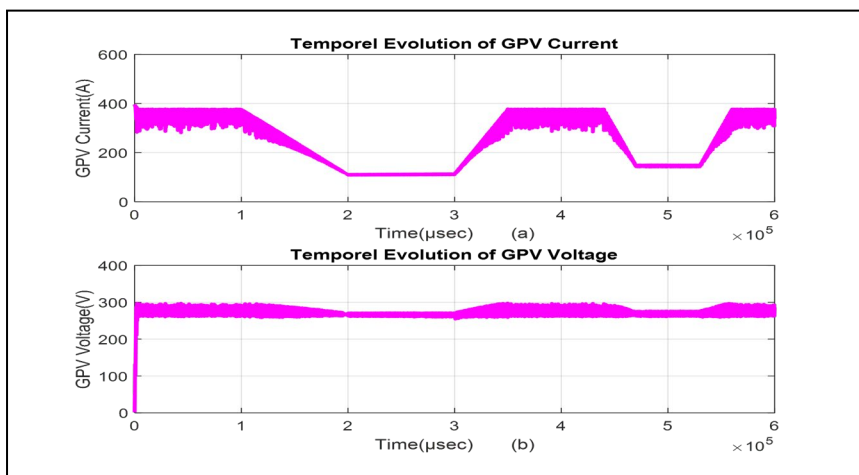
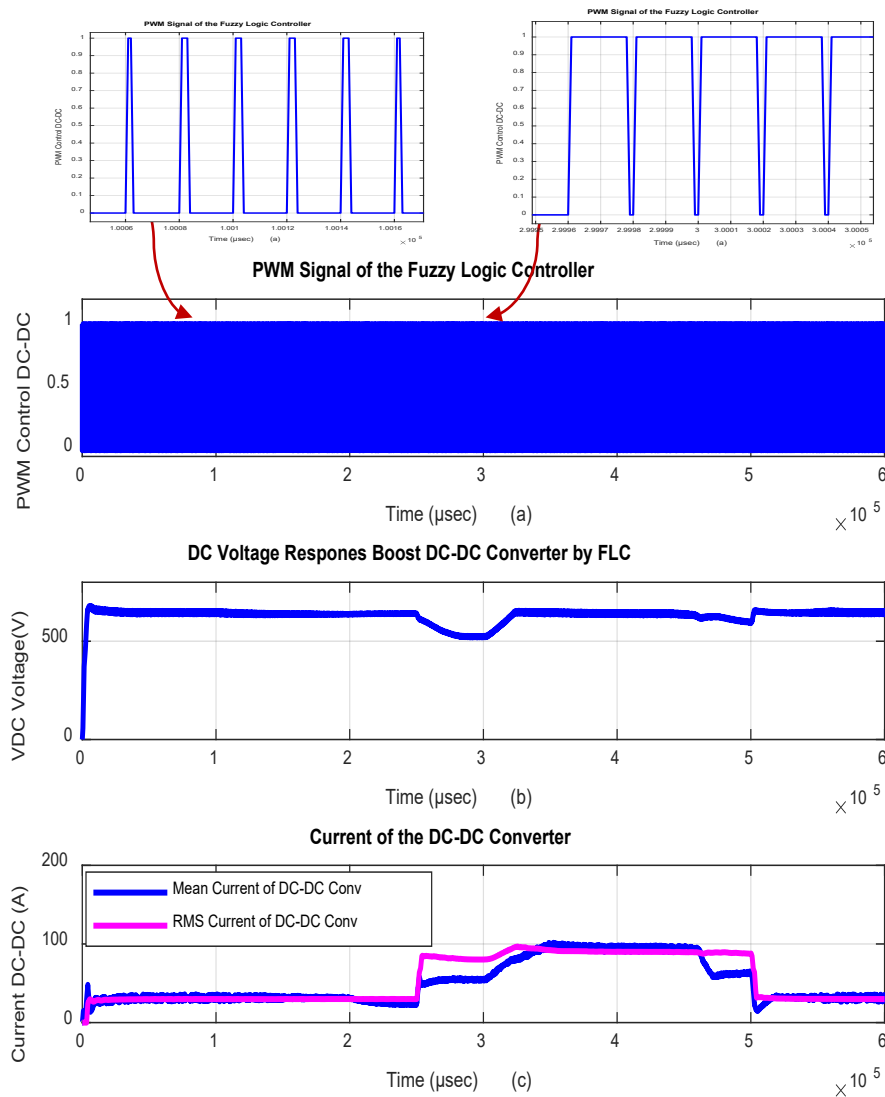


Figure 4.34 Comportement de GPV (**I<sub>pv</sub>** & **V<sub>pv</sub>**) lors d'une charge complète soudaine, évolution temporelle de **I<sub>pv</sub>** (a) et **V<sub>pv</sub>** (b)

La Figure (4.33) présente les entrées du panneau solaire, l'irradiance et la température ambiante fixée à 25°C. Le signal varie de 1000 W/m<sup>2</sup> à 250 W/m<sup>2</sup> et revient à sa valeur initiale jusqu'à la

fin. Par conséquent, la [Figure \(4.34\)](#) montre la sortie  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  du réseau PV. Ces deux paramètres ont le même comportement que dans le cas\_01.

La [Figure \(4.35\)](#) donne le signal de contrôle du cycle de service ([figure \(4.35\) \(a\)](#)), la tension  $V_{dc}$  ([figure \(4.35\) \(b\)](#)) et le courant  $I_{dc}$  ([figure \(4.35\) \(c\)](#)) du convertisseur DC-DC. Le signal de contrôle (cycle de service) génère des valeurs adaptatives dans les conditions climatiques et sans charge constante. La tension DC est d'environ 640V.



**Figure 4. 35** Le signal de commande du cycle de travail (a), la tension Vdc (b) et le courant Idc du convertisseur DC-DC (c) [1].

La figure (4.36) montre l'état de charge (SOC) mesuré et estimé en utilisant le filtre de Kalman étendu (EKF). Cet estimateur est adopté pour introduire une technique sans contact pour estimer le SOC de la batterie.

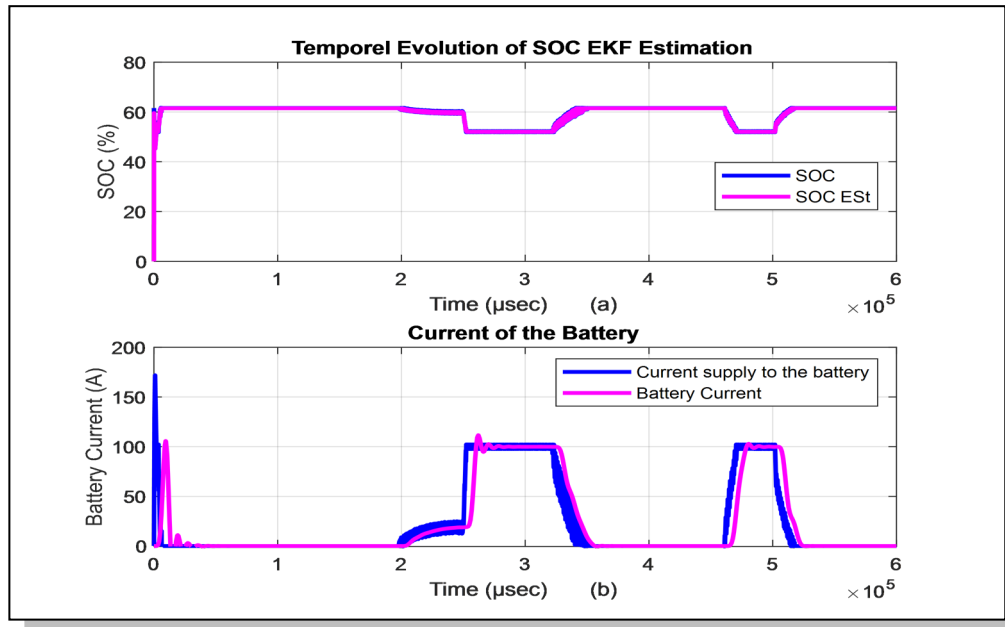


Figure 4. 36 Mesure et estimation du SOC (a), mesure et estimation du courant de la batterie (b)

Les figures (4.37), (4.38) illustrent la réponse de l'onduleur triphasé, les courants, les tensions et la valeur efficace. Pour l'équilibre de puissance entre le générateur PV et la batterie, on peut facilement voir l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée.

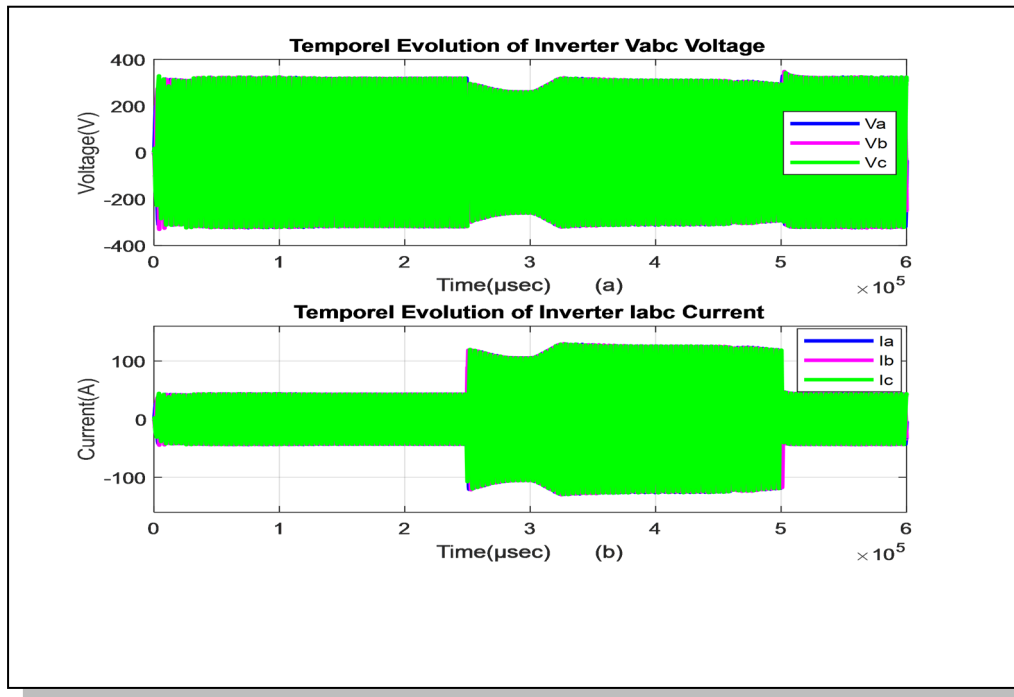


Figure 4. 37 Tension et courant Vabc de l'onduleur pendant une charge non constante en fonction de l'irradiance solaire et d'une température constante

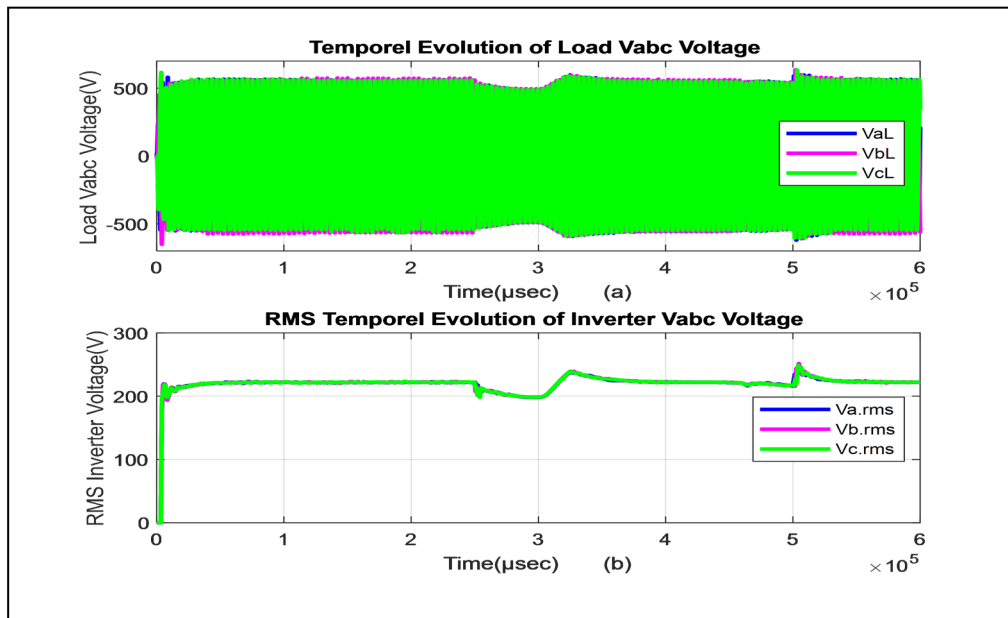


Figure 4. 38 Tension Vabc de phase à phase de l'onduleur (a) et (b) RMS(Vabc) avec des valeurs variables d'irradiance et de température et avec une charge non constante.

Les changements rapides de météo devraient mettre à l'épreuve l'algorithme MPPT et c'est le cas. Cependant, la réaction du régulateur MPPT est rapide ; en regardant les figures (4.35) (a) et (b), on peut voir à quelle vitesse le MPPT répond au changement d'irradiance. À la fin de cette partie de recherche, on peut conclure que les résultats obtenus sont satisfaisants et que l'objectif de maintenir la puissance maximale possible à partir d'un générateur PV, pendant différentes conditions climatiques d'insolation solaire et de température, a été réalisé. Ce régulateur permet de trouver plus rapidement le point de puissance maximale.

La figure (4.39) illustre le comportement de la gestion de systèmes d'alimentation autonome proposé, face à la variation de l'irradiance et à la demande de charge non constante.

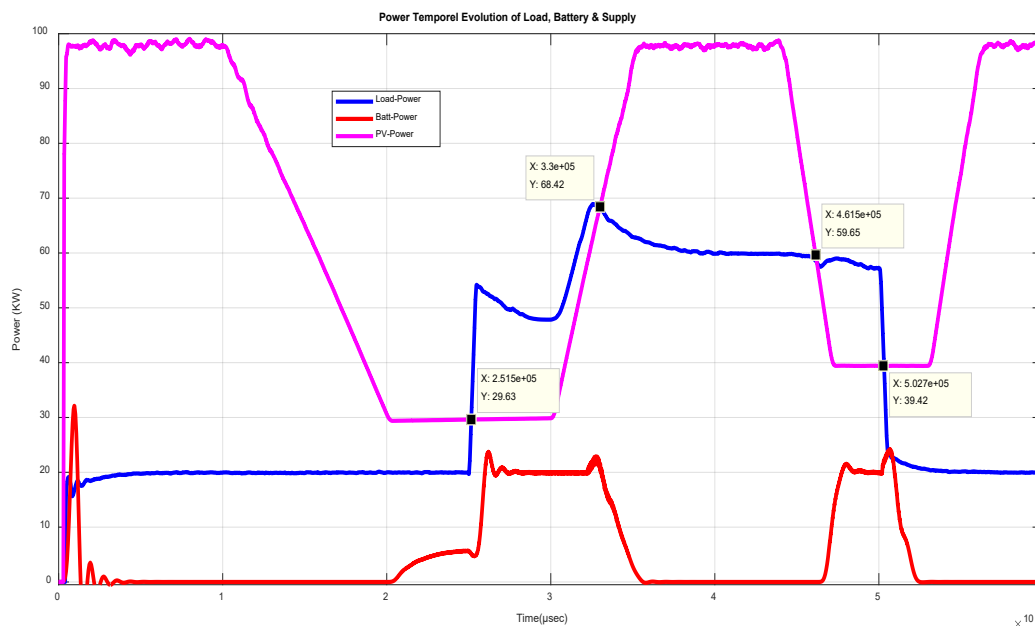


Figure 4. 39 Bilan de puissance lors de l'intégration du système photovoltaïque et de la batterie en utilisant une charge non constante [1].

