

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté Sciences et Technologies
Département Electrotechnique et Automatique
Laboratoire Génie Electrique de Guelma

THÈSE

En Vue de l'Obtention du Diplôme de
Doctorat en Troisième Cycle

Domaine : ST ; Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie Renouvelable

Présentée par

ZERMANE Akram Issam

Intitulée

**Contribution à l'Optimisation et l'Amélioration des Performances des
Systèmes Photovoltaïques par Résolution des Défis liés au Stockage de
l'Énergie**

Soutenue le : 20/02/2025

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom

Grade

Mr LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Président
Mr BORDJIBA Tarik	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Encadreur
Mr MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
Mr LABAR Hocine	Professeur	Univ Badji Mokhtar Annaba	Examineur
Mr OMEIRI Amar	Professeur	Univ Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remercîments

Au terme de cette thèse, il m'est cher de témoigner ma gratitude envers celles et ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma femme, pour son amour, sa patience et son soutien inébranlable durant toutes ces années. Son encouragement constant a été ma plus grande force.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude la plus profonde à mes parents et à ma famille, qui m'ont constamment accompagné, aussi bien moralement que matériellement. Leur foi en mes capacités et leurs sacrifices ont été indispensables à la réalisation de ce travail.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur Tarik Bordjiba, Professeur à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, pour sa constante présence, ses conseils éclairés et son soutien sans faille tout au long de ce projet. Son expertise pointue et son exigence scientifique m'ont permis d'avancer sereinement et de mener à terme cette recherche.

Je remercie également le Laboratoire de Génie Électrique de Guelma (LGEG) pour m'avoir offert un environnement de travail stimulant et enrichissant. Mes remerciements s'adressent particulièrement au directeur du laboratoire, Monsieur Ahcene Lemzadmi Professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma, pour son soutien et sa bienveillance.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury pour leur temps, leur expertise et leurs précieux conseils :

Monsieur Abdelkrim Moussaoui, Professeur à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, pour ses observations pertinentes et ses suggestions qui ont enrichi cette thèse.

Monsieur Hocine Labar, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, pour son implication et son expertise qui ont apporté une dimension importante à ce travail.

Monsieur Amar Omeiri, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, pour sa rigueur et ses commentaires constructifs.

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui, de manière directe ou indirecte, ont participé à la réalisation de ce travail de thèse. L'amitié, la coopération et les encouragements qu'ils ont prodigués ont apporté une motivation précieuse.

À toutes et à tous, je vous suis infiniment reconnaissant.

Résumé

La transition vers les énergies renouvelables est cruciale pour atténuer les défis environnementaux et énergétiques actuels. Les systèmes photovoltaïques (PV) jouent un rôle central dans cette transition, mais leur efficacité est souvent limitée par la nature intermittente de l'énergie solaire et les contraintes liées au stockage par batteries. Cette thèse explore deux approches pour améliorer la performance des systèmes PV en abordant le défi du stockage d'énergie.

Elle s'organise en cinq chapitres, offrant une étude détaillée sur les technologies photovoltaïques, des systèmes de stockage et des approches de gestion de l'énergie. Le premier chapitre est une revue des avancées en matière de cellules photovoltaïques, il présente les différents types de centrales solaires et effectue une analyse des techniques permettant d'améliorer le rendement des systèmes PV. Le chapitre suivant détaille les constituants des systèmes PV et propose une modélisation mathématique des principaux composants, notamment des solutions hybrides de stockage de l'énergie.

Au cours du troisième chapitre, une multitude de stratégies de commande et de contrôle du flux d'énergie sont explorées pour mieux optimiser la gestion des systèmes de stockage hybride. Le quatrième chapitre introduit deux solutions au problème de stockage concernant la gestion de l'énergie : une pour un système autonome avec stockage hybride contrôlé par un régulateur FOPI-PSO et une pour un centre de tri des déchets en Algérie utilisant un système connecté au réseau sans stockage. Ces solutions sont simulées dans diverses conditions afin d'en évaluer la performance.

Le cinquième chapitre présente les résultats des simulations pour les deux stratégies proposées, soulignant les gains d'efficacité et identifiant les limites des solutions développées. La première stratégie, basée sur un système autonome avec stockage hybride optimisé par un contrôleur FOPI-PSO, a démontré des améliorations notables en stabilité et en réactivité face aux variations de la demande et de l'ensoleillement. La seconde stratégie, un système connecté au réseau simulé avec PVsyst pour un centre de tri des déchets, confirme que les installations PV peuvent répondre efficacement aux besoins énergétiques, tout en réduisant la dépendance aux batteries.

En conclusion, la principale contribution de cette thèse est de démontrer que les systèmes photovoltaïques, optimisés par des stratégies de gestion spécifiques, non seulement améliorent l'efficacité énergétique mais ils participent à une diminution notable des rejets de CO₂, ce qui soutient les buts et les objectifs globaux de la transition énergétique. Les perspectives de recherche futures incluent des validations expérimentales, l'intégration de l'apprentissage automatique, et des optimisations multi-objectifs pour garantir une gestion énergétique plus durable et performante.

Abstract

The transition to renewable energy is essential to address current environmental and energy challenges. Photovoltaic (PV) systems play a central role in this transition, but their efficiency is often limited by the intermittent nature of solar energy and the constraints associated with battery storage. This thesis explores two approaches to enhance the performance of PV systems by addressing the challenge of energy storage.

The thesis is organized into five chapters, providing a comprehensive overview of PV technologies, storage options, and energy management methods. The first chapter presents a review of advances in photovoltaic cell technologies, an overview of various types of solar power plants, and a discussion of techniques for improving PV system efficiency. The second chapter details the components of PV systems and offers mathematical modeling of key elements, focusing on hybrid storage solutions such as batteries and supercapacitors.

In the third chapter, various strategies for controlling and managing energy flows are explored to better optimize hybrid storage systems. The fourth chapter introduces two energy management solutions: one for an autonomous system with hybrid storage controlled by an FOPI-PSO regulator, and another for a waste sorting center in Algeria using a grid-connected system without storage. These solutions are simulated under different conditions to assess their performance.

The fifth chapter presents the simulation results for the two proposed strategies, highlighting efficiency gains and identifying the limitations of the developed solutions. The first strategy, based on an autonomous system with hybrid storage optimized by an FOPI-PSO controller, showed significant improvements in stability and responsiveness to variations in demand and sunlight. The second strategy, a grid-connected system simulated with PVsyst for a waste sorting center, confirms that PV installations can effectively meet energy needs while reducing reliance on batteries.

In conclusion, this thesis demonstrates that PV systems optimized with specific management strategies not only improve energy efficiency but also significantly reduce CO₂ emissions, supporting the energy transition in Algeria. Future research perspectives include experimental validations, the integration of machine learning, and multi-objective optimizations to ensure more sustainable and efficient energy management.

ملخص

إن التحول إلى الطاقة المتجددة أمر بالغ الأهمية للتخفيف من التحديات البيئية وتحديات الطاقة اليوم. تلعب الأنظمة الكهروضوئية (PV) دورًا مركزيًا في هذا التحول، لكن فعاليتها غالبًا ما تكون محدودة بسبب الطبيعة المتقطعة للطاقة الشمسية والقيود المفروضة على تخزين البطاريات. تستكشف هذه الأطروحة طريقتين لتحسين أداء الأنظمة الكهروضوئية من خلال مواجهة تحدي تخزين الطاقة.

تم تنظيمه في خمسة فصول، ويقدم نظرة عامة على التقنيات الكهروضوئية وخيارات التخزين وطرق إدارة الطاقة. يقدم الفصل الأول مراجعة للتطورات في الخلايا الكهروضوئية، ويعرض الأنواع المختلفة لمحطات الطاقة الشمسية ويناقش تقنيات تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية. ويتناول الفصل الثاني تفاصيل مكونات الأنظمة الكهروضوئية ويقدم نماذج رياضية للمكونات الرئيسية، بما في ذلك حلول التخزين الهجين مثل البطاريات والمكثفات الفائقة.

في الفصل الثالث، يتم استكشاف استراتيجيات مختلفة للتحكم في تدفق الطاقة والتحكم فيها لتحسين إدارة أنظمة التخزين الهجينة بشكل أفضل. يقدم الفصل الرابع حلين لإدارة الطاقة: أحدهما لنظام مستقل مع تخزين هجين يتحكم فيه منظم FOPI-PSO والآخر لمركز فرز النفايات في الجزائر باستخدام نظام متصل بالشبكة بدون تخزين. تتم محاكاة هذه الحلول في ظل ظروف مختلفة من أجل تقييم أدائها.

ويعرض الفصل الخامس نتائج عمليات المحاكاة للاستراتيجيتين المقترحتين، مع تسليط الضوء على مكاسب الكفاءة وتحديد حدود الحلول التي تم تطويرها. أظهرت الإستراتيجية الأولى، التي تعتمد على نظام مستقل مع تخزين هجين تم تحسينه بواسطة وحدة تحكم FOPI-PSO، تحسينات ملحوظة في الاستقرار والاستجابة للتغيرات في الطلب وأشعة الشمس. وتؤكد الاستراتيجية الثانية، وهي نظام متصل بالشبكة تمت محاكاته باستخدام PVsyst لمركز فرز النفايات، أن المنشآت الكهروضوئية يمكنها تلبية احتياجات الطاقة بكفاءة، مع تقليل الاعتماد على البطاريات. في الختام، تتمثل المساهمة الرئيسية لهذه الأطروحة في إثبات أن الأنظمة الكهروضوئية، التي تم تحسينها من خلال استراتيجيات إدارة محددة، لا تعمل على تحسين كفاءة الطاقة فحسب، بل تساهم أيضًا في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير، وبالتالي تدعم تحول الطاقة. تشمل وجهات النظر البحثية عمليات التحقق التجريبية، وتكامل التعلم الآلي، والتحسينات متعددة الأهداف لضمان إدارة طاقة أكثر استدامة وكفاءة.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES ABREVIATIONS	XIV
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction	5
1.2 Le potentiel de l'énergie solaire photovoltaïque	5
1.3 Le potentiel de l'énergie solaire photovoltaïque en Algérie	7
1.4 Technologies photovoltaïques	10
1.4.1 Cellules photovoltaïques en silicium	10
1.4.1.1 Silicium monocristallin	10
1.4.1.2 Silicium polycristallin	11
1.4.2 Cellules photovoltaïques à couche mince	12
1.4.2.1 Les cellules Cadmium Telluride (CdTe)	12
1.4.2.2 Les cellules Di-séléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS)	13
1.4.3 Cellules photovoltaïques de nouvelle génération	14
1.4.3.1 Cellules photovoltaïques organiques	14
1.4.3.2 Les cellules à base de Pérovskites	14
1.4.3.3 Autres technologies émergentes	15
1.5 Applications de l'énergie photovoltaïque	15
1.5.1 Systèmes résidentielles	15
1.5.1.1 Systèmes connectés au réseau	15
1.5.1.2 Systèmes autonomes	16

1.5.2 Applications commerciales et industrielles	16
1.5.2.1 Toitures commerciales	16
1.5.2.2 Fermes solaires	16
1.5.2.2.1 Les centrale solaire au sol	19
1.5.2.2.2 Les centrales solaire aquatiques	19
1.5.2.2.3 Les centrale solaire aériennes	20
1.5.3 Applications spécifiques	20
1.5.3.1 Systèmes intégrés aux bâtiments	20
1.5.3.2 Systèmes portables et hors réseau	21
1.6 Les différents éléments d'une installation photovoltaïque	22
1.6.1 Modules photovoltaïques	22
1.6.1.1 Présentation de L'effet photovoltaïque	22
1.6.1.2 Conception et fabrication	23
1.6.1.3 Performances et durabilité	23
1.6.2 Présentation des Onduleurs ou convertisseurs DC-AC	24
1.6.3 Systèmes de stockage d'énergie dans les installations photovoltaïques	24
1.6.3.1 Types de batteries	24
1.6.3.2 Supercondensateurs	24
1.6.4 Présentation des convertisseurs DC/DC	25
1.7 Performances et efficacité des systèmes photovoltaïque	25
1.7.1 Facteurs influençant l'efficacité	25
1.7.1.1 Impacte de la Température	25
1.7.1.2 Impacte de l'Orientation et l'inclinaison	25
1.7.1.3 Impacte des Conditions météorologiques	26
1.7.2 Méthodes d'amélioration de l'efficacité	26
1.7.2.1 Suiveurs solaires	26
1.7.2.2 Refroidissement actif et passif	26

1.7.2.2 Refroidissement actif et passif	27
1.8 Conclusion	27

CHAPITRE 2

MODELISATION MATHÉMATIQUE DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

2.1 Introduction	28
2.2 Présentation des composants d'un système photovoltaïque	28
2.2.1 Cellule Photovoltaïque	28
2.2.2 Module Photovoltaïque	29
2.2.3 Générateur Photovoltaïque	29
2.2.4 Convertisseur DC-DC	29
2.2.5 Convertisseur DC-AC	29
2.2.6 Dispositif de Stockage d'Énergie	29
2.3 Le rôle crucial de la modélisation mathématique dans l'analyse, la fabrication et l'amélioration des systèmes photovoltaïques	30
2.4 Modélisation de la Cellule Photovoltaïque	30
2.4.1 Modèle Électrique	30
2.4.2 Modèle à Diode Idéale	31
2.4.3 Modélisation du Module Photovoltaïque	31
2.4.3.1 Association des Cellules	31
2.4.3.2 Courbes caractéristiques I-V et P-V du Module	34
2.5 Modélisation mathématique des Convertisseur DC/DC (Hacheurs)	35
2.5.1 Modèle idéal du hacheur Boost	36
2.5.2 Principe de fonctionnement du Hacheur Boost	37
2.5.3 Modèle du Hacheur Buck-Boost	38
2.6 Description des dispositifs de stockage	40

2.6.1 Stockage par batteries (stockage électrochimiques)	40
2.6.2 Stockage mécanique	40
2.6.3 Stockage thermique	41
2.6.4 Stockage par Supercondensateurs	41
2.7 Synthèse des accumulateurs électrochimiques	42
2.7.1 Batteries de type Plomb-Acide	42
2.7.2 Batteries de type Lithium-Ion (Li-Ion)	43
2.7.3 Batteries Nickel-Métal Hydrure (NiMH)	44
2.7.4 Batteries Nickel-Cadmium (NiCd)	44
2.8 Présentation des batteries Li-Ion	46
2.8.1 La capacité	46
2.8.2 La résistance interne	47
2.8.3 La tension à vide (V_{oc})	47
2.8.4 La tension nominale	47
2.8.5 L'état de charge (SoC)	47
2.8.6 Nombre de jours d'autonomie	48
2.8.7 Cycle de vie	48
2.8.8 Modélisation mathématique des batteries	48
2.9 Association des Batteries en Série, en Parallèle et Mixte	49
2.10 Principe de fonctionnement des accumulateurs Li-Ion	51
2.10.1 Structure des Électrodes et de l'électrolyte	51
2.10.2 Réactions électrochimiques et mécanisme de Charge et Décharge	51
2.11 Système de gestion des Batteries (BMS - Battery Management System)	53
2.11.1 Fonctionnalités du système de gestion des batteries	53
2.11.1.1 Protection Contre les Décharges Profondes	53
2.11.1.2 Prévention des Surcharges	53
2.11.1.3 Contrôle de la Température	53

2.11.1.4	Surveillance de l'État de Charge et de l'État de Santé	54
2.11.1.5	Gestion de l'Équilibrage des Cellules	54
2.12	Problématiques Liées aux Batteries Lithium-Ion dans les Systèmes d'Énergie renouvelable	54
2.12.1	Solutions Potentielles	56
2.13	Principe d'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques grâce à l'hybridation des sources de stockage	57
2.13.1	Les Supercondensateurs	59
2.13.2	Paramètres Caractéristiques des Supercondensateurs	61
2.13.2	Model électrique du supercondensateur	62
2.14	Conclusion	63

CHAPITRE 3

REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES MECANISMES DE GESTION ET DE CONTROLE DU FLUX D'ENERGIE DES SYSTEMES DE STOCKAGE HYBRIDES BATTERIES / SUPERCONDENSATEURS

3.1	Introduction	64
3.2	Présentation des différentes configurations d'association des dispositifs de stockage	65
3.2.1	Configuration en Série	65
3.2.2	Configuration en parallèle	65
3.2.2.1	Configuration en parallèle sans convertisseurs	65
3.2.2.2	Configuration en parallèle avec un seul convertisseur	66
3.2.2.3	Configuration en parallèle avec deux convertisseurs	67
3.2.2.4	Comparaison des différentes configurations	68
3.3	Introduction aux stratégies de gestion utilisées dans les systèmes de stockage hybride	68
3.3.1	Les objectifs partagés des stratégies de gestion dans les dispositifs de stockage hybride	69

3.3.2	Approches de Gestion de l'Énergie	69
3.2.2.1	Méthode à base de règles et de lois de gestion	69
3.2.2.2	Stratégie à base d'algorithme stochastique itératif (Métaheuristique)	74
3.2.2.3	Synthèse comparative des Méthodes Stochastiques	76
3.3.3	Méthode hybrides de gestion d'énergie	77
3.4	Techniques de Suivit de point de fonctionnement maximum (MPPT)	79
3.5	Conclusion	82

CHAPITRE 4

STRATEGIES PROPOSEES DE COMMANDE ET DE GESTION DE CONTROLE DU FLUX D'ENERGIE POUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

4.1	Introduction	83
4.2	Présentation et description des systèmes étudiés	83
4.2.1	Système photovoltaïque autonome avec stockage hybride (HESS)	84
4.3	Mécanisme et structure de l'approche de contrôle préposée	86
4.3.1	Filtre Passe-bas (LPF)	86
4.3.2	Fonctionnement du Filtre Passe-bas	87
4.3.3	Avantages du Filtre Passe-bas dans le stockage hybride	87
4.4	Régulateur PID à Ordre Fractionnaire (FOPID)	87
4.5	Types de Fonctions de Fitness	90
4.6	Composants du Système Photovoltaïque Autonome avec Stockage Hybride	92
4.6.1	Description des panneaux photovoltaïque	93
4.7	Amélioration et Optimisation de la stratégie de contrôle de l'énergie	96
4.7.1	Optimisation du système de control de l'énergie (EMS)	98
4.7.2	Optimisation des paramètres du contrôleur par PSO	99
4.8	Conclusion	102

CHAPITRE 5

RESULTATS DES SIMULATION ET DISCUSSIONS DES STRATEGIES PROPOSEES

5.1 Introduction	104
5.2 Résultats et discussion de la stratégie 1	105
5.2.1 Scénario 1 : variation de l'irradiation solaire	105
5.2.2 Scénario 2 : Variation de la charge	109
5.2.3 Test de robustesse	113
5.2.3.1 Importance des Simulations de Variations de Charge	113
5.2.3.2 Analyse des Critères de Performance	113
5.2.4 Conclusion de la stratégie 1	115
5.3 Résultat et simulation de la Stratégie 2 : Alimentation d'un centre de tri des déchets par un système photovoltaïque couplé au réseau	116
5.3.1 Description de l'Équipement du Centre de Tri des Déchets	117
5.3.2 Description du système photovoltaïque connecté au réseau	120
5.3.2 Optimisation de l'Inclinaison et l'Orientation	121
5.3.3 Processus de dimensionnement du champ Photovoltaïque	122
5.3.4 Processus de dimensionnement de l'Onduleur	125
5.3.5 Résultats et discussions de la stratégie 2	127
5.3.5.1 Analyse de l'irradiation et de la température	127
5.3.5.3 Analyse du Ratio de Performance (PR)	128
5.3.5.4 Bilan de performance annuel	129
5.3.6 Conclusion de la stratégie 2	135
5.4 Conclusion	137
CONCLUSION GENERALE	138
Références	143

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	La quantité de production d'électricité en TWh à partir de l'énergie solaire photovoltaïque dans le monde, 2015-2030	6
Figure 1.2	Carte de l'irradiation solaire mondiale	7
Figure 1.3	Plan national en matière d'énergie renouvelable destiné au marché algérien entre 2015 et 2030	8
Figure 1.4	Potentiel des gisements solaires en Algérie	9
Figure 1.5	Module photovoltaïque monocristallin	10
Figure 1.6	Module solaire photovoltaïque polycristallin	11
Figure 1.7	Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe	13
Figure 1.8	Cellule photovoltaïque CIGS	14
Figure 1.9	Schémas d'une installation photovoltaïque couplée au réseau	15
Figure 1.10	Schémas d'une installation solaire photovoltaïque autonome	16
Figure 1.11	Centrale solaire photovoltaïque 20MW à Adrar, Sahara algérien	17
Figure 1.12	Centrale solaire flottante dans un lac	19
Figure 1.13	Centrale solaire sur la Station Spatial International	20
Figure 1.14	Systèmes solaire intégré aux bâtiments	21
Figure 1.15	Dispositif solaire photovoltaïque portatif avec ses différents connecteurs	21
Figure 1.16	Schémas illustrant l'effet photovoltaïque	22
Figure 1.17	Caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque	23
Figure 1.18	Suiveur solaire	26
Figure 2.1	Schémas d'une installation photovoltaïque autonome	28
Figure 2.2	Schémas du model de la cellule photovoltaïque	31
Figure 2.3	Association de cellules en série	32
Figure 2.4	Groupement de cellules en parallèle	32

Figure 2.5	Connexion de cellules mixte	33
Figure 2.6	Courbe I-V du module photovoltaïque	34
Figure 2.7	Courbe P-V du module photovoltaïque	35
Figure 2.8	Schémas du Modèle du hacheur Boost	36
Figure 2.9	Les différentes configurations possibles d'un hacheur Boost	38
Figure 2.10	Modèle du hacheur Buck-Boost	38
Figure 2.11	Diagramme de Ragone	42
Figure 2.12	Batterie solaire Li-Ion Victron energy 12.8V/100Ah	47
Figure 2.13	Model électrique de la batterie	48
Figure 2.14	Types de branchement des batteries	50
Figure 2.15	Réactions électrochimiques et principe de fonctionnement d'une batterie Li-Ion	52
Figure 2.16	Les différentes fonctionnalités du système de gestion des batteries	53
Figure 2.17	Résumé du principe d'hybridation des sources de stockage (Batteries-Supercondensateurs)	58
Figure 2.18	Le principe de répartition des fonctions entre les batteries et les supercondensateurs dans les systèmes de stockage hybrides	59
Figure 2.19	Les différents composants d'un supercondensateur	61
Figure 2.20	Model du supercondensateur	62
Figure 3.1	Configuration en parallèle sans convertisseur	65
Figure 3.2	Configuration en parallèle avec un seul convertisseur	66
Figure 3.3	Configuration en parallèle avec deux convertisseurs	67
Figure 3.4	Commutation binaire (tout ou rien)	70
Figure 3.5	Méthode de la puissance limite	71
Figure 3.6	Décomposition fréquentiel de la puissance	73
Figure 3.7	Organigramme récapitulatif de l'algorithme génétique	74
Figure 4.1	Schéma général du système PV autonome avec HESS et système de control d'énergie (EMS).	85

Figure 4.2	Diagramme du filtre passe-bas	86
Figure 4.3	Contrôleur PID a ordre fractionnaire (FOPID)	88
Figure 4.4	Comparaison des domaines de control entre le PID et le FOPID	89
Figure 4.5	Schémas détaillé du système photovoltaïque autonome avec stockage hybride (HESS) et système de gestion d'énergie (EMS)	92
Figure 4.6	Caractéristique du PV sous l'irradiation variable et température constante	94
Figure 4.7	Caractéristique du champ PV sous température variable et irradiation constante	95
Figure 4.8	Schéma du système de control de l'énergie (EMS) pour le système photovoltaïque avec stockage hybride (HESS)	97
Figure 4.9	Schéma Optimisé par FOPI-PSO du système de control de l'énergie (EMS) pour le système photovoltaïque avec stockage hybride (HESS)	98
Figure 4.10	Organigramme de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO)	100
Figure 4.11	Schéma d'optimisation du contrôleur FOPI-PSO	102
Figure 5.1	Profil de l'irradiation solaire	105
Figure 5.2	Tension du bus continue	106
Figure 5.3	Réponse des puissances de la charge, la batterie et le champ PV dans des conditions d'irradiation solaire variable	107
Figure 5.4	Réponse du supercondensateur avec une irradiation variable pour les contrôleurs PI et FOPI-PSO	108
Figure 5.5	Réponse des puissances de charge, la batterie et le champ PV dans des conditions charge variable	109
Figure 5.6	Comparaison des Repenses du supercondensateur avec une charge variable pour les contrôleurs PI et FOPI-PSO	111
Figure 5.7	Evolution de l'état de charge de la batterie (SOC)	113
Figure 5.8	Site de traitement des déchets solides	116
Figure 5.9	Image du système de convoyeur dans une installation de tri des déchets	117
Figure 5.10	Rendu 3D du centre de tri des déchets réalisé avec SolidWorks	118
Figure 5.11	Distribution de la puissance et de l'énergie	119

Figure 5.12	Schémas du système photovoltaïque en autoconsommation connecté au réseau	121
Figure 5.13	Angle d'inclinaison du champ PV	122
Figure 5.14	Courbe de performances	122
Figure 5.15	Caractéristique Courant-Tension pour le module JinkoSolar JKM 300-60	124
Figure 5.16	Caractéristique Puissance-Tension pour le module JinkoSolar JKM 300-60	124
Figure 5.17	Courbe illustrant le processus de dimensionnement de l'onduleur	126
Figure 5.18	Profile d'efficacité de l'onduleur pour 580V, 600V et 850V	127
Figure 5.19	Graphique de la puissance nominale mensuelle durant une année de production solaire	131
Figure 5.20	Ratio de performance correspondant a chaque mois durant l'année	132
Figure 5.21	Diagramme de pertes du système photovoltaïque durant l'année	133
Figure 5.22	Evaluation de la balance carbone durant le cycle de vie de l'installation photovoltaïque	134
Figure 5.23	Diagramme de dégradation pour une durée de vie de 30 ans	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Comparaison entre les cellules photovoltaïques monocristallines et polycristallines	12
Tableau 1.2	Liste des principales centrales solaire photovoltaïques dans le monde	18
Tableau 2.1	Rapport cyclique des différents types de hacheurs	39
Tableau 2.2	Les diverses technologies de stockage par accumulateurs	45
Tableau 2.3	Comparaison entre les condensateurs et les supercondensateurs et les batteries	60
Tableau 3.1	Comparaison des différentes configurations pour l'architecture en parallèle	68
Tableau 3.2	Comparatif des méthodes de gestion à base de règles et de lois de gestion déterministes	73
Tableau 3.3	Comparaison des Méthodes Stochastiques	76
Tableau 3.4	Comparatif des techniques MPPT	81
Tableau 4.1	Caractéristiques technique du PV	96
Tableau 4.2	Paramètres utilisés pour de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO)	101
Tableau 5.1	Test de robustesse	114
Tableau 5.2	Puissances et consommation journalière	119
Tableau 5.3	Spécifications technique du module JinkoSolar 300Wc	123
Tableau 5.4	Fiche technique de l'onduleur ABB-PRO-33,0-TL-OUTD	125
Tableau 5.5	Bilans et Résultats Principaux du Système PV Connecté au Réseau	130

LISTE DES ABREVIATIONS

PV	Photovoltaïque
TWh	Térawatt heures
CO ₂	Dioxyde de carbone
TEP	Tonnes équivalent pétrole
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
CSP	Centrale solaire thermodynamique
GJ	Giga joules
CdTe	Cadmium Telluride
CIGS	Di-séléniure de cuivre-indium-gallium
UV	Ultra violet
ISS	Station spatial internationale
V _{mpp}	Tension au point de fonctionnement maximal
I _{mpp}	Courant au point de fonctionnement maximal
P _{mpp}	Puissance au point de fonctionnement maximal
I	Courant
V	Tension
DC	Courant continue
AC	Courant alternatif
NiCd	Nickel-cadmium
NiMH	Nickel-métal-hydrure
MPPT	Suivi du point maximal de puissance
α	Rapport cyclique
STEP	Station de transfert d'énergie par pompage
Li-Ion	Lithium-Ion
Voc	Tension à vide

SoC	Etat de charge
BMS	Système de gestion de la batterie
HESS	Système de stockage hybride de l'énergie
SC	Supercondensateur
LPF	Filtre Passe-bas
LFC	Composant bas fréquence
HFC	Composant haut fréquence
IAE	Erreur Absolue Intégrale
P_Bat	Puissance de la batterie
P_SC	Puissance du supercondensateur
AG	Algorithme génétique
ACF	Algorithme de colonie de fourmis
PSO	Optimisation par essaim de particules
GWO	Algorithme des loups gris
FOPI	Régulateur à ordre fractionnaire proportionnel intégral
FOPID	Régulateur à ordre fractionnaire proportionnel intégral dérivateur
ANN	Réseau de neurones artificiel
P&O	Perturber et Observer
LF	Logique Floue
EMS	Système de control de l'énergie
Kp	Paramètre de contrôle proportionnel
Ki	Paramètre de contrôle intégral
Kd	Paramètre de contrôle dérivé
λ	Composante fractionnaires pour la partie intégrale
μ	Composante fractionnaires pour la partie dérivée
I_PV	Courant de sortie du champ PV
V_PV	Tension du champ PV

I_{Bat}	Courant de la batterie
I_{SC}	Courant du supercondensateur
I_{Load}	Courant de la charge
I_{bat_ref}	Courant de référence de la batterie
I_{ref}	Courant de référence
I_{Bat_err}	Courant d'erreur de la batterie
P_{Bat_rest}	La puissance restante
PWM	Modulation de largeur d'impulsion
PI	Régulateur proportionnel intégral
FOPI-PSO	Régulateur à ordre fractionnaire proportionnel intégral optimisé par PSO
PR	Ratio de Performance
L_c	Pertes de collecte du champ photovoltaïque
L_s	Pertes du système
Yf	Production d'énergie utile

INTRODUCTION GENERALE

- **Contexte**

Dans un contexte mondial marqué par des défis environnementaux et énergétiques croissants, la quête d'une transition énergétique durable est devenue une priorité pour de nombreux pays [1]. La demande énergétique à l'échelle planétaire, en constante croissance et augmentation, s'accompagne de la nécessité urgente de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter les impacts néfastes du réchauffement climatique [2]. Dans ce cadre, les énergies renouvelables se présentent comme une alternative incontournable aux énergies fossiles, notamment l'énergie solaire, dont le développement est soutenu par des politiques globales de plus en plus ambitieuses [3].