Les résultats obtenus concernant la gestion de l'énergie appliquée aux systèmes autonomes montrent une performance remarquable. Dans notre cas, malgré des conditions de fonctionnement

très exigeantes, une charge variable et des conditions climatiques fluctuantes, le régulateur proposé s'est avéré particulièrement efficace.

Le phénomène de cliquetis est significativement réduit, et la tension  $V_{dc}$  reste presque constante, même en présence de variations durant les phases de fonctionnement. L'efficacité du régulateur est également démontrée lors des transitions de puissance entre les différentes sources d'énergie, garantissant ainsi une gestion fluide et fiable de l'énergie.

Cette robustesse et cette stabilité confirment la pertinence du régulateur dans des scénarios exigeants et variés.

#### **4-9. Etude en simulation d'un micro-réseau hybride AC/DC et son contrôle de coordination**

Un micro-réseau hybride AC/DC combine à la fois des systèmes de distribution d'énergie en courant alternatif (AC) et en courant continu (DC). Ce type de micro-réseau permet de tirer parti des avantages des deux types de systèmes électriques tout en surmontant les limitations associées à chaque type de réseau. L'un des principaux avantages d'un micro-réseau hybride est sa capacité à intégrer diverses ressources énergétiques distribuées (DERs), telles que les panneaux solaires, les batteries et les piles à combustible, tout en fournissant de l'énergie de manière efficace aux consommateurs.

Le contrôle de coordination dans un micro-réseau hybride AC/DC fait référence à l'intégration des différentes sources d'énergie, des convertisseurs et des dispositifs de stockage d'énergie de manière à assurer un fonctionnement optimal et stable du système dans son ensemble. Le contrôle de coordination vise à maximiser l'efficacité énergétique, à minimiser les coûts et à garantir la stabilité du réseau, tant en mode autonome qu'en mode connecté au réseau principal. Cela implique également de gérer les flux d'énergie entre les sous-réseaux AC et DC, ainsi que de coordonner la production et la consommation d'énergie, en tenant compte des fluctuations de la demande et de la production des DERs.

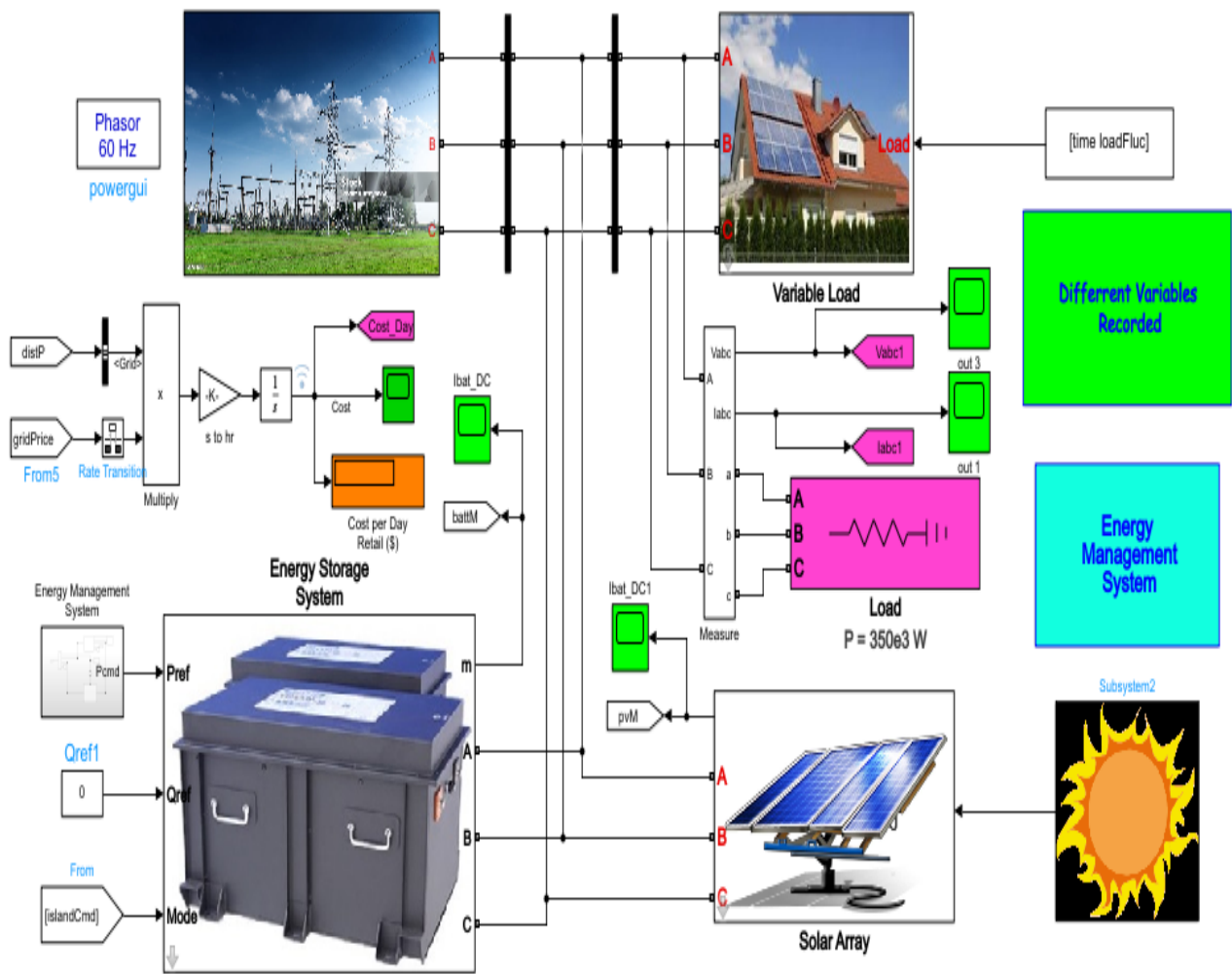


Figure 4.40 Model simulink de système micro- réseau hybride proposé

Le réseau hybride figure (4.40), peut fonctionner en deux modes. En mode connecté au réseau, le convertisseur principal assure la stabilité de la tension du bus continu ( $V_{dc}$ ) et fournit la puissance réactive nécessaire tout en échangeant de l'énergie entre les bus AC et DC. Le convertisseur élévateur de tension (boost) est régulé pour fournir la puissance maximale.

Lorsque la puissance produite par les sources DC dépasse la consommation des charges DC, le convertisseur fonctionne comme un onduleur et injecte de l'énergie du côté DC vers le côté AC. Si la génération totale d'énergie est inférieure à la consommation totale des charges sur le côté DC, le convertisseur injecte de l'énergie du côté AC vers le côté DC. Lorsque la production d'énergie totale est supérieure à la charge totale du réseau hybride, de l'énergie est injectée dans le réseau public. Sinon, le réseau hybride recevra de l'énergie du réseau public. En mode connecté au réseau, le convertisseur de batterie joue un rôle moins crucial dans le fonctionnement du système, car l'équilibre énergétique est assuré par le réseau public.

En mode autonome, la batterie joue un rôle essentiel tant pour l'équilibre énergétique que pour la stabilité de la tension. Les objectifs de contrôle des différents convertisseurs sont gérés par le système de gestion de l'énergie (EMS). La tension du bus continu ( $V_{dc}$ ) est maintenue stable par le convertisseur de batterie ou le convertisseur élévateur (boost) en fonction des conditions de fonctionnement. Le convertisseur principal est contrôlé pour fournir une tension de bus AC stable et de haute qualité. Les panneaux photovoltaïques (PV), peuvent fonctionner en mode suivi du point de puissance maximale (MPPT) ou en mode hors MPPT, selon les besoins opérationnels du système.

La simulation du réseau hybride dans différentes conditions de source et de charge a été réalisée pour deux algorithmes de gestion d'énergie proposées :

- Système de gestion heuristique.
- Système de gestion optimisé.

Les résultats obtenus pour un système de gestion heuristique sont présentés dans la [figure \(4.41\)](#) suivante.

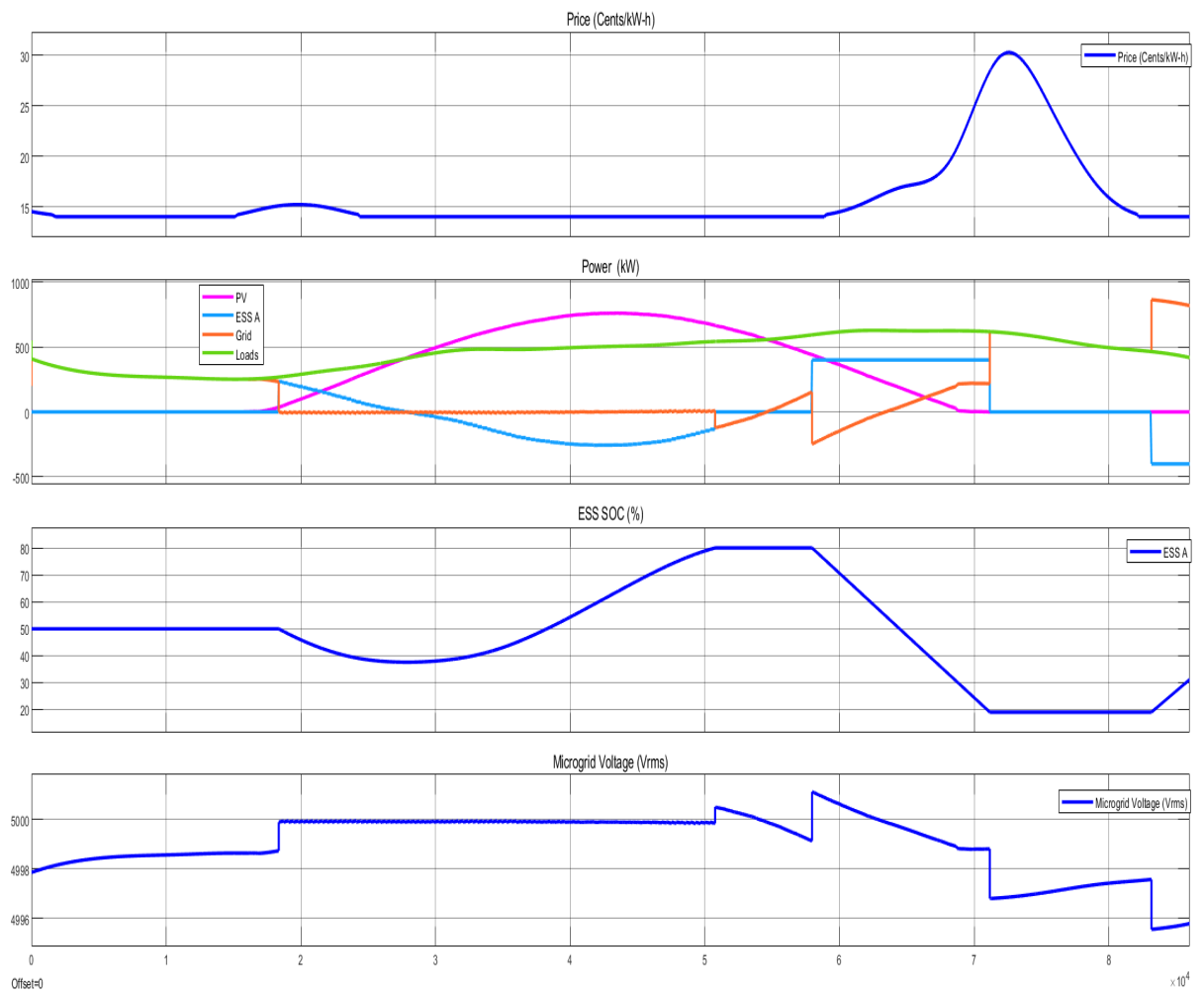


Figure (4.41). Représente : le prix de l'énergie utilisée, la tension de micro-réseaux, évolution temporelle de la puissance (PV, système de stockage, réseaux, charge), SOC%, la tension de micro-réseaux, pour un système heuristique.

- ✚ La première courbe montre l'évolution du prix de l'électricité en cents par ( $\text{kw} \cdot \text{h}$ ). Ou une augmentation importante du prix est observée entre les intervalles de temps ( $6 \cdot 10^4 \text{ s}$  et  $8 \cdot 10^4 \text{ s}$ ).

Cette hausse du prix correspond à une période de demande de pointe sur le réseau. Cela peut inciter un système à basculer sur des sources alternatives (comme une batterie ESS) pour minimiser les coûts d'énergie.

- ✚ Et pour la courbe des puissances (PV, ESS, réseaux, charge) montre la gestion des différentes sources d'énergie dans le système. La production photovoltaïque (PV) varie en fonction des conditions solaires, générant une puissance fluctuante. La batterie (ESS A) intervient pour équilibrer le système : elle se charge pendant les périodes de faible prix de

l'énergie, en utilisant soit l'excédent du PV, soit l'énergie du réseau, et se recharge pendant les pics de prix pour soutenir la charge. La puissance issue du réseau varie en fonction des besoins du système, et peut même devenir négative lorsqu'il y a une injection d'énergie dans le réseau. Enfin, la consommation des charges reste stable tout au long de la période.

- ✚ D'après, la courbe l'état de charge (SOC%) de la batterie on observe que l'état de charge diminue puis augmente progressivement avant de retomber.
  - Une baisse du SOC correspond à une décharge de la batterie pour alimenter les charges ou soutenir le réseau pendant les pics de prix.
  - Une hausse du SOC reflète une recharge, souvent pendant des périodes de faible coût de l'électricité.
  
- ✚ La courbe de la tension  $V_{rms}$  du micro-réseau Montre que la tension est globalement stable autour de 5000  $V_{rms}$  avec de légères fluctuations, ou les variations observées sont synchronisées avec des événements spécifiques tels que des changements dans les charges ou les niveaux de génération des sources (comme PV ou batterie). Ces fluctuations pourraient également correspondre à des transitions entre les modes de fonctionnement (connexion ou déconnexion avec le réseau principal).

Donc, ces courbes montrent un système de gestion d'énergie heuristique, dans un micro-réseau visant à minimiser les coûts. La batterie (ESS) et le photovoltaïque (PV) réduisent la dépendance au réseau en fonction des variations de prix. L'état de charge de la batterie est optimisé pour maximiser l'autonomie et stabiliser le système, agissant comme un tampon énergétique. Ce modèle assure une gestion efficace des ressources et la stabilité électrique face aux fluctuations des prix et de la production renouvelable.