L'énergie photovoltaïque, qui permet de convertir et de transformer d'une manière directe l'énergie solaire en électricité, est l'une des solutions les plus prometteuses pour répondre à ces enjeux globaux. Son caractère inépuisable et son faible impact environnemental en font un pilier de la transition énergétique [4]. En Algérie, un pays disposant d'un ensoleillement exceptionnel avec plus de 2 500 heures de soleil par an, l'énergie solaire représente un potentiel stratégique non seulement pour réduire la dépendance aux énergies fossiles, mais aussi pour diversifier le mix énergétique national [5]. Le déploiement de cette ressource permettrait à l'Algérie de non seulement assurer une plus grande indépendance énergétique, mais également de devenir un acteur important sur la scène internationale en matière d'énergie renouvelable.

Cependant, bien que l'énergie photovoltaïque soit une technologie largement développée et adoptée depuis plusieurs années, des défis restent à surmonter, en particulier en matière de gestion des interruptions de la production solaire et de la capacité à assurer une fourniture d'électricité continue et stable. [6]. Le stockage d'énergie par batterie apparaît comme une solution incontournable pour pallier l'intermittence aux sources d'énergie renouvelables [7]. Les batteries servent à conserver l'énergie supplémentaire générée pendant les périodes de forte lumière solaire, afin de la renvoyer lorsque la production est faible ou que la demande en énergie est importante. Toutefois, leur utilisation n'est pas sans défis. Les batteries sont confrontées à des limitations de performance, essentiellement en ce qui concerne la capacité de stockage, le rendement et surtout la longévité [8]. En effet, l'usure des batteries est un problème majeur, souvent défavorisé par les cycles répétés de charge et de décharge, et par l'exposition à des pics de puissance importants. Pour répondre à ces défis, la gestion optimale du flux énergétique dans les systèmes photovoltaïques est cruciale [9]. Ces aspects font du stockage d'énergie une composante essentielle pour toute stratégie d'intégration à grande échelle de l'énergie photovoltaïque dans les réseaux électriques et les infrastructures énergétiques nationaux et internationaux [10].

- **Problématique**

Bien que d'importants progrès technologiques aient contribué à diminuer les dépenses de production des installations photovoltaïques et à optimiser leur rendement, plusieurs défis majeurs subsistent. Le stockage d'énergie est l'un des principaux enjeux, car il permet de compenser l'intermittence de la production solaire, en accumulant l'énergie pendant les périodes ensoleillées pour la restituer durant les périodes où la production solaire est insuffisante, notamment par temps couvert ou la nuit [11].

L'établissement de solutions de stockage durables et robuste pour gérer efficacement cette intermittence représente un enjeu majeur sur le plan technique et économique. En effet, les dispositifs de stockage conventionnels, comme les batteries solaires, présentent plusieurs limites, en particulier en termes de durée de vie et de longévité, de coûts d'installation et de maintenance, ainsi que de performances en matière énergétiques. Ces contraintes freinent l'adoption massive de systèmes photovoltaïques, particulièrement dans des configurations autonomes où le réseau électrique est absent ou instable [12].

Par ailleurs, l'optimisation des systèmes hybrides de stockage, qui associent plusieurs technologies telles que les batteries et les supercondensateurs, représente une approche prometteuse pour améliorer l'efficacité globale des systèmes photovoltaïques [13]. Les batteries, en particulier, sont capables de stocker des quantités importantes d'énergie sur une longue durée, ce qui les rend essentielles pour garantir une alimentation continue en électricité, surtout en période d'intermittence solaire. Cependant, comme nous l'avons mentionné précédemment elles présentent certaines limitations, notamment en termes de durée de vie, de taux de décharge, et de performances en environnement extrême, qui nécessitent des stratégies de gestion optimisées pour éviter leur dégradation prématurée [14]. Les cycles de charge/décharge plus lents des batteries, par rapport aux supercondensateurs, les rendent moins adaptées aux demandes de puissance immédiates, mais elles restent cruciales pour des applications à plus long terme et de grande capacité. Les supercondensateurs, en particulier, se distinguent par leurs capacités de charge et de décharge rapides, leur longue durée de vie, et leur aptitude à fonctionner dans des conditions extrêmes [15]. Toutefois, l'intégration conjointe de ces deux technologies dans des systèmes photovoltaïques souligne l'existence des défis en termes de gestion optimale des flux d'énergie, nécessitant l'utilisation de stratégies avancées de contrôle afin de maximiser la performance et la durabilité de l'ensemble du système. Cette complémentarité permet d'exploiter les avantages respectifs de chaque technologie tout en minimisant leurs inconvénients [16].

• Objectifs

Cette thèse s'inscrit dans une démarche visant à répondre aux défis liés au stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques, en mettant l'accent sur deux axes principaux :

- Améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques à travers une gestion optimisée des dispositifs de stockage. Le but est d'offrir des alternatives novatrices et réalisables pour améliorer la gestion du stockage et la distribution d'énergie, tout en prolongeant la longévité des constituants.
- Offrir des options techniques appropriées au cadre énergétique algérien et international, en tenant compte des spécificités locales en termes d'ensoleillement, de besoins énergétiques et d'infrastructure. Deux solutions distinctes sont proposées :
 1. **Une solution autonome avec stockage hybride**, intégrant à la fois des batteries et des supercondensateurs. Un algorithme de gestion énergétique sophistiqué dirige cette configuration, dans le but d'optimiser la longévité des composants de stockage tout en améliorant la performance globale du système. Ce type de solution est particulièrement adapté aux zones rurales ou isolées, où le réseau électrique est inexistant ou peu fiable.
 2. **Une solution connectée au réseau sans stockage**, spécialement conçue pour des infrastructures à but écologique telles que les centres de tri des déchets. Ce type de disposition tire parti de la souplesse des systèmes photovoltaïques pour injecter

directement l'énergie produite dans le réseau, réduisant ainsi les coûts et les besoins en termes de stockage local tout en optimisant l'utilisation de l'énergie solaire disponible.

L'objectif global de cette recherche est de participer et de contribuer à l'amélioration des systèmes photovoltaïques en proposant des solutions concrètes et qui répondent aux défis contemporains face aux enjeux liés au stockage d'énergie, tout en optimisant le recours aux ressources solaires à disposition.

- **Structure**

Cette thèse est structurée en plusieurs chapitres qui abordent de manière progressive les différentes problématiques et solutions proposées. En plus d'une introduction générale cette thèse est structurée en cinq chapitres, Chaque étape cruciale de la recherche et de l'amélioration des dispositifs utilisant l'énergie photovoltaïque et le stockage d'énergie est abordée.

- **Chapitre 1 : Revue de la littérature sur l'énergie solaire photovoltaïque**

Ce premier chapitre propose une analyse exhaustive des technologies actuelles dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque. Il couvre et aborde les différents types de cellules photovoltaïques disponibles, les diverses configurations et architectures de centrales solaires, ainsi que les techniques d'amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Une attention particulière est accordée aux avancées récentes dans le secteur, ainsi qu'aux défis techniques qui subsistent pour une intégration plus large de cette technologie.

- **Chapitre 2 : Modélisation mathématique des différents composants des systèmes photovoltaïque**

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la modélisation mathématique des composants essentiels des systèmes photovoltaïques, tels que les panneaux solaires, les convertisseurs et les dispositifs de stockage d'énergie. La modélisation vise à comprendre et à optimiser le comportement de ces composants sous différentes conditions de fonctionnement, avec l'objectif d'améliorer les performances globales du système.

- **Chapitre 3 : Revue de la littérature des mécanismes de gestion et de contrôle du flux d'énergie des systèmes de stockage hybrides batteries / supercondensateurs**

Ce chapitre explore en détail la littérature existante concernant les processus de gestion, d'administration et de régulation du flux d'énergie dans les installations de stockage hybrides qui associent batteries et supercondensateurs. Il examine les méthodes de gestion énergétique modernes, en évaluant les avantages et les limitations des diverses stratégies, ainsi que les défis techniques et les contraintes liées à l'optimisation des dispositifs de stockage au sein des installations photovoltaïques.

- **Chapitre 4 : Stratégies proposées de commande et de gestion de contrôle du flux d'énergie des systèmes de stockage hybrides batteries/supercondensateurs pour les systèmes photovoltaïques**

Ce chapitre présente les stratégies de commande, de régulation et de gestion avancées que nous proposons pour optimiser le contrôle du flux d'énergie dans les systèmes de stockage hybrides combinant batteries et supercondensateurs. Ces stratégies sont conçues pour répondre aux défis spécifiques posés par la nature fluctuante de la production d'énergie solaire et par le profil variant de la demande, tout en maximisant la longévité des composants de stockage et en améliorant l'efficacité énergétique globale du système. Pour atteindre ces objectifs, nous proposons une stratégie de gestion hybride qui combine des méthodes basées sur des règles prédéfinies avec des techniques d'optimisation intelligentes. L'optimisation se concentre notamment sur le réglage d'un régulateur avancé, tel que le régulateur FOPI, capable de gérer efficacement les non-linéarités et les incertitudes du système.

En parallèle, nous explorons également une deuxième stratégie qui se concentre sur une solution sans stockage, spécifiquement conçue pour un centre de tri des déchets connecté au réseau. Cette configuration vise à injecter directement l'énergie produite par le système photovoltaïque dans le réseau électrique. Cette approche permet de minimiser les coûts et les complexités associés au stockage local de l'énergie, tout en optimisant l'utilisation des ressources solaires disponibles. L'absence de stockage annule les contraintes potentielle des composants liés au stockage et simplifie la gestion du flux énergétique.

- **Chapitre 5 : Résultats des simulations et discussion des stratégies proposées**

Dans ce chapitre, nous exposons les conclusions des simulations menées pour juger la performance des méthodes de gestion et d'administration élaborées pour les installations photovoltaïques examinées. Ces simulations visent à vérifier la performance des stratégies dans divers scénarios illustrant les conditions d'exploitation réelles, Notamment les variations d'irradiance solaire, les fluctuations de la demande énergétique, ainsi que les interactions complexes entre les systèmes de stockage et les autres composants.

L'analyse des performances du système photovoltaïque à caractère autonome occupe la première section de ce chapitre. Les simulations ont été menées sur des configurations combinant batteries et supercondensateurs, en analysant l'impact des stratégies de gestion hybride sur la longévité des composants de stockage et sur l'efficacité énergétique globale du système ainsi que la capacité à maintenir un courant ininterrompu malgré les interruptions liées à la production solaire. On évalue les résultats en ce qui concerne la diminution de la détérioration des batteries, le renforcement de la qualité du courant et la minimisation des pertes d'énergie. Des comparaisons sont effectuées entre différentes configurations de régulateurs et algorithmes de gestion, notamment l'utilisation du régulateur FOPI optimisé par PSO.

La deuxième partie du chapitre aborde la simulation du système connecté au réseau sans stockage, spécifiquement adapté à un centre de tri des déchets. Cette section explore comment l'énergie photovoltaïque peut être intégrée de manière efficace dans les opérations du centre, avec un accent sur l'augmentation du rendement énergétique et l'optimisation de l'injection au réseau.

Au final, une discussion approfondie est organisée sur les perspectives et les moyens d'amélioration. On propose des suggestions pour optimiser de manière plus efficace les systèmes analysés.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle de plus en plus crucial dans la transition énergétique mondiale due à sa capacité à convertir directement l'énergie solaire en électricité propre et renouvelable. Face aux enjeux environnementaux et aux limitations des énergies fossiles, les systèmes photovoltaïques sont considérés comme une option prometteuse pour répondre aux besoins en énergie actuels et futurs. [3] Cependant, pour appliquer et améliorer ces systèmes, il est indispensable de bien appréhender leurs principes de fonctionnement, les technologies indispensables et les défis qui y sont associés.

Ce chapitre propose une revue approfondie des connaissances actuelles sur l'énergie photovoltaïque. Nous explorerons les différentes technologies de cellules photovoltaïques disponibles à ce jour, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limitations.

Nous étudierons aussi les différentes architectures de centrales solaires, en donnant une description détaillée des configurations les plus courantes et de leurs applications particulières. De plus, ce chapitre abordera les différentes approches pour améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, dans le but d'optimiser la conversion de l'énergie solaire et d'optimiser le rendement énergétique. Le but est de présenter une vision globale des progrès technologiques dans ce domaine et de mettre en perspective les solutions pratiques pour relever les défis énergétiques contemporains.

1.2 Le potentiel de l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque solaire représente un grand pas en avant dans le domaine de l'énergie à l'échelle mondiale, offrant une solution prometteuse pour faire face aux défis actuels de la production d'électricité [4]. Dans un monde qui évolue constamment et dans un environnement mondial qui nécessite la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la diversification des sources d'énergie et l'accès universel à une énergie propre, l'énergie solaire photovoltaïque devient un élément clé de la transition énergétique [5].

Alors que les nations du monde entier cherchent à respecter les accords internationaux sur le climat et à réduire leur dépendance aux combustibles fossiles, [17] l'énergie solaire photovoltaïque offre une alternative attrayante en exploitant une ressource renouvelable et abondante.

Dans la figure 1.1, on peut observer comment la production mondiale d'électricité en térawatt heures (TWh) à partir de l'énergie solaire photovoltaïque a évolué de 2015 à 2030. Dans cette figure, on peut observer une tendance générale à l'augmentation de la production d'électricité solaire photovoltaïque au fil du temps, qui est influencée par différents éléments tels que les innovations technologiques, les politiques de régulations énergétiques, les capitaux placés dans les énergies renouvelables et les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

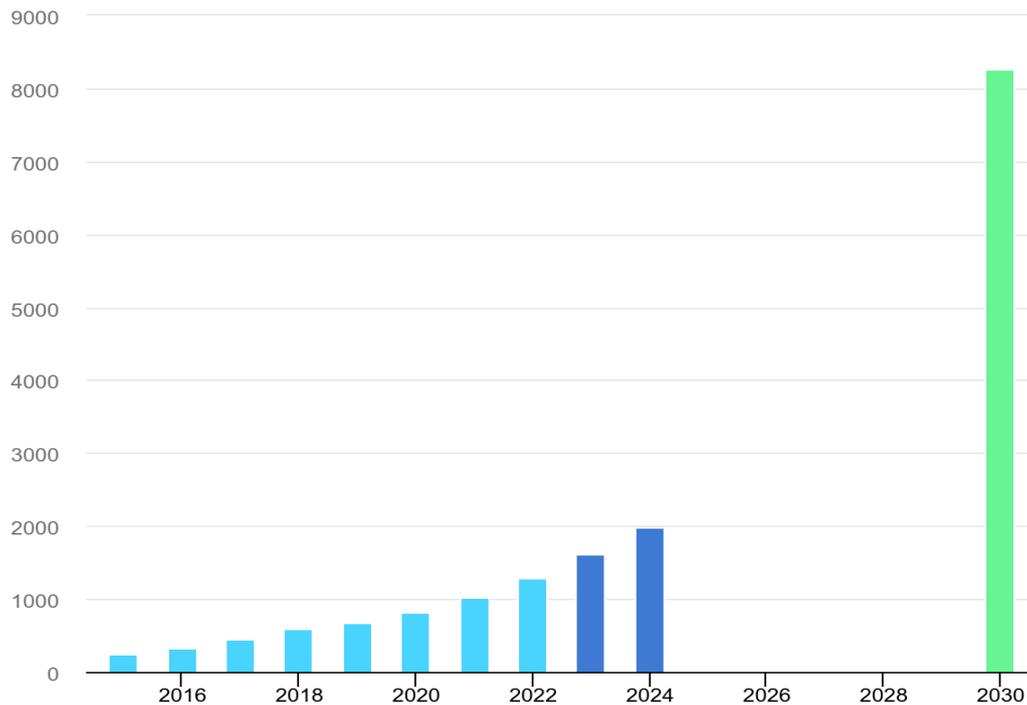


Figure 1.1 La quantité de production d'électricité en TWh à partir de l'énergie solaire photovoltaïque dans le monde, 2015-2030 [18]

Le potentiel solaire à l'échelle mondiale est illustré dans la Figure 1.2, qui montre la répartition géographique de l'énergie solaire exploitable. Dans cette carte, on peut observer en détail les niveaux d'irradiation solaire des différentes régions, qui sont exprimés en kilowattheures par mètre carré par an, ce qui correspond à la quantité de rayonnement solaire absorbée par unité.

L'irradiation solaire est grandement influencée par la latitude, qui augmente à mesure que l'on s'approche de l'équateur en raison d'une concentration plus élevée des rayons solaires. Toutefois, à cause de la forte couverture nuageuse de la zone équatoriale, ce sont les régions des tropiques qui reçoivent le plus d'irradiations.

Cette carte permet d'évaluer et de comparer le potentiel solaire dans diverses régions du monde, ce qui revêt une importance capitale pour la planification et le développement de projets d'énergie solaire photovoltaïque. De cette manière, il est possible de mieux appréhender les fluctuations géographiques du potentiel solaire et de localiser les endroits les plus favorables pour l'installation de systèmes solaires [19].

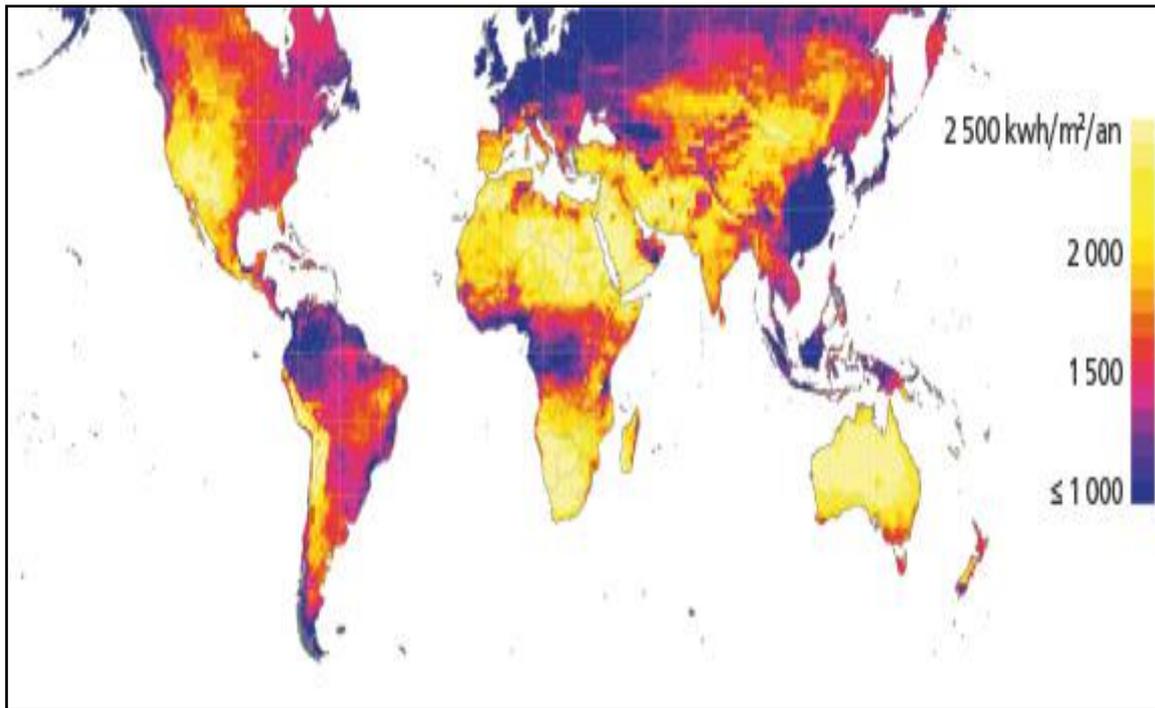


Figure 1.2 Carte de l'irradiation solaire mondiale [19]

1.3 Le potentiel de l'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

Dans le contexte particulier de l'Algérie, un pays qui possède de nombreuses ressources solaires, l'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle essentiel. Même si l'électricité est encore principalement produite à partir de combustibles fossiles, l'utilisation du potentiel solaire algérien présente une occasion exceptionnelle de varier le mix énergétique national et de diminuer les émissions de CO₂. En outre, dans un pays où la disponibilité de l'électricité reste limitée dans certaines régions isolées, l'énergie solaire photovoltaïque présente des perspectives prometteuses pour améliorer l'accès à l'énergie et promouvoir le développement socio-économique [20].

L'Algérie est pleinement engagée dans la transition vers les énergies renouvelables, en mettant en place un programme ambitieux qui met l'accent sur le développement des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cette initiative correspond à la perspective du gouvernement algérien, qui vise à exploiter les ressources inépuisables comme l'énergie solaire afin de varier le système énergétique et anticiper les demandes énergétiques à venir du pays. En optant pour une approche globale et en mobilisant des compétences, l'Algérie se mobilise fermement pour un passage énergétique de nature écologique [21].

La mise à jour du programme des énergies renouvelables a pour objectif d'établir une capacité de production d'origine écologique de 22 000 MW d'ici 2030 pour le marché national, avec pour objectif stratégique de pouvoir exporter si les conditions du marché national l'autorisent. En même temps, le nouveau programme d'efficacité énergétique a pour objectif de faire des économies d'énergie d'environ 63 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) d'ici 2030, couvrant plusieurs secteurs tels que le bâtiment, l'éclairage public, le transport et l'industrie. Ceci sera accompli grâce à l'introduction de technologies performantes telles que l'éclairage

éco-énergétique, l'isolation thermique, les chauffe-eau solaires, les carburants propres comme le GPL, ainsi que des équipements industriels plus efficaces. [22]

L'Algérie a également pour objectif de diminuer ses émissions de dioxyde de carbone de 193 millions de tonnes en mettant en place ces programmes, ce qui contribue de manière importante aux efforts mondiaux de lutte contre le réchauffement climatique.

La Figure 1.3 illustre la cohérence du plan d'investissement en énergies renouvelables pour le marché algérien pour les 15 prochaines années à partir de 2015. [23] Cette représentation graphique présente en détail les objectifs et les prévisions concernant la mise en place des énergies renouvelables en Algérie pendant cette période. Cette représentation graphique donne une vision claire de l'orientation du programme énergétique du pays vers les énergies renouvelables, en mettant l'accent sur le photovoltaïque en tant que principal stimulateur de cette évolution.

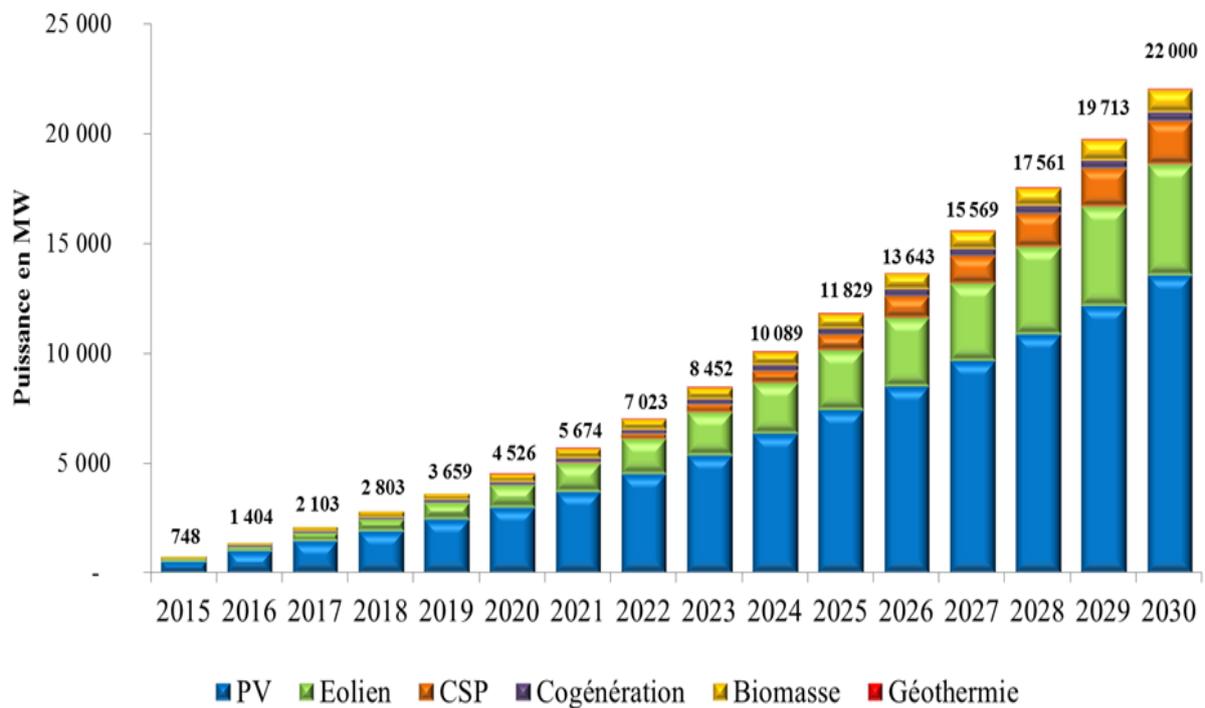


Figure 1.3 Plan national en matière d'énergie renouvelable destiné au marché algérien entre 2015 et 2030 [23]

La distribution géographique de l'ensoleillement à travers le territoire est illustrée dans la figure 1.4, qui met en évidence les régions où le rayonnement solaire est le plus élevé. [24]. En raison d'un climat en grande partie désertique, l'Algérie possède un potentiel solaire très élevé, en particulier dans les régions du Sud, où l'ensoleillement est presque constant toute l'année.

Les informations fournies dans cette représentation graphique sont cruciales pour élaborer la stratégie d'installation de centrales solaires, en repérant les régions les plus prometteuses pour la génération d'énergie solaire. Cela met en évidence l'importance stratégique du

développement des énergies renouvelables dans ces zones afin de répondre à la demande énergétique croissante du pays tout en diminuant la dépendance aux énergies fossiles.

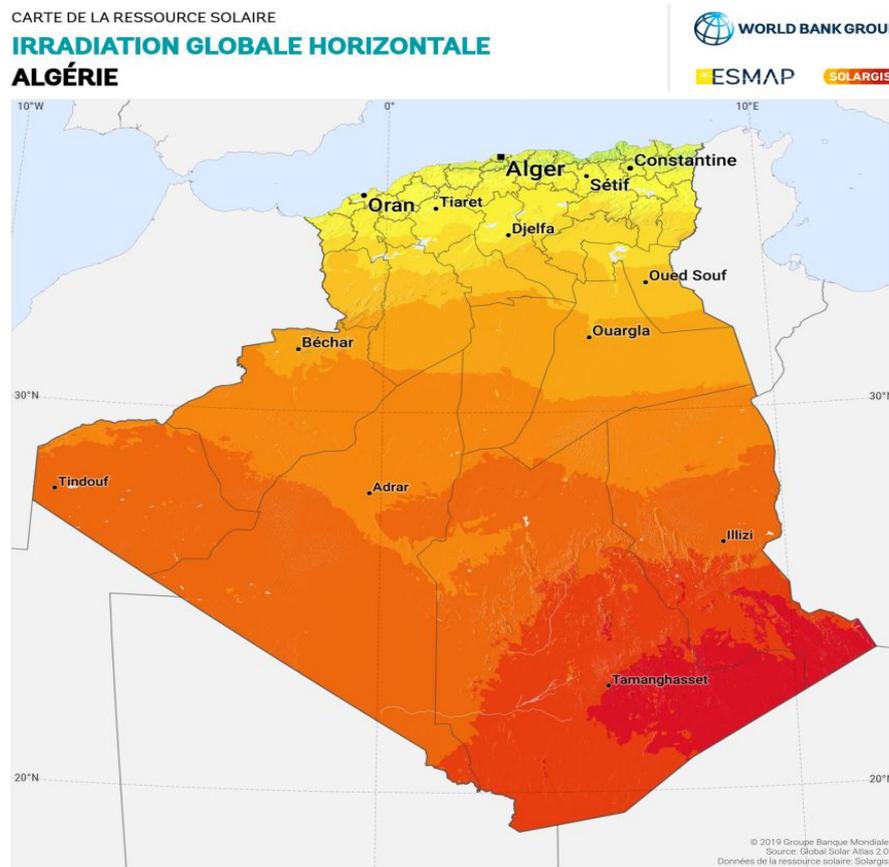


Figure 1.4 Potentiel des gisements solaires en Algérie [24]

En synthèse, la mise en œuvre du programme national d'efficacité énergétique contribuera à freiner de manière progressive l'augmentation de la demande en énergies polluantes. Cette démarche permettra de réaliser des économies d'énergie cumulées d'environ 93 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP), dont 63 millions seront générées d'ici 2030.

La TEP représente une tonne de pétrole équivalent. Il s'agit d'une unité d'énergie qui représente la quantité d'énergie présente dans une tonne de pétrole brut. Une TEP correspond à une quantité d'environ 42 giga joules (GJ) ou 11,63 mégawatheures (MWh). On retrouve fréquemment cette unité pour faire une comparaison entre la consommation ou la production d'énergie provenant de diverses sources [25].

Afin de mieux comprendre les enjeux liés à l'énergie solaire photovoltaïque, nous allons dans ce qui suit examiner les technologies disponibles à ce jour ainsi que leurs évolutions récentes, afin d'évaluer leur potentiel et leurs applications dans différents contextes.

1.4 Technologies photovoltaïques

Les technologies photovoltaïques sont essentielles pour générer de l'électricité solaire. Elles se démarquent grâce aux matériaux et aux méthodes employés pour transformer la lumière du soleil en électricité. Dans cette partie, nous examinons en profondeur les technologies photovoltaïques les plus importantes, leurs caractéristiques, avantages et désavantages.

1.4.1 Cellules photovoltaïques en silicium

Dans l'industrie solaire, les cellules photovoltaïques en silicium sont largement employées grâce à leur fiabilité et leur performance [26]. Elles se déclinent en deux principales catégories :

1.4.1.1 Silicium monocristallin

Ces cellules sont fabriquées à partir de lingots de silicium purifié, découpés en fines tranches. Elles offrent un rendement élevé, généralement entre 15% et 22%, grâce à leur structure uniforme et à leur pureté élevée. Cependant, elles sont plus coûteuses à produire en raison de la complexité du processus de fabrication. La figure 1.5 représente un panneau solaire monocristallin [27].

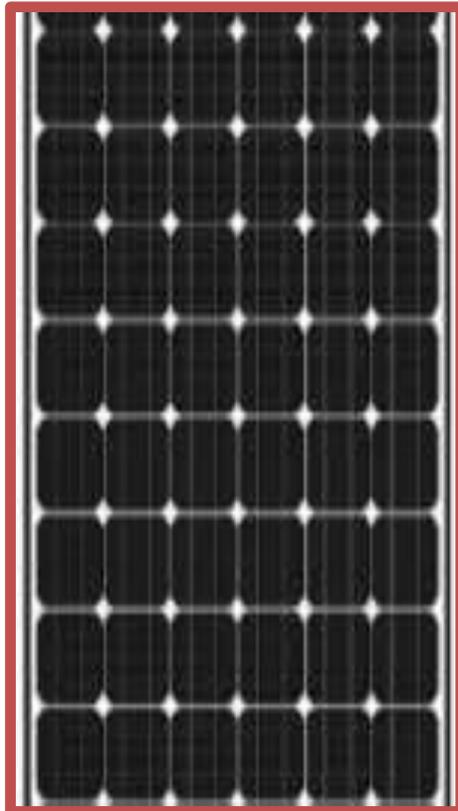


Figure 1.5 Module photovoltaïque monocristallin

1.4.1.2 Silicium polycristallin

Ces cellules sont fabriquées à partir de lingots de silicium refroidis rapidement, ce qui crée une structure cristalline moins uniforme. Bien qu'elles offrent généralement un rendement légèrement inférieur, entre 13% et 18%, elles sont moins chères à produire en raison de leur processus de fabrication plus simple. La figure 1.6 illustre un panneau solaire photovoltaïque polycristallin [28].



Figure 1.6 Module solaire photovoltaïque polycristallin

Les performances et les dépenses de ces deux types de cellules sont variables en fonction des exigences particulières de l'installation et des préférences des marques.

Les caractéristiques essentielles des cellules photovoltaïques monocristallines et polycristallines sont comparées dans le Tableau 1.1. Il souligne les différences en ce qui concerne l'efficacité énergétique, le coût de production, la tolérance aux critères climatiques, la longévité et les applications courantes [29].

Tableau 1.1 Comparaison entre les cellules photovoltaïques monocristallines et polycristallines

Critères	Cellules Monocristallines	Cellules Polycristallines
Processus de fabrication	Utilisation de lingots de silicium, découpés en fines tranches.	Refroidissement rapide de lingots de silicium, créant une structure cristalline moins uniforme.
Rendement en %	Généralement plus élevée, entre 15% et 22%.	Légèrement inférieure, entre 13% et 18%.
Coût de fabrication	Plus élevé en raison de la complexité du processus de fabrication.	Moins élevé en raison d'un processus de fabrication plus simple.
Performance température élevée	Moins affectée par les températures élevées, meilleure performance globale.	Meilleure tolérance aux températures élevées, moins sensibles à la surchauffe.
Tolérance aux ombrages	Plus sensible aux ombrages, car chaque cellule est indépendante	Moins sensible aux ombrages, en raison de la structure cristalline moins uniforme.
Durée de vie	Plus longue, grâce à la structure uniforme et à la pureté élevée du silicium.	Légèrement plus courte, mais toujours significative.
Domaines d'applications	Applications où l'espace est limité ou lorsque des rendements élevés sont nécessaires, comme les installations résidentielles et commerciales.	Applications où le coût est un facteur déterminant, telles que les grandes installations commerciales ou les centrales solaires à grande échelle.

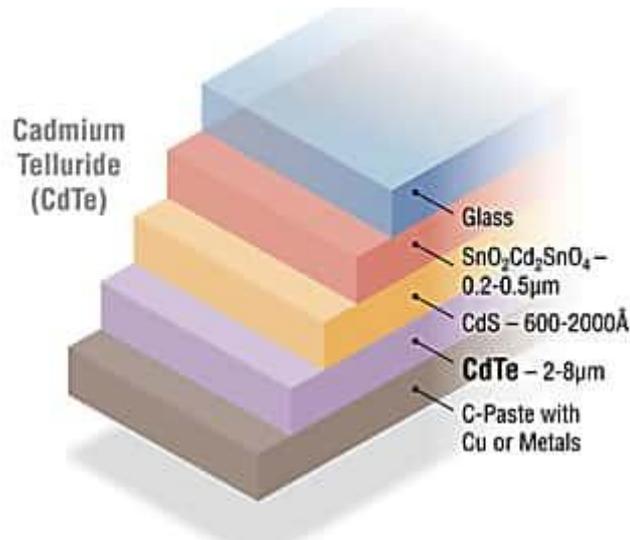
1.4.2 Cellules photovoltaïques à couche mince

1.4.2.1 Les cellules Cadmium Telluride (CdTe)

Les cellules CdTe se composent d'une fine couche de tellure de cadmium qui est déposée sur un substrat en verre ou en plastique [30].

- **Avantages** : Elles sont moins coûteuses à produire que les cellules en silicium et peuvent avoir une meilleure performance dans des conditions de faible luminosité.
- **Inconvénients** : Elles sont généralement moins efficaces que les cellules en silicium, bien que les technologies récentes aient considérablement amélioré leur rendement. Le cadmium est également considéré comme un matériau toxique, ce qui soulève des préoccupations environnementales lors du traitement et du recyclage des cellules en fin de vie [31].

La Figure 1.7 présente la structure d'une cellule photovoltaïque à base de CdTe. La couche d'absorbeur dopé P (représentée en mauve) est située sous une autre couche semi-conductrice dopée N (CdS). Ces deux couches forment ce qu'on appelle une hétérojonction [32].



- Figure 1.7 Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe

1.4.2.2 Les cellules Di-séléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS)

Les cellules CIGS sont fabriquées en déposant une fine couche de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium sur un substrat [33].

- **Avantages :** Elles offrent un rendement énergétique élevé et peuvent être produites avec des coûts de fabrication relativement bas. Elles sont également flexibles et peuvent être intégrées dans des applications nécessitant des surfaces courbes ou irrégulières [34].
- **Inconvénients :** Elles sont sensibles à l'humidité et à la corrosion, ce qui peut affecter leur durée de vie et leur stabilité à long terme. Le processus de fabrication peut également être plus complexe que celui des cellules CdTe.

La Figure 1.8 présente une illustration d'une cellule photovoltaïque à base de CIGS. Ces cellules solaires CIGS peuvent être produites sur des substrats flexibles, ce qui les rend adaptées à diverses applications pour lesquelles les systèmes photovoltaïques cristallins traditionnels et d'autres produits rigides ne conviennent pas [35].



Figure 1.8 Cellule photovoltaïque CIGS

1.4.3 Cellules photovoltaïques de nouvelle génération

En plus des technologies déjà en place, diverses cellules photovoltaïques de nouvelle génération se trouvent actuellement en développement :

1.4.3.1 Cellules photovoltaïques organiques

Les cellules organiques se servent de polymères organiques ou de molécules organiques en tant que matériau semi-conducteur [36].

- **Avantages :** Les techniques d'impression et de dépôt de film mince permettent de les produire à moindre coût, ce qui les rend parfaites pour une production de masse et des applications souples [37].
- **Inconvénients :** Leur efficacité énergétique est actuellement inférieure à celle des autres technologies, bien que des progrès significatifs aient été réalisés ces dernières années. Elles sont également sensibles à la dégradation due à l'exposition aux rayons UV et à l'oxydation, ce qui limite leur durée de vie.

1.4.3.2 Les cellules à base de Pérovskites

La pérovskite est un matériau semi-conducteur de structure cristalline utilisé dans les cellules à base de pérovskite [38].

- **Avantages :** Elles offrent un potentiel d'efficacité énergétique élevé [39], rivalisant avec les cellules en silicium. Elles peuvent être produites à bas coût à l'aide de méthodes de fabrication simples et peu coûteuses [40].
- **Inconvénients :** Il reste encore des obstacles à surmonter pour assurer leur stabilité à long terme et leur longévité, car elles peuvent être vulnérables à l'humidité, à la température et à la corrosion. On est en train de développer des méthodes de conception plus solides afin d'améliorer leur fiabilité [41].

1.4.3.3 Autres technologies émergentes

Les cellules à points quantiques [42], qui exploitent des nanoparticules de matériaux semi-conducteurs pour capter et transformer la lumière solaire, ainsi que les cellules à colorant et les cellules à hétérojonctions, qui cherchent des approches novatrices pour améliorer l'efficacité et la rentabilité des systèmes photovoltaïques, sont d'autres technologies en cours de développement [43].

1.5 Applications de l'énergie photovoltaïque

Le photovoltaïque solaire (PV) est une source d'énergie renouvelable extrêmement polyvalente et adaptable, offrant une multitude d'applications dans des secteurs tels que les habitations, [44] les entreprises [45], l'industrie et les contextes particuliers [46]. Dans cette section, nous étudions en profondeur les différentes applications de l'énergie solaire photovoltaïque, en mettant en évidence leurs particularités scientifiques et techniques.

Les installations photovoltaïques offrent différentes approches pour répondre aux besoins énergétiques en fonction de leur connexion au réseau, tout en tenant compte des spécificités propres à chaque configuration. Dans cette partie, nous allons examiner les diverses options de configuration pour les systèmes photovoltaïques résidentiels.

1.5.1 Systèmes résidentiels

1.5.1.1 Systèmes connectés au réseau : Les panneaux solaires connectés au réseau sont élaborés dans le but de produire de l'électricité pour une maison tout en étant reliés au réseau électrique public [47]. Ces systèmes exploitent la conversion directe de la lumière solaire en électricité. L'électricité produite est consommée instantanément par les appareils domestiques, et tout excédent est injecté dans le réseau électrique, générant des crédits d'électricité ou une compensation financière pour le propriétaire. La figure 1.9 montre le schéma d'une installation photovoltaïque en connexion avec le réseau de distribution électrique [48].

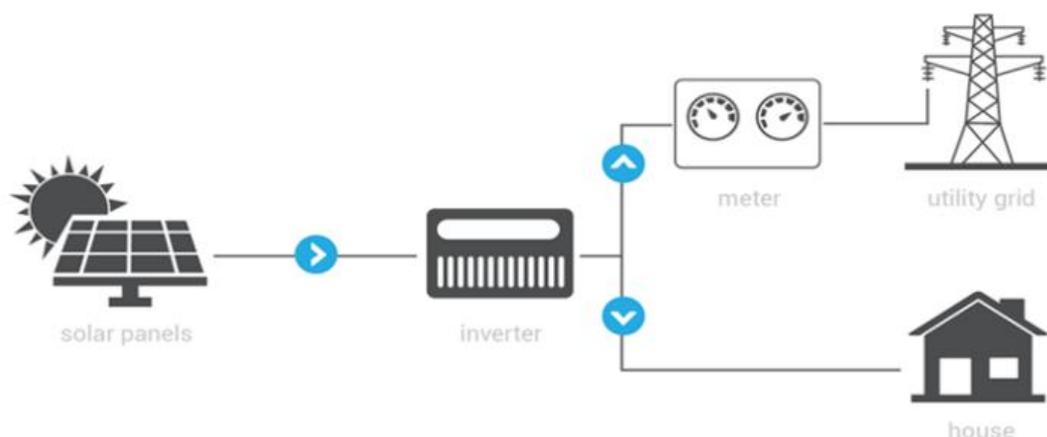


Figure 1.9 Schémas d'une installation photovoltaïque couplée au réseau

1.5.1.2 Systèmes autonomes : Les systèmes photovoltaïques autonomes, ou hors réseau, sont conçus pour alimenter des habitations ou des installations isolées qui ne sont pas raccordées au réseau électrique principal [49]. Ces systèmes utilisent des batteries pour stocker l'électricité produite par les panneaux solaires pendant la journée, permettant ainsi une utilisation continue de l'énergie solaire même pendant les périodes sans lumière solaire. Ils sont particulièrement adaptés aux zones éloignées où l'accès à l'électricité traditionnelle est limité ou inexistant. La figure 1.10 montre une installation photovoltaïque résidentielle autonome [50].

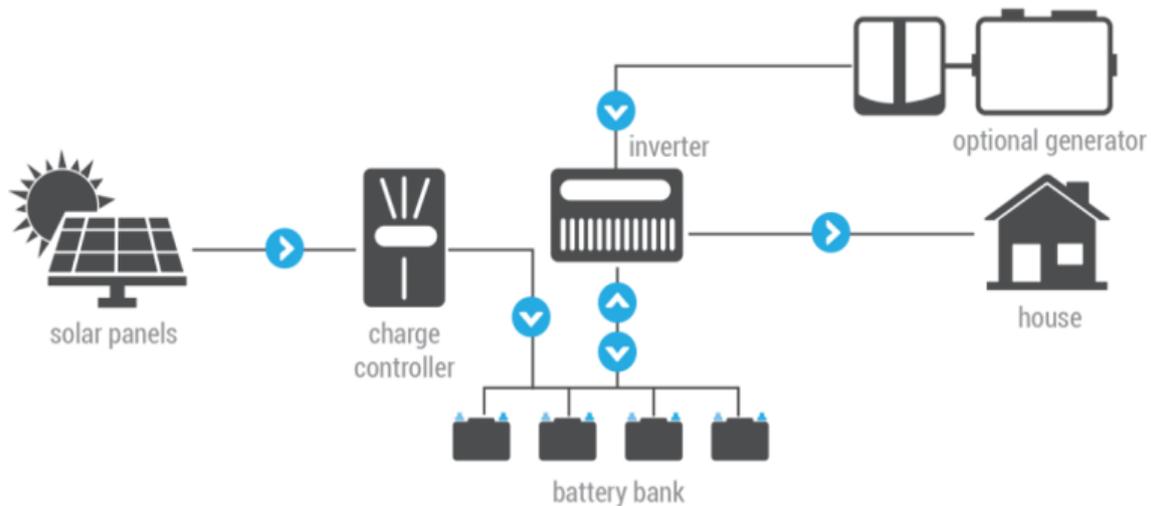


Figure 1.10 Schémas d'une installation solaire photovoltaïque autonome

1.5.2 Applications commerciales et industrielles

1.5.2.1 Toitures commerciales : Les toitures commerciales représentent un vaste terrain pour l'installation de systèmes photovoltaïques dans les environnements urbains et suburbains [51]. Ces installations sont souvent constituées de panneaux solaires montés sur des structures fixes, généralement sur les toits des bâtiments, et sont conçues pour répondre aux besoins énergétiques des entreprises. Les systèmes photovoltaïques commerciaux contribuent à réduire la dépendance aux réseaux électriques conventionnels et à réduire les coûts énergétiques à long terme [52].

1.5.2.2 Fermes solaires : Les fermes solaires, ou centrales solaires, sont des installations de grande envergure conçues pour produire de l'électricité à partir du soleil à une échelle commerciale ou industrielle. Ces installations regroupent souvent des milliers de panneaux solaires installés sur des terrains vastes et dégagés [53], comme des déserts ou des terres agricoles non utilisées. Les fermes solaires fournissent de l'électricité à grande échelle, généralement destinée à être injectée dans les réseaux électriques régionaux ou nationaux. La Figure 1.11 illustre une centrale solaire d'une puissance de 20 MW située au niveau d'Adrar dans le Sahara algérien [54].



Figure 1.11 Centrale solaire photovoltaïque 20MW à Adrar, Sahara algérien [54]

Le tableau 1.2 offre une vue d'ensemble des principales centrales solaires photovoltaïques, référencées sur le site pvresources.com, avec une capacité de plus de 200 MW en service à ce jour. Il met également en évidence le fait que les États-Unis disposent du plus grand nombre de centrales solaires en service avec plus de 7 centrale a grandes puissance en fonctionnement a ce jour [55].

Tableau 1.2 Liste des principales centrales solaire photovoltaïques dans le monde [55]

Puissance	Localisation	Description	Année de mise en service
1000 MW	 Chine <i>Yanchi, Qinghai Province</i>	Yanchi Solar PV Station	2016
575 MW	 USA <i>Rosamond, CA</i>	Solar Star Projects	2015
550 MW	 USA <i>Riverside County, CA</i>	Desert Sunlight Solar Farm	2015
550 MW	 USA <i>San Luis Obispo County, CA</i>	Topaz Solar Farm	2011-2014
480 MW	 Chine <i>Longyangxia Dam, Qinghai Province</i>	Longyangxia Hydro-Solar PV Station	2013-2015
350 MW	 USA <i>Boulder City, NV</i>	Copper Mountain III Solar Facility	2015
345 MW	 Inde <i>Charanka, Patan District</i>	Charanka Park PV power plant	2012-2015
300 MW	 France <i>Cestas, Bordeaux Gironde</i>	Centrale solaire de Cestas	2015
290 MW	 USA <i>Yuma County, AZ</i>	Agua Caliente Solar Project	2012
250 MW	 USA <i>Primm, NV</i>	Silver State South Solar	2016
250 MW	 USA, <i>San Luis Obispo, CA</i>	California Valley Solar Ranch	2012-2013
230 MW	 USA <i>Lancaster, CA</i>	Antelope Valley Solar	2015
206 MW	 USA <i>Calexico, CA</i>	Mount Signal Solar	2014
200 MW	 Chine <i>Gonghe County, Qinghai Province</i>	Gonghe Industrial Park Phase I	2013

En fonction de la nature du terrain où elles sont installées, on peut distinguer trois grandes catégories de centrales solaires : les centrales installées au sol, les centrales installées dans un milieu aquatique et les centrales aériennes.

1.5.2.2.1 Les centrale solaire au sol

Les plus fréquemment utilisées sont les installations qui impliquent la mise en place de panneaux solaires sur des terrains étendues, souvent en plein air, avec une orientation optimale afin de maximiser l'exposition au soleil [56]. La superficie de ces centrales peut atteindre plusieurs hectares et elles sont généralement implantées dans des régions rurales ou désertiques où l'espace est vaste et abordable. Elles présentent le bénéfice d'une capacité de production d'énergie considérable, ce qui en fait des solutions parfaites pour satisfaire une demande énergétique élevée. Elles requièrent cependant de vastes espaces, ce qui peut entraîner des conflits d'usage avec d'autres activités telles que l'agriculture ou la préservation des habitats naturels [57].

1.5.2.2.2 Les centrales solaire aquatiques

Comme illustré dans la figure 1.12, les centrales flottantes ou aquatiques représentent une technique plus moderne qui implique l'installation de panneaux solaires sur des structures aquatiques, habituellement sur des plans d'eau comme des lacs, des rivières ou des espaces retenus [58]. Cette technique présente de multiples avantages, comme la réduction du recours aux sols, la réduction de l'évaporation de l'eau par le biais de l'ombrage des panneaux et une optimisation de leur efficacité grâce au refroidissement écologique par l'eau. Les centrales flottantes sont particulièrement adaptées aux régions où le terrain est limité ou coûteux. Elles offrent une nouvelle solution visant à maximiser l'utilisation des ressources disponibles tout en contribuant à la production d'énergie écologique [59].



Figure 1.12 Centrale solaire flottante dans un lac

1.5.2.2.3 Les centrale solaire aériennes

Les centrales solaires aériennes représentent une avancée technologique ambitieuse dans le domaine de la production d'énergie solaire [60]. Un exemple pertinent de ce concept est la Station spatiale Internationale (ISS) illustré dans la figure 1.13 [61], qui, bien qu'elle ne soit pas une centrale solaire à proprement parler, elle illustre comment l'énergie solaire peut être exploitée en orbite terrestre pour des applications énergétiques avancées. Les enseignements de l'ISS peuvent orienter les initiatives visant à concevoir des systèmes capables de capter et de transmettre l'énergie solaire à grande échelle depuis l'orbite terrestre [62].



Figure 1.13 Centrale solaire sur la Station Spatial International

1.5.3 Applications spécifiques

1.5.3.1 Systèmes intégrés aux bâtiments : Les panneaux solaires intégrés dans les bâtiments, comme le montre la figure 1.14, sont élaborés pour être incorporés dans la structure des bâtiments eux-mêmes, en remplaçant ou en complétant les éléments de construction traditionnels tels que les toitures, les revêtements et les vitres. Ces systèmes offrent une double fonctionnalité en fournissant à la fois une source d'électricité renouvelable et une fonctionnalité architecturale, tout en s'intégrant de manière transparente à l'esthétique globale du bâtiment [63].



Figure 1.14 Systèmes solaire intégré aux bâtiments

1.5.3.2 Systèmes portables et hors réseau :

Les systèmes photovoltaïques portables et hors réseau sont conçus pour être facilement transportés et installés dans des environnements temporaires ou éloignés. Ces systèmes compacts et autonomes peuvent être utilisés dans une variété d'applications, notamment les voyages en plein air, les expéditions scientifiques, les missions humanitaires et les situations d'urgence où l'accès à l'électricité conventionnelle est limité ou indisponible. Ils sont souvent équipés de batteries pour stocker l'énergie solaire et fournir une alimentation fiable même en l'absence de lumière solaire directe ce système est illustré dans la figure 1.15 [64].



Figure 1.15 Dispositif solaire photovoltaïque portable avec ses différents connecteurs

En bref, les utilisations de l'énergie solaire photovoltaïque englobent une variété d'applications, allant des installations domestiques aux projets commerciaux et industriels, en

passant par des solutions innovantes spécifiques. Ces applications illustrent la variété et la souplesse de ces systèmes.

Après avoir exploré les différents types d'installations photovoltaïques, il est crucial de bien comprendre la composition et le rôle des différents éléments qui les constituent. C'est pourquoi nous allons dans ce qui suit explorer en détail les composants clés de ces systèmes, ainsi que leurs interactions, pour mieux appréhender leur fonctionnement global.

1.6 Les différents éléments d'une installation photovoltaïque

Un système photovoltaïque solaire est composé de multiples éléments indispensables qui travaillent ensemble pour convertir le rayonnement solaire en électricité utilisable. Dans cette partie, nous examinerons en détail les éléments essentiels d'un système photovoltaïque, leur conception, leurs performances et leur rôle global dans le système.

1.6.1 Modules photovoltaïques

1.6.1.1 Présentation de L'effet photovoltaïque

La transformation directe du rayonnement solaire en électricité dans les dispositifs photovoltaïques, tels que les cellules solaires, repose sur l'effet photovoltaïque, un phénomène physique essentiel. Le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel, qui a observé pour la première fois la formation d'un courant électrique lorsqu'une électrode éclairée était plongée dans une solution conductrice [65], a découvert ce phénomène en 1839

Les cellules solaires sont principalement constituées de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, qui sont responsables de l'effet photovoltaïque. Quand les photons de la lumière solaire frappent la surface d'une cellule photovoltaïque, ces photons ont la capacité de transmettre leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur [66].

Une cellule solaire photovoltaïque fonctionne de manière similaire à une diode, composée de deux couches de matériaux semi-conducteurs dopées. La couche N est dopée pour transporter les charges négatives, tandis que la couche P traite les charges positives [67]. Cette structure illustrée dans la figure 1.16 génère une tension électrique constante à l'intérieur de la cellule.

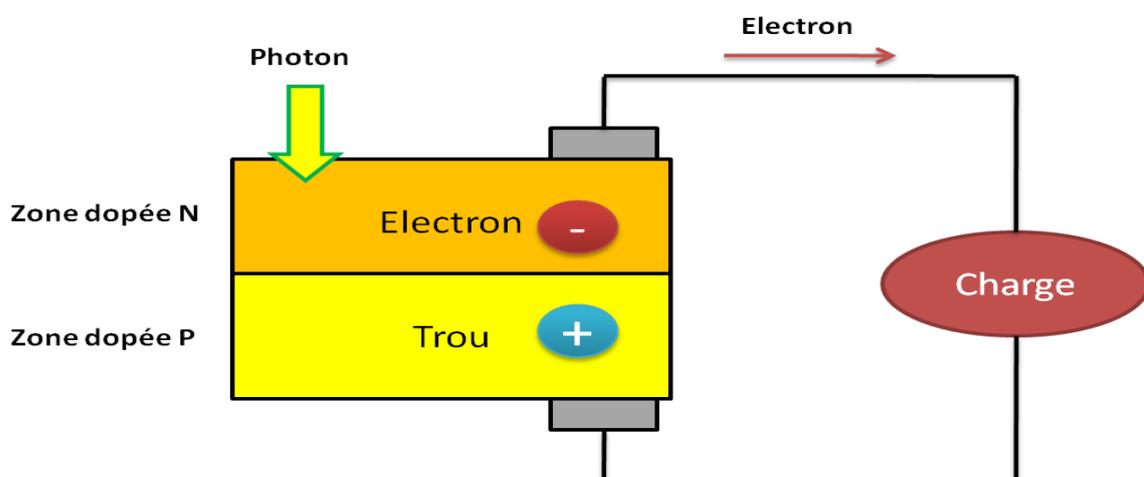


Figure 1.16 Schémas illustrant l'effet photovoltaïque

Quand la paire électron-trou est formée, la diode génère un champ électrique qui sépare les charges négatives des charges positives. La différence de potentiel entre les couches N et P est de 0,6 à 0,8 volts. Si une charge électrique, comme une résistance, est connectée entre ces deux couches, un courant électrique peut circuler, exploitant ainsi l'énergie générée par l'absorption des photons [68].

1.6.1.2 Conception et fabrication : Les panneaux solaires, également connus sous le nom de modules photovoltaïques, sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles. L'effet photovoltaïque transforme la lumière solaire en électricité dans chaque cellule. Le silicium monocristallin, le silicium polycristallin et les matériaux à couches minces tels que le CdTe et le CIGS sont des matériaux couramment employés pour les cellules photovoltaïques. Il est essentiel de prendre en considération des éléments tels que l'efficacité, la longévité, les coûts de production et la facilité d'installation lors de la conception des modules [69].

1.6.1.3 Performances et durabilité : Les performances des panneaux solaires sont évaluées en fonction de leur rendement, de leur puissance et de leurs rendements dans des conditions de luminosité et de température standard et particulière [70]. La durabilité des modules est importante pour assurer une longue durée de vie et une production d'énergie fiable. Des tests rigoureux sont effectués avant la mise sur le marché pour évaluer la résistance des modules aux conditions climatiques extrêmes, à l'humidité, aux variations de température et aux chocs mécaniques.

Les propriétés non linéaires d'une cellule photovoltaïque en silicium sont représentées par la courbe $I=f(V)$ dans des conditions d'éclairement et de température spécifiques [71]. Le point de puissance maximale (P_{mpp}) est identifié par les valeurs optimales de tension (V_{mpp}) et de courant (I_{mpp}) représentées dans cette courbe. Le point de fonctionnement optimal est déterminé par ces valeurs, comme le montre la caractéristique illustrée dans la Figure 1.17.

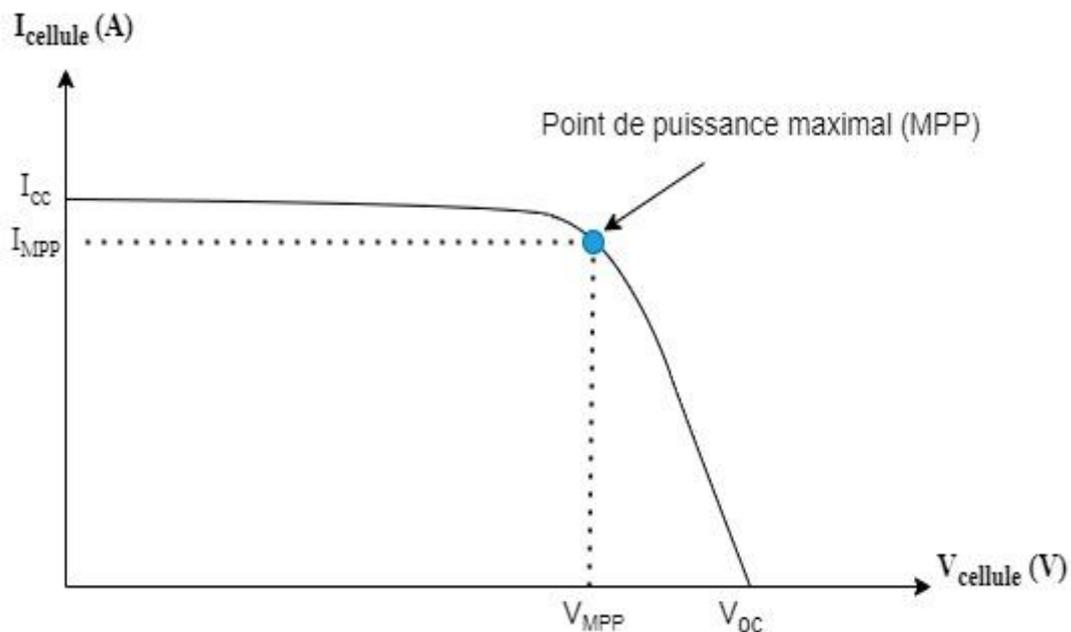


Figure 1.17 Caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque

Le courant de court circuit et la tension à vide de la cellule peuvent également être fournis par cette courbe.