Les résultats de simulation obtenus pour le système de gestion optimisé sont présentés dans la [figure \(4.42\)](#) suivante.

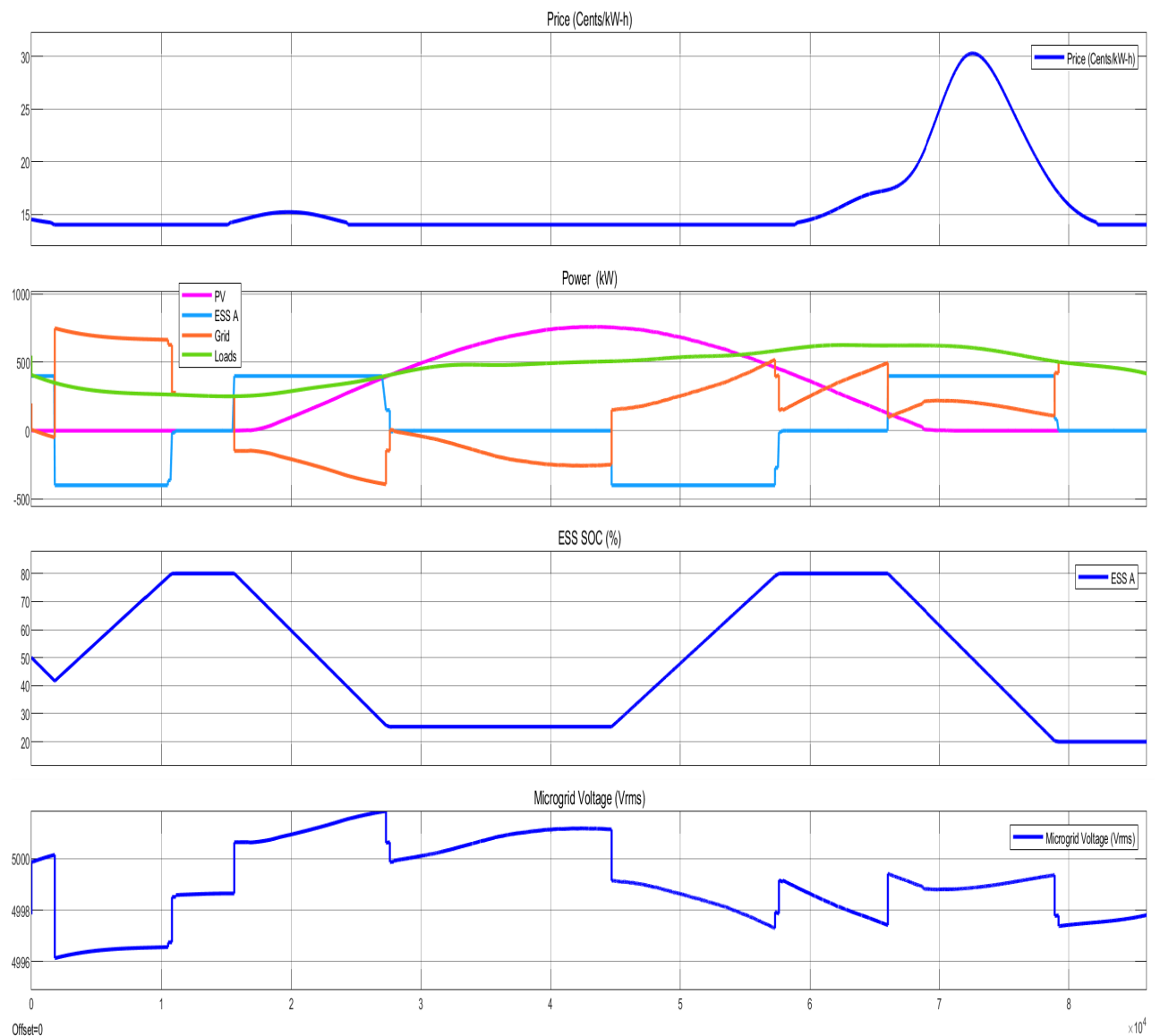


Figure (4.42). Représente : le prix de l'énergie utilisée, la tension de micro-réseaux, évolution temporelle de la puissance (PV, système de stockage, réseaux, charge), SOC%, la tension de micro-réseaux, pour un système optimisé.

Ces courbes représentent l'évolution de plusieurs variables dans un système micro-réseau optimisé, via une approche de programmation linéaire. On observe :

#### ✚ Pour la courbe de prix

Le prix (*Cents/Kwh*), reste stable dans les premières phases, avec de légères variations correspondant à une période de coûts modérés. Une augmentation brusque et marquée du prix est observée à un moment précis, représentant une période critique où l'électricité du réseau devient plus coûteuse.

### ✚ Pour la courbe de puissance

Les différentes sources réagissent de manière complémentaire tout au long du temps pour répondre à la demande énergétique tout en minimisant les coûts :

- **PV (photovoltaïque)** : La production suit un profil caractéristique de la disponibilité solaire, augmentant progressivement pour atteindre un pic pendant les heures de haute irradiation avant de décroître.
- **ESS A (Système de stockage d'énergie)** : Le stockage d'énergie montre un comportement stratégique et décalé par rapport aux fluctuations du prix.
  - ✓ Pendant les périodes de prix bas, la batterie se charge activement (puissance négative), utilisant l'énergie excédentaire de la source photovoltaïque ou du réseau pour se préparer aux périodes de prix élevé.
  - ✓ Lorsque le pic de prix est atteint, la batterie entre en phase de décharge (puissance positive), fournissant l'énergie nécessaire pour alimenter les charges locales ou réduire la dépendance au réseau. Ce comportement décalé reflète une optimisation du système visant à réduire les coûts globaux.
- **Réseau** : Les échanges avec le réseau montrent une interaction coordonnée. L'énergie est importée lorsque le prix est bas ou lorsque les ressources locales ne suffisent pas, et éventuellement exportée si un surplus est disponible pendant les périodes de prix élevé.
- **Charges** : La demande des charges reste relativement constante, imposant une contrainte que le système doit gérer efficacement en ajustant les flux des autres composantes.

### ✚ Pour la courbe de l'état de charge de l'ESS

Le SOC de la batterie montre un comportement étroitement aligné sur les variations de prix et les besoins du système :

- **Phase de charge** : Avant le pic de prix, le SOC augmente rapidement, indiquant une période où l'ESS se charge pour accumuler de l'énergie en prévision de la hausse des coûts. Cela correspond généralement à des périodes où le prix est faible et/ou la production renouvelable est excédentaire.
- **Phase de décharge** : Pendant ou juste avant le pic de prix, le SOC diminue progressivement, indiquant une décharge stratégique pour répondre aux besoins

énergétiques locaux. Cette décharge permet de limiter l'utilisation du réseau à un moment où l'énergie est la plus coûteuse, minimisant ainsi les coûts opérationnels du micro-réseau.

Ce comportement décalé montre que le système utilise la batterie non pas en réponse immédiate au pic de prix, mais de manière anticipative, reflétant une planification optimisée.

#### Pour la courbe de tension du micro-réseau

Malgré les fluctuations des flux de puissance, la tension du micro-réseau reste globalement stable autour de  $5000 V_{rms}$ . Les légères variations reflètent les ajustements nécessaires pour équilibrer les sources et les charges en temps réel. Cette stabilité est cruciale pour assurer la fiabilité du système et maintenir une qualité de service adéquate, même pendant les périodes critiques comme les pics de prix.

En résumé, les courbes analysées démontrent une gestion optimisée d'un micro-réseau à travers des décisions automatisées basées sur la programmation linéaire. Le prix de l'électricité fluctue légèrement avant de connaître un pic important, reflétant des tarifs dynamiques liés à la demande ou aux conditions du marché. Le système exploite ces variations en optimisant les interactions entre les différentes sources d'énergie (photovoltaïque, réseau, stockage) et les charges. Le stockage d'énergie (ESS) est géré de manière proactive : il se charge lorsque les coûts sont bas et se décharge pour répondre à la demande ou exporter de l'énergie lorsque les prix augmentent. Parallèlement, la tension du micro-réseau est maintenue stable autour de  $5000 V_{rms}$ , garantissant la fiabilité et la sécurité du système. Ces résultats illustrent une stratégie efficace de minimisation des coûts, de maintien de l'équilibre énergétique et de stabilité du réseau,

La [figure \(4.43\)](#) représente le coût cumulé de l'utilisation, et l'utilisation cumulée de l'énergie provenant du réseau en fonction du temps pour trois scénarios : heuristique, optimisation, et sans stockage

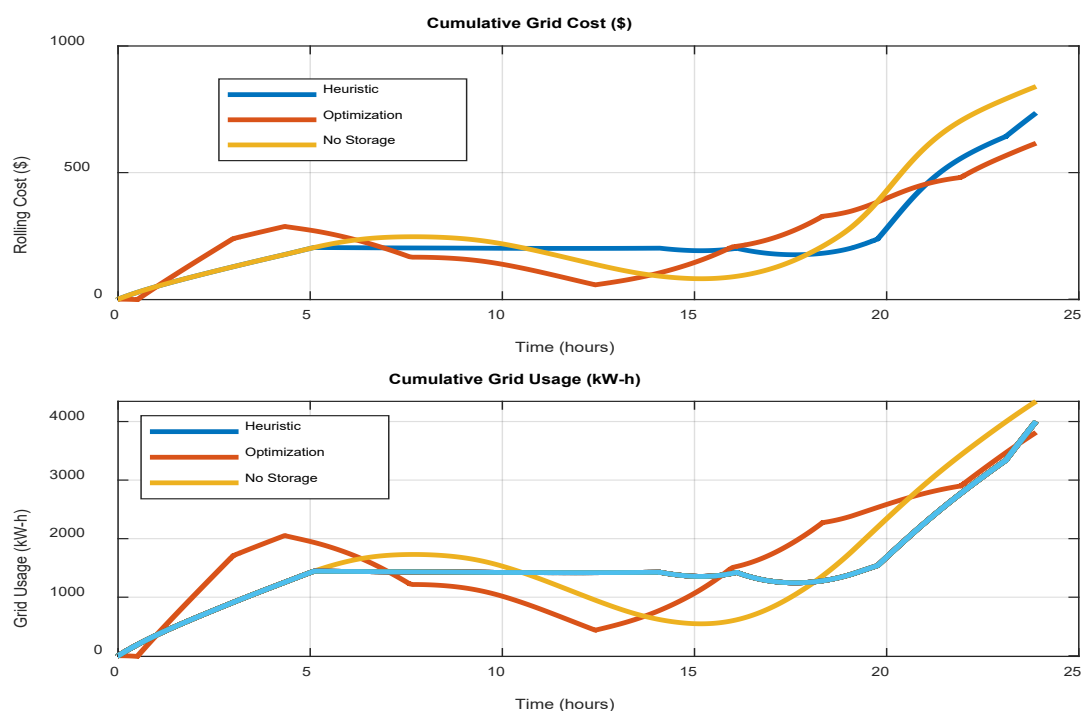


Figure (4.43) le coût cumulé de l'utilisation du réseau et l'utilisation cumulée de l'énergie provenant du réseau

On remarque que :

- ✓ Le scénario (sans stockage) présente le coût cumulé le plus élevé, indiquant une dépendance importante au réseau.
- ✓ Le scénario (heuristique) offre également une réduction de coût par rapport à sans stockage, bien qu'il soit légèrement moins performant que l'optimisation ou le coût augmente est égale 735.72 \$. Cela reflète une gestion plus basique et moins efficace des ressources énergétiques.
- ✓ Le scénario (Optimisation) réduit significativement le coût cumulé, grâce à une gestion optimale des ressources locales (comme le stockage ou les énergies renouvelables). Ou le coût est égale 616.04 \$
- ✓ Après 24 heures, l'écart entre les trois courbes devient plus marqué, soulignant l'importance de la gestion intelligente proposée des ressources pour minimiser les coûts sur le long terme.

En résumé, le système optimisé est clairement le plus performant en termes de coût et d'utilisation du réseau, démontrant la puissance des algorithmes avancés de gestion d'énergie. La gestion heuristique offre une certaine amélioration par rapport à l'absence de stockage, mais reste inférieure à l'optimisation. Enfin, le scénario sans stockage est le moins performant, avec une forte dépendance au réseau et des coûts élevés. Ces résultats mettent en évidence l'impact positif d'une gestion intelligente et d'un stockage d'énergie bien utilisé dans un micro-réseau.

#### **4-10. Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en lumière les performances et les résultats issus des simulations du système photovoltaïque autonome modélisé sous MATLAB-SIMULINK. Les tests réalisés ont montré l'impact des facteurs environnementaux, tels que l'éclairage, la température, ainsi que les résistances série et parallèle, sur les caractéristiques de courant-tension (I-V) et de puissance-tension (P-V) des modules PV. L'évaluation des convertisseurs DC-DC a démontré leur rôle crucial dans l'optimisation de la conversion de l'énergie photovoltaïque, avec une attention particulière aux convertisseurs Boost. De plus, la méthode de filtrage de Kalman étendu (EKF) s'est avérée efficace pour estimer avec précision l'état de charge (SOC) de la batterie, assurant une gestion optimale de l'énergie.

Les différentes études de cas ont également mis en évidence la performance des algorithmes MPPT, notamment le régulateur flou, dans la recherche du point de puissance maximale sous des conditions variables d'irradiance et de température. Les résultats obtenus confirment la robustesse du système proposé et la capacité du régulateur à répondre rapidement aux variations climatiques, garantissant une stabilité et une efficacité énergétique optimales.

Les résultats présentés dans ce chapitre mettent en évidence les avancées significatives dans la gestion des systèmes énergétiques micro-réseau. L'analyse de l'approches heuristique et optimisée par la programmation linéaire, montre que ce dernière offre une solution prometteuse pour répondre aux exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique, de réduction des coûts et de stabilité. Ces travaux ouvrent des perspectives prometteuses pour l'amélioration des systèmes hybrides et des micro-réseaux autonomes.

### 4.11. Bibliographies

- [1] K. Sahel Hananea, L. Abderrazak\*b, R. Adleneb, A. Mohameda, K. Mohamedb “Fuzzy Logic Control of Maximum Power Point Tracking Controller in an Autonomous Hybrid Power Generation System by Extended Kalman Filter for Battery State of Charge Estimation,” IJE Transactions B: Applications Vol. 36, No. 02, (February 2023) 199-214

## Conclusion générale

L'énergie solaire photovoltaïque a émergé comme une alternative majeure depuis les premiers programmes spatiaux en raison de sa grande flexibilité et de sa capacité à fonctionner dans des environnements hostiles. Elle représente une solution attrayante par rapport aux méthodes de production d'énergie conventionnelles.

Les recherches présentées dans cette thèse abordent principalement la problématique de la valorisation de l'énergie photovoltaïque à travers de nouvelles stratégies de régulation entre les générateurs photovoltaïques et leurs charges associées. Plusieurs techniques ont été proposées pour améliorer la conversion de l'énergie photovoltaïque, qui continue de faire face à des problèmes importants de transfert de puissance des générateurs photovoltaïques vers les charges, souvent bien en deçà de leurs capacités maximales. Notre approche explore diverses techniques de gestion de l'énergie dans le but de maximiser la production électrique des systèmes photovoltaïques. Nous nous appuyons sur des travaux impliquant des chaînes de conversion discrétisées pour élaborer des solutions novatrices.