1.6.2 Présentation des Onduleurs ou convertisseurs DC-AC

Les onduleurs, également appelés convertisseurs DC-AC [71], sont des appareils qui transforment le courant continu (DC) généré par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) qui peut être utilisé par les appareils électriques et les réseaux publics. Plusieurs catégories d'onduleurs existent :

- **Onduleurs centralisés** : Conviennent aux grandes installations PV, où un seul onduleur gère la conversion pour un grand nombre de modules.
- **Onduleurs string** : Utilisés pour des installations de taille moyenne, chaque onduleur string gère plusieurs rangées (strings) de modules PV [72].
- **Micro-onduleurs** : Installés individuellement sur chaque module PV, améliorant la performance et la fiabilité du système en cas d'ombrage ou de défaillance d'un module.

Impact sur l'efficacité : Les onduleurs ont une importance capitale pour améliorer l'efficacité globale du système solaire. En réduisant les pertes de conversion et en optimisant la gestion de l'énergie, des onduleurs de qualité supérieure peuvent maximiser la quantité d'électricité utilisable. Le bon fonctionnement, la fiabilité et la longévité des onduleurs jouent un rôle essentiel dans la performance à long terme du système photovoltaïque [73].

1.6.3 Systèmes de stockage d'énergie dans les installations photovoltaïques

1.6.3.1 Types de batteries : Grâce aux systèmes de stockage d'énergie, il est possible de conserver l'électricité générée par les panneaux solaires afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement, notamment lorsque la production solaire est limitée ou absente. Les divers types de batteries fréquemment employés comprennent :

- **Batteries au lithium-ion (Li-ion)** : Haute densité énergétique, longue durée de vie et faible maintenance [74].
- **Batteries au plomb-acide** : Coût initial plus bas, mais durée de vie plus courte et maintenance plus fréquente [75].
- **Autres types** : Comprennent les batteries au nickel-cadmium (NiCd), au nickel-métal-hydrure (NiMH) et autres technologies émergentes [76].

1.6.3.2 Supercondensateurs : Les supercondensateurs offrent d'autres attributs de stockage énergétique, tels que des cycles rapides de charge/décharge, une longévité accrue et une haute densité de puissance. Néanmoins, leur densité énergétique est inférieure à celle des batteries classiques, ce qui restreint leur capacité de stockage à long terme [77].

Pour faire face aux interruptions de la production solaire, il est primordial de stocker de l'énergie. Les systèmes de stockage permettent de stocker l'énergie supplémentaire générée pendant les périodes ensoleillées, assurant ainsi une alimentation électrique stable et fiable même en cas de conditions de lumière défavorables.

1.6.4 Présentation des convertisseurs DC/DC

Le rôle de ces convertisseurs consiste à réguler la tension et le courant délivrés par les modules photovoltaïques et les dispositifs de stockage, afin de les adapter aux exigences des onduleurs. Ils jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la performance du système PV en maintenant une tension et un courant optimaux [78].

- **Convertisseurs abaisseurs (buck) :** Réduisent la tension d'entrée à un niveau plus bas.
- **Convertisseurs éleveurs (boost) :** Augmentent la tension d'entrée à un niveau plus élevé.
- **Convertisseurs buck-boost :** Peuvent soit abaisser, soit élever la tension d'entrée selon les besoins.

En réduisant les pertes de conversion et en offrant une meilleure gestion de l'énergie produite par les panneaux solaires, les convertisseurs DC/DC améliorent l'efficacité du système. Ils sont particulièrement utiles dans les systèmes où la tension de sortie des modules PV doit être ajustée pour correspondre aux besoins spécifiques des onduleurs ou des batteries de stockage [79].

En utilisant les facultés propres à chaque composants, un système photovoltaïque peut être conçu pour maximiser la production d'énergie, assurer une conversion efficace et fiable de cette énergie et fournir une alimentation stable même en présence de variations dans la production solaire.

Après avoir passé en revue les principaux éléments d'une installation photovoltaïque, il est désormais important de se concentrer sur les performances et l'efficacité de ces systèmes. Comprendre ces aspects est essentiel pour évaluer leur rentabilité et leur impact environnemental, ainsi que pour identifier les leviers d'amélioration possibles.

1.7 Performances et efficacité des systèmes photovoltaïque

Les performances et l'efficacité d'un système photovoltaïque sont des éléments primordiaux et cruciaux pour maximiser la production d'électricité et garantir la viabilité économique des installations solaires. Cette section examine les principaux facteurs qui influencent l'efficacité des systèmes PV ainsi que les méthodes utilisées pour améliorer cette efficacité [80].

1.7.1 Facteurs influençant l'efficacité

1.7.1.1 Impacte de la Température : La performance des panneaux solaires est fortement influencée par la température. Habituellement, l'efficacité des cellules photovoltaïques baisse à mesure que la température augmente. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de la température accroît la résistance interne des cellules, ce qui diminue leur efficacité. Ainsi, il est crucial de concevoir des systèmes de refroidissement appropriés et de sélectionner des matériaux qui minimisent ce phénomène [81].

1.7.1.2 Impacte de l'Orientation et l'inclinaison : L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires jouent un rôle clé dans l'absorption de l'énergie solaire. L'orientation optimale dépend de la latitude du site d'installation, avec une inclinaison souvent ajustée pour maximiser l'exposition au soleil tout au long de l'année. Une mauvaise orientation ou

inclinaison peut réduire significativement la quantité d'énergie captée par les panneaux solaires [82].

1.7.1.3 Impacte des Conditions météorologiques : Les conditions météorologiques, telles que l'ensoleillement, la nébulosité, la poussière et les précipitations, affectent directement la quantité de lumière solaire disponible pour la conversion en électricité. Par exemple, une couverture nuageuse prolongée ou une pollution atmosphérique peuvent diminuer l'efficacité des systèmes photovoltaïques. La conception des systèmes doit prendre en compte ces variations pour optimiser la performance sur une base annuelle [83].

1.7.2 Méthodes d'amélioration de l'efficacité

1.7.2.1 Suiveurs solaires : Les suiveurs solaires (Figure 1.18) sont des dispositifs mécaniques qui orientent les panneaux solaires afin qu'ils soient toujours face du soleil tout au long de la journée. En ajustant constamment l'angle des panneaux pour qu'ils soient perpendiculaires aux rayons du soleil, les suiveurs solaires peuvent augmenter la quantité d'énergie capturée, améliorant ainsi l'efficacité globale du système PV [84]. Il existe deux principaux types de suiveurs solaires : à axe unique et à double axe.



Figure 1.18 Suiveur solaire

1.7.2.2 Refroidissement actif et passif : Afin de lutter contre les conséquences néfastes de la température sur l'efficacité des cellules photovoltaïques, il est possible d'utiliser des méthodes de refroidissement actif et passif. Le refroidissement actif ou direct consiste à utiliser des équipements comme des aérateurs ou des systèmes de refroidissement par fluide afin de faire expulser la chaleur retenue par les panneaux. Le refroidissement passif, de son côté, utilise des techniques de conception telles que l'écartement de l'espace entre les panneaux afin d'améliorer le flux de l'air ou l'emploi de matériaux à haute conductivité thermique pour favoriser la dissipation naturelle de la chaleur [85].

1.7.2.3 Innovations matérielles : Des innovations matérielles constantes visent à améliorer l'efficacité des cellules photovoltaïques. L'emploi de matériaux sophistiqués comme les pérovskites est une des avancées technologiques qui favorisent la réalisation de taux de transformation plus significatifs tout en réduisant idéalement les coûts de production. De plus, l'intégration de structures nanométriques dans les cellules PV peut augmenter l'absorption de la lumière et réduire les pertes par réflexion. Les recherches se concentrent également sur le développement de cellules tandem, qui combinent plusieurs couches de matériaux pour capturer un spectre plus large de la lumière solaire [86].

Ces stratégies et technologies jouent un rôle crucial dans l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques, contribuant ainsi à rendre l'énergie solaire plus compétitive et durable.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse approfondie des avancées actuelles dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque a été exposée. Les multiples technologies de cellules photovoltaïques ont été étudiées, en décrivant en détail leurs principes de fonctionnement, leurs bénéfices et leurs contraintes. Grâce à cette exploration, il est devenu plus évident comment chaque technologie joue un rôle dans la production d'énergie solaire et les défis spécifiques auxquels elles font face.

Les différents types de centrales solaires ont également été traités, en décrivant les configurations les plus courantes et leurs applications particulières. Cette analyse globale des installations solaires a révélé les différentes méthodes employées pour capter et convertir l'énergie solaire. En résumé, ce chapitre a donné une vue d'ensemble complète des avancées technologiques dans le domaine de l'énergie solaire. Les connaissances obtenues constituent une fondation solide pour saisir les solutions concrètes disponibles pour relever les défis énergétiques actuels.

Après avoir examiné en détail les technologies photovoltaïques et les éléments constitutifs d'une installation, nous allons dans le prochain chapitre nous intéresser à la modélisation mathématique des différents composants des systèmes photovoltaïques. Cette étape est cruciale pour analyser leur comportement dynamique et concevoir des stratégies de gestion optimisées, ajustées aux particularités propres à chaque composant et aux conditions d'utilisation.

CHAPITRE 2

MODELISATION MATHÉMATIQUE DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

2.1 Introduction

Les dispositifs photovoltaïques comme vue dans le précédent chapitre, représentent des technologies avancées conçues pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable. Les composants fondamentaux de ces dispositifs jouent un rôle déterminant dans l'efficacité et la fiabilité du système photovoltaïque. Une compréhension approfondie de ces éléments, ainsi que de leurs interactions (Figure 2.1), est indispensable pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques.

Ce chapitre a pour but d'expliquer minutieusement le fonctionnement des différentes parties des systèmes photovoltaïques, en présentant la modélisation mathématique de chaque élément. Nous débuterons en représentant les systèmes de production d'énergie solaire, puis nous étudierons les systèmes de stockage d'énergie et les composants d'électronique de puissance, qui gèrent et convertissent l'énergie solaire. Par la suite, nous aborderons les problématiques liées au stockage par batteries, qui constituent la principale problématique de cette thèse, et examinerons les solutions potentielles pour surmonter ces défis.

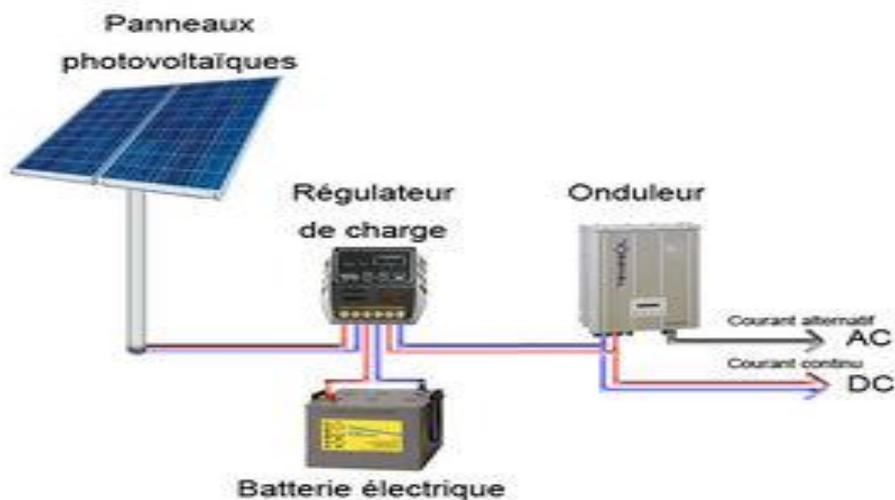


Figure 2.1 Schémas d'une installation photovoltaïque autonome

2.2 Présentation des composants d'un système photovoltaïque

2.2.1 Cellule Photovoltaïque

- **Fonction** : La cellule solaire est l'élément de base essentiel de tout système photovoltaïque. Grâce à l'effet photovoltaïque, elle est chargée de convertir directement la lumière solaire en électricité.

- **Matériaux** : Habituellement, les cellules sont conçues à partir de semi-conducteurs comme le silicium. (monocristallin, polycristallin ou amorphe).
- **Principe de fonctionnement** : Lorsque la lumière solaire frappe la cellule, elle excite les électrons, créant un courant électrique.

2.2.2 Module Photovoltaïque

- **Composition** : Un module photovoltaïque se compose d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles, encapsulées pour leur protection et fixées sur une structure stable.
- **Fonction** : Les modules permettent une augmentation de la puissance et de la tension de sortie afin de les adapter à des applications pratiques.

2.2.3 Générateur Photovoltaïque

- **Assemblage** : Plusieurs modules photovoltaïques sont connectés pour former un générateur photovoltaïque.
- **Rôle** : La puissance du générateur est adéquate pour alimenter des charges électriques ou pour être injectée dans le réseau électrique..

2.2.4 Convertisseur DC-DC

- **Fonction** : Les convertisseurs DC-DC modifient la tension et le courant générés par les panneaux solaires ou les dispositifs de stockages afin d'améliorer le transfert d'énergie.
- **Types** : Les différentes configurations des convertisseurs comprennent Buck, Boost et Buck-Boost, chacune ayant des applications particulières en fonction des exigences de tension et de courant.

2.2.5 Convertisseur DC-AC

- **Fonction** L'onduleur transforme le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires photovoltaïques en courant alternatif (AC) qui peut être utilisé par les appareils électriques.
- **Types** : Les onduleurs peuvent être monophasés ou triphasés selon les exigences du système et la taille de l'installation.

2.2.6 Dispositif de Stockage d'Énergie

- **Rôle** : En utilisant des batteries ou d'autres systèmes de stockage tels que les supercondensateurs, il est possible de stocker l'énergie supplémentaire pour une utilisation ultérieure, ce qui renforce la fiabilité du système photovoltaïque en fournissant de l'énergie même en l'absence de soleil.

2.3 Le rôle crucial de la modélisation mathématique dans l'analyse, la fabrication et l'amélioration des systèmes photovoltaïques

La modélisation mathématique est un outil essentiel pour l'analyse, la conception et l'optimisation des systèmes photovoltaïques [87]. Voici quelques raisons clés de son importance :

a. La Précision de l'analyse des Performances

- **Prévisions** : Les modèles mathématiques permettent d'anticiper et de prévoir les performances des systèmes photovoltaïques sous diverses conditions environnementales (température, irradiance).
- **Caractérisation** : Ils aident à caractériser les comportements des cellules, modules et systèmes entiers, facilitant ainsi l'identification de problèmes potentiels et les diagnostics.

b. Optimisation du Système

- **Dimensionnement** : Les modèles aident à dimensionner correctement les composants du système (taille des modules, capacité des batteries, etc.) pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques.
- **Efficacité** : Les modèles mathématiques permettent d'optimiser les paramètres de fonctionnement (comme le point de puissance maximale - MPPT) pour maximiser l'efficacité énergétique.

c. Conception Fiable et Durable

- **Simulation** : Les modèles permettent de simuler différents scénarios de fonctionnement avant la mise en place réelle, réduisant les risques de dysfonctionnements.
- **Durabilité** : En anticipant les dégradations potentielles et les comportements à long terme, ils contribuent à la conception de systèmes plus durables et fiables.

d. Intégration et Contrôle

- **Contrôle Avancé** : Des modèles mathématiques servent à la création d'algorithmes de contrôle pour une gestion optimale de l'énergie, incluant les méthodes de stockage et de distribution.
- **Intégration Réseau** : Ils facilitent l'intégration des systèmes PV avec les réseaux électriques, assurant une injection d'énergie stable et conforme aux normes.

2.4 Modélisation de la Cellule Photovoltaïque

2.4.1 Modèle Électrique

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, la conception des cellules photovoltaïques joue un rôle crucial dans la conversion photovoltaïque, qui repose sur le principe de la conversion directe de la lumière solaire en électricité. Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules qui sont connectées de manière spécifique, et un générateur photovoltaïque est formé d'un ensemble de module. Ces composants sont dans la majorité des cas fabriqués à partir de semi-conducteurs tels que le silicium.

Afin d'approfondir la compréhension et l'étude des caractéristiques des cellules photovoltaïques, divers modèles ont été créés. Ces modèles commencent par représenter une cellule idéale avant de se développer vers des représentations plus complexes qui tiennent compte des pertes physiques de la cellule [88]. La cellule photovoltaïque classique est

constituée d'un générateur de courant et d'une diode, également connue sous le nom de modèle idéal de la cellule. On ajoute fréquemment deux résistances à ce modèle : une résistance en série et une résistance en parallèle. La figure 2.2 illustre le circuit électrique équivalent à une diode pour la cellule photovoltaïque [89].

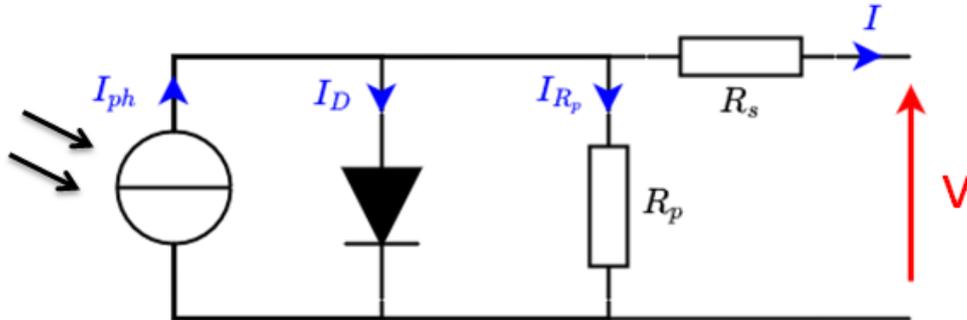


Figure 2.2 Schémas du model de la cellule photovoltaïque

2.4.2 Modèle à Diode Idéale

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{qV + IR_s}{kTcA} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (2.1)$$

- **I** : Courant traversant la cellule solaire.
- **I_{ph}** : Courant généré par la lumière.
- **I_s** : Courant de saturation inverse, en fonction des matériaux de la cellule solaire.
- **V** : Tension aux bornes de la cellule solaire.
- **R_s** : Résistance série, tenant compte de la résistance interne.
- **k** : Constante de Boltzmann.
- **q** : Charge d'un électron.
- **A** : Facteur d'idéalité de la diode.
- **R_p** : Résistance parallèle.
- **T_c** : Température (Kelvin).

2.4.3 Modélisation du Module Photovoltaïque

2.4.3.1 Association des Cellules

a. En Série

Lorsque des cellules photovoltaïques sont disposées en série, les tensions des cellules s'additionnent, tandis que le courant reste identique à travers l'ensemble de la chaîne. Cette configuration en série est illustrée dans la figure 2.3.

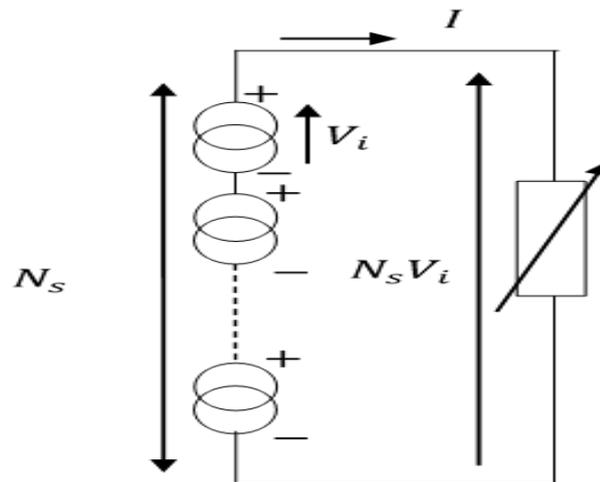


Figure 2.1. Association de cellules en série.

b. En Parallèle

En associant les cellules en parallèle, il est nécessaire d'ajouter les courants de chaque cellule, tandis que la tension demeure la même. L'association des cellules en parallèle est illustrée dans la figure 2.4.

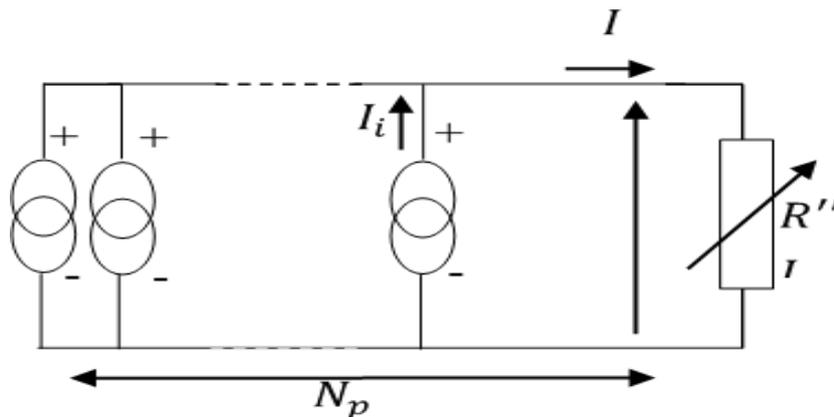


Figure 2.2. Groupement de cellules en parallèle.

c. Série/Parallèle

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de modules photovoltaïques branchés en série et en parallèle, assemblés sous forme de panneaux photovoltaïques, comme le montre la figure 2.5. La caractéristique électrique globale courant/tension du générateur photovoltaïque est théoriquement obtenue en combinant les caractéristiques des cellules élémentaires identiques qui le composent. On réalise cette combinaison en prenant en considération deux facteurs d'échelle : un facteur N_s pour l'axe des tensions, qui indique le nombre total de cellules en série, et un facteur N_p pour l'axe des courants, qui se rapporte au nombre total de cellules en parallèle.

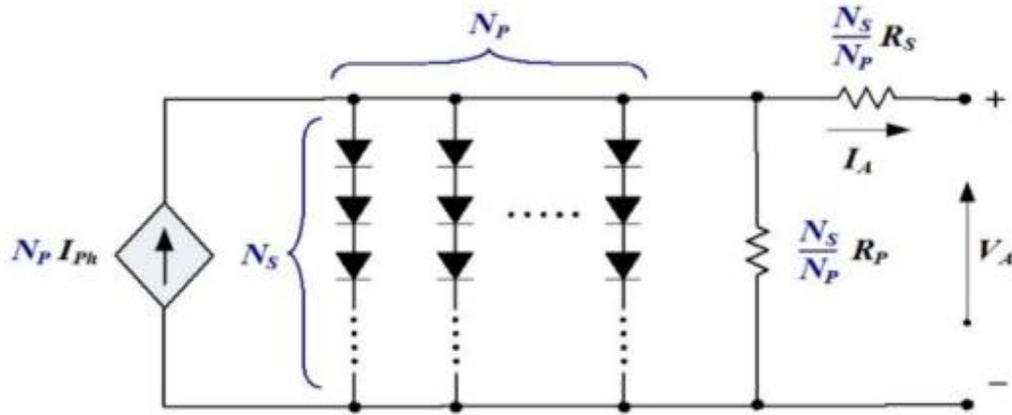


Figure 2.3 Connexion de cellules mixte

Afin d'atteindre des niveaux de tension et de courant désiré, les systèmes photovoltaïques utilisent fréquemment une combinaison d'associations en série et en parallèle. On désigne cette configuration sous le nom de matrice série-parallèle.

L'équation suivante représente le courant de sortie d'un générateur photovoltaïque (GPV) en tenant compte des paramètres de résistance série et de résistance shunt ainsi que du nombre de cellules en série et en parallèle.

$$I = I_{ph} - I_d \left(e^{\left(\frac{V + IR_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{a N_s V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + IR_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{R_{sh} \cdot \frac{N_s}{N_p}} \quad (2.2)$$

- **I** : Courant du générateur photovoltaïque.
- **I_{ph}** : Courant photo-généré, proportionnel à l'irradiance lumineuse.
- **I_d** : Courant de diode, représentant les pertes par recombinaison au sein des cellules PV.
- **V** : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.
- **RS** : Résistance série, représentant les pertes ohmiques dans les connexions internes des cellules.
- **RSh** : Résistance shunt, représentant les pertes par fuite de courant au travers des cellules.
- **NS**: Nombre de cellules connectées en série.
- **NP** : Nombre de branches connectées en parallèle.
- **a** : Facteur d'idéalité de la diode, une constante dépendant de la technologie de la cellule PV.
- **V_t** : Tension thermique, donnée par $V_t = kT/q$ où, q est la charge de l'électron, T est la température absolue en Kelvin, et k est la constante de Boltzmann.

Si les cellules photovoltaïques transforment l'énergie solaire en électricité, leur performance dépend des conditions météorologiques. Les performances des cellules photovoltaïques sont

principalement influencées par deux éléments : l'intensité du rayonnement solaire reçu et la température ambiante. Il est crucial de saisir l'influence de ces éléments afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques [90].

L'irradiation solaire incidente a un impact direct sur la production d'électricité des cellules photovoltaïques, généralement exprimée en kilowatts par mètre carré (kW/m^2). Bien qu'il ne s'agisse pas d'une relation strictement linéaire, une exposition accrue au soleil entraîne en général une augmentation de la production d'énergie. Il est également possible que la température ambiante affecte les performances des cellules photovoltaïques. En effet, l'équation précédente démontre parfaitement qu'une hausse de la température augmente la tension aux bornes des cellules, ce qui réduit l'efficacité du système. Ce phénomène est lié à la croissance de la mobilité des charges et aux caractéristiques des matériaux semi-conducteurs utilisés. Pour limiter au maximum les effets indésirables de la température, il est essentiel que les ingénieurs intègrent des dispositifs de refroidissement et de ventilation optimisés [91].

2.4.3.2 Courbes caractéristiques I-V et P-V du Module

La courbe I-V et P-V (Figure 2.6 et 2.7) d'un module est calculée en se basant sur les propriétés de chaque cellule et leur interaction en série et en parallèle. Elles représentent les caractéristiques non linéaires d'un module photovoltaïque pour des conditions d'éclairement et de température spécifiques [92].

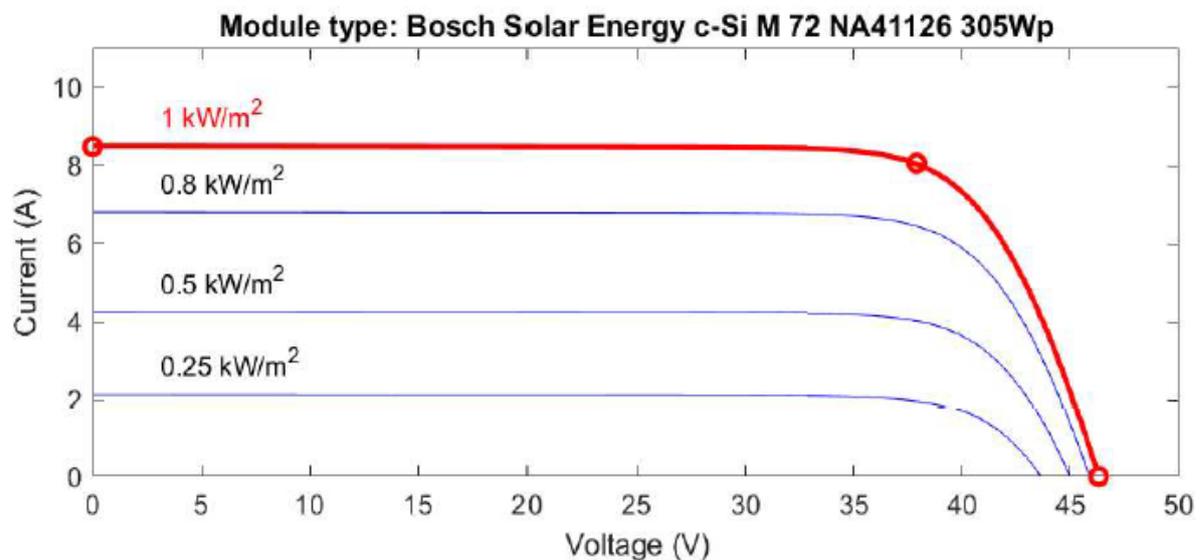


Figure 2.6 Courbe I-V du module photovoltaïque

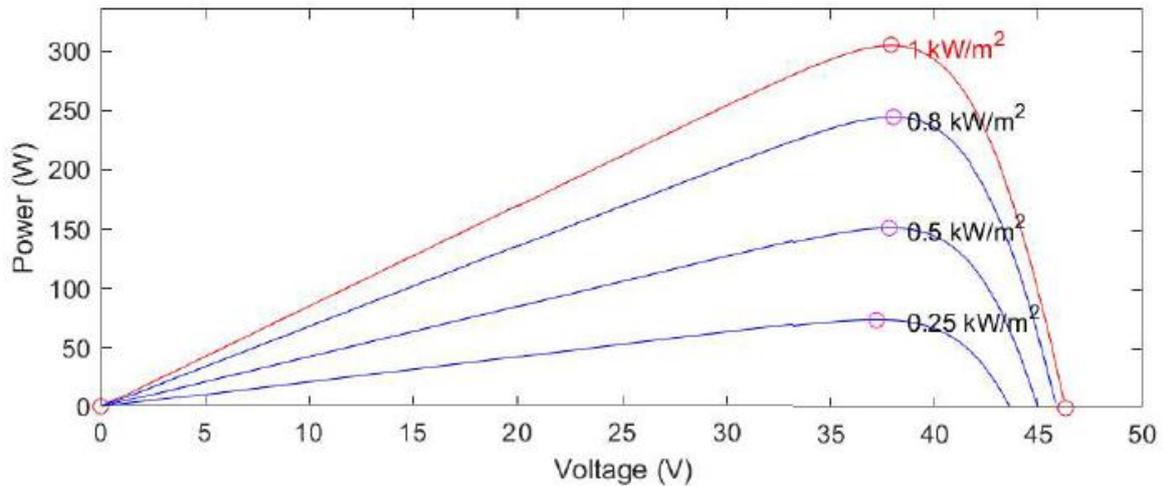


Figure 2.7 Courbe P-V du module photovoltaïque

2.5 Modélisation mathématique des Convertisseur DC/DC (Hacheurs)

Les hacheurs, aussi connus sous le nom de convertisseurs DC/DC, sont des appareils électroniques indispensables pour contrôler la tension ou le courant dans un circuit électrique en ajustant le rapport cyclique (α) [93]. Dans différentes applications, ces convertisseurs ont un rôle essentiel, comme les alimentations à découpage et les convertisseurs de puissance. Ce texte examine les principes essentiels du fonctionnement des hacheurs, les diverses catégories disponibles, et expose quelques formules essentielles qui y sont liées.

Le rapport cyclique, connu sous le nom de (α), correspond à la proportion du temps nécessaire pour que le signal soit actif par rapport à la durée totale du signal. En modifiant cette proportion, les hacheurs peuvent réguler la tension ou le courant qui est délivré à la charge.

Le hacheur Boost et le hacheur Buck-Boost sont les hacheurs les plus fréquemment employés dans les applications photovoltaïques [94].

Le hacheur Boost est employé pour ajuster la tension de sortie du générateur photovoltaïque. Il est contrôlé par une technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui varie le rapport cyclique (α) en fonction des conditions météorologiques afin d'extraire le maximum de puissance disponible. Le schéma électrique de ce type de hacheur est illustré à la figure 2.8.

Le convertisseur Buck-Boost est employé comme régulateur de charge pour des dispositifs de stockage. Il permet de gérer efficacement les processus de charge et de décharge du système de stockage en fonction des exigences de consommation et de la disponibilité de l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques. Le diagramme fonctionnel de ce convertisseur est illustré à la figure 2.10.

D'autres types de hacheurs vont être étudiés et comparés par la suite dans ce chapitre.

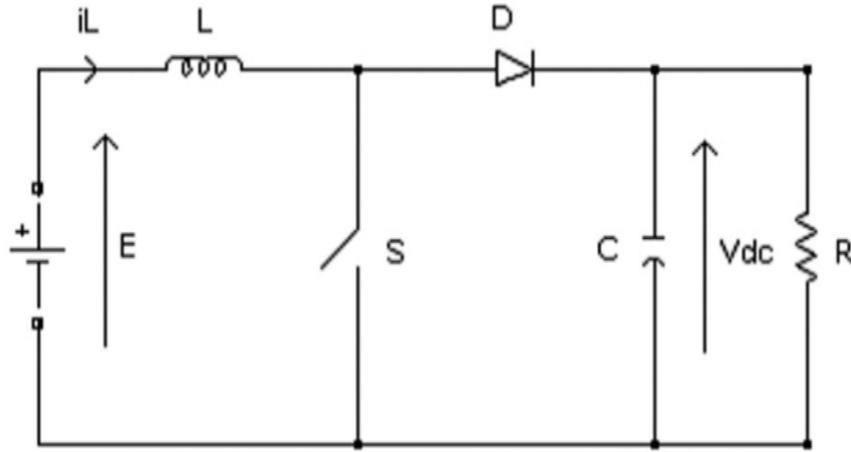


Figure 2.8. Schémas du Modèle du hacheur Boost.

2.5.1 Modèle idéal du hacheur Boost

Si l'on suppose que le semi-conducteur commandé (Sw) est un interrupteur idéal, avec des capacités (CE et Cs) et une inductance (L) idéales, le hacheur boost peut être représenté à l'aide des équations différentielles ordinaires suivantes :

$$C_e \frac{dV_e}{dt} = (1 - u)i_l - \frac{V_e}{R} - i_s \quad (2.3)$$

$$L \frac{di_l}{dt} = V_e - (1 - u)V_e \quad (2.4)$$

$$V_s = Ri \quad (2.5)$$

Dans les contextes pratiques, on pourrait ajouter une résistance interne à l'inductance (RL) et une résistance interne à la capacité (RC) au modèle antérieure.. On transforme les équations (2.4) et (2.5) :

$$C_e \frac{dV_{ce}}{dt} = (1 - u) - \frac{V_s}{R} - u \quad (2.6)$$

$$L \frac{di_l}{dt} = V_e - (1 - u)V_s - R_l i_l \quad (2.7)$$

$$V_s = V_c + R_c * C_e \frac{dV_e}{dt} \quad (2.8)$$

En substituant (2.8) dans (2.6), on obtient :

$$C_e \frac{dV_c}{dt} = (1 - u)i_l - \frac{V_e}{R} - \frac{R_{ce}}{R} - \frac{R_{ce}}{R} * C_e \frac{dV_c}{dt} - i_s \quad (2.9)$$

Ce qui donne :

$$\left(1 + \frac{R_c}{R}\right) * C \frac{dV_c}{dt} = (1 - u)i_l - \frac{V_c}{R} - i_s \quad (2.10)$$

Et:

$$\left(\frac{R + R_c}{R}\right) * C \frac{dV_c}{dt} = (1 - u)i_l - \frac{V_c}{R} - i_s \quad (2.11)$$

D'où :

$$C \frac{dV_c}{dt} = \left(\frac{R}{R + R_c}\right) (1 - u)i_l - \frac{V_c}{R + R_{ce}} - \frac{R}{R + R_{ce}} i_s \quad (2.12)$$

L'expression (2.8) devient :

$$V_s = V_{ce} + R_{ce} * \left(\frac{R}{R + R_{ce}}\right) (1 - u)i_l - \frac{R_c}{R + R_{ce}} - \frac{RR_c}{R + R_{ce}} i_s \quad (2.13)$$

Par le développement de cette expression de V_s on obtient :

$$V_s = \frac{V_{ce} R}{R + R_{ce}} + \frac{R_{ce} R}{R + R_{ce}} [(1 - u)i_l - i_s] \quad (2.14)$$

$$i_l = \frac{1}{l} \int (V_E - (1 - u)V_s - R_l i_l) dt \quad (2.15)$$

- (u) étant la position de l'interrupteur qui peut prendre comme valeur 0 ou 1.

2.5.2 Principe de fonctionnement du Hacheur Boost

On peut expliquer le fonctionnement de ce genre de hacheur comme suit : Si l'interrupteur Sw est positionné à la position 1, le circuit est divisé en deux parties. À gauche, la source charge l'inductance et à droite, la capacité maintient la tension de sortie grâce à l'énergie qu'elle a déjà stockée. Lorsque l'interrupteur est en position 0, il alimente le circuit à droite avec la source DC et l'énergie accumulée dans l'inductance, ce qui augmente la tension de sortie. On peut le voir dans la Figure 2.9.

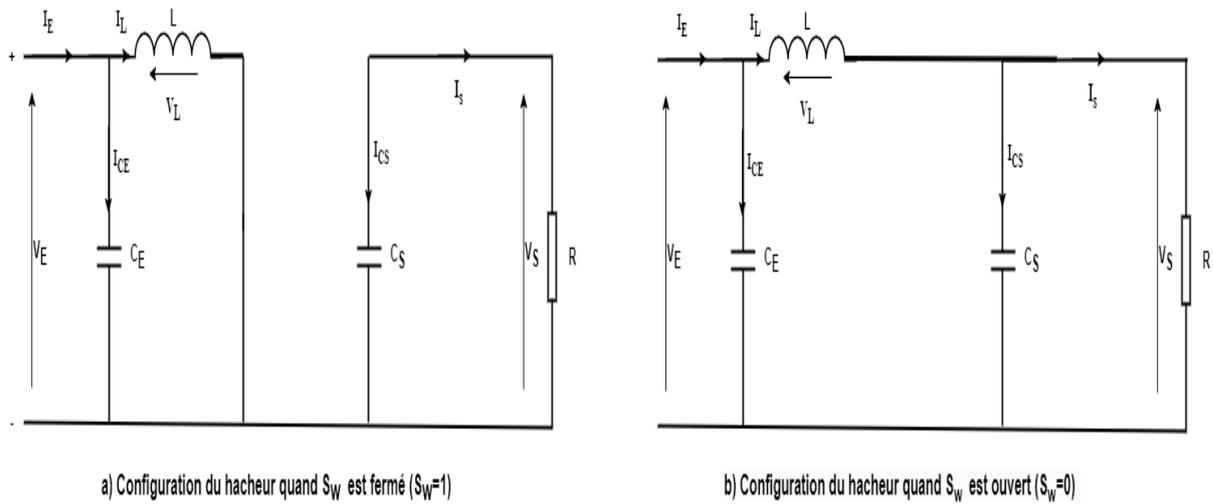


Figure 2.9. Les différentes configurations possibles d'un hacheur Boost.

2.5.3 Modèle du Hacheur Buck-Boost

Dans la figure 2.10, on peut observer que le convertisseur DC/DC Buck-Boost présente une tension de sortie différente de la tension originale. La variation de son amplitude par rapport à la tension d'entrée est directement influencée par la valeur du rapport cyclique.

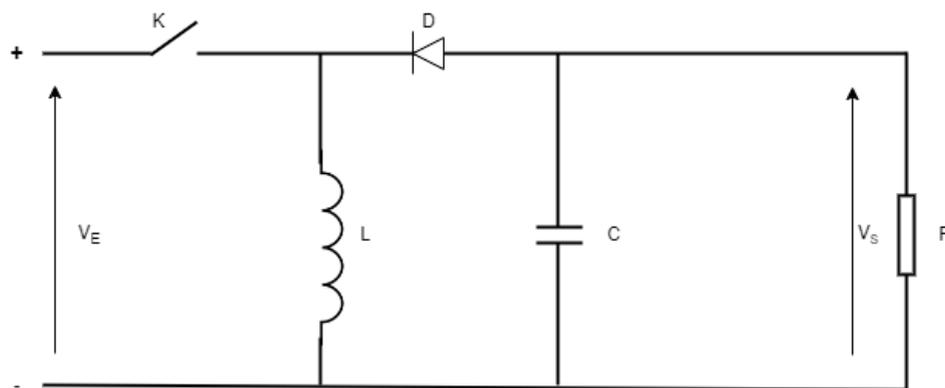


Figure 2.10. Modèle du hacheur Buck-Boost.

Il est possible de définir l'expression mathématique de la tension de sortie :

$$V_S = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_E \quad (2.16)$$

L'ondulation du courant dans l'inductance et la tension de sortie sont exprimées par les relations (2.17) et (2.18), respectivement :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_E}{L f} \quad (2.17)$$

$$\Delta V_S = \frac{\alpha I_S}{C f} \quad (2.18)$$

Où,

- V_E est la tension d'entrée du hacheur ;
- V_S est la tension de sortie du hacheur ;
- α est le rapport cyclique ;
- C est la valeur de la capacité ;
- L est la valeur de l'inductance ;
- I_L est le courant qui traverse l'inductance ;
- I_S est le courant qui traverse la charge.

Bien qu'il existe d'autres types de hacheurs que nous ne développerons pas dans cette thèse, le tableau 2.1 résume les principaux rapports de transformation du transformateur d'isolement (K) et les rapports cycliques (α) pour les différentes structures des hacheurs avec et sans isolement galvanique.

Tableau 2.1. Rapport cyclique des différents types de hacheurs [71].

Convertisseur	Rapport cyclique	Isolement galvanique
Buck	α	Non
Boost	$\frac{1}{1 - \alpha}$	Non
Buck - Boost	$\frac{-\alpha}{1 - \alpha}$	Non
Cuk	$\frac{-\alpha}{1 - \alpha}$	Non
Sepic	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$	Non
Flyback	$K \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	OUI
Push - Pull	$K\alpha$	OUI
Forward	$K\alpha$	OUI

2.6 Description des dispositifs de stockage

L'incorporation grandissante des ressources renouvelables dans les dispositifs d'énergie contemporains complexifie les enjeux associés au stockage de l'énergie. Les systèmes de stockage jouent un rôle crucial en équilibrant la production énergétique et les besoins de consommation, notamment dans le contexte des sources d'énergie intermittentes comme le solaire. La performance de ces appareils repose sur leur aptitude à respecter des critères de performance stricts, tout en conservant une viabilité budgétaire, ce qui représente l'un des défis majeurs de la transition énergétique [96].

Il n'est pas possible de stocker directement l'énergie électrique, il faut la convertir en d'autres formes (mécanique, électrochimique, etc.) qui peuvent être conservées et restituées sous forme électrique au moment opportun. Cette conversion revêt une importance capitale pour optimiser l'utilisation des énergies durables et assurer la stabilité et la solidité des réseaux électriques face aux fluctuations d'exploitation et de production.

Par ailleurs, la sélection des technologies de stockage est déterminée par la durée nécessaire à la conservation de l'énergie ainsi que par les contraintes spécifiques liées aux caractéristiques et aux besoins du système énergétique en question. Les options sont multiples, allant des batteries électrochimiques, qui proposent des réponses rapides pour des applications de courte durée, aux systèmes de stockage par pompage-turbinage, qui conviennent à des réserves permanentes. Ainsi, il est essentiel d'améliorer ces systèmes de stockage afin de réduire la dépendance aux énergies polluantes et de favoriser une transition vers un mix énergétique plus écologique et respectueux de l'environnement.

Le développement et l'innovation dans le domaine des technologies de stockage d'énergie sont donc indispensables pour soutenir la transition énergétique mondiale [97]. La bonification de la densité énergétique, de la durée de vie, de l'efficacité de conversion et du coût opérationnel des systèmes de stockage nécessite des efforts continus et constants.

2.6.1 Stockage par batteries (stockage électrochimiques)

- **Batteries lithium-ion** : Les batteries lithium-ion sont couramment déployées en raison de leur densité énergétique élevée et de leur rendement énergétique optimal. Elles sont particulièrement adaptées pour le stockage à court terme, tel que dans les systèmes de stockage d'énergie photovoltaïque, ainsi que pour des applications non stationnaires et mobiles à forte demande de puissance, comme les véhicules électriques [98].
- **Batteries à flux** : Les batteries à flux font appel à des solutions électrolytiques contenues dans des réservoirs externes, ce qui leur confère une grande souplesse pour des applications de stockage à importante échelle et une période de vie étendue.

2.6.2 Stockage mécanique

- **Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)** : Elles utilisent l'énergie excédentaire pour pomper de l'eau vers un réservoir en altitude. Cette eau est ensuite relâchée pour produire de l'électricité via des turbines hydroélectriques lorsque la demande est élevée.

- **Volants d'inertie** : Ils stockent l'énergie en augmentant la vitesse de rotation d'un rotor massif. Cette énergie est ensuite récupérée en réduisant la vitesse de rotation, fournissant de l'électricité rapidement en cas de besoin.

2.6.3 Stockage thermique

- **Stockage thermique sensible** : Ce mode stocke l'énergie sous forme de chaleur dans des matériaux comme l'eau ou les fluides caloporteurs. Utilisé souvent dans les centrales solaires thermodynamiques, il permet de générer de l'électricité même en l'absence de soleil.
- **Stockage thermique latent** : Pour stocker et restituer l'énergie, il exploite la chaleur latente de fusion ou de vaporisation des matériaux à changement de phase.

2.6.4 Stockage par Supercondensateurs

- Ils conservent l'électricité sans utiliser de processus chimiques, ce qui permet des périodes de charge et de décharge particulièrement rapides. Bien que leur densité énergétique soit inférieure à celle des batteries, Ils conviennent parfaitement à des applications qui requièrent des apports d'énergie rapides.

Le diagramme de Ragone illustré dans la figure 2.11 permet de visualiser clairement que :

Les batteries : elle sont idéales pour des applications nécessitant un bon compromis entre capacité de stockage et puissance délivrée.

Les piles à combustible : sont plus adaptées pour des applications nécessitant un stockage d'énergie à long terme avec des besoins en puissance moins immédiats.

Les supercondensateurs : sont parfaits pour des applications où des décharges rapides et puissantes sont nécessaires sur une courte durée.

Le Diagramme de Ragone est un outil majeur pour déterminer la meilleure technologie de stockage pour des applications spécifiques en fonction des aspirations en termes de densité énergie et de puissance [99].

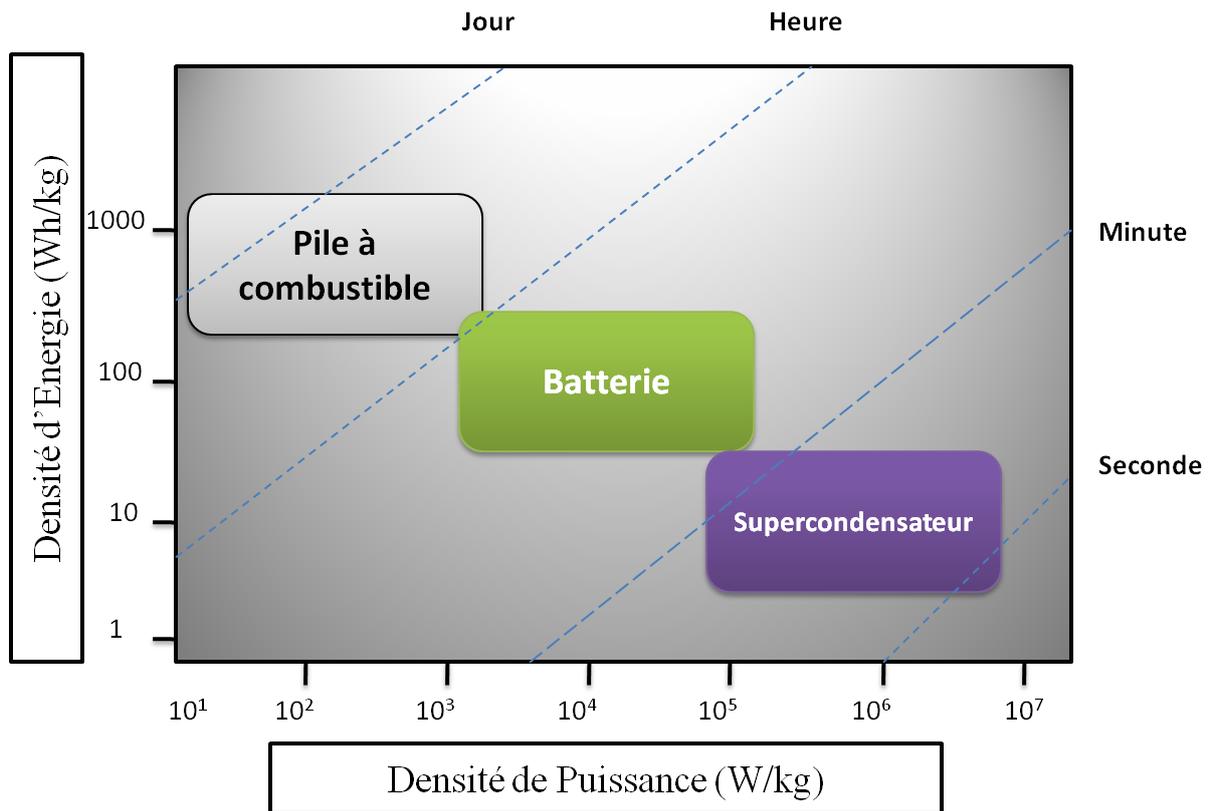


Figure 2.11 : Diagramme de Ragone [99]

2.7 Synthèse des accumulateurs électrochimiques

Cette section se concentre sur une analyse approfondie des principales catégories de batteries électrochimiques, notamment les batteries plomb-acide, lithium-ion (Li-Ion), nickel-cadmium (NiCd) et nickel-métal hydrure (NiMH). Chacune de ces technologies présente des caractéristiques distinctes en termes de principes de fonctionnement, d'avantages et d'inconvénients, et joue un rôle crucial dans divers domaines d'application.

2.7.1 Batteries de type Plomb-Acide

Principe de fonctionnement : Les batteries plomb-acide sont composées de plaques d'électrodes en plomb (Pb) et en dioxyde de plomb (PbO₂), immergées dans une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄). Lors de la décharge, une réaction chimique entre ces composants génère de l'électricité, tandis que la charge inverse permet de reconstituer les électrodes [100].

Avantages :

- **Coût :** Les batteries plomb-acide sont parmi les plus économiques disponibles sur le marché, bénéficiant d'une technologie éprouvée et d'une production en masse qui réduit les coûts.

- **Robustesse** : Elles fonctionnent efficacement dans des conditions de basse température et sont capables de supporter des abus de charge, ce qui en fait une option fiable pour de nombreuses applications, y compris les systèmes de secours et les véhicules lourds.
- **Recyclabilité** : Le taux de recyclage des batteries plomb-acide est élevé, atteignant jusqu'à 95 %. Les matériaux peuvent être récupérés et réutilisés, contribuant ainsi à une économie circulaire.

Inconvénients :

- **Densité énergétique** : Leur faible densité énergétique, généralement entre 25 et 55 Wh/kg, limite leur usage dans des applications nécessitant une grande capacité d'énergie dans un espace restreint.
- **Cycle de vie** : Elles ont une durée de vie limitée, avec un nombre de cycles de charge/décharge de 450 à 800, ce qui peut augmenter les coûts à long terme pour les utilisateurs.
- **Maintenance** : Les batteries plomb-acide nécessitent un entretien régulier pour prévenir la sulfatation, qui peut diminuer leur performance et leur durée de vie.
- **Impact environnemental** : La présence de plomb pose des défis considérables en matière de sécurité environnementale et de santé, rendant leur gestion en fin de vie problématique.

2.7.2 Batteries de type Lithium-Ion (Li-Ion)

Principe de fonctionnement : Les batteries lithium-ion fonctionnent grâce au mouvement d'ions lithium entre l'anode (souvent en graphite) et la cathode (un oxyde métallique comme LiCoO_2), le tout étant immergé dans un électrolyte liquide ou solide. Cette migration d'ions permet de stocker et de libérer de l'énergie [101].

Avantages :

- **Haute densité énergétique** : Avec des capacités pouvant atteindre 150 à 250 Wh/kg, elles sont idéales pour des applications où l'espace et le poids sont critiques, comme dans les Smartphones, ordinateurs portables et véhicules électriques.
- **Efficacité** : Les batteries Li-Ion ont un rendement de conversion élevé, souvent supérieur à 80 %, ce qui signifie qu'une grande partie de l'énergie stockée est utilisable.
- **Cycle de vie** : Elles offrent une longévité remarquable, avec plusieurs milliers de cycles de charge, réduisant les coûts de remplacement sur le long terme.
- **Autodécharge faible** : Leur faible taux d'autodécharge permet de conserver la charge pendant de longues périodes sans utilisation, ce qui est un avantage significatif.

Inconvénients :

- **Coût** : Les matériaux nécessaires à la fabrication, comme le lithium et le cobalt, sont relativement coûteux et leur volatilité sur le marché peut affecter les prix.
- **Sécurité** : En cas de surcharge ou d'endommagement physique, les batteries Li-Ion peuvent se retrouver exposées à des dangers de surchauffe et d'incendie, ce qui requiert des dispositifs de gestion thermique avancés.

- **Disponibilité des ressources :** La concentration des réserves de lithium et de cobalt dans certaines régions soulève des préoccupations concernant la durabilité et l'impact environnemental de leur extraction.

2.7.3 Batteries Nickel-Métal Hydrure (NiMH)

Principe de fonctionnement : Les batteries NiMH sont constituées d'un alliage d'hydrure métallique pour l'anode et d'oxyhydroxyde de nickel pour la cathode, avec un électrolyte alcalin. Ce système permet une réaction chimique efficace pour le stockage et la libération d'énergie [102].

Avantages :

- **Sécurité :** Elles sont considérées comme plus sûres que les batteries lithium-ion en raison de leur résistance au feu et à la fuite, ce qui les rend adaptées à des applications domestiques et industrielles.
- **Cycle de vie :** Les batteries NiMH tolèrent bien les cycles de charge/décharge partiels, ce qui est particulièrement utile dans des applications où la recharge fréquente est nécessaire.
- **Impact environnemental :** Moins toxiques que leurs homologues au plomb et au cadmium, les batteries NiMH sont plus faciles à gérer en fin de vie.

Inconvénients :

- **Densité énergétique :** Avec une densité énergétique moyenne de 60 à 120 Wh/kg, elles sont moins adaptées que les batteries lithium-ion pour des applications nécessitant une grande capacité d'énergie.
- **Effet mémoire :** Sensibles à l'effet mémoire, elles peuvent voir leur capacité réduite si elles ne sont pas régulièrement complètement déchargées.
- **Auto-décharge :** Leur taux d'autodécharge est plus élevé que celui des batteries Li-Ion, entraînant une perte d'énergie plus rapide lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

2.7.4 Batteries Nickel-Cadmium (NiCd)

Principe de fonctionnement : Les batteries nickel-cadmium utilisent du cadmium métallique pour l'anode et l'oxyhydroxyde de nickel pour la cathode, avec un électrolyte alcalin. Cette configuration permet d'obtenir une performance stable même dans des conditions difficiles [103].

Avantages :

- **Robustesse :** Les batteries NiCd montrent une grande résistance aux températures extrêmes et conservent leur capacité à fournir de l'énergie dans des conditions variées.
- **Cycle de vie :** Leur longue durée de vie et leur capacité à résister à des cycles de charge/décharge répétés en font une option solide pour des applications industrielles et de secours.
- **Tolérance aux abus :** Elles peuvent gérer des situations de surcharge et de décharge profonde, offrant ainsi une flexibilité d'utilisation.

Inconvénients :

- **Densité énergétique** : Leur densité énergétique relativement faible, entre 40 et 60 Wh/kg, limite leur utilisation par rapport à d'autres technologies plus modernes.
- **Effet mémoire** : Très sensibles à l'effet mémoire, elles nécessitent des décharges complètes périodiques pour maintenir leur capacité, ce qui peut être contraignant pour l'utilisateur.
- **Impact environnemental** : L'utilisation de cadmium, un métal hautement toxique, pose de graves problèmes environnementaux et de santé, ce qui rend leur gestion en fin de vie complexe.
- **Auto-décharge** : Les batteries NiCd présentent un taux d'auto-décharge relativement élevé, ce qui peut entraîner une perte d'énergie significative lorsqu'elles ne sont pas utilisées.

Les avantages et les désavantages de chaque type de batterie électrochimique sont mis en évidence dans cette analyse détaillée, ce qui permet une meilleure compréhension des options disponibles pour les utilisateurs et les concepteurs de systèmes énergétiques. Le Tableau 2.2 résume les caractéristiques des différentes technologies de stockage par accumulateurs [104].

Tableau 2.2 Les diverses technologies de stockage par accumulateurs [104].

Type de Batterie	Densité Énergétique (Wh/kg)	Densité de Puissance (W/kg)	Cycle de Vie (Cycles)	Autodécharge	Coût	Sécurité	Impact Environnemental
Plomb-Acide	30-50	150-300	500-800	Faible	Faible	Risque de fuite acide	Élevé (plomb)
Lithium-Ion (Li-Ion)	150-250	200-2000	1000-3000	Très faible	Élevé	Risque de surchauffe	Modéré (lithium)
Nickel-Métal Hydrure (NiMH)	60-120	60-120	500-2000	Modéré	Modéré	Moins de risques	Faible
Nickel-Cadmium (NiCd)	40-60	100-1000	1000-2000	Élevé	Modéré	Tolérance aux abus	Élevé (cadmium)

Cette comparaison montre que chaque type de batterie a ses propres avantages et inconvénients, ce qui les rend plus ou moins adaptées à différentes applications. La batterie sera choisie en fonction des exigences particulières en ce qui concerne sa densité énergétique, son cycle de vie, son coût, sa sécurité et son impact sur l'environnement [104].

En résumé, grâce à leur densité énergétique élevée, leur durée de vie prolongée, leur faible autodécharge et leur capacité à s'adapter à différentes exigences de puissance, les batteries lithium-ion se présentent comme la technologie privilégiée pour de nombreuses applications contemporaines qui requièrent un stockage d'énergie efficace et fiable, comme dans le domaine des énergies renouvelables. Nous allons dans ce qui suit nous pencher exclusivement sur les batteries lithium-ion.

2.8 Présentation des batteries Li-Ion

Sony Energitech est la première entreprise à commercialiser une batterie utilisant la technologie lithium-ion en 1991 [105].