Les contrôleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont couramment utilisés pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale. Ces contrôleurs sont conçus pour suivre le point de puissance maximale (PPM) et minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement réelle et la puissance maximale de référence, cette dernière étant variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

En conclusion, ce travail de recherche a accompli avec succès les objectifs définis pour le développement et la gestion d'un système d'alimentation autonome, en mettant en avant le module photovoltaïque SunPower SPR-305E-WHT-D. Les éléments clés comprenaient un modèle mathématique détaillé, un convertisseur élévateur avec un algorithme FLC MPPT pour optimiser la puissance, la gestion de charge/décharge de la batterie, et l'utilisation d'un algorithme EKF pour estimer le SOC.

L'intégration d'un convertisseur élévateur avec un algorithme FLC MPPT a constitué une étape cruciale, permettant d'optimiser la puissance générée par le module PV sous diverses conditions climatiques. Les fonctions d'appartenance floues ont été ingénieusement utilisées, montrant leur utilité dans l'adaptation aux conditions changeantes, tandis que l'onduleur

triphasé a contribué à convertir la tension continue en alternative, alimentant une charge non constante.

L'algorithme EKF pour l'estimation du SOC de la batterie a montré une précision remarquable, s'adaptant aux variations de la tension à circuit ouvert en fonction de la température ambiante. La répartition optimale de la charge entre le solaire et les batteries, conforme aux conditions de charge spécifiques, a démontré une gestion équilibrée de l'énergie. Cette gestion efficace de la charge et de la décharge de la batterie, ainsi que l'utilisation de l'algorithme EKF pour estimer le SOC, ont ajouté une dimension sophistiquée au système.

Les simulations ont confirmé la robustesse du système face aux changements climatiques rapides, soulignant la performance optimale maintenue malgré les fluctuations des charges. Ce système autonome offre ainsi une solution prometteuse pour maximiser la production d'énergie solaire dans des conditions climatiques variables, suggérant son application pratique dans des environnements réels.

L'intégration des batteries et des énergies renouvelables, combinée à des algorithmes d'optimisation avancés PL, permet non seulement de minimiser la dépendance au réseau principal, mais aussi de tirer parti des variations dynamiques de prix et des conditions climatiques changeantes. Ces stratégies garantissent une gestion plus intelligente et résiliente des ressources énergétiques, en alignant les objectifs de performance et de durabilité.

Enfin, les résultats ont montré que la coordination entre les sources d'énergie permet de maintenir un équilibre entre production et consommation, tout en réduisant les coûts grâce à une gestion optimisée. Ces travaux ouvrent des perspectives prometteuses pour l'amélioration des systèmes hybrides et des micro-réseaux.

En conclusion, ce travail de recherche a réussi à réaliser les objectifs fixés, validant l'efficacité du système proposé. Ces résultats prometteurs offrent des perspectives intéressantes pour le déploiement de systèmes d'alimentation autonomes dans des contextes variés, démontrant une avancée significative dans le domaine des énergies renouvelables et des technologies de stockage.

Cependant, cette étude met en lumière le besoin de poursuivre les recherches, notamment pour intégrer des prédictions sur la demande énergétique et les prix, et pour inclure une variété encore plus large de sources d'énergie renouvelable. Ces travaux futurs contribueront à renforcer encore davantage la transition vers des systèmes énergétiques durables, intelligents et adaptatifs, en répondant aux besoins d'une société moderne en constante évolution.



# Fuzzy Logic Control of Maximum Power Point Tracking Controller in an Autonomous Hybrid Power Generation System by Extended Kalman Filter for Battery State of Charge Estimation

K. Sahel Hanane<sup>a</sup>, L. Abderrazak<sup>\*b</sup>, R. Adlene<sup>b</sup>, A. Mohamed<sup>a</sup>, K. Mohamed<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mechanical Engineering Department, Automatic Laboratory, University of 20 August 1955, Skikda, Algeria

<sup>b</sup> Electrical Engineering Department, Automatic Laboratory, University of 20 August 1955, Skikda, Algeria

## PAPER INFO

### Paper history:

Received 07 April 2022

Received in revised form 04 November 2022

Accepted 05 November 2022

### Keywords:

Management

Hybrid Photovoltaic System

Stand-alone

DC-DC Converter

State of Charge Estimation

Extended Kalman Filter

## ABSTRACT

Autonomous power generation systems are designed to operate independently from the public power grid. Batteries constitute the important element in stand-alone PV system. They are used to store electricity produced by solar energy at overnight or for emergency use during the non-constant load demand. This paper has three major parts. The first pertains to the design of an intelligent method for maximum power point tracking based on fuzzy logic controller to improve the efficiency of a standalone solar energy system. The second part describes the battery state of charge (SOC). The proposed model, which better reflects the real SOC response of the lithium battery, is constructed by using the extended Kalman Filter (EKF) states estimator. This proposed method can be considered as a more accurate and reliable method to estimate the battery state of charge. The third part integrates a management system for the above two renewable energy sources. The performance of the proposed management system by using a fuzzy logic controller based maximum power point tracking FLC-MPPT and the EKF estimator have been simulated in Matlab/Simulink at different solar irradiation and temperature for a given no constant load energy request.

doi: 10.5829/ije.2023.36.02b.02

## NOMENCLATURE

$q$	Electron Charge	$v, w$	zero-mean white Gaussian
$\alpha$	Duty cycle	$A_k = \left. \frac{\partial f(x,u)}{\partial x} \right _{x(t),u(t)}$	Linearized System Matrix
$x$	State variable	$C_k = \left. \frac{\partial f(x,u)}{\partial x} \right _{x(t),u(t)}$	Linearized Output Matrix
$u$	Control variable	$R_{L1} \text{ \& } R_{L2}$	Load Resistors
$K_k = P_{k/k-1} C_d^T [C_d P_{k/k-1} C_d^T + \Sigma_v]^{-1}$	Kalman gain matrix	$P_{k/k-1} = A_d P_{k-1/k-1} A_d^T + \Sigma_w$	Error covariance time update

## 1. INTRODUCTION

In recent years, solar energy, in particular photovoltaic energy, has seen a significant development as an alternative to meet energy demands, especially in desert areas or for reasons of environmental concern and the fall in the prices of photovoltaic modules [1].

For this purpose, photovoltaic (PV) panels, which are the main technology for converting solar energy into

electrical energy, can be installed as stand-alone systems to produce electrical energy in certain isolated areas or be connected to supply the electrical network. Because solar energy is instantaneous and unstable by nature, the PV energy system works in conjunction with storage batteries to provide continuous and stable power in the configuration of hybrid stand-alone power systems photovoltaic generator (GPV)/ batteries. Battery storage can be considered an auxiliary power source to reduce the

\*Corresponding Author Institutional Email:  
[a.lachouri@univ-skikda.dz](mailto:a.lachouri@univ-skikda.dz) (L. Abderrazak)

risk of PV's irregular power supply, and always ensure the satisfaction of demand [2]. Indeed, to enhance the effectiveness of the PV generation system, DC/DC converters are always used to follow up on the maximal power extracted (MPP) from the PV array system and adapt the connection with an electrical network or battery bank to adjust the power flow route and optimize the whole system performance [3]. In order to retrieve the maximum power delivered by the PV generator, researchers are working on improving MPPT algorithms [4]. In the literature, several algorithms and techniques are developed for calculating the MPPT, such as the perturbation and observation (P&O) algorithm, the incremental conductance algorithm (InCond), the ripple correlation control algorithm (RCC), the fractional voltage/current MPPT, the fuzzy logic controller MPPT algorithm, and the neural network (NN)-based MPPT control [5]. However, the most famous MPPT is the fuzzy logic controller, which is widely adopted because it is the simplest and most robust method among all MPPT ones. The FLC method can be introduced also in other contexts for searching the maximum (or minimum) of a function [6]. Other than an MPPT controller, inverters for PV or grid-connected or stand-alone AC systems, DC/DC converters (buck, boost, buck-boost, Cuk, single-ended primary inductance converter SEPIC etc.) and storage elements such as electrical batteries, which are used to improve the PV efficiency and regulate the output voltage [7].

Hybrid power systems (HPS) based on renewable energy (RE) are a good alternative for conventional systems to guarantee the continuity of electricity supply to customers. In general, batteries are the most common in this context. Many companies are interested in the management and storage of solar energy and providing more intelligent solutions for the solar energy markets, whether for home use or for commercial and industrial use. However, to meet this requirement, we can find that batteries constitute the most attractive energy storage systems because of their high efficiency and low pollution. However, the batteries must be protected against overcharging and deep discharging. This requires continuous monitoring for both the battery state of charge and the energy produced by the photovoltaic panels [8]. Therefore, the battery State of Charge (SOC) which used to estimate its remaining stored charge, is a very important parameter to establish a control strategy [9]. In this context, real-time tracking with an accurate estimate of its SOC can not only protect the battery from overcharging and over discharging and improve its life duration but also allow the applications to make rational control strategies in order to ensure the reliability of the power production system and optimize energy management [10].

There are many types of batteries currently used in the industry: lead-acid batteries, Ni-MH, Ni-Cd and Li-

ion batteries. All these batteries have chemical energy storage that cannot be directly accessed and measured. In the literature, evaluation of SOC is essentially based on two methods, physical and electrical:

**A. Physical methods:** These methods are based on the observation of chemical and physical changes occurring in the battery during charging or discharging in operating mode. Among these methods, one involves measuring the gravity (or specific gravity) of the electrolyte.

**B. Electrical methods:** These methods are applicable to the majority of batteries. They are calculated from the measurements of the electrical parameters such as the voltage, the current, internal resistance, and impedance. Among these methods: method of charge counting or current integration, Fuzzy logic and ANN-based methods, and recently the Extend Kalman Filter (EKF).

This work presents three main contributions. The first contribution consists of the design of an intelligent method for maximum power point tracking based on fuzzy logic controllers. The second part describes the battery state of charge (SOC). The proposed model, which better reflects the real SOC response of the lithium battery, is constructed by using the extended Kalman Filter (EKF) states estimator realizing a software sensor for the measurement of the battery SOC. The advantage of such a method is that the SOC is optimally estimated even in the presence of wideband measurement noise affecting the system [11]. The paper is structured as follows: section 2 is devoted to the modeling of PV systems. A brief introduction to the control scheme is presented in section 3. Section 4 introduces an EKF-based SOC estimator for the developed model, and the simulation results are provided in section 5.

## 2. DESCRIPTION OF THE SYSTEM

A stand-alone alternative energy system consists of two or more energy sources, at least one of which is renewable [12]. Solar is a promising power generating source, but it depends on climatic conditions and geographical areas [13]. Generally, the residential PV-battery backup system consisted of a PV generator for the conversion of the solar irradiance to electrical power, deep-cycle flooded lead acid batteries for the storage of the electrical energy, Pulse Width Modulation (PWM) charge controller to regulate the charging operating mode of the battery bank. Also, a power converter is able to operate in two modes: DC/AC and AC/DC conversion. Figure 1 shows a schematic overview of a typical PV/battery Renewable Energy Hybrid System (REHS).

In this section, the PV generator and the storage battery are coupled with the inverter and connected to an AC bus system, which supplies directly the load. In such systems, the battery can be considered as the main source in the case, for instance, of insufficient PV production.

Furthermore, the PV power production has to be exploited with the highest efficiency. Therefore, it is necessary for an operation strategy to design the optimal economic solution for solving this problem. On another side, the capacity of battery has to be large enough to be charged from the power excess provided by the PV generator to cover the power deficit.

**2. 1. PV Model**

In simulations, the literature reveals methods of modeling solar cells, with a major difference between using a single diode solar model or a double diode solar model. They display real system actions with the inclusion of losses [12]. In this paper, a single diode model is used. This model is characterized by its electric diagram, which is illustrated in Figure 2. The power source models the conversion of solar energy

into electricity, the resistance shunt reflects the surface quality of the cell periphery, the resistance series refers to the different contact and interaction resistances performed on the cell, and the diode in the PN junction parallel models [13].

The current expression for equivalent solar model is given by Equation (1).

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{SH}} \tag{1}$$

Generally, for modules in a PV system that are connected in arrays, the cell array contains  $N_p$  parallel branches, each with  $N_s$  modules in series. The total current output can be deduced as follows from Equation (2) [14].

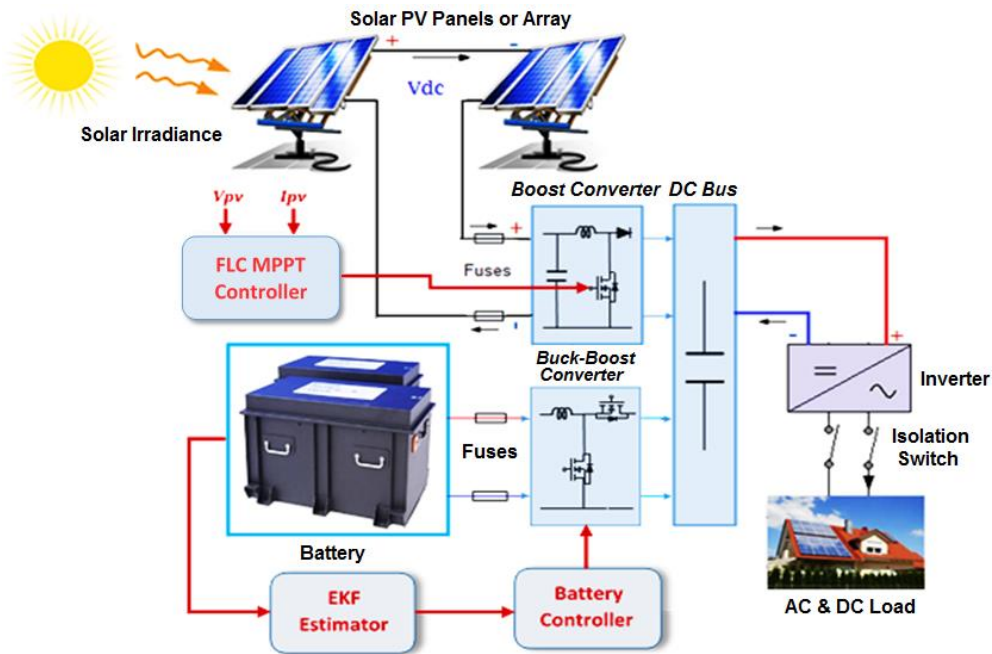


Figure 1. Schematic illustrating the studied REHS configuration

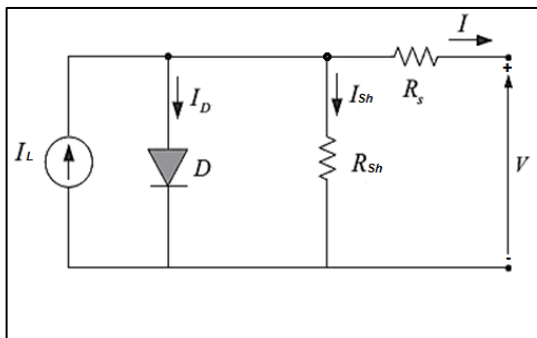


Figure 2. Equivalent Model of Single Diode Solar cell [15]

$$I = N_p \cdot I_L - N_p \cdot I_0 \left( e^{\frac{q(V+(N_s/N_p)I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T \cdot N_s}} - 1 \right) - \frac{V+(N_s/N_p)I \cdot R_s}{(N_s/N_p)R_{SH}} \tag{2}$$

where:

- $I$ : is the solar array output current (A).
- $I_0$ : is the cell reverse saturation current (A).
- $I_L$ : is the photo-generated current (A).
- $V$ : is the solar panel output voltage (V).
- $q$ : is the electron charge  $1.602 \cdot 10^{-19}$  C.
- $k$ : is the Boltzmann constant  $1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K.
- $n$ : is the p-n junction ideality factor.
- $T$ : is the temperature (K).

**2. 2. DC/DC Converter**

The boost converter is used where a controlled average voltage is required by converting a DC voltage ( $V_{in}$ ) to another DC voltage ( $V_0$ ). As shown in Figure 3, it is comprised of a DC input voltage source  $V_{in}$ , boost inductor L, controlled switch (MOSFET), diode D, filter capacitor C, and load resistance R. When the switch S is in the on state, the boost inductor stores energy from the PV panel and the current increases linearly. The diode D is reverse biased at the time. However, if the switch S is turned off, the energy stored in the inductor is released through the diode to the input RC circuit. As the name of the converter suggests, the PV panel voltage is added to the inductor voltage (discharge state) to make the output voltage always greater than the input voltage [16].

This converter is modelled as follow [17]:

$$V_0 = \frac{V_{in}}{1-\alpha} \tag{3}$$

$$I_0 = I(1 - \alpha) \tag{4}$$

where,  $\alpha$ ,  $V_{in}$  and  $I$ ,  $V_0$  and  $I_0$  are respectively the duty cycle, PV input voltage, and current, and the output voltage and current of the boost converter.

**2. 3. Modeling of Battery**

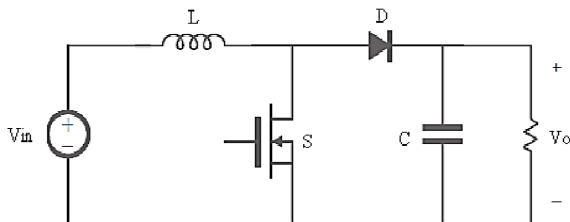
The battery is an important element of a stand-alone PV system. The equivalent circuit illustrated in Figure 4 gives the model of the lithium battery. The capacitances  $C_c$  and  $C_{cs}$  represent the battery storage capacity and the diffusion effects. The resistances  $R_i$  and  $R_t$  represent the internal and the polarization resistances respectively. The voltages across the bulk capacitor and the surface one are denoted by  $V_{cb}$  and  $V_{cs}$ . The terminal voltage and current are denoted by  $V_0$  and  $I$ , respectively [18]. For simplicity, the model equations can thus be characterized by the model, which is shown in Figure 4.

$$\dot{V}_{cb} = \frac{I}{C_{cb}} \tag{5}$$

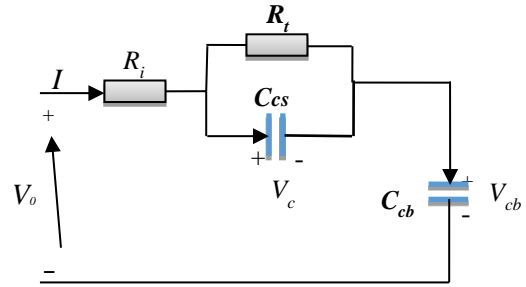
$$\dot{V}_{cs} = \frac{1}{R_t C_{cs}} V_{cs} + \frac{1}{C_{cs}} I \tag{6}$$

$$V_0 = V_{cb} + V_{cs} + IR_i \tag{7}$$

It seems that the relationship between open circuit terminal voltage (OCV) and State of Charge SOC is only



**Figure 3.** DC-DC Boost converter



**Figure 4.** Equivalent circuit model for a lithium battery

piecwisely linear and static [19], one can define:

$$V_{cb} = kSoc + d \tag{8}$$

where k and d  $\neq$  0, (k and d are not constants and vary with battery SOC and the ambient temperature). Here, SOC represents the battery's State Of Charge. By substituting Equation (8) into Equation (5) ~ Equation (7), the equations describing the battery characteristics can be defined as:

$$\begin{bmatrix} \dot{Soc} \\ \dot{V}_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I}{kC_{cb}} \\ -\frac{1}{R_t C_{cs}} V_{cs} + \frac{1}{C_{cs}} I \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$V_0 = kSoc + V_{cs} + IR_i + d \tag{10}$$

**3. CONTROL STRATEGIES**

The literature has suggested several MPPT techniques to improve MPP algorithms that have been published, such as: P&O MPPT algorithm, Fractional Open-Circuit Voltage-Based MPPT, Incremental Conductance Based MPPT Technique, Fuzzy Logic Control Based MPPT, Neural Network Based MPP. Out of which, due to several advantages like fast operation, simple implementation, Fuzzy Logic Control Based MPPT is preferred [20-22].

**3. 1. Fuzzy MPPT Control**

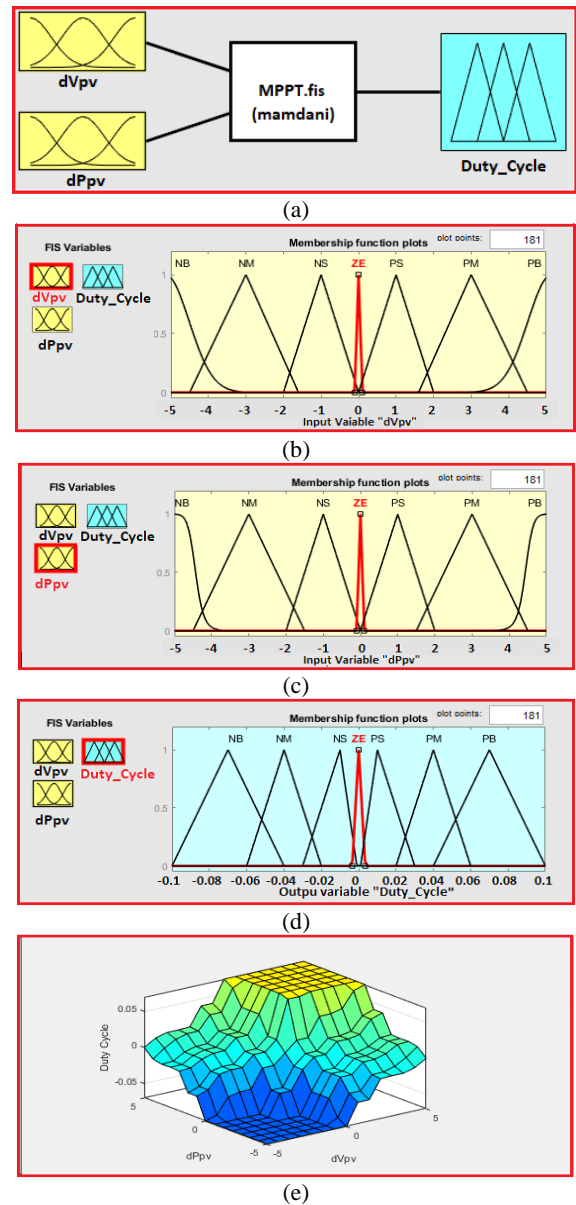
The MPPT fuzzy logic controller has been developed to extract the maximum solar energy by forcing the PV panel to operate at its maximum power point (MPP). This control is considered a crucial element for improving the efficiency of the PV system [23]. Fuzzy control is a method that allows the construction of nonlinear controllers from heuristic information that comes from the knowledge of an expert. In the MPPT configuration, Fuzzy Logic Controller (FLC) is used to determine the duty cycle of the DC-DC boost converter. In this study, the fuzzy logic controller was developed with two inputs and one output functions such as PV voltage, PV current, and duty cycle of the PV boost converter. Figure 5 shows the diagram of the FLC MPPT algorithm. The power produced by the

PV panels is calculated from the measured values of the current and voltage sensors [24]. The main parts of the FLC include: fuzzification, system inference, rule base, and defuzzification.

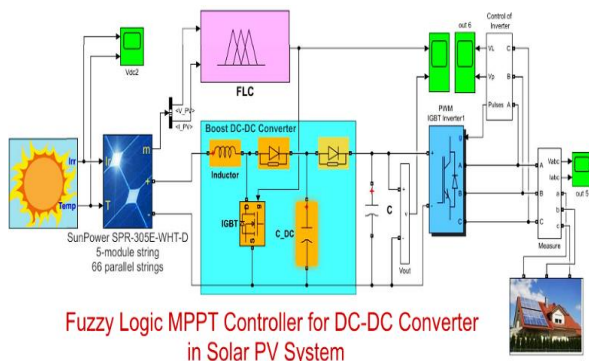
The fuzzy logic controller has been developed with two inputs and one output function, such as,  $dV_{pv}$ ,  $dP_{pv}$  and duty cycle of the PV boost converter, as shown in Figure 6(a). The fuzzy  $dV_{pv}$  input membership function is classified into seven ranges, namely negative  $dV_{pv}$ , negative medium  $dV_{pv}$ , negative small  $dV_{pv}$ , zero  $dV_{pv}$ , positive small  $dV_{pv}$ , positive medium  $dV_{pv}$  and positive  $dV_{pv}$  as presented in Figure 6(b). The fuzzy PV  $dP_{pv}$  input membership function is classified into seven ranges, namely negative  $dP_{pv}$ , negative medium  $dP_{pv}$ , negative small  $dP_{pv}$ , zero  $dP_{pv}$ , positive small  $dP_{pv}$ , positive medium  $dP_{pv}$  and positive  $dP_{pv}$  as presented in Figure 6(c). The fuzzy duty cycle output membership function is classified into seven ranges that are negative Duty Cycle, negative medium Duty Cycle, negative small Duty Cycle, zero Duty Cycle, positive small Duty Cycle, positive medium Duty Cycle and positive Duty Cycle as presented in Figure 6(d). The fuzzy rules surface waveform presented in Figure 6(e).

**3. 2. Battery Charge Controller**

Based on simulation work done for a stand-alone PV system, a strategy for ON/OFF-switching control signals can be generated through a PID-type controller where the battery and the PV generator never simultaneously power the load. When the energy produced by the PV is not enough to meet the load demand, the secondary power supply (battery) takes over and supplies the load. This control strategy aims to adjust the phase between the system bus voltage (Vdc) and the battery voltage according to the state of charge (BAT\_SOC). Figure 7(a) shows the ON/OFF-switching set points (or thresholds) for the battery and PV panel power contributions. When the power produced by the solar panels falls below the load demand, or the threshold, the battery is switched ON



**Figure 6.** (a) Design of Fuzzy Controller for DC-DC converter (b) Input  $dV_{pv}$  Membership function (c) Input  $dP_{pv}$  Membership function, (d) Output Duty Cycle Membership function and (e) The fuzzy rules surface waveform



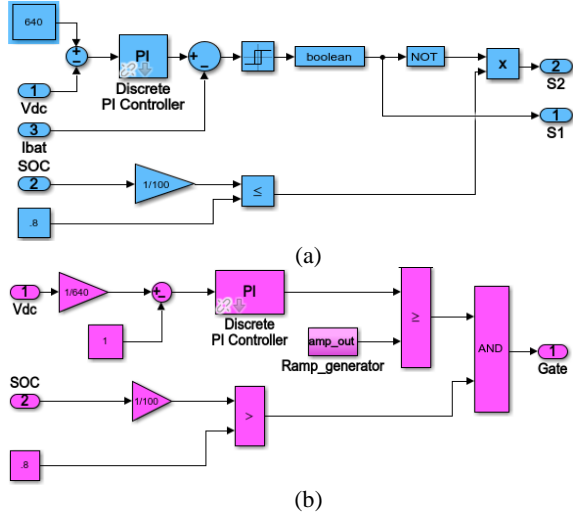
**Figure 5.** Fuzzy based MPPT controller simulation model for PV system Design of Fuzzy Logic Controller

and kept on until BAT\_SOC falls below the threshold. The two variables S1 and S2 are used to put the battery either in charging mode or in energy source mode according to Table 1.

The battery's operating mode is directly related to the DC-DC converter's functioning. In the case that the GPV energy production is insufficient, the battery takes over as an emergency power supply. Switching between the PV source and the battery is ensured by the gate control output, provided by a PI regulator Figure 7(b).

**TABLE 1.** Battery operating mode

S2	S1	Operating mode
0	0	Disconnected
0	1	Source
1	0	Loading
1	1	Disconnected

**Figure 7.** (a) Battery/electrolyzer Controller (b) PI Controller for Switching between the PV source and the battery

#### 4. EKF-BASED SOC ESTIMATION

The EKF considers the noise characteristics of the current and voltage sensors, and effectively overcomes the effect of random errors. There exist several alternatives to the Kalman filter, depending to whether the mathematical model is linear, nonlinear, discrete or continuous. In this work, the battery is the dynamic model, and the state of charge constitutes the state variable to estimate. If the model is nonlinear, then we may use a linearization process at every time step to approximate the nonlinear system with a linear time varying (LTV) system. This LTV system is then implemented by Kalman filter, resulting in an Extended Kalman Filter (EKF) on the true nonlinear system. Note that although EKF effectiveness has been validated in many works [10, 25-27]. In this study, the EKF, based on dynamic equations, is used to estimate the battery state of charge [28] Figure 7.

The nonlinear system is presented as follows:

$$\dot{x}(t) = f(x, u) + w \quad (11)$$

$$y(t) = g(x, u) + v \quad (12)$$

where,  $w$  and  $v$  are zero-mean white Gaussian stochastic processes with covariance matrices  $\Sigma_w$  and  $\Sigma_v$  respectively. Now,  $f(x, u)$  is a nonlinear dynamics

function and  $g(x, u)$  is a nonlinear measurement function. The input is expressed as  $u(t) = I$  and the output is  $y = V_0$ .

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{u}{kC_{cb}} \\ -\frac{1}{R_t C_{cs}} x_2 + \frac{1}{C_{cs}} u \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$g(x, u) = kx_1 + x_2 + R_i u + d \quad (14)$$

At each time step,  $f(x, u)$  and  $g(x, u)$  are linearized by a first-order Taylor-series expansion. The linearized model is:

$$\delta \dot{x} = A_k \delta x + B_k \delta u \quad (15)$$

$$y = C_k \delta x + D_k \delta u \quad (16)$$

where:

$$A_k = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_t C_{cs}} \end{bmatrix}$$

$$B_k = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{kC_{cb}} \\ \frac{1}{C_{cs}} \end{bmatrix}$$

$$C_k = \left. \frac{\partial g(x, u)}{\partial x} \right|_{x(t), u(t)} = [k \quad 1]$$

$$\text{and } D_k = \left. \frac{\partial g(x, u)}{\partial u} \right|_{x(t), u(t)} = R_i$$

The model represented by Equations (15)-(16) can be discretized as follows:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k \quad (17)$$

$$y_{k+1} = C_d x_k + D_d u_k \quad (18)$$

where:

$$A_d \approx E + T_s A_k,$$

$$B_d \approx T_s B_k,$$

$C_d \approx C_k$ , and  $D_d \approx D_k$ ,  $E$  is the unit matrix and  $T_s$  is the sampling period.