Il est crucial de connaître les caractéristiques d'une batterie lithium-ion afin de saisir son fonctionnement et ses performances. Voici les éléments clés :

2.8.1 La capacité

La batterie possède une capacité qui détermine la quantité de charge électrique qui peut être restituée après une charge complète. On la représente en ampères-heures (Ah) et elle représente l'intensité totale du courant de décharge en une heure. L'intégrale du courant de décharge (i_{batt}) sur le temps entre l'état initial (t_i) et l'état final (t_f) permet de calculer la capacité et est montrée dans l'équation suivante :

$$C_{batt} = \int_{t_i}^{t_f} i_{batt}. dt \quad (2.19)$$

Cette équation montre que par exemple pour une batterie ayant une capacité de 100Ah, la batterie sera complètement déchargée au bout de 10 heures avec un courant constant de 10A.

La figure 2.12 montre une batterie Li-ion d'une capacité de 100Ah ayant une tension de 12.8V.



Figure 2.12 Batterie solaire Li-Ion Victron energy 12.8V/100Ah

2.8.2 La résistance interne

La résistance interne d'une batterie représente l'ensemble des obstacles électriques présents dans ses différents composants internes. Elle est influencée par le type de matériaux utilisés pour les électrodes, les connexions, la composition chimique de l'électrolyte, ainsi que par les réactions électrochimiques qui s'y produisent. Une faible résistance interne est préférable, car elle améliore le rendement énergétique de la batterie tout en réduisant les pertes thermiques.

2.8.3 La tension à vide (V_{oc})

La V_{oc} , également connu sous le nom de tension à vide ou en circuit ouvert, correspond au potentiel d'équilibre de la batterie. Elle correspond à la tension mesurée quand la batterie mise en repos. La tension de la batterie dépend principalement de sa composition chimique et de son état de charge.

2.8.4 La tension nominale

La tension nominale correspond à la différence de potentiel nécessaire pour que la batterie puisse garantir un fonctionnement idéal dans les situations de fonctionnement optimales. Cette tension est déterminée par le potentiel de réaction chimique de chaque élément du couple oxydant/réducteur utilisé, qui change selon les différents modèles de batteries. En général, cette tension est comprise entre 12V, 24V et 48V dans les batteries destinées à l'énergie solaires.

2.8.5 L'état de charge (SoC)

L'état de charge (SoC) désigne le pourcentage de la capacité de la batterie qui demeure chargée par rapport à sa capacité nominale. Le SoC est représenté en pourcentage, avec 100 % pour une batterie entièrement chargée et 0 % pour une batterie entièrement déchargée. On peut calculer le SoC grâce à la formule suivante :

$$Soc(\%) = \frac{C_{bat\ disponible}}{C_{bat\ nominale}} * 100 \quad (2.20)$$

2.8.6 Nombre de jours d'autonomie

La durée d'autonomie d'une batterie est calculée en fonction du temps nécessaire pour alimenter un réseau ou un dispositif jusqu'à sa décharge complète, sans avoir besoin de recharger la batterie. Cette mesure est nécessaire pour évaluer la capacité de la batterie à garantir une provision continue en l'absence de sources de recharge possibles. La capacité de la batterie (exprimée en ampères-heures, Ah), la consommation énergétique du système alimenté et les conditions environnementales jouent un rôle dans l'autonomie.

2.8.7 Cycle de vie

Le nombre de périodes de charge/décharge qu'une batterie peut endurer avant que sa capacité ne soit considérablement diminuée détermine sa durée de vie. Un cycle de charge/décharge correspond à une décharge complète suivie d'une recharge complète. Les batteries lithium-ion sont réputées pour leur longue durée de vie, pouvant souvent atteindre entre 1000 et 3000 cycles, en fonction de leur utilisation et des conditions de fonctionnement.

En bref, la longévité et la durée d'utilisation des batteries jouent un rôle crucial dans l'évaluation de leur efficacité dans des applications de stockage d'énergie renouvelable. Pour illustrer ces concepts, considérons une batterie lithium-ion utilisée dans un système de stockage d'énergie solaire pour une application domestique. Si la batterie a une capacité de 8 kWh et que la consommation énergétique moyenne est de 2 kWh par jour, l'autonomie serait de (8 kWh / 2 kWh par jour) soit 4 jours sans recharge. Il est donc primordial de bien dimensionner les batteries de stockage dans les installations photovoltaïques.

2.8.8 Modélisation mathématique des batteries

La Figure 2.13 illustre le circuit équivalent de la batterie [106].

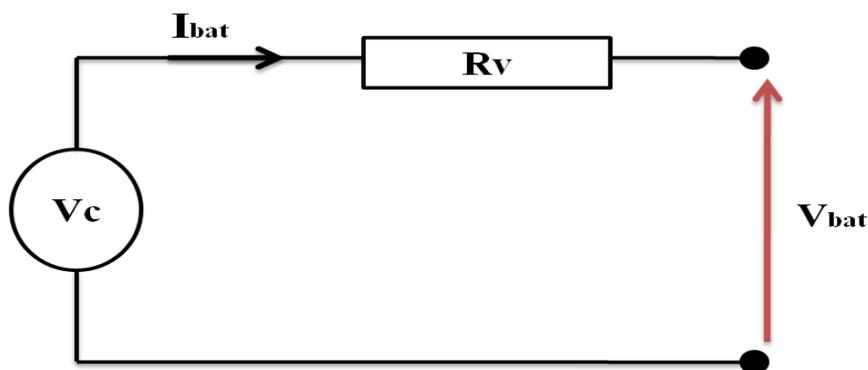


Figure 2.13 Model électrique de la batterie

Où,

- V_c : Tension idéale d'entrée (V);
- V_{bat} : Tension aux bornes de la batterie (V);
- I_{bat} : Courant développer par la batterie (A);
- R_v : Résistance interne variable de la batterie (Ω).

L'équation suivante permet de calculer la résistance interne de la batterie en fonction de ces différentes caractéristiques:

$$R_v = R_i + k \frac{C_{bat}}{C_{bat} - \int_0^t I_{bat}.dt} \quad (2.21)$$

Avec :

- R_i : résistance interne (Ω);
- k : coefficient de polarisation ;
- C_{bat} : capacité de la batterie (Ah) ;

La tension en fonction du temps aux bornes de la batterie sera donc exprimée par l'équation (2.22) comme suit :

$$V_{bat}(t) = V_c - R_v.I_{bat}(t) \quad (2.22)$$

2.9 Association des Batteries en Série, en Parallèle et Mixte

L'association des batteries est une technique couramment utilisée pour adapter les caractéristiques électriques d'un système d'alimentation en fonction des besoins spécifiques de l'application. Cette technique permet d'augmenter la tension, la capacité ou une combinaison des deux. On distingue principalement trois types d'associations : en série, en parallèle et mixte. Chacune de ces configurations a ses propres avantages et inconvénients, ainsi que des applications spécifiques [107, 108].

a. Association en Série

L'association en série implique de relier successivement les bornes positives et négatives de plusieurs batteries.

- **Tension** : La tension totale est la somme des tensions de chaque batterie individuelle. Si par exemple quatre batteries ayant chacune une tension de 12V sont en série, la tension totale sera de 48V.
- **Capacité** : La capacité totale reste la même que celle de chaque batterie individuelle. Si chaque batterie a une capacité de 100Ah, la capacité totale du système en série sera toujours de 100Ah.

b. Association en Parallèle

L'association en parallèle implique de relier toutes les bornes positives entre elles et toutes les bornes négatives entre elles.

- **Tension** : La tension totale reste la même que celle de chaque batterie individuelle. Par exemple, si quatre batteries de 24V sont connectées en parallèle, la tension totale restera de 24V.
- **Capacité** : La capacité totale est la somme des capacités de chaque batterie. Si chaque batterie a une capacité de 150Ah, la capacité totale sera de 600Ah.

c. Association Mixte (Série-Parallèle)

Les configurations en série et en parallèle sont combinées dans l'association mixte afin de bénéficier des avantages des deux.

- **Tension et Capacité** : La tension totale est déterminée par le nombre de groupes de batteries en série, tandis que la capacité totale est déterminée par le nombre de groupes en parallèle. Par exemple, si nous avons quatre batteries de 12V 100Ah connectées en série-parallèle (2 séries de 2 batteries en parallèle), nous obtenons une tension totale de 24V et une capacité totale de 200Ah.

Les différents modèles d'association des batteries sont illustrés dans la Figure 2.14.

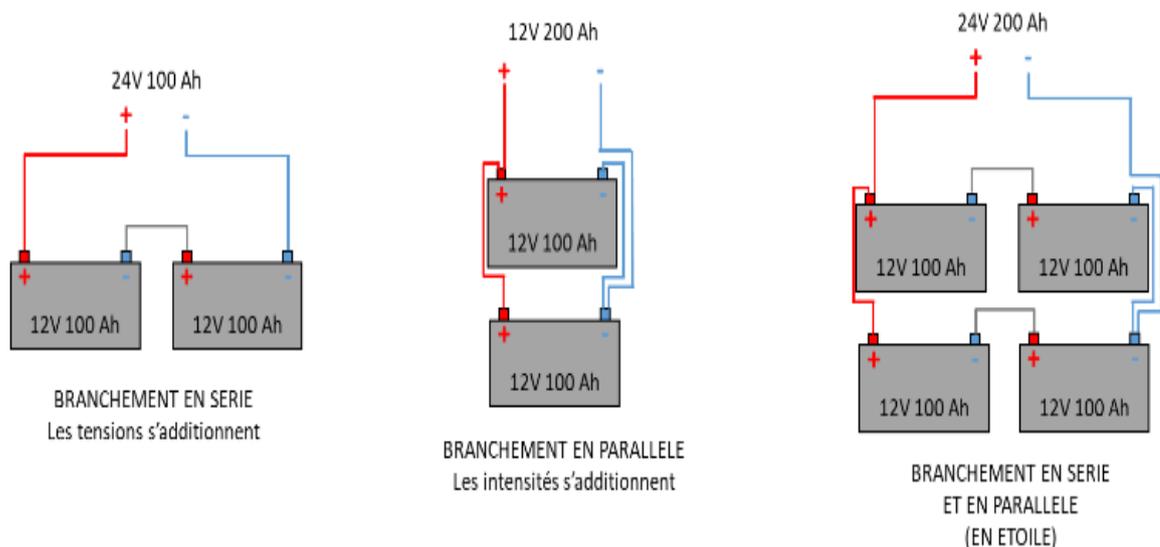


Figure 2.14 Types de branchement des batteries

L'association des batteries en série, en parallèle et mixte tel qu'illustré dans la Figure 2.13 offre des solutions variées pour adapter les caractéristiques électriques d'un système en fonction des besoins spécifiques. La configuration sera sélectionnée en fonction des besoins en matière de tension, de capacité et de fiabilité du système. Il est crucial d'assurer une gestion

adéquate de ces configurations afin d'optimiser l'efficacité et la longévité des batteries dans les applications photovoltaïques et autres systèmes d'approvisionnement électrique.

2.10 Principe de fonctionnement des accumulateurs Li-Ion

Les batteries au lithium-ion transforment l'énergie électrique en énergie chimique en échangeant réciproquement des ions lithium entre une électrode positive et une électrode négative lors des cycles de charge et de décharge. Ce système fonctionne grâce à des matériaux spécifiques pour les électrodes et un électrolyte qui facilite le déplacement des ions [109].

2.10.1 Structure des Électrodes et de l'électrolyte

Électrode Négative (Anode) : Composée en général de matériaux carbonés tels que le graphite. Lors de la décharge, cette électrode subit une oxydation, libérant des ions lithium dans l'électrolyte.

Électrode Positive (Cathode) : Souvent constituée d'oxydes métalliques comme le dioxyde de cobalt (LiCoO_2), le phosphate de fer lithié (LiFePO_4), ou le manganate de lithium (LiMn_2O_4). Pendant la décharge, la cathode subit une réduction, acceptant les ions lithium provenant de l'anode.

L'électrolyte Entre les deux électrodes se trouve l'électrolyte qui joue un rôle crucial dans la conduction des ions lithium. Il peut se présenter sous forme liquide, solide ou polymère gélifié, et garantit la circulation des ions entre les électrodes tout en empêchant le déplacement des électrons. La différence de potentiel entre les électrodes est maintenue grâce à cette séparation ionique et électronique.

2.10.2 Réactions électrochimiques et mécanisme de charge et décharge

- **Décharge** : Lorsque la batterie est en utilisation en mode décharge, les ions lithium se déplacent de l'anode vers la cathode à travers l'électrolyte, tandis que les électrons circulent dans le circuit externe. L'anode se désolidarise des ions lithium et les libère dans l'électrolyte, se transformant ainsi par oxydation. Simultanément, la cathode capte ces ions lithium, acceptant les électrons et se réduisant.
- **Charge** : Pendant la recharge, le processus est inversé. Les ions lithium migrent de la cathode vers l'anode, se réinsérant dans le matériau de l'anode, tandis que les électrons retournent à l'anode via le circuit externe. Ceci est illustré dans la figure 2.15 ci-dessous.

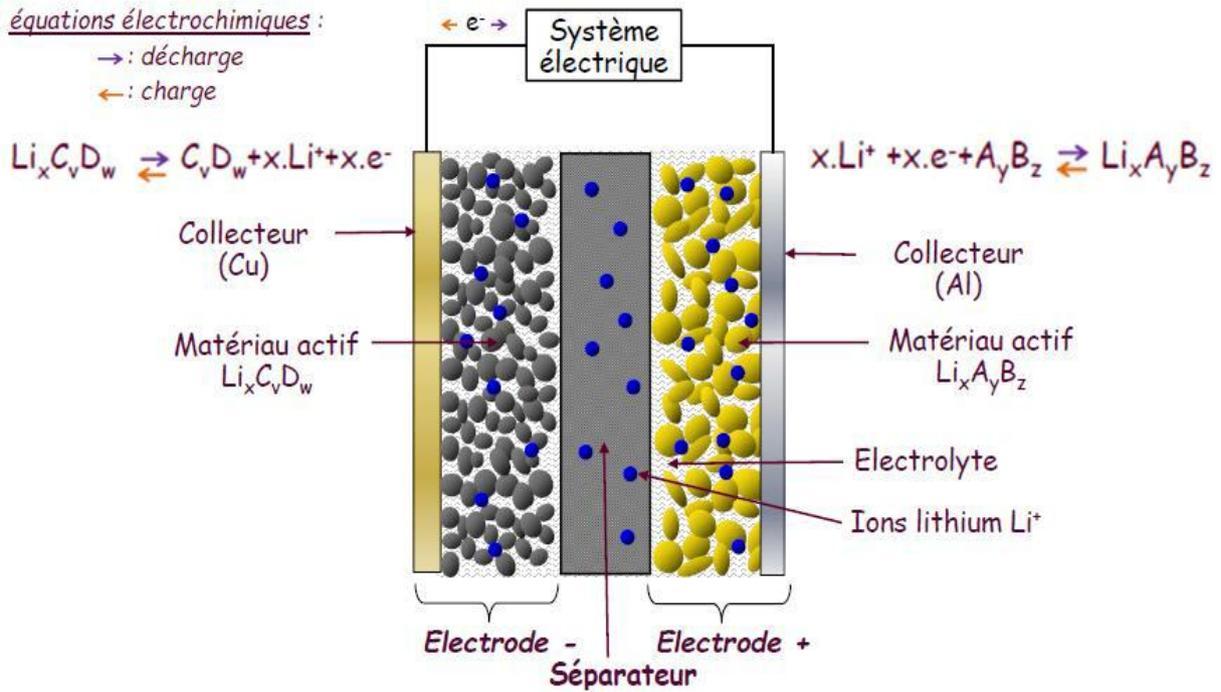


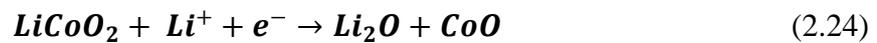
Figure 2.15 Réactions électrochimiques et principe de fonctionnement d'une batterie Li-Ion

Les réactions électrochimiques qui interviennent lors de ses processus sont les suivantes [110]. :

Décharge :



Charge :



En synthèse, le fonctionnement des batteries lithium-ion repose sur des processus électrochimiques sophistiqués et rigoureusement contrôlés, permettant l'exécution de cycles de charge et de décharge réitérés avec une grande efficacité énergétique. Ces batteries sont couramment utilisées dans les applications d'énergies renouvelables grâce à leur densité énergétique élevée, leur longévité significative et leur capacité à supporter des cycles de charge et de décharge répétés à haute intensité, tout en maintenant des performances optimales.

2.11 Système de gestion des Batteries (Battery Management System)

Pour assurer la sécurité des utilisateurs et optimiser les performances des batteries lithium-ion, il est essentiel de déployer un système de gestion des batteries, également appelé BMS (Battery Management System). Le rôle essentiel du BMS réside dans la surveillance et le contrôle de l'état de la batterie, ce qui permet d'éviter et de palier certains risques et d'améliorer sa longévité et son efficacité [111].

2.11.1 Fonctionnalités du système de gestion des batteries

La figure 2.16 illustre les différentes fonctionnalités du système de gestion des batteries. Nous allons par la suite détailler ces fonctionnalités ainsi que leurs intérêts opérationnels.

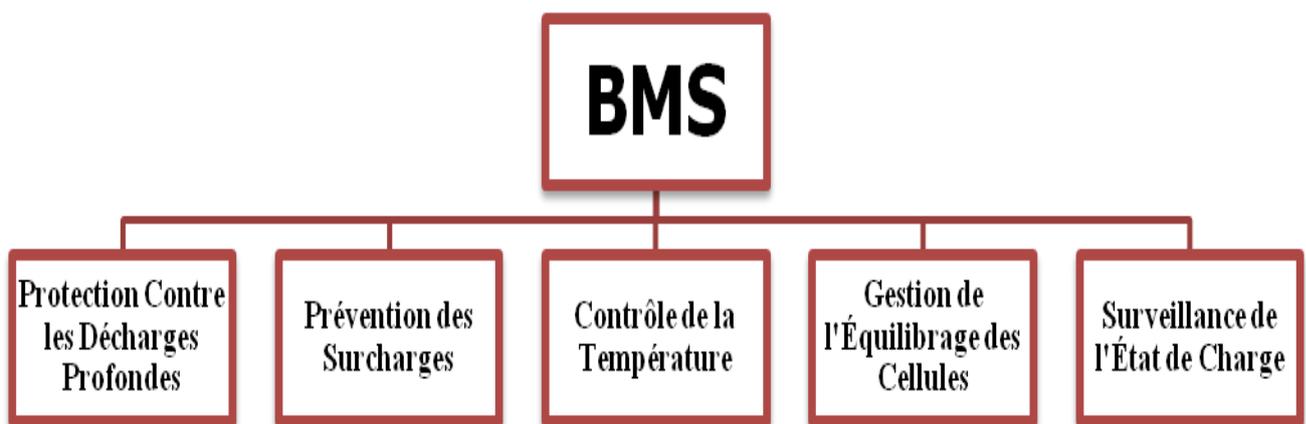


Figure 2.16 Les différentes fonctionnalités du système de gestion des batteries

2.11.1.1 Protection Contre les Décharges Profondes

Le BMS empêche la batterie de se vider et de se décharger en dessous d'un certain seuil critique, ce qui pourrait endommager les cellules et réduire leur capacité à long terme. En arrêtant la décharge avant d'atteindre ce seuil, le BMS contribue à prolonger la durée de vie de la batterie.

2.11.1.2 Prévention des Surcharges

Pendant la recharge, le système de gestion des batteries surveille la tension de la batterie dans le but d'éviter les surcharges. Une surcharge peut entraîner une surchauffe et des réactions chimiques indésirables, augmentant les risques de défaillance ou d'incendie. Le BMS régule le processus de charge pour s'assurer que chaque cellule est rechargée de manière uniforme et sécurisée.

2.11.1.3 Contrôle de la Température

La température est cruciale pour la performance et la sécurité des batteries au lithium-ion. Le système de régulation des batteries contrôle constamment la température des cellules et met

en place des protocoles de sécurité pour prévenir toute surchauffe. Au cas où la température dépasse une plage de fonctionnement sécurisée, le BMS peut réduire ou suspendre temporairement les opérations de charge et de décharge pour éviter les dommages.

2.11.1.4 Surveillance de l'État de Charge et de l'État de Santé

Le système de gestion des batteries intègre des algorithmes avancés permettant l'évaluation et la transmission en temps réel des paramètres critiques tels que l'état de charge (SoC) et l'état de santé (SoH) de la batterie. Ces informations, dérivées des mesures de tension, de courant et de température, sont utilisées pour déterminer avec précision la charge restante ainsi que l'intégrité fonctionnelle de la batterie, facilitant ainsi sa gestion prédictive, et son entretien préventif.

2.11.1.5 Gestion de l'Équilibrage des Cellules

L'équilibre entre la charge et la décharge de chaque cellule de la batterie est assuré par le système de gestion des batteries. Il est primordial de préserver un équilibre entre les cellules pour optimiser le potentiel d'utilisation de la batterie et prévenir toute instabilité susceptible d'affaiblir son efficacité et sa longévité.

Le déploiement du BMS est très important dans le secteur de l'énergie renouvelable. Effectivement, la gestion continue des cycles de charge et de décharge des dispositifs d'accumulation d'énergie basés sur les batteries est essentielle en réponse aux productions intermittentes et aux besoins en énergie. Un BMS efficace permet de :

- **Optimiser la Performance** : En assurant que la batterie fonctionne toujours dans des conditions optimales.
- **Augmenter la Sécurité** : En minimisant les risques associés aux conditions de fonctionnement extrêmes.
- **Prolonger la Durée de Vie** : En évitant les stress inutiles sur les cellules de la batterie.

Le BMS, grâce à ses dispositifs de contrôle et de surveillance sophistiqués, contribue à optimiser les performances des batteries tout en réduisant les dangers pour les utilisateurs et les coûts associés à la maintenance.

2.12 Problématiques Liées aux Batteries Lithium-Ion dans les Systèmes d'Énergie renouvelable

Malgré leur avancée technologique, les batteries lithium-ion posent des défis majeurs lorsqu'elles sont employées dans des systèmes d'énergie, en particulier en ce qui concerne leur autonomie, leur fiabilité et leur durabilité. Le traitement de ces problèmes est primordial pour améliorer leur rendement et étendre leur durée de vie [112].

Les batteries disponibles sur le marché actuel ne permettent qu'une autonomie restreinte aux systèmes qu'elles alimentent. L'application nécessitant une alimentation continue sur de longues périodes, les véhicules électriques ainsi que les systèmes de stockage d'énergie

renouvelable sont particulièrement confrontée à cette limitation. La limitation de l'autonomie est causée par divers éléments :

- Les batteries actuelles présentent une densité énergétique qui, même si elle est en constante amélioration, demeure insatisfaisante pour de nombreuses applications à grande échelle tel que les centrales photovoltaïques.
- Les appareils modernes consomment souvent une quantité considérable d'énergie, ce qui diminue l'autonomie pratique des batteries.
- L'autonomie des batteries est également influencée par les fluctuations de température et les cycles de charge/décharge.

Les batteries au lithium-ion sont vulnérables aux variations de puissance importantes, ce qui peut compromettre leur fiabilité et diminuer leur durée de vie. Lorsque la demande d'énergie change rapidement, on observe des fluctuations de puissance, ce qui est fréquent dans les systèmes de stockage d'énergie solaire ou il y'a souvent de forts appel de courant. Les conséquences des variations de puissance comprennent :

- Les variations rapides des cycles de charge et de décharge provoquent un stress électrochimique sur les matériaux des électrodes. Ce stress peut mener à une dégradation accélérée des électrodes, affectant la structure cristalline du matériau actif et augmentant la résistance interne de la batterie. À long terme, cette dégradation réduit la capacité de la batterie à stocker et à libérer de l'énergie efficacement, entraînant une diminution de sa durée de vie utile.
- Le chauffage excessif peut causer une surchauffe des cellules, causer des dommages aux composants internes et accroître le risque de défaillance.
- Les fluctuations rapides de la demande peuvent également engendrer des déséquilibres entre les cellules de la batterie. Lorsque certaines cellules se chargent ou se déchargent à des taux différents, cela peut entraîner une variation dans la tension et l'état de charge de chaque cellule. Ce déséquilibre peut diminuer l'efficacité globale du pack de batteries et réduire la capacité utilisable. Des cellules affaiblies peuvent également affecter le rendement global du système, entraînant une perte d'énergie et une diminution de l'autonomie.

Ces facteurs, combinés, peuvent provoquer une diminution notable de la longévité des batteries au lithium-ion. Il est donc nécessaire que les usagers prennent conscience des conséquences des changements de puissance dans les applications où ces batteries sont employées. Pour résoudre ces problèmes, il est crucial d'adopter des solutions telles que la mise en place de systèmes de gestion de batterie (BMS) avancés, qui peuvent contrôler et harmoniser la charge entre les cellules [113].

La durabilité des batteries lithium-ion est un autre élément crucial. À chaque cycle de charge/décharge, la batterie perd de sa capacité, et des conditions d'utilisation rigoureuses peuvent hâter ce processus de vieillissement. Les facteurs clés qui impactent la durée de vie incluent [114]:

- La durée de vie de la batterie diminue drastiquement en raison d'une décharge profonde fréquente, ce qui rend les éléments des électrodes plus fragiles.
- Les températures élevées, qu'elles soient chaudes ou froides, favorisent la détérioration des cellules de la batterie.
- L'augmentation des taux de charge et de décharge entraîne une hausse des contraintes physiques et thermiques sur les cellules. ce qui diminue leur durée de vie.

2.12.1 Solutions Potentielles

Pour surmonter ces défis, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre :

1. **L'Amélioration des Matériaux** : La conception de matériaux innovants pour les électrodes et les électrolytes peut accroître la capacité énergétique et la résistance aux variations de puissance.
2. **La Gestion Thermique** : Les batteries peuvent être maintenues à des températures idéales grâce à des systèmes de gestion thermique efficaces, ce qui permet de réduire le stress thermique.
3. **L'Optimisation des Cycles de Charge/Décharge** : L'emploi de méthodes de gestion de la batterie sophistiquées permet d'équilibrer les cycles de charge et de décharge afin de réduire le stress et étendre la longévité de la batterie.
4. **Le Développement de Technologies Hybrides** : L'intégration de supercondensateurs ou d'autres technologies de stockage d'énergie avec les batteries lithium-ion constitue une approche prometteuse pour gérer les fluctuations de puissance. Les supercondensateurs, par exemple, peuvent fournir une puissance instantanée pour répondre aux pics de demande, tandis que les batteries gèrent la capacité d'énergie à plus long terme. Cette synergie permet de réduire le stress sur les batteries lithium-ion, augmentant leur durée de vie et leur efficacité tout en améliorant la réactivité du système global [115].
5. **Le Remplacement par le Réseau Électrique** : Dans certaines applications photovoltaïques, une connexion directe au réseau électrique peut être plus avantageuse que l'utilisation exclusive de batteries. En utilisant le réseau pour absorber l'excès d'énergie produite pendant les périodes de forte production, on peut réduire la dépendance aux batteries pour le stockage. Ce modèle de gestion permet également de fournir de l'énergie en cas de besoin, améliorant la stabilité et la résilience du système. En évitant les problèmes associés au stockage par batteries, cette approche peut également contribuer à une gestion plus efficace des ressources énergétiques [116].

Dans cette thèse, nous allons d'abord explorer le développement de technologies de stockage hybride (HESS), en mettant l'accent sur les synergies entre les batteries lithium-ion et d'autres formes de stockage d'énergie. Nous examinerons comment ces systèmes hybrides peuvent atténuer les impacts des variations de puissance et améliorer l'efficacité globale.

Ensuite, nous analyserons la solution du remplacement par le réseau électrique, en considérant ses avantages et ses limitations dans le contexte des systèmes d'énergie solaire. Cette exploration nous permettra de mieux comprendre les alternatives possibles et de proposer des recommandations pour optimiser l'intégration des systèmes des photovoltaïques dans des environnements variés.

2.13 Principe d'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques grâce à l'hybridation des sources de stockage

Les progrès technologiques récents dans le secteur du stockage par batteries lithium-ion ont grandement amélioré les performances des systèmes solaires, cependant ces batteries ne sont pas toujours en mesure de garantir une autonomie adéquate pour certaines applications exigeantes. En effet, comme vu précédemment lorsqu'elles sont exposées à des cycles de charge-décharge vifs et à des régimes de fortes fluctuations de puissance, les batteries lithium-ion sont confrontées à des contraintes électrochimiques et thermiques importantes. La fiabilité et la longévité des batteries peuvent être compromises par ces contraintes, ce qui pose un enjeu important pour leur emploi dans des dispositifs énergétiques complexes [117].

Pour pallier ces limitations, l'intégration d'une source d'énergie complémentaire capable de répondre rapidement aux fluctuations de la demande énergétique apparaît comme une solution prometteuse. L'hybridation des sources d'énergie, qui consiste à combiner deux technologies distinctes au sein d'un même système, permet de tirer parti des avantages spécifiques de chaque source tout en atténuant leurs inconvénients. Par exemple, l'intégration de supercondensateurs avec des batteries lithium-ion constitue une stratégie efficace pour améliorer la performance globale des systèmes de stockage. En fournissant des pics de puissance instantanés au moment opportun, les supercondensateurs soulagent les batteries lors des charges de haute intensité, ce qui réduit les restrictions opérationnelles et étend leur longévité [118].

L'hybridation des sources implique la fusion de deux sources d'énergie distinctes au sein d'un même système pour tirer parti des avantages propres à chacune d'entre elles (voir Figure 2.17). Cette approche hybride offre plusieurs avantages : elle permet d'optimiser la gestion de l'énergie, d'augmenter l'autonomie du système, et de garantir une réponse dynamique aux variations de la demande. En combinant les batteries lithium-ion, qui sont efficaces pour le stockage à long terme et la fourniture d'énergie continue, avec des supercondensateurs, qui excellent dans la fourniture rapide d'énergie de pointe, il est possible d'atteindre une synergie qui maximise l'efficacité et la durabilité du système.

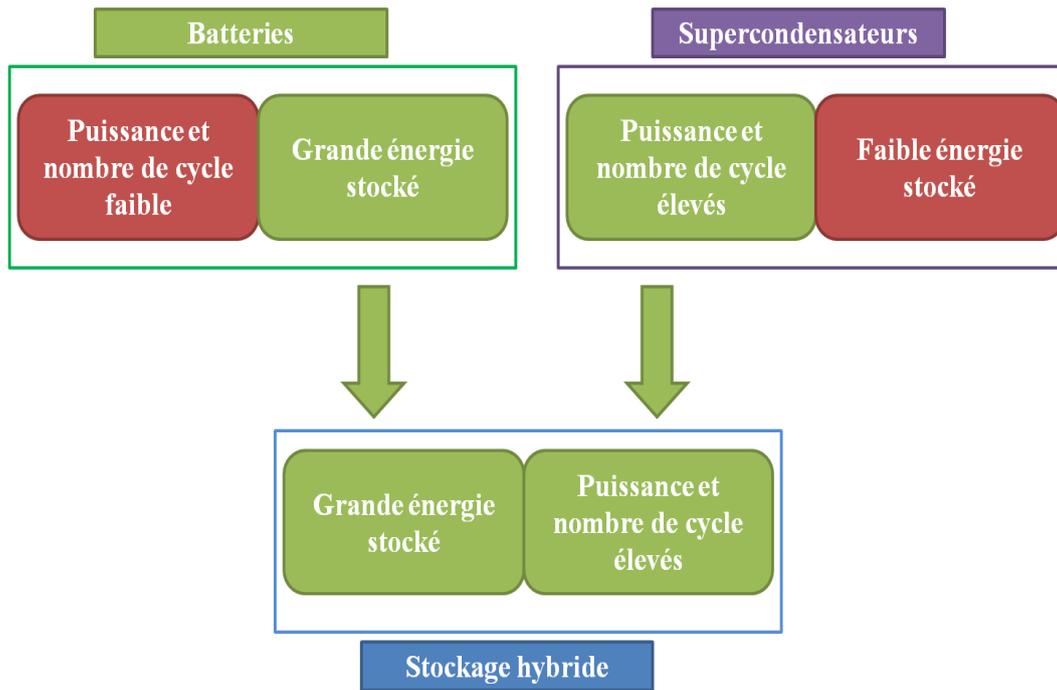


Figure 2.17 Résumé du principe d'hybridation des sources de stockage (Batteries-Supercondensateurs)

Les supercondensateurs, grâce à leur nature ayant une densité de puissance élevées et leur aptitude à se charger et à se décharger rapidement, peuvent compenser les manques des batteries lorsqu'ils sont combinés. On peut combiner des batteries au lithium-ion avec des supercondensateurs afin d'exploiter les bénéfices des deux mécanismes de stockage et concevoir un système hybride énergétiquement solide.

Les supercondensateurs offrent la capacité de générer des niveaux d'énergie et de puissance presque immédiats, facilitant une réponse très rapide face aux besoins en charge et en décharge. Cela offre aux batteries la possibilité de fonctionner dans des conditions plus stables et moins restrictives, ce qui améliore les performances globales du système.

En outre, grâce à la gestion des fluctuations soudaines de puissance, les supercondensateurs réduisent la consommation des batteries. Cela favorise l'amélioration de l'efficacité de l'énergie stockée dans les batteries et accroît l'autonomie du système tout en optimisant sa durée de vie. Par la diminution du stress électrochimique et thermique sur les batteries on peut constater une forte réduction du taux de détérioration [119].

Finalement, Le partage des rôles entre batteries et supercondensateurs est illustré dans la Figure 2.18. Ce schéma démontre comment les deux sources d'énergie peuvent collaborer afin de proposer un système de stockage équilibré et efficace. Les supercondensateurs répondent à la demande de puissance immédiate, tandis que les batteries offrent une énergie continue sur de plus longues périodes, en exploitant les avantages de chaque technologie [120].

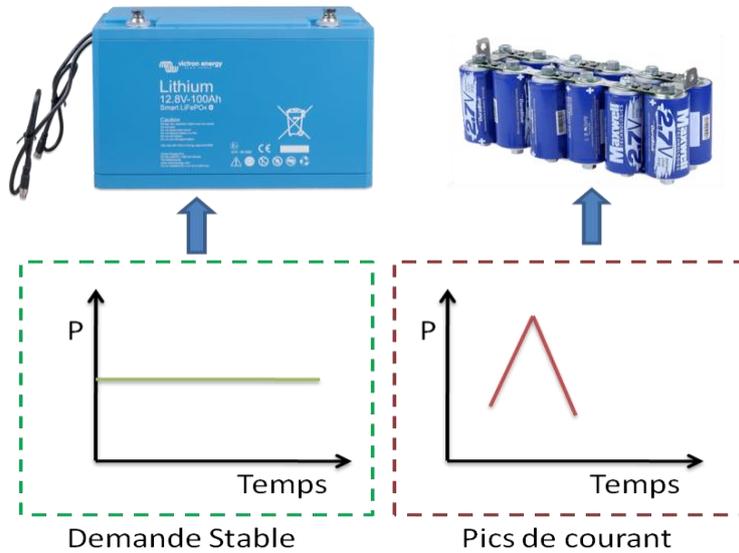


Figure 2.18 Le principe de répartition des fonctions entre les batteries et les supercondensateurs dans les systèmes de stockage hybrides

2.13.1 Les Supercondensateurs

Les supercondensateurs comme présenté dans le précédent chapitre, sont des appareils de stockage d'énergie électrostatiques qui peuvent stocker des quantités d'énergie bien plus élevées que les condensateurs traditionnels. Les performances élevées sont obtenues grâce à leur structure unique et à l'utilisation de matériaux poreux.

Le tableau suivant permet de faire une comparaison entre les condensateurs dit classiques, les supercondensateurs et les batteries Ce tableau met en évidence les principales différences et les avantages spécifiques des trois dispositifs, soulignant les applications appropriées pour chaque type.

Tableau 2.3 Comparaison entre les condensateurs et les supercondensateurs et les batteries

Caractéristique	Condensateurs Classiques	Supercondensateurs	Batteries
Principe de Stockage	Électrostatique	Électrostatique avec double couche	Réactions électrochimiques
Matériaux des Électrodes	Métal ou film métallique	Matériaux poreux (Carbone, Graphène)	Divers (plomb, lithium-ion, nickel-métal hydrure)
Capacité de Stockage	Faible (nF à μ F)	Très élevée (F à kF)	Moyenne à élevée (mAh à Ah)
Densité d'Énergie	Faible	Élevée	Très élevée
Densité de Puissance	Très élevée	Élevée	Moyenne à faible
Temps de Charge/Décharge	Très rapide (microsecondes à millisecondes)	Rapide (secondes à minutes)	Lent à modéré (heures)
Coût	Bas	Plus élevé	Variable (dépend de la technologie)
Durée de Vie	Longue	Très longue (millions de cycles)	Moyenne (centaines à milliers de cycles)
Applications Typiques	Circuits électroniques, filtrage	Stockage d'énergie, gestion des pics de puissance, véhicules électriques	Alimentation continue, véhicules électriques, stockage à long terme

Les condensateurs traditionnels conservent l'énergie en séparant les charges sur des plaques métalliques contrairement aux supercondensateurs qui, En plus de séparer les charges, utilisent une double couche poreuse afin de stocker davantage de charges sur une surface électrode élargie. De plus les matériaux utilisés dans les électrodes des condensateurs classiques sont des métaux simples, tandis que les supercondensateurs utilisent des matériaux poreux tels que le carbone activé ou le Graphène, ce qui permet d'augmenter la surface disponible pour le stockage de charge.

Les supercondensateurs offrent une capacité de stockage et une densité d'énergie bien supérieures à celles des condensateurs classiques, ce qui les rend parfaits pour le stockage d'énergie à une échelle plus importante par exemple dans les installation solaire ou les véhicules électriques.

Les batteries, quant à elles, fonctionnent par des réactions électrochimiques, libérant de l'énergie lorsqu'une réaction se produit au niveau de leurs électrodes. Elles peuvent stocker une quantité considérable d'énergie, avec des densités énergétiques allant de 150 à 250 Wh/kg pour les batteries lithium-ion. Cependant, elles nécessitent plus de temps pour se charger et se décharger en raison des processus chimiques impliqués, ce qui les rend mieux adaptées pour des applications à long terme, comme l'alimentation des appareils électroniques, des véhicules électriques et les installations photovoltaïques

Finalement Les condensateurs classiques peuvent se charger et se décharger extrêmement rapidement, mais avec une faible capacité énergétique tendit que les supercondensateurs offrent un bon compromis entre une charge/décharge rapide et une capacité énergétique élevée.

En résumé, les supercondensateurs se positionnent comme une solution intermédiaire entre les condensateurs traditionnels et les batteries. Ils offrent une densité d'énergie plus élevée que les premiers tout en permettant une charge et une décharge plus rapides que les secondes. Cette flexibilité en fait un choix prometteur pour diverses applications modernes, notamment dans les systèmes de stockage d'énergie renouvelable et la mobilité électrique. Les choix entre ces technologies dépendent largement des exigences spécifiques de chaque application, qu'il s'agisse de rapidité de chargement ou de déchargement, de capacité de stockage ou de longévité [121].

Les différents composants internes du supercondensateur sont illustrés dans la figure 2.19.

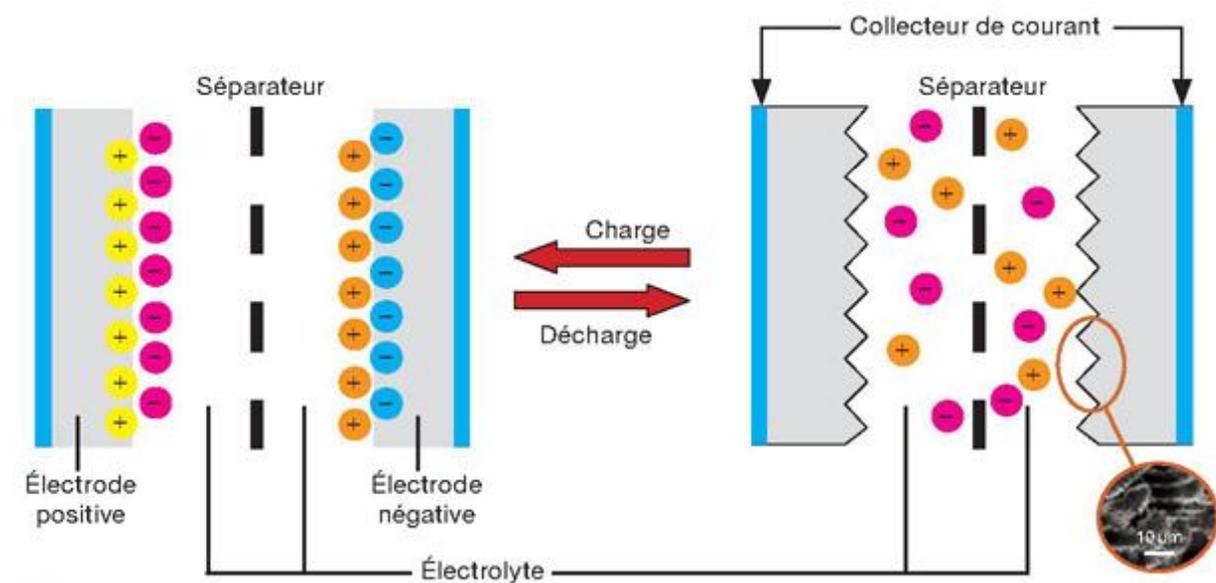


Figure 2.19 Les différents composants d'un supercondensateur

2.13.2 Paramètres Caractéristiques des Supercondensateurs

Les supercondensateurs possèdent plusieurs paramètres clés qui déterminent leurs performances et leur adéquation pour diverses applications. Parmi ces paramètres, on trouve la capacité, la résistance interne [122].

a. La Capacité :

La capacité (C) d'un supercondensateur, qui est sa capacité à conserver de l'énergie électrostatique, peut être exprimée de la même manière que celle des condensateurs traditionnels. La relation mathématique de la capacité est représentée par la relation mathématique ci-dessous :

$$C_{sc} = \frac{S \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d} \quad (2.25)$$

Où :

- ϵ_0 est la permittivité du vide (en C/mV),
- ϵ_r est la permittivité relative du matériau,
- S est la surface de chaque électrode (en m²),
- d est la distance entre les deux électrodes (en m).

Il est démontré par cette formule que la capacité est intrinsèquement liée à la surface des électrodes et à la permittivité du matériau, Tout en étant inversement proportionnelle à la distance entre les électrodes.

b. La Resistance interne :

La résistance interne des supercondensateurs joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la puissance qu'ils peuvent fournir. La résistance est due à différents éléments du supercondensateur, comme l'électrolyte et les électrodes. En règle générale, la résistance interne est extrêmement faible, ce qui permet aux supercondensateurs de générer des courants élevés sans pertes significatives. L'importance d'une résistance interne faible est primordiale pour des applications qui requièrent des charges et des décharges rapides, presque cela réduit les pertes énergétiques et améliore l'efficacité globale du dispositif.

2.13.2 Model électrique du supercondensateur

Le modèle électrique du supercondensateur (Figure 2.20) est constitué d'une capacité C_{sc} en série avec une résistance série R [123 ; 124].

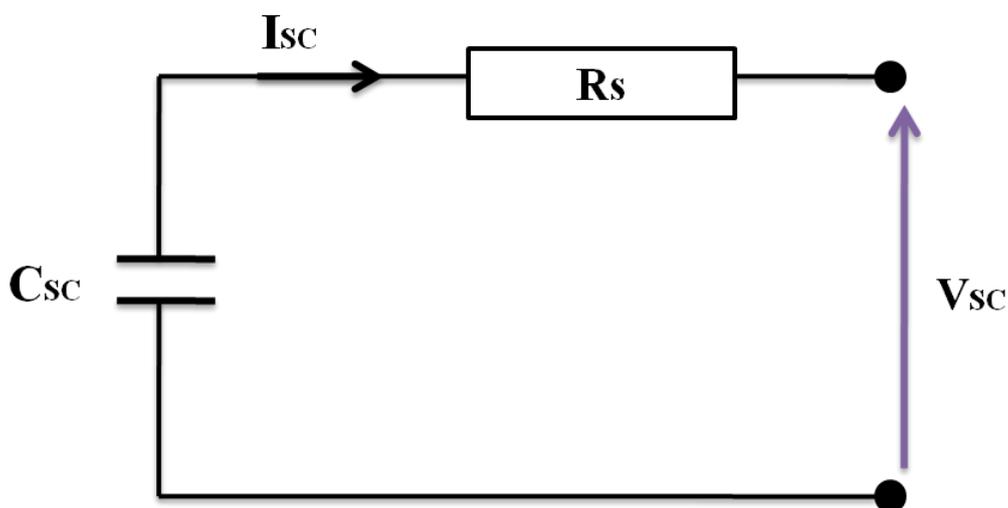


Figure 2.20 Model du supercondensateur

Avec :

- C_{sc} : Capacité du supercondensateur ;
- I_{sc} : Courant du supercondensateur ;
- R_s : Résistance interne du supercondensateur ;
- V_{sc} : Tension du supercondensateur.

L'un des principaux avantages de ce modèle réside dans sa capacité à simuler avec précision à la fois le stockage d'énergie et les pertes de puissance associées à la dissipation. En effet, la capacité C_{sc} représente l'énergie stockée dans le système, tandis que la résistance modélise les pertes d'énergie dues à la résistance interne des composants. Ceci établit un aperçu global des performances du système, en prenant en considération les processus de charge et de décharge au sein de ce dernier.

2.14 Conclusion

Ce chapitre a favorisé la construction d'une connaissance approfondie des différents composants des systèmes photovoltaïques et de leurs modèles mathématiques. En analysant en détail les systèmes de transformation d'énergie solaire, les solutions de stockage et les composants de l'électronique de puissance, nous avons mis en lumière les relations complexes entre ces composants et leur influence sur la performance globales des systèmes photovoltaïques.

Nous avons également abordé la problématique liée au stockage par batterie, qui représente un des défis majeurs pour la fiabilité et l'efficacité des installations solaires. Après une analyse approfondie, nous avons opté pour une solution à base d'hybridation des sources de stockage en combinant batteries et supercondensateurs, une approche visant à maximiser les performances et la durabilité du système. Ce chapitre a donc posé les bases pour explorer des solutions potentielles visant à pallier ces limitations, contribuant ainsi à l'objectif principal de cette thèse : améliorer les systèmes photovoltaïques tout en minimisant les problèmes liés au stockage par batteries.

CHAPITRE 3

REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES MECANISMES DE GESTION ET DE CONTROLE DU FLUX D'ENERGIE DES SYSTEMES DE STOCKAGE HYBRIDES BATTERIES / SUPERCONDENSATEURS

3.1 Introduction

Les solutions de stockage d'énergie hybrides qui mettent en commun des batteries et des supercondensateurs ont été exposées comme une solution prometteuse. Pour améliorer les performances, la fiabilité et la durabilité des systèmes énergétiques, tel qu'indiqué dans le précédent chapitre. Ces modèles permettent d'utiliser les nombreux atouts des deux types d'éléments : La densité d'énergie élevée des batteries et la puissance élevée des supercondensateurs.

Cette partie effectue l'analyse des mécanismes de gestion et de contrôle du flux d'énergie utilisés dans les systèmes de stockage hybrides liés aux installations photovoltaïques.

Les recherches précédentes ont joué un rôle important dans le secteur des méthodes de contrôle pour les combinaisons de batteries-supercondensateurs et les systèmes de stockage d'énergie hybrides (HESS). Koohi et Rosen [125], ainsi que Luo et al. [126], ont dressé une liste des technologies de stockage d'énergie électrique développées à ce jour, mettant en avant les avantages et inconvénients de chaque dispositif de stockage, notamment les batteries au Lithium-Ion et les supercondensateurs, principaux sujets de notre étude. Au sujet de l'électrification rurale, l'intégration des systèmes photovoltaïques autonomes a émergé comme une solution importante. Pour répondre au défi du stockage efficace de l'énergie, Jing et al. [127] ont réalisé une étude approfondie sur un système de stockage d'énergie hybride batterie-supercondensateur pour les systèmes PV autonomes. Leur conclusion suggère que l'intégration d'un système de stockage d'énergie secondaire actif avec une batterie primaire passive représente une configuration optimale pour les applications de systèmes photovoltaïques autonomes.

Ce chapitre vise principalement à exposer et à étudier les diverses structures d'association des éléments et des dispositifs de stockage, ainsi que les stratégies avancées de gestion et de contrôle du flux d'énergie dans ces systèmes mixtes. Nous explorerons différentes approches de régulation, mettant en avant les avantages des méthodes modernes comme l'utilisation des régulateurs d'ordre fractionnaire et les techniques d'optimisation intelligentes. Ces méthodes permettent une meilleure adaptation aux variations rapides des conditions de fonctionnement et d'ensoleillement, participant de cette manière à l'amélioration de la fiabilité d'utilisation et l'efficacité globale des systèmes de stockage.

Ce chapitre vise à fournir un cadre exhaustif pour comprendre les mécanismes de régulation du flux d'énergie, en proposant des solutions pour maximiser l'efficacité des ressources énergétiques disponibles et améliorer la longévité des équipements de stockage.

3.2 Présentation des différentes configurations d'association des dispositifs de stockage

Une multitude de structures d'association entre les batteries et les supercondensateurs ont été élaborées et analysées. On retrouve parmi les plus fréquentes :

3.2.1 Configuration en Série : Dans cette disposition, les supercondensateurs sont connectés en série avec les batteries. Le principal avantage réside dans la simplicité du circuit, cependant cette configuration requiert un contrôle strict afin d'équilibrer les tensions et les courants entre les deux éléments.

3.2.2 Configuration en parallèle : Dans cette configuration les supercondensateurs et les batteries sont connectés en parallèle. Cette architecture permet une gestion plus flexible des flux d'énergie, mais nécessite des dispositifs de gestion pour équilibrer les charges entre les deux composants.

Selon la littérature [128], [129], Le mode de connexion parallèle présente plusieurs avantages par rapport au couplage en série, notamment en matière d'efficacité et de robustesse et de maniabilité du système dans son ensemble. Ceci est la raison principale pour notre choix de nous concentrer sur cette configuration dans le cadre de cette thèse en raison de ce qu'elle peut donner comme bénéfices en termes de flexibilité de control. Nous allons dans ce qui va suivre décortiquer les différents type d'architecture en parallèle et faire une synthèse comparative entre ces différentes techniques de couplage.

3.2.2.1 Configuration en parallèle sans convertisseurs

Dans cette configuration, les supercondensateurs sont directement reliés à la batterie via le bus continu (voir Figure 3.1). Cette configuration simple permet de diminuer les dépenses de conception. Toutefois, cette facilité restreint la souplesse et les performances du système.

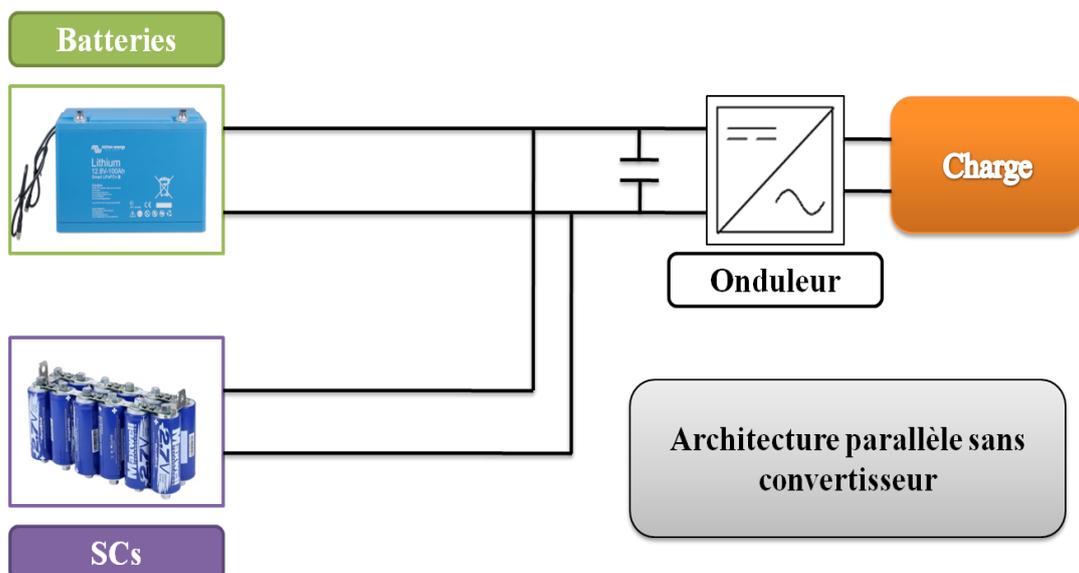


Figure 3.1 Configuration en parallèle sans convertisseur

- **Avantages :**

- Coût de conception faible.
- Simplicité de l'architecture.

- **Inconvénients :**

- Tension du bus continu stabilisée uniquement par la batterie.
- Absence de contrôle des courants.
- Réponse insuffisante aux fortes demandes de puissance ou aux courts-circuits.

3.2.2.2 Configuration en parallèle avec un seul convertisseur

Dans cette configuration, il n'y a qu'un seul convertisseur pour relier la batterie ou les supercondensateurs au bus continu. En règle générale, on utilise le convertisseur pour gérer les supercondensateurs, tandis que la batterie est directement reliée au bus continu (voir Figure 3.2).

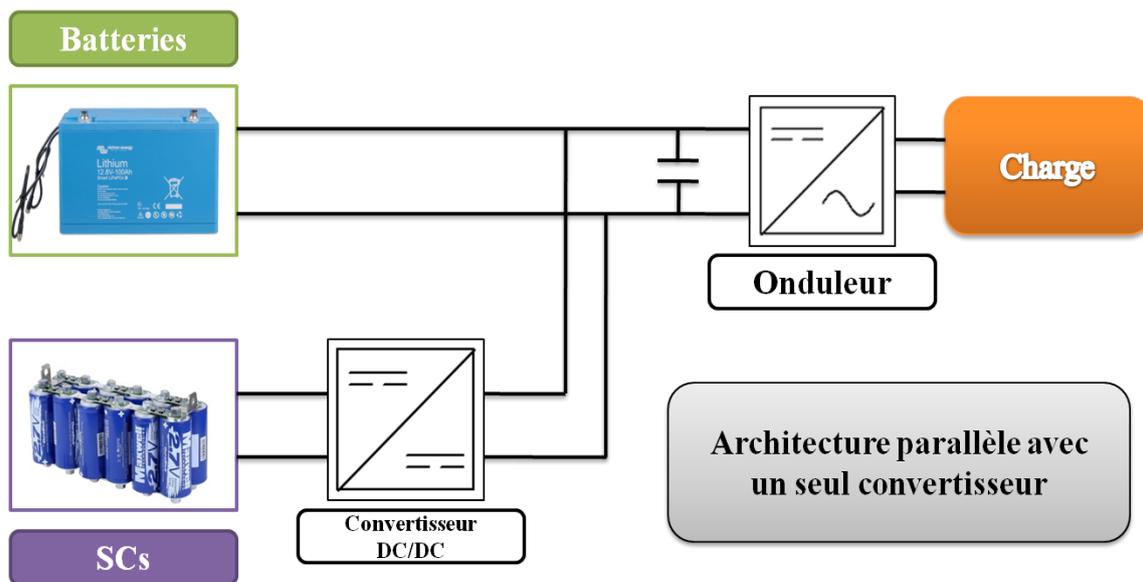


Figure 3.2 Configuration en parallèle avec un seul convertisseur

- **Avantages :**

- Meilleur contrôle de la puissance délivrée par les supercondensateurs.
- Réduction des stress sur la batterie.

- **Inconvénients :**

- Coût supplémentaire dû à l'ajout du convertisseur.
- Complexité accrue par rapport à la configuration sans convertisseur.
- Absence de contrôle sur la batterie

3.2.2.3 Configuration en parallèle avec deux convertisseurs

Cette configuration utilise deux convertisseurs : un pour la batterie et un pour les supercondensateurs. Chaque source d'énergie peut ainsi être contrôlée indépendamment, offrant une flexibilité maximale et une optimisation des performances du système. (Voir Figure 3.3) [130].

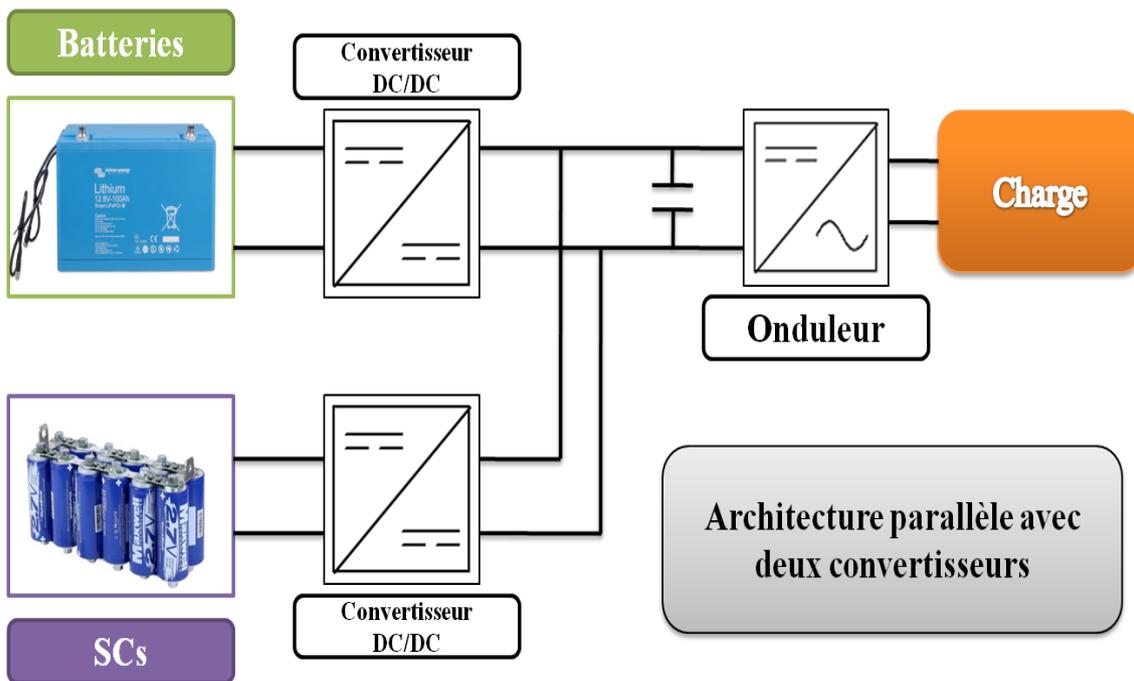


Figure 3.3 Configuration en parallèle avec deux convertisseurs

Avantages :

- Gestion autonome des flux et des tensions pour chaque source.
- Amélioration de la réactivité et de la gestion de l'énergie.
- Renforcement de la fiabilité et de la tolérance aux imperfections.