The algorithm of the EKF has three distinct phases: *Initialization, Prediction and upgraded* [28]:

*Initialization:* for  $k = 0$ , given the initial state values  $x_0$ , covariance matrix  $P$ , noise variance  $\Sigma_w$  and  $\Sigma_v$ .

*Prediction:* The step of prediction consists to using the state estimated of the previous moment to calculate an estimate of the current state.

*The state estimate update:*

$$\bar{x}_{k/k-1} = f(\bar{x}_{k-1/k-1}, u_{k-1})$$

*Error covariance time update:*

$$P_{k/k-1} = A_d P_{k-1/k-1} A_d^T + \Sigma_w$$

*Upgraded and correction:* In this step, the current measurements are used to correct the state predicted to obtain a more precise estimate of the state.

*Kalman gain matrix:*

$$K_k = P_{k/k-1} C_d^T [C_d P_{k/k-1} C_d^T + \Sigma_v]^{-1}$$

*State estimate measurement update:*

$$\bar{x}_{k/k} = \bar{x}_{k/k-1} + K_k [y_k - g(\bar{x}_{k/k-1}, I_k)]$$

*Error covariance measurement update:*

$$P_{k/k} = (E - K_k C_d) P_{k/k-1}$$

### 5. MATLAB/SIMULINK SIMULATION AND RESULTS

The solar panel model is made in *Matlab/Simulink* software, the model is simulated under STC, and the  $I-V$  and  $P-V$  characteristics are presented in Figure 8. These curves change depending on the temperature and solar irradiance variation Figure 9.

Simulation is the simplest and most efficient technique used today for the evaluation of engineering solutions. The MATLAB-SIMULINK model was designed, as depicted in Figure 9, to explore the performance of the integrated PV/Battery/AC & DC Load system and the control strategy. However, the components of the proposed stand-alone PV system are: The solar panels and storage batteries are connected to the DC bus by a DC/DC boost converter and DC/DC

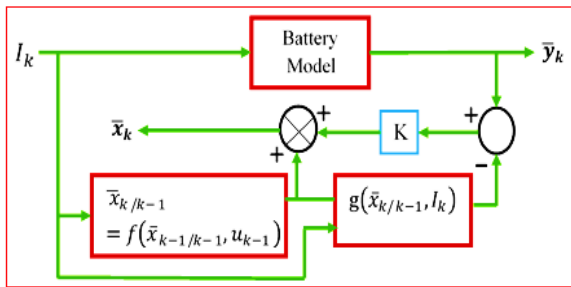


Figure 8. Structure of the Extended Kalman Filter

buck-boost converter consecutively. Then we find a three-phase inverter that is supervised by its own controller and it is used to convert from DC to AC voltage. Finally, two loads are connected / disconnected to the AC voltage side by the inverter controller, with Load 1 representing the critical one and Load 2 represents the less priority loads. The conventional fuzzy logic MPPT controller, is proposed and the calculation of the SOC status is evaluated by EKF observer. The PV module considered in the simulation is the Array type: SunPower SPR-305E-WHT-D (with a capacity of 100 kW); 5 series modules; 66 parallel strings in which the model parameters are given in Table 2.

A Stand-alone system involves no interaction with a utility grid. Many scenarios are considered to simulate the autonomous hybrid power system with local load variations. Firstly, we consider a constant temperature with varying irradiation and secondly a constant irradiance with varying temperature applied to the solar panel SunPower SPR-305E-WHT-D. For the 100 kW solar array block, we used 330 SunPower SPR-305E-WHT-D modules, connected in a combination of 66 cells in-parallel by 5 cells in-series. A series connection of cells results in higher voltages, while a parallel connection results in higher current. This array generates 100.7 kW at an irradiance of 1 kW/m<sup>2</sup> at a temperature of 25°C. Its MPP voltage varies approximately from 250.2 V to 296.6 V up to given environmental conditions. The DC-DC Converter operates at a switching frequency of 5 kHz and provides an output at 640 V DC. The DC link

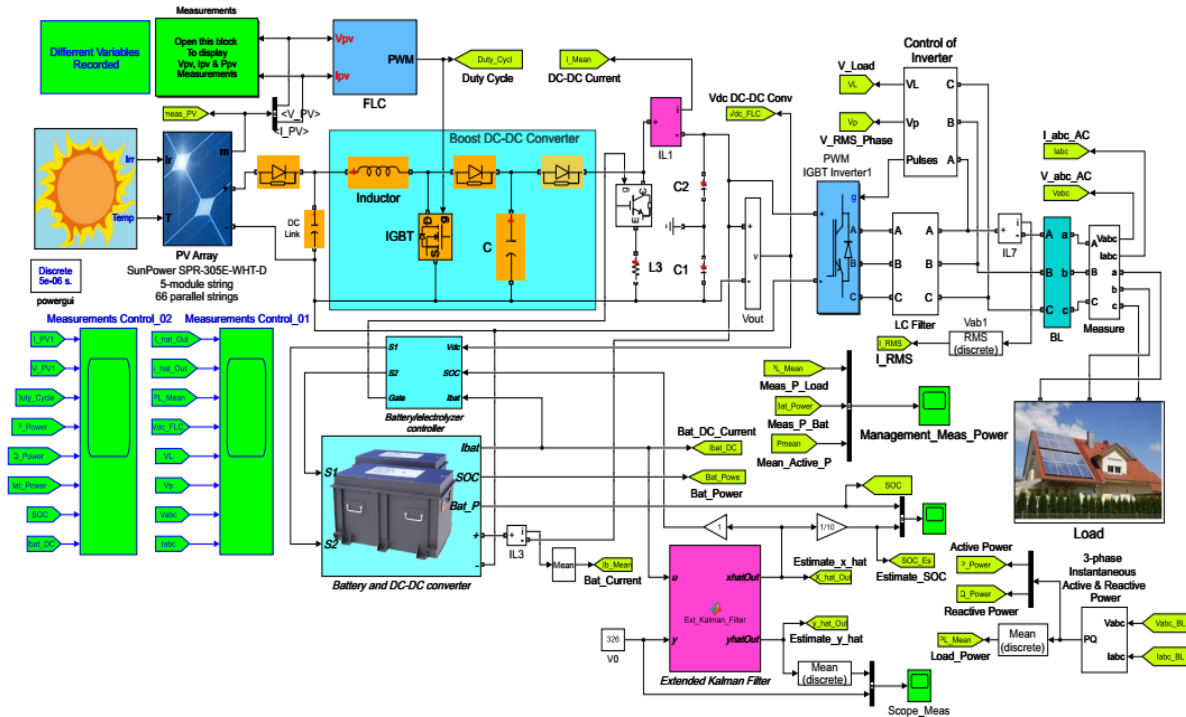


Figure 9. Simulink model of proposed control of the system

capacitors C1 and C2 play a damping role in order to maintain the stability of the MPPT during these transitory disturbances. This aspect is important because this ripple is directly perceived as electrical pollution at the output voltage of the PV module. By making step variations in the solar radiation S and the temperature T, the proposed power generation system of Figure 7 provided the I–V and P–V characteristics as shown in Figure 8. Hence, as shown, the sampling time  $T_s$  is 50  $\mu$ s and the simulated data are in accordance with the characteristics mentioned in Table 2.

The DC link capacitors C1 and C2 play a damping role in order to maintain the stability of the MPPT during these transitory disturbances. This aspect is important because this ripple is directly perceived as electrical pollution at the output voltage of the PV module. By making step variations in the solar radiation S and the temperature T, the proposed power generation system of Figure 9 provided the I–V and the P–V characteristics as shown in Figure 10. Hence, as shown, the sampling time  $T_s$  is 50  $\mu$ s and the simulated data are in accordance with the characteristics mentioned in Table 2.

**5. 1. Effects of Changing Irradiance** As the irradiance increases short circuit current also increases along with the open circuit voltage. Because of both increasing of V and I, the  $P_{max}$  is also increases according the irradiance.

#### Case Study 01: Irradiance and Temperature variation

For the first case study applied to the PV array type SunPower SPR-305E-WHT-D, the supervisory control

**TABLE 2.** PV module M/s SunPower SPR-305E-WHT-D Paramaters at STC (25°C & 1000W/m<sup>2</sup>)

Designation	Value
Parallel String	66
Series-connected modules per string	5
No. of cells per module	96
Number not of modules	330
PV module power	305.226W
Isc of PV array	5.96 A
Voc of PV array	64.2 V
MPP Voltage at 25 °C $V_{mpp}$	54.7 V
MPP Current at 25 °C $I_{mpp}$	5.58 A
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.27269
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.061745
Parallel resistance (Rp)	269.5934 $\Omega$
Series resistance (Rs)	0.37152 $\Omega$
Diode ideality factor	0.94504

considers the forecast energy demand of the end-users and makes instantaneous decisions about stand-alone energy production. The main goal of stand-alone system management is to satisfy the loads energy needs.

Simulation inputs for the solar panel model are the incident solar irradiance and the ambient temperature. These parameters are updated at each time interval, and they are subject to the variability of the data. The simulation outputs of the solar panel array at each time step are the current, voltage and power generated. The PV array generates the maximum amount of power at around 100KW within the given irradiation (1000W/m<sup>2</sup>,25°C). An R load (constant impedance) model is used to examine the PV system behavior under the FLC MPPT algorithm. Loads in a stand-alone system are commonly categorized into fixed and flexible ones, depending on the comfort choices defined by the user. The simplified R no constant load model consists of a resistor R connected in parallel ( $R_{L1}$  &  $R_{L2}$ ) with values of 30000 $\Omega$  and 10000 $\Omega$  respectively. The load profile adopted in this study is as follow:

- ✓ From 0 to 1.25s : load1 = 30000 $\Omega$ ,
- ✓ From 1.25 to 2.5s : load1+load2 = 40000 $\Omega$ ,
- ✓ From 2.5 to 3s : load1 = 30000 $\Omega$ ,

The obtained simulation results are summarized in Figures 11-17. Figure 11 shows the incident solar irradiance and the ambient temperature profile. Figure 12 depicts the PV array voltage  $V_{pv}(t)$  (Figure 12(a)) and current  $I_{pv}(t)$  (Figure 12(b)) responses, respectively.

The plots of results in Figure 13 show the duty cycle (d), calculated from a conventional FLC MPPT controller, and its effect on the promising performance and accurate tracking of the stand-alone system according to the profile change of irradiance and temperature, this figure also illustrates the DC-DC voltage and current respectively. Figure 13(a) shows the duty cycle temporal evolution calculated from the PWM signal, then Figure 13(b) gives the DC-DC converter voltage and the Figure 13(c) illustrates the currents generated by the DC-DC converter, the mean and the *rms* currents respectively. Simulation results are obtained as shown in Figure 14, which shows the SOC and current battery. Figure 14(a) shows that the estimate SOC curve follows the measured SOC closely. Therefore, Figure 14(b) depicts the measured and estimated battery current with its *zoomed-in views*. Figure 14 shows clearly how the real SOC reflects precisely the battery operation, whether in charging or discharging mode.

Figure 15 shows the inverter output voltage before filtering, which contains the harmonic components. In addition, we can easily see that the stability of the inverter output voltage is always assured even with the load variation. However, Figure 16 shows the Inverter output  $V_{abc}$  Voltage (a) and  $RMS(V_{abc})$  (b) with varying

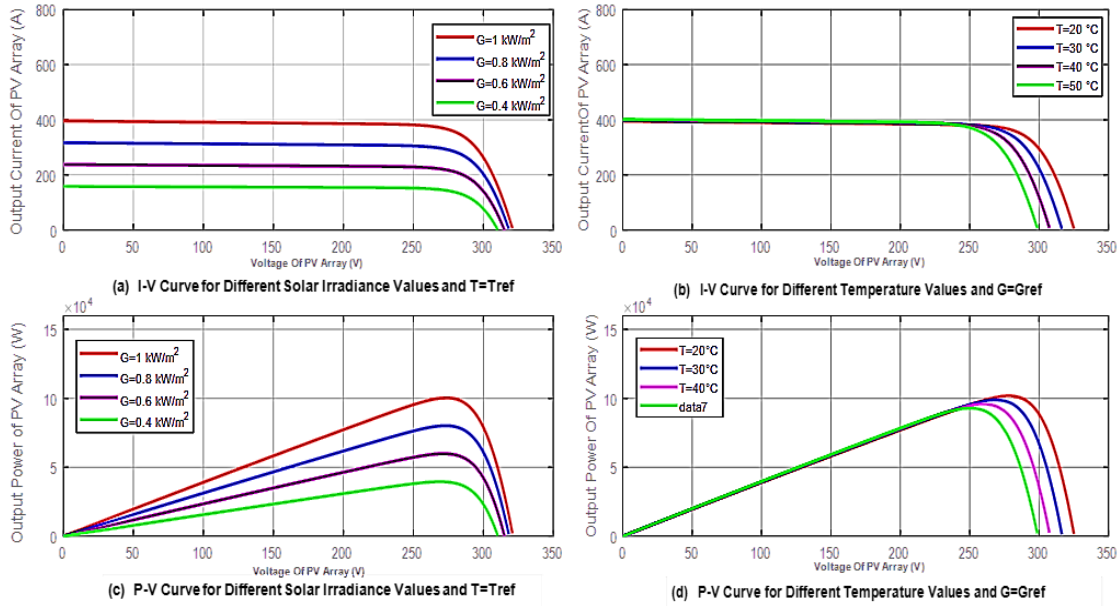


Figure 10. I-V and P-V characteristics of PV array under various temperatures and solar irradiation levels

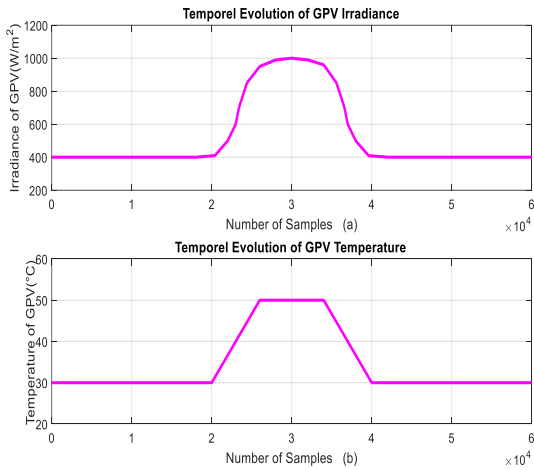


Figure 11. The incident solar irradiance (a) and the ambient temperature (b) profile

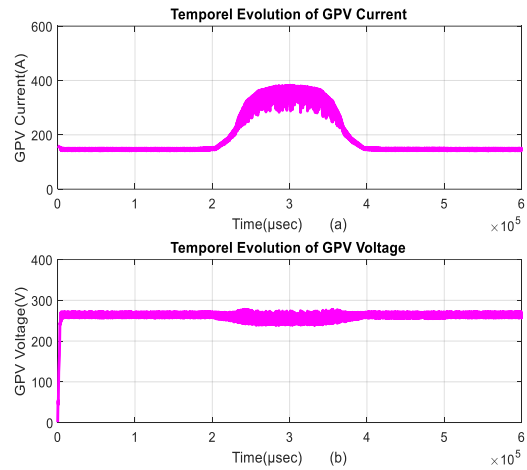


Figure 12. GPV ( $I_{pv}$  &  $V_{pv}$ ) behavior during sudden full load Temporal Evolution of  $I_{pv}$  (a) and  $V_{pv}$  (b)

irradiance and temperature values with no constant. Then the figure (Figure 17) shows the produced power trajectories for all three stand-alone components, PV panels, battery and the load. The main goal of hybrid system management is to satisfy the battery and load needs. For this assumption, the control algorithm starts with the selection of the mode connection, and then it checks the battery SOC, after that it passes to the comparison between the panel power and that required by the load demands. These comparisons are done according to the following main cases:

**Case 1:** The solar power covers the load demand, and charges the battery banks.

**Case 2:** The battery helps the PV generator to supply the load demand.

As Figure 17 shows, the PV panel generates the energy according to the given climatic conditions (Irradiation, Temperature). The resulting graphs will be discussed according to time intervals, as follows:

**From 0 to 1.8520s:** During this period, the PV energy is greater than load demand, and the battery is fully charged.

**From 1.8520s to 2.5165s:** The PV energy can't cover the power needs despite the increased load demand. The storage battery delivers the lacking power in order to supply the load.

**From 2.5165s to 3s:** During this interval time, the PV energy covers the load power needs. The battery is fully charged and the energy supplied by the battery must be zero.

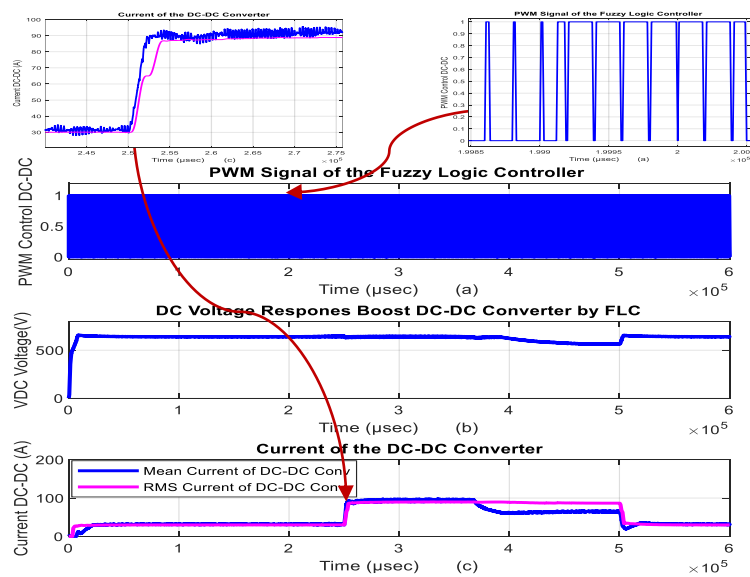
**Case Study 02: variable Irradiance and constant Temperature**

Simulations depicted in Figures 18-24 illustrate the case with variable Irradiance, constant Temperature and no constant Load. All the waveforms of these figures illustrate the response of PV array type SunPower SPR-305E-WHT-D. However, we can easily conclude that the PV generator is very sensitive to rapid environmental changes and, it is well known that an irradiance change has a much greater effect on array characteristics than does the temperature change. When the irradiance is changed, the power-voltage characteristic of the PV panel and its MPP are simultaneously reformulated. Therefore, the FLC MPPT controller must track the changed MPP rapidly. Figure 18 presents PV panel inputs, irradiance and ambient temperature fixed at 25°C. The signal is drawn to vary from 1000 W/m<sup>2</sup> to 250 W/m<sup>2</sup> and returns to its initial value until the end. Therefore, the Figure 19 shows the  $I_{pv}$  and  $V_{pv}$  output PV array. These two parameters have the same behavior then the case\_01. Figure 20 gives the duty cycle control signal (Figure 20 (a)) Vdc Voltage (Figure 20(b)) and  $I_{dc}$  Current (Figure 20(c)) of the DC-DC converter. The control signal (duty cycle) generates adaptive values within the climatic conditions and no constant load. The Dc voltage is around 640V. The Figure 21 shows the SOC measured

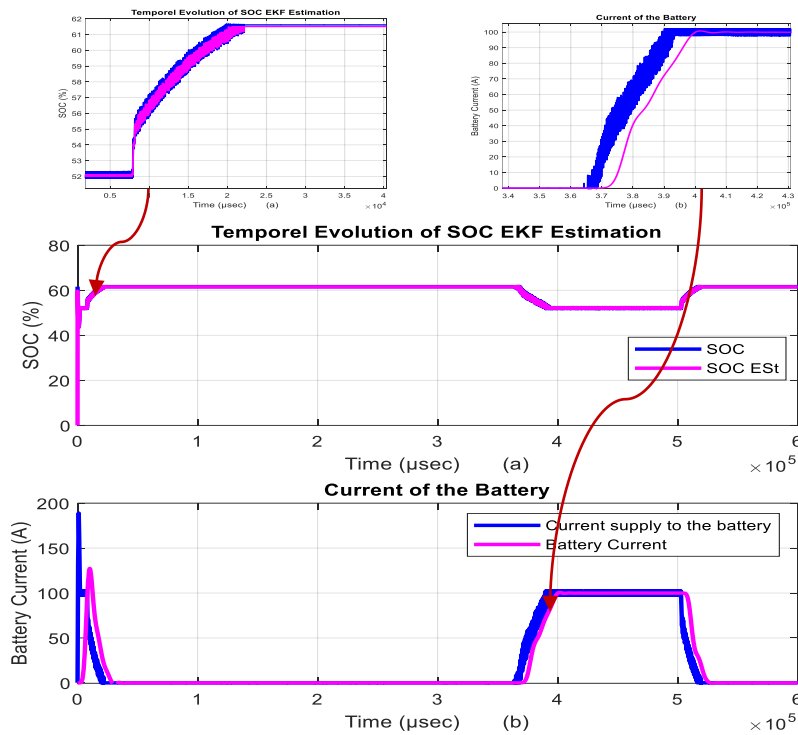
and estimated by using the Extended Kalman Filter (EKF). This estimator is adopted to introduce a senseless technique to estimate the storage battery SOC. The figures (Figures 22 and 23) illustrate the three-phase inverter response, currents, voltages and rms value. For the power balance between the PV generator and Battery, we can easily see the efficiency of the proposed strategy control. Figure 24 depicted the behavior of the hybrid stand-alone power systems management against the irradiance variation and no constant load demand.

In conclusion, the rapid changing weather should challenge the MPPT algorithm and it does so. However, the reaction of the MPPT controller is quick; by looking at Figures 20(a) and 20(b) it can be seen how fast the MPPT responds to the irradiance change. At the end of this research work, we can conclude that the obtained results are satisfactory and that the objective to maintain the maximum power possible from a PV generator, during different climatic conditions of the solar insolation and temperature, was realized. This controller makes a shorter time to find the point of maximum power.

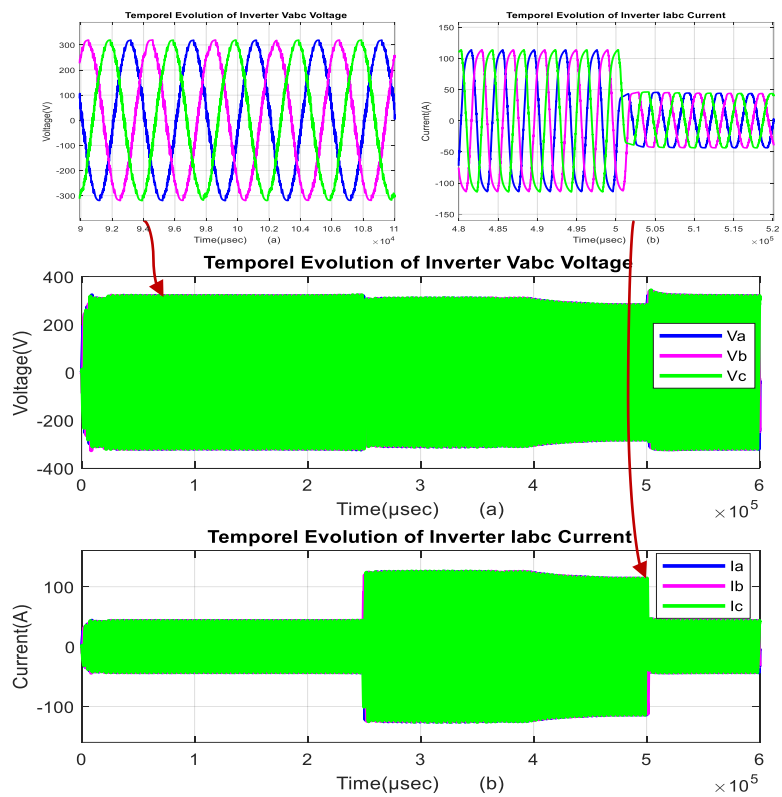
The obtained results can be compared with other research works using the same context concerning the power management applied to hybrid systems. In our case, despite the very severe operating conditions, a non-constant load and variable climatic conditions, the proposed controller gives very efficient results compared with those cited in [28, 29]. The chattering phenomenon is damped and the voltage Vdc is almost constant even in the presence of fluctuations during the operating mode. The efficiency of this controller is proven especially during the switching of the power produced by the different sources.



**Figure 13.** The Cycle duty control signal (a), Vdc Voltage (b) and Idc Current (c) of the DC-DC converter



**Figure 14.** Measurement and Estimate SOC (a), Current supply and generate current (b) of the battery



**Figure 15.** Inverter three phase sinusoidal voltage (a) and current (b) during no constant load according solar irradiance and the ambient temperature condition

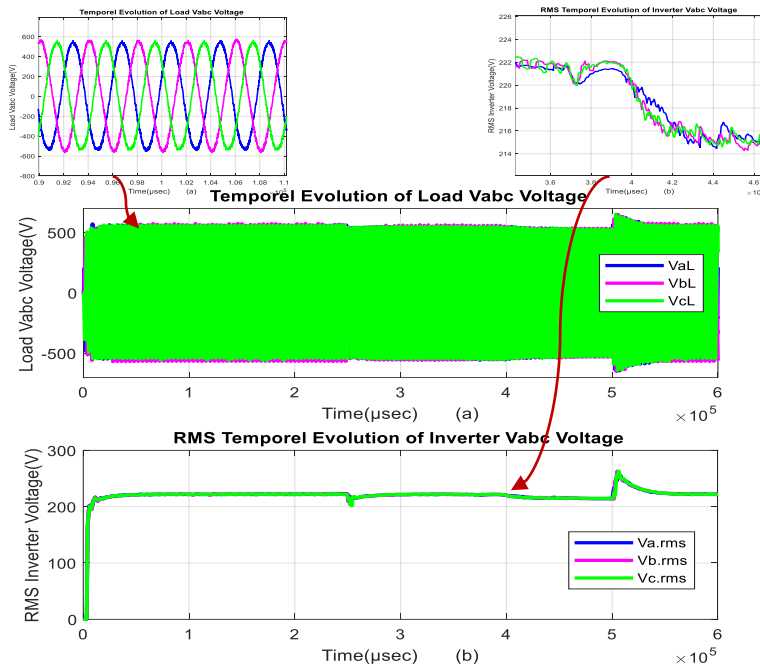


Figure 16. Inverter Vabc Phase to Phase Voltage (a) and (b) RMS (Vabc) with varying irradiance and temperature values with no constant Load

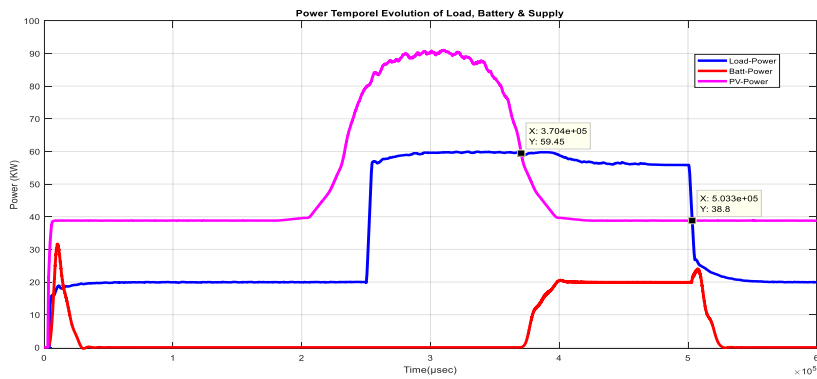


Figure 17. Power balance during integration of PV system and Battery by using a no constant Load

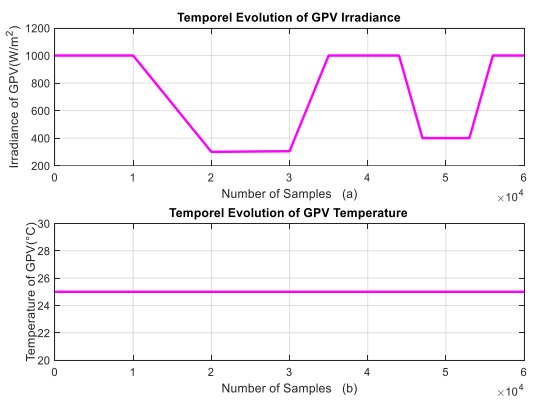


Figure 18. The incident solar irradiance (a) and the ambient temperature (b) profile

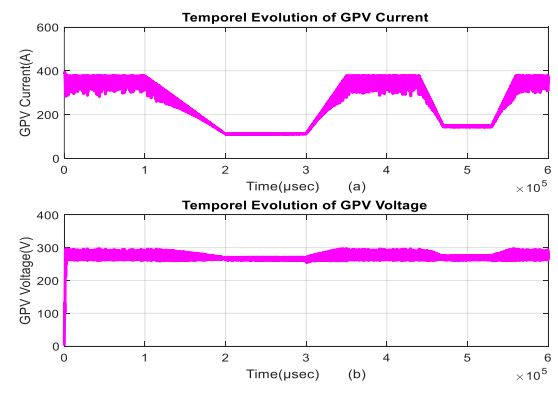


Figure 19. GPV ( $I_{pV}$  &  $V_{pV}$ ) behavior during sudden full load, temporal evolution of  $I_{pV}$  (a) and  $V_{pV}$  (b)

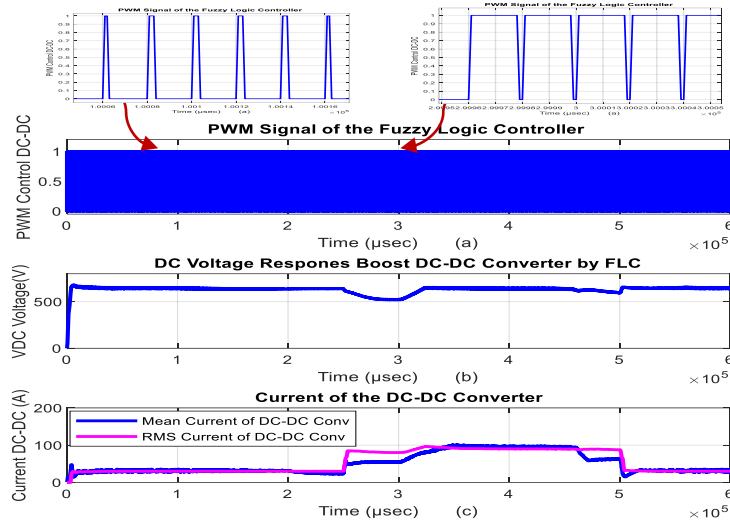


Figure 20. The Cycle duty control signal (a), Vdc Voltage (b) and Idc Current (c) of the DC-DC converter

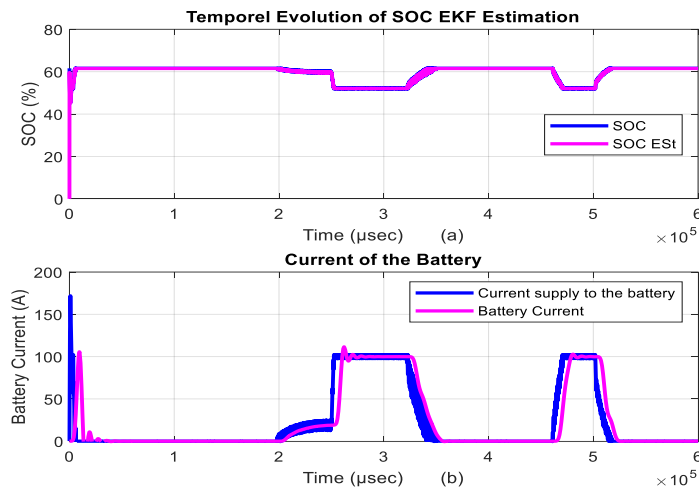


Figure 21. Measurement and Estimate SOC (a), Current supply and generate current (b) of the battery

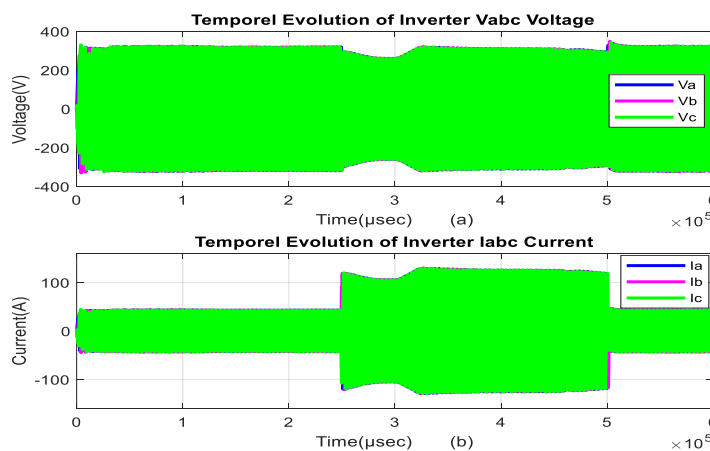
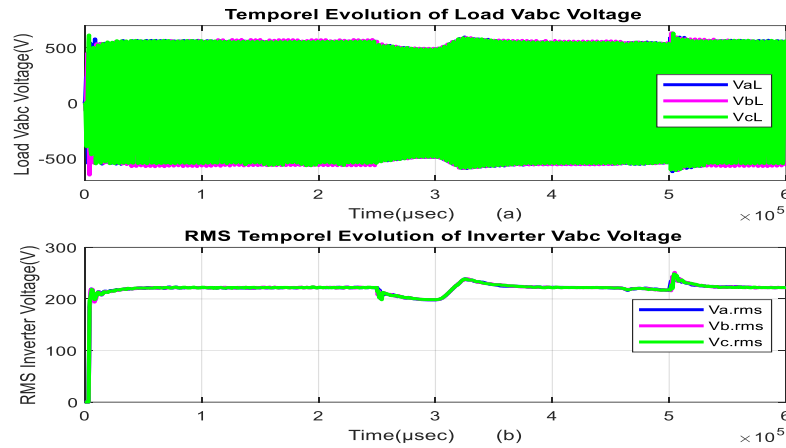
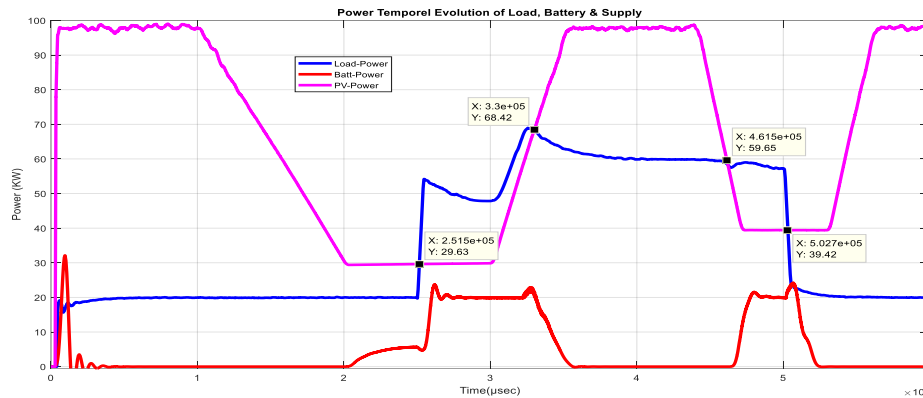


Figure 22. Inverter Vabc voltage and current during no constant load according solar irradiance and constant Temperature



**Figure 23.** Inverter **Vabc** Phase to Phase Voltage (a) and (b) **RMS(Vabc)** with varying irradiance and temperature values with no constant Load



**Figure 24.** Power balance during integration of PV system and Battery by using a no constant Load

**6. CONCLUSION**

The purpose of this research work has mainly focused on the development of an autonomous hybrid power system and its energy management unit in variable climatic conditions. To sum up, firstly, the PV array type SunPower SPR-305E-WHT-D is considered in this study, where the developed mathematical model, the boost converter with the FLC MPPT algorithm used to track the given power, the battery charging\discharging, and the EKF algorithm have been explained in deep detail. The fuzzy membership functions are designed based on the triangle method for the fuzzification process and used centroid method for the defuzzification process. The DC-link voltage has been converted to AC voltage by three phase voltage source inverter and applied to no constant load. The EKF algorithm is used to the estimate SOC of a lithium battery pack, with the assumption that the relationship between battery OCV and SOC is piecewise linear and varies with the ambient temperature.

The performance of the system at various input conditions is studied with the proposed control. The optimal load sharing has been achieved proportionally among the solar and proper charging and discharging modes of batteries at particular load conditions. The proposed management system conducts to attain the targeted objectives, despite the climatic conditions and load variation, in order to maintain the power demand at satisfactory levels satisfactory and to protect the battery against deep discharging\overcharging. The simulation results show that SOC estimation by using the EKF method is effective and can estimate battery SOC accurately.

**7. REFERENCES**

1. Necaibia, S., Kelaiaia, M.S., Labar, H., Necaibia, A. and Castronuovo, E.D., "Enhanced auto-scaling incremental conductance mppt method, implemented on low-cost

- microcontroller and sepic converter", *Solar Energy*, Vol. 180, (2019), 152-168. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.028>
2. Wu, Z., Tazvinga, H. and Xia, X., "Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system", *Applied Energy*, Vol. 148, (2015), 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.109>
  3. Tang, L., Zhang, Y., Xu, W. and Zeng, C., "Novel variable step-size maximum power point tracking control strategy for pv systems based on contingency angles", in 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE., (2013), 3904-3911.
  4. Eldahab, Y.E.A., Saad, N.H. and Zekry, A., "Enhancing the design of battery charging controllers for photovoltaic systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, (2016), 646-655. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.061>
  5. Jiang, Y., Qahouq, J.A.A. and Haskew, T.A., "Adaptive step size with adaptive-perturbation-frequency digital mppt controller for a single-sensor photovoltaic solar system", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 7, (2012), 3195-3205. doi: 10.1109/TPEL.2012.2220158.
  6. Manganiello, P., Ricco, M., Petrone, G., Monmasson, E. and Spagnuolo, G., "Optimization of perturbative pv mppt methods through online system identification", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 12, (2014), 6812-6821. doi: 10.1109/TIE.2014.2317143.
  7. Deveci, O. and Kasnakoğlu, C., "Performance improvement of a photovoltaic system using a controller redesign based on numerical modeling", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 29, (2016), 12634-12649. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.149>
  8. Hassani, H., Zaouche, F., Rekioua, D., Belaid, S., Rekioua, T. and Bacha, S., "Feasibility of a standalone photovoltaic/battery system with hydrogen production", *Journal of Energy Storage*, Vol. 31, (2020), 101644. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101644>
  9. Chan, C., Lo, E. and Weixiang, S., "The available capacity computation model based on artificial neural network for lead-acid batteries in electric vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 87, No. 1-2, (2000), 201-204. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00502-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00502-9)
  10. Zhang, F., Liu, G. and Fang, L., "A battery state of charge estimation method with extended kalman filter", in 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE., (2008), 1008-1013.
  11. Zhang, F., Liu, G. and Fang, L., "A battery state of charge estimation method using sliding mode observer", in 2008 7th world congress on intelligent control and automation, IEEE., (2008), 989-994.
  12. Uddin, M.H., Baig, M.A. and Ali, M., "Comparision of 'perturb & observe' and 'incremental conductance', maximum power point tracking algorithms on real environmental conditions", in 2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube), IEEE., (2016), 313-317.
  13. Sera, D. and Baghzouz, Y., "On the impact of partial shading on pv output power", *Proceedings of RES'08*, (2008). <https://www.researchgate.net/publication/259786752>
  14. Khelif, M., M'raoui, A. and Malek, A., "Simulation, optimization and performance analysis of an analog, easy to implement, perturb and observe mppt technique to be used in a 1.5 kw photovoltaic system", in 2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), IEEE. (2013), 10-17.
  15. Sera, D., Valentini, M. and Raducu, A., "Real time photovoltaic array simulator for testing grid-connected pv inverters", in 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2008, IEEE., (2008).
  16. Motahhir, S., Aoune, A., El Ghzizal, A., Sebti, S. and Derouich, A., "Comparison between kalman filter and incremental conductance algorithm for optimizing photovoltaic energy", *Renewables: Wind, Water, and Solar*, Vol. 4, No. 1, (2017), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0046-8>
  17. Aoune, A., Motahhir, S., El Ghzizal, A., Sebti, S. and Derouich, A., "Determination of the maximum power point in a photovoltaic panel using kalman filter on the environment psim", in 2016 International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD), IEEE., (2016), 1-4.
  18. Vasebi, A., Partovibakhsh, M. and Bathaee, S.M.T., "A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended kalman filter for hybrid electric vehicle applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 174, No. 1, (2007), 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.011>
  19. Rahimi Mirazizi, H. and Agha Shafiyi, M., "Evaluating technical requirements to achieve maximum power point in photovoltaic powered z-source inverter", *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects* Vol. 31, No. 6, (2018), 921-931. doi: 10.5829/ije.2018.31.06c.09.
  20. Rupesh, M. and Vishwanath, T., "Intelligent controllers to extract maximum power for 10 kw photovoltaic system", *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics* Vol. 35, No. 4, (2022), 784-793. doi: 10.5829/ije.2022.35.04a.18.
  21. Al-Majidi, S.D., Abbod, M.F. and Al-Raweshidy, H.S., "A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 31, (2018), 14158-14171. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.002>
  22. Senthil, R., "Global mppt control algorithms for solar pv systems under non-uniform solar radiation", *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 7, (2019), 2102-2105.
  23. Boutabba, T., Drid, S., Chrifi-Alaoui, L. and Benbouzid, M., "A new implementation of maximum power point tracking based on fuzzy logic algorithm for solar photovoltaic system", *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics* Vol. 31, No. 4, (2018), 580-587. doi: 10.5829/ije.2018.31.04a.09.
  24. Plett, G.L., "Extended kalman filtering for battery management systems of lipb-based hev battery packs: Part 3. State and parameter estimation", *Journal of power sources*, Vol. 134, No. 2, (2004), 277-292. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.033>
  25. Bhangu, B., Bentley, P., Stone, D. and Bingham, C., "Observer techniques for estimating the state-of-charge and state-of-health of vrlabs for hybrid electric vehicles", in 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE., (2005), 780-789,
  26. Vikhe, P., Sabale, A., Kadu, C., Mandhare, V. and Jondhale, A., "Pv generation with battery storage supplying a variable load-supervision and control strategy", Vol. 27, No. 12, (2021).
  27. Soliman, M.S., Belkhier, Y., Ullah, N., Achour, A., Alharbi, Y.M., Al Alahmadi, A.A., Abeida, H. and Khraisat, Y.S.H., "Supervisory energy management of a hybrid battery/pv/tidal/wind sources integrated in dc-microgrid energy storage system", *Energy Reports*, Vol. 7, (2021), 7728-7740. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.056>
  28. Anagreh, Y.N., Alnassan, A. and Radaideh, A., "High performance mppt approach for off-line pv system equipped with storage batteries and electrolyzer", *International Journal of Renewable Energy Development*, Vol. 10, No. 3, (2021). doi: 10.14710/ijred.2021.34131.

---

**Persian Abstract**

---

**چکیده**

سیستم های تولید برق مستقل به گونه ای طراحی شده اند که مستقل از شبکه برق عمومی کار کنند. باتری ها عنصر مهم در سیستم PV مستقل را تشکیل می دهند. آنها برای ذخیره برق تولید شده توسط انرژی خورشیدی در یک شب یا برای استفاده اضطراری در طول تقاضای بار غیر ثابت استفاده می شوند. این مقاله دارای سه بخش اصلی است. اولی مربوط به طراحی یک روش هوشمند برای ردیابی نقطه حداکثر توان مبتنی بر کنترل کننده منطق فازی برای بهبود کارایی یک سیستم انرژی خورشیدی مستقل است. بخش دوم وضعیت شارژ باتری (SOC) را توضیح می دهد. مدل پیشنهادی، که پاسخ SOC واقعی باتری لیتیومی را بهتر منعکس می کند، با استفاده از تخمین گر حالات فیلتر کالمن (EKF) ساخته شده است. این روش پیشنهادی را می توان به عنوان روشی دقیق تر و قابل اعتمادتر برای تخمین وضعیت شارژ باتری در نظر گرفت. بخش سوم یک سیستم مدیریت برای دو منبع انرژی تجدید پذیر فوق را یکپارچه می کند. عملکرد سیستم مدیریت پیشنهادی با استفاده از کنترل کننده منطق فازی مبتنی بر ردیابی نقطه حداکثر توان FLC-MPPT و برآوردگر EKF در Matlab/Simulink در تابش خورشیدی و دمای متفاوت برای درخواست انرژی بدون بار ثابت شبیه سازی شده اند.

---