Inconvénients :

- Augmentation des frais de conception, de mise en place et d'installation.
- Complexité accrue du système de gestion et de contrôle.
- Pour gérer les deux convertisseurs en même temps, il est crucial d'employer des algorithmes de contrôle plus sophistiqués.

3.2.2.4 Comparaison des différentes configurations

Voici ci-dessous le tableau 3.1, il effectue une comparaison des diverses configurations en parallèle qui impliquent les batteries et des supercondensateurs :

Tableau 3.1 Comparaison des différentes configurations pour l'architecture en parallèle

Paramètre	Parallèle sans Convertisseur	Parallèle avec un Seul Convertisseur	Parallèle avec Deux Convertisseurs
Coût de Conception	Faible	Modéré	Élevé
Simplicité	Très simple	Simple	Complexe
Contrôle des Courants	Limité	Amélioré (uniquement pour les supercondensateurs)	Optimal (indépendant pour chaque source)
Stabilisation de la Tension	Par la batterie	Par la batterie avec contrôle supplémentaire	Par les deux sources avec contrôle optimal
Flexibilité	Faible	Modérée	Élevée
Réponse aux Fluctuations de Puissance	Faible	Modérée	Élevée
Fiabilité	Modérée	Modérée à élevée	Élevée
Complexité de Gestion	Très faible	Modérée	Élevée
Tolérance aux Défauts	Faible	Modérée	Élevée

Selon le tableau ci-dessus, on peut conclure que les critères particuliers de l'application, tels que la performance, le coût, la souplesse et la méthode de gestion, ont un impact sur la sélection de la configuration la plus appropriée. L'architecture sans convertisseur est économique et simple mais offre une performance limitée, tandis que l'architecture avec deux convertisseurs offre la meilleure performance et flexibilité au prix d'une plus grande complexité et d'un coût plus élevé.

Dans le cadre de cette thèse, le choix du couplage utilisant un convertisseur pour chaque dispositif de stockage est justifié par la nécessité d'un contrôle précis et flexible des flux d'énergie, une performance optimale et une fiabilité accrue, malgré un coût et une complexité de conception plus élevés.

3.3 Introduction aux stratégies de gestion utilisées dans les systèmes de stockage hybride

La gestion de l'énergie est déterminante pour optimiser la répartition des flux de puissance entre les différentes unités d'un système de stockage hybride. Plusieurs études ont examiné les dispositifs liés aux batteries et supercondensateurs, dans le but d'élaborer des méthodes de gestion efficaces. Ces stratégies cherchent à maximiser l'usage de la complémentarité entre les deux sources, en capitalisant sur les forces respectives des batteries et des supercondensateurs.

3.3.1 Les objectifs partagés des stratégies de gestion dans les dispositifs de stockage hybride

Dans les systèmes hybrides qui incorporent batterie et supercondensateur, l'administration de l'énergie se concentre essentiellement sur la réalisation des buts ci-dessous.

Optimisation de la Durée de Vie des Batteries : L'utilisation de supercondensateurs permet de gérer les fluctuations et les variations rapides de puissance, ce qui réduit les périodes de charge et de décharge des batteries, ce qui a un impact significatif sur leur longévité.

Optimisation des performances générales du Système: En combinant les caractéristiques des deux sources, il est possible d'améliorer la réactivité du système face aux variations de la demande de puissance, assurant ainsi une fourniture d'énergie plus stable et efficace.

Maximisation de l'Efficacité Énergétique : Une gestion parfaite permet de minimiser les pertes énergétiques, En exploitant les avantages de chaque dispositif de stockage en fonction des conditions de mise en marche.

3.3.2 Approches de Gestion de l'Énergie

De nombreuses recherches ont permis d'établir la gestion énergétique entre les batteries et les supercondensateurs, dans le but d'optimiser l'exploitation mutuelle de ces deux sources. Ces stratégies peuvent reposer sur deux idées principales : les stratégies basées sur les règles déterministes et les stratégies basées sur des méthodes d'optimisation intelligentes.

3.2.2.1 Méthode à base de règles et de lois de gestion

Dans l'ensemble, les stratégies basées sur des règles utilisent des groupes de normes prédéfinies pour déterminer la distribution de la puissance. Ces règles sont formulées sous forme de déclarations conditionnelles Si-Alors (If-Then), qui sont simples à comprendre et à implémenter.

Les règles sont définies en fonction des états du système, tels que l'état de charge (SoC), l'appel de courant, et d'autres paramètres. Par exemple : Si la demande de puissance est élevée, alors utiliser les supercondensateurs pour fournir le surplus de puissance.

Nous allons dans ce qui suit citer plusieurs techniques utilisées dans les systèmes de stockage hybrides.

- **Méthode de Commutation Binaire (tout ou rien)**

La stratégie de commutation binaire, également connue sous le nom de stratégie de type tout ou rien ou bien thermostat On/Off, est une méthode simple et efficace de gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides. La base de cette approche est de répartir les flux d'énergie entre les deux dispositifs de stockage de manière à faire fonctionner les deux sources indépendamment l'une de l'autre.

Cette stratégie repose sur le principe de faire fonctionner chaque source d'énergie dans les conditions optimales de performance en lui attribuant un état actif (On) ou désactivé (Off). En

d'autres termes, la puissance demandée est entièrement fournie par l'une ou l'autre des sources comme montrer dans l'Equation 3.1 et 3.2

$$\text{Soit : } P_{Charge} = P_{Bat} \quad (3.1)$$

$$\text{Ou : } P_{Charge} = P_{SC} \quad (3.2)$$

La transition entre les deux sources se fait de manière brusque, sans état intermédiaire. Cela signifie que, à un moment donné, soit la batterie fournit toute la puissance, soit ce sont les supercondensateurs qui le font.

Un diagramme de commutation (Figure 3.4) illustre cette approche, où l'une des sources d'énergie est intégralement chargée de la génération de puissance à tout instant [131].

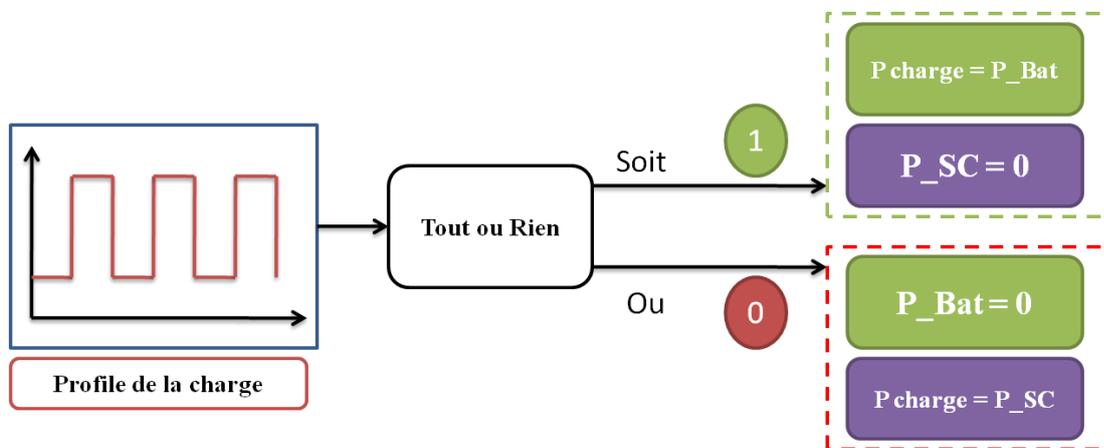


Figure 3.4 Commutation binaire (tout ou rien)

Cette stratégie demeure une option viable pour des applications où la simplicité et la rapidité de réponse sont essentielles, mais il peut être nécessaire d'utiliser des solutions plus avancées afin d'obtenir des performances optimales dans différentes modes de fonctionnement.

- **Méthode de la puissance limite**

Cette méthode consiste à restreindre et à limiter la puissance fournie par la batterie tout au long du profil de puissance. Cette approche consiste à définir à l'avance un seuil de puissance pour la batterie, au-delà duquel les supercondensateurs prennent en charge l'excédent de puissance requis (Figure 3.7).

La limite de la puissance que peut fournir la batterie est déterminée en fonction de ses caractéristiques et de ses particularités techniques. Cette limite à ne pas franchir est déterminé par la capacité maximale de la batterie à fournir une puissance continue sans compromettre son état de santé.

Lorsque la puissance demandée par le profil est inférieure ou égale à la limite préalablement défini, la batterie délivre d'une manière indépendante la puissance demandée. Quand la demande de puissance dépasse le seuil, les supercondensateurs sont utilisés pour générer la puissance supplémentaire requise. Ils fournissent la différence entre le besoin en puissance et le seuil de puissance de la batterie, comme précisé dans l'équation 3.3 [132].

$$P_{Charge} = P_{Bat} + P_{SC} \quad (3.3)$$

Bien que cette stratégie puisse être peu complexe à mettre en œuvre et augmente peu les coûts initiaux, ses avantages en termes de performance et de fiabilité en font une option envisageable.

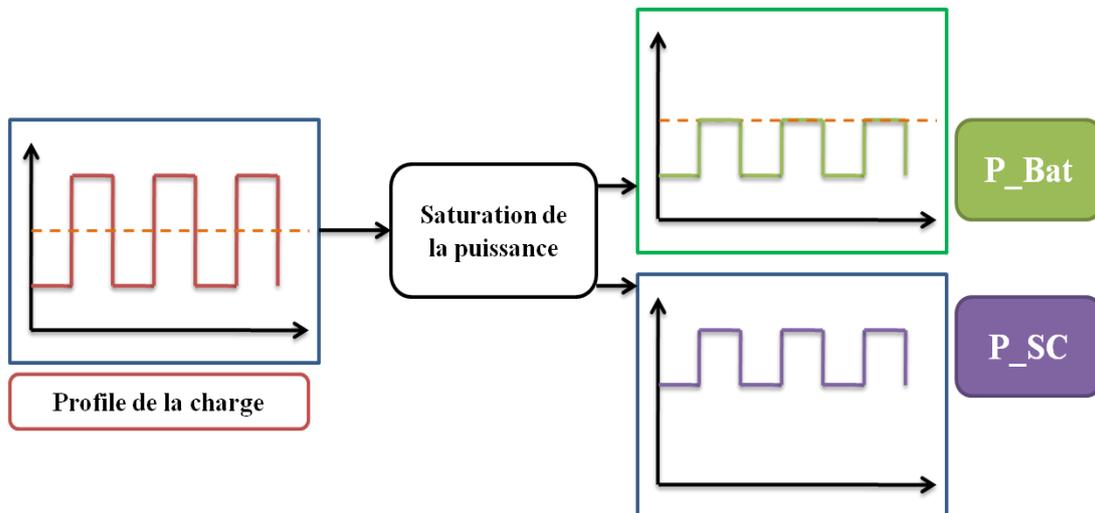


Figure 3.5 Méthode de la puissance limite

- **Méthode d'ajustement de la puissance limite**

La méthode d'ajustement de la puissance limite [132] représente une amélioration et une évolution de la technique de puissance limite classique. Bien qu'elle conserve le principe de base de répartition des flux d'énergie, cette version offre une flexibilité accrue en ajustant le seuil de puissance des batteries en fonction du niveau de charge des dispositifs de stockage disponibles. Contrairement à l'approche classique qui établit un seuil de puissance pour la batterie, ce procédé autorise une modification de ce seuil en fonction de la charge des supercondensateurs. Par conséquent, il est possible de diminuer et de réduire la puissance attribuée à la batterie et de privilégier l'usage des supercondensateurs lorsqu'ils disposent d'une charge adéquate.

L'équation de partage de la puissance utilisée par la méthode d'ajustement de la puissance limite est identique à celle de la puissance limite (Equation 3.2), mais le seuil de distribution est différent dans cette situation.

Bien que cette stratégie soit complexe et coûteuse, elle offre des bénéfices en termes de souplesse et d'efficacité.

- **Méthode de Décomposition Fréquentiel de la puissance**

La méthode de décomposition fréquentielle de puissance est basée sur une méthode novatrice pour gérer les flux d'énergie dans les systèmes de stockage intelligents. Selon cette méthode, le profil de demande d'énergie est divisé en composantes haute et basse fréquence, chacune d'entre elles étant attribuée à la source de stockage la plus appropriée.

La mise en place de cette méthode se fait de la manière suivante :

Dans un premier temps, cette approche consiste à segmenter le profil de la demande d'énergie à l'aide d'un filtre pour déterminer les éléments de fréquence élevée et basse. Les composantes hautes fréquences représentent les fluctuations rapides de la demande énergétique, tandis que les composantes basses fréquences correspondent aux fluctuations plus lentes.

Ensuite on effectue l'attribution des composantes aux sources de stockage

- Il est attribué aux supercondensateurs la responsabilité de gérer les composantes à haute fréquence du profil de puissance. La capacité élevée des supercondensateurs à se charger et à se décharger rapidement leur permet de faire face de manière efficace aux pics de puissance, aux appels de courant et aux fluctuations rapides de la demande.
- Les batteries, quant à elles, sont utilisées pour absorber et fournir les composantes basses fréquences du profil de puissance. Grâce à leur capacité à stocker des quantités importantes d'énergie sur une période prolongée, les batteries sont idéales pour gérer les demandes stables de courant.

Le modèle de décomposition fréquentiel de la puissance est présenté dans la figure 3.6, ainsi que l'attribution ciblée des composants aux sources de stockage [133].

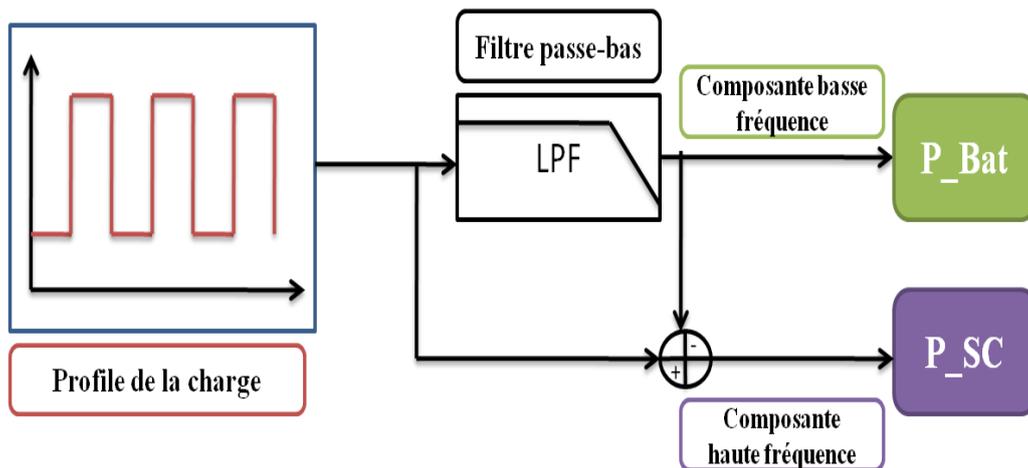


Figure 3.6 Décomposition fréquentiel de la puissance

Le Tableau 3.2 établit une comparaison des stratégies et des méthodes de gestion d'énergie à base de règles vue précédemment en utilisant les avantages et les inconvénients associés à chaque stratégie. Les critères évalués incluent la complexité de mise en œuvre, et la flexibilité opérationnelle.

Tableau 3.2 Comparatif des méthodes de gestion à base de règles et de lois de gestion déterministes

Stratégie	Avantages	Inconvénients
Commutation binaire	- Simplicité d'implémentation - Réduction de la complexité de contrôle	- Fluctuations brusques de puissance - Potentiel de surcharge
Limitation de Puissance	- Réduction des fluctuations de courant - Préservation de la batterie contre les surcharges	- Limitation par le seuil fixe de puissance - Peut ne pas être optimal pour des variations imprévues
Ajustement de la puissance	- Flexibilité accrue dans la gestion des flux de puissance - Meilleure adaptation aux variations de charge	- Complexité accrue de gestion et de calcul - Besoin de systèmes de contrôle plus sophistiqués
Décomposition Fréquentiel	- Optimisation de l'utilisation des capacités spécifiques des supercondensateurs et des batteries - Réduction des fluctuations de courant	- Complexité de mise en œuvre et de contrôle - Coût plus élevé d'implémentation et de maintenance

Ainsi, la stratégie la plus efficace sera déterminée par des priorités techniques telles que la facilité d'exécution et d'implémentation, la diminution des dépenses et des coûts la souplesse opérationnelle, et des risques de surcharge, ainsi que la capacité à faire face aux fluctuations

de charge. Une évaluation approfondie basée sur les caractéristiques spécifiques du système et des besoins opérationnels est essentielle pour choisir la stratégie la plus adaptée.

3.2.2.2 Stratégie à base d'algorithme stochastique itératif (Métaheuristique)

Les métaheuristiques sont des techniques d'optimisation inspirées par des processus naturels ou des principes mathématiques avancés, qui permettent de trouver des solutions proches de l'optimalité dans des espaces de recherche vastes et complexes. Voici quelques exemples d'algorithmes métaheuristiques souvent utilisés en gestion d'énergie :

a. Algorithmes Génétiques (AG) :

La théorie de l'évolution est à l'origine des Algorithmes génétiques (Figure 3.7), qui se manifestent par la génération d'une population initiale de solutions potentielles, représentées des chromosomes. Ces solutions sont soumises à des processus de sélection, de croisement et de mutation à chaque génération afin de générer une nouvelle génération de solutions améliorées. Les AG sont employées dans le domaine de la gestion d'énergie afin d'améliorer la planification de la production, la gestion des sources de stockage et la résolution de problèmes de dimensionnement des régulateurs de charge [134].

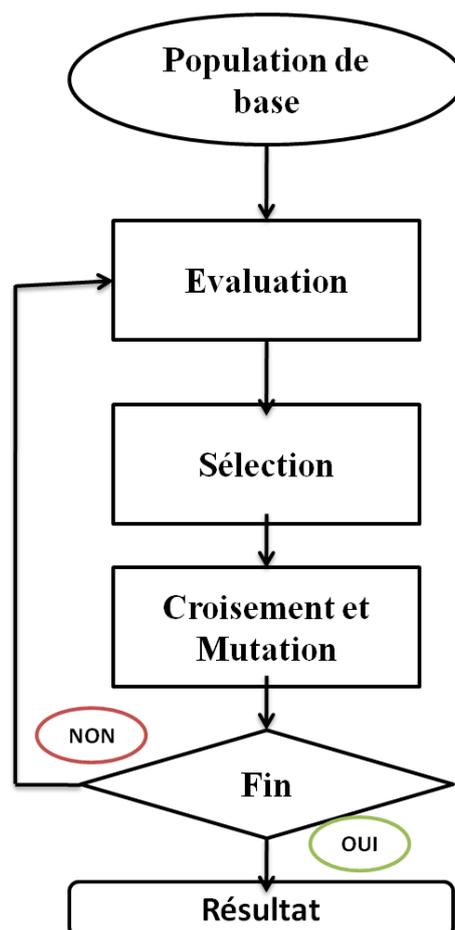


Figure 3.7 Organigramme récapitulatif de l'algorithme génétique

b. Algorithmes de Colonies de Fourmis (ACF) :

Les ACF sont inspirés par le comportement collectif des colonies de fourmis, où chaque fourmi communique par des phéromones pour trouver le chemin le plus court vers une source de nourriture. En utilisant des mécanismes de probabilité et de rétroaction positive (phéromones), les ACF peuvent découvrir des chemins optimaux dans des environnements dynamiques et incertains. En gestion d'énergie, les ACF sont appliqués pour optimiser la distribution d'énergie, et la gestion des réseaux électriques intelligents (Smart grid) [135].

c. Optimisation par Essaim de Particules (PSO) :

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une méthode d'optimisation dérivée des mécanismes d'interaction sociale observés par les scientifiques chez certaines espèces animales, comme les poissons ou les oiseaux, durant la recherche de nourriture. Dans ce cadre, l'espace de recherche est exploré par des particules, qui représentent des solutions potentielles. Ces particules ajustent leur position et leur vitesse en fonction de leurs expériences passées ainsi que de celles des autres particules au sein de l'essaim. La PSO est couramment utilisée en raison de sa simplicité d'implémentation, de ses performances efficaces et de son faible coût de calcul [136].

La position et la vitesse de chaque particule sont actualisées à chaque cycle à l'aide des formules mathématiques suivantes :

$$V_i(k + 1) = w \cdot V_i(k) + C1 \cdot r1 [P_i(k) - x_i(k)] + C2 \cdot r2 [G_i(k) - x_i(k)] \quad (3.4)$$

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + V_i \quad (3.5)$$

- w : facteur d'inertie adaptatif
- $V_i(k)$: vitesse des particules à l'itération k
- $x_i(k)$: position des particules dans l'espace de recherche à l'itération k
- $C1$: facteur cognitif contrôlant le comportement individuel de chaque particule
- $C2$: facteur social contrôlant le comportement collectif de chaque particule
- $r1$ et $r2$: nombres aléatoires uniformément distribués dans l'intervalle $[0, 1]$

La technique PSO est recommandée pour ajuster les gains des contrôleurs afin d'atteindre les paramètres optimaux du contrôleur et, par conséquent, la meilleure sortie du système.

d. Algorithme des Loups Gris (GWO)

L'Algorithme des Loups Gris (GW) est basé sur le comportement social et les stratégies de chasse des loups gris. Il simule la hiérarchie sociale des loups et leurs rôles (alpha, bêta, delta et oméga) pour guider la recherche de solutions optimales. Les loups mettent à jour leur position en se basant sur la position des leaders du groupe (alpha, bêta et delta) et en se dirigeant vers les meilleures solutions connues. Les formules de mise à jour incluent des paramètres qui modélisent le comportement social et de chasse des loups [137].

3.2.2.3 Synthèse comparative des Méthodes Stochastiques

Les méthodes stochastiques les plus couramment utilisées pour l'optimisation sont présentées dans le tableau 3.3. Chacune de ces méthodes est évaluée en fonction de son inspiration, de sa mise à jour des solutions, de sa complexité de calcul, de sa robustesse, de sa convergence, de ses paramètres de contrôle et de ses applications courantes. Les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont mis en évidence par cette comparaison, ce qui facilite le choix de la méthode la plus appropriée en fonction des besoins spécifiques du problème traité.

Tableau 3.3 Comparaison des Méthodes Stochastiques

Critère	Optimisation par Essaim de Particules (PSO)	Algorithmes Génétiques (AG)	Algorithme des Loups Gris (GWO)	Algorithme de Colonie de Fourmis (ACF)
Inspiration	Comportement des essaims d'oiseaux et des bancs de poissons	Evolution biologique et sélection naturelle	Comportement social et stratégies de chasse des loups gris	Comportement de recherche de nourriture des fourmis
Population	Particules	Individus (chromosomes)	Loups	Fourmis
Mise à jour des solutions	Positions et vitesses ajustées par des formules basées sur les meilleures expériences	Sélection, croisement et mutation	Positions ajustées en fonction des leaders du groupe	Pistes de phéromones et probabilités de déplacement
Complexité de calcul	Faible à modérée	Modérée à élevée	Modérée	Modérée à élevée
Robustesse	Bonne, mais dépend des paramètres initiaux	Très bonne, mais coûteux en calculs	Très bonne, bon compromis entre exploration et exploitation	Très bonne, mais sensible aux paramètres de phéromones
Convergence	Rapide, mais peut se coincer dans des optima locaux	Plus lente, mais meilleure exploration	Modérée, équilibre entre vitesse et qualité de la solution	Bonne, mais peut se coincer dans des optima locaux
Paramètres de Contrôle	Facteur d'inertie, coefficients de confiance	Taux de croisement, taux de mutation	Facteurs sociaux et de chasse	Taux d'évaporation des phéromones, influence relative des phéromones et de l'heuristique locale
Applications Typiques	Optimisation des contrôleurs, problèmes d'optimisation continue	Problèmes d'optimisation combinatoire, conception de systèmes	Optimisation continue et combinatoire, gestion de l'énergie	Problèmes de chemins et d'itinéraires, optimisation combinatoire

Plusieurs facteurs spécifiques ont motivé le choix de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) dans notre étude, au détriment d'autres méthodes comme les Algorithmes Génétiques (AG) :

Efficacité et simplicité de mise en œuvre : Le PSO est reconnu pour sa mise en œuvre rapide et conceptuellement plus simple comparée à d'autres méthodes d'optimisation comme les algorithmes génétiques. Sa simplicité de mise en œuvre se traduit par un nombre réduit de paramètres à ajuster, facilitant ainsi l'optimisation.

Efficacité de la recherche : Le PSO est particulièrement performant pour la recherche dans des espaces de solutions multidimensionnels, ce qui est crucial dans notre cas où il est nécessaire d'optimiser simultanément plusieurs paramètres de contrôle pour améliorer les performances d'un système hybride de stockage d'énergie.

Preuves empiriques d'efficacité : Le PSO a été appliqué avec succès dans divers domaines, notamment les applications en énergie renouvelable et l'optimisation des contrôleurs pour les systèmes de stockage d'énergie. Les recherches antérieures ont démontré sa capacité à converger rapidement vers des solutions puissantes.

Ces avantages font du PSO une méthode prometteuse et efficace pour la gestion d'énergie dans des systèmes hybrides, exploitant au mieux la complémentarité entre les batteries et les supercondensateurs. En résumé, l'Optimisation par Essaim de Particules offre une combinaison optimale de simplicité, d'efficacité de recherche et de preuves empiriques, justifiant ainsi son choix pour notre étude [136].

3.3.3 Méthode hybrides de gestion d'énergie

Les méthodes hybrides, qui combinent des techniques fondées sur des règles avec des techniques d'optimisation, gagnent en popularité actuellement dans la gestion d'énergie des systèmes hybrides. Ces stratégies mixtes visent à exploiter les bénéfices des deux méthodes : les approches basées sur des règles sont simples et réactives, tandis que les stratégies d'optimisation sont efficaces et optimisées.

Fréquemment, les méthodes fondées sur des règles sont déterministes et faciles à mettre en place, permettant ainsi une réponse rapide aux fluctuations de la demande et des conditions opérationnelles. Toutefois, leur manque de souplesse peut ne pas toujours assurer une performance optimale. Dans le but de surmonter ces contraintes, des méthodes d'optimisation, comme l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) ou les Algorithmes Génétiques (AG), sont employées afin de déterminer les paramètres optimaux des règles ou d'ajuster ces règles de manière dynamique en fonction des conditions actuelles.

Ces stratégies hybrides peuvent apporter une amélioration significative à la performance globale des systèmes de gestion d'énergie en incorporant des résultats d'optimisation hors ligne. Par exemple, les résultats d'optimisation peuvent servir à établir des limites de puissance dans une méthode de limitation de la puissance, ou à ajuster des contrôleurs dans une méthode de décomposition fréquentielle de la puissance.

L'optimisation hors ligne apporte une intelligence supplémentaire qui permet de prendre en considération la diversité et l'incertitude des conditions de fonctionnement, ce qui permet une gestion d'énergie plus solide et efficace. En outre, Les méthodes hybrides offrent la possibilité

d'améliorer l'exploitation des caractéristiques des différentes sources de stockage d'énergie, telles que les batteries et les supercondensateurs, ce qui améliore la longévité, la fiabilité et les performances globales du fonctionnement du système.

En résumé, l'essor des stratégies hybrides dans la gestion de l'énergie reflète une tendance à adopter des systèmes plus souples et réactifs, capables de répondre aux exigences complexes des applications contemporaines en matière de stockage et de gestion d'énergie.

Alam et al. [138] proposent une approche novatrice utilisant un régulateur intégré à ordre fractionnaire (FOPI) optimisé avec un stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES), ajusté à l'aide de l'optimisation par essaim de particules (PSO), pour améliorer l'inertie virtuelle du système. Les simulations montrent une amélioration des performances en termes de dépassement et de temps de repense, confirmant l'efficacité de cette approche.

Vanchinathan et ses collègues. [139] présentent une nouvelle approche basée sur l'algorithme d'optimisation des baleines (WOA) pour l'ajustement optimal du régulateur proportionnel intégral à ordre fractionnaire (FOPI) dans le contrôle de vitesse sans capteur des moteurs à courant continu sans balai à aimant permanent (PMBLDC) alimentés par des systèmes PV solaires. L'étude met en évidence la robustesse du contrôle de vitesse PMBLDC dans diverses conditions de fonctionnement, comparant l'efficacité du WOA avec d'autres techniques d'optimisation telles que l'algorithme des chauves-souris (BA) et l'optimisation du loup gris (GWO).

Saadi et al. [140] visent à optimiser l'extraction de puissance à partir d'un panneau photovoltaïque et à la livrer à un système de charge dans des conditions météorologiques standard. Ils utilisent des convertisseurs DC-DC Boost standard et des convertisseurs DC-DC Buck-Boost bidirectionnels pour le contrôle de la tension. Deux algorithmes de contrôle MPPT, l'optimisation par essaim de particules (PSO) et l'incrément de conductance (INC), sont comparés. Les résultats montrent que l'algorithme MPPT INC offre une réponse transitoire PV stable, tandis que l'algorithme MPPT PSO atteint une bonne réponse PV en régime permanent.

Cabrane et ses collègues [141] suggèrent une méthode novatrice pour contrôler la tension du bus DC dans le stockage d'énergie solaire, en combinant des batteries et des supercondensateurs. L'approche énergétique fondée sur la logique floue exposée dans l'étude s'est avérée efficace pour conserver les charges des supercondensateurs et des batteries dans un état satisfaisant. Cependant, une comparaison approfondie avec d'autres méthodologies de contrôle, telles que celles basées sur des modèles mathématiques ou des techniques d'optimisation, contribuerait à une évaluation plus complète des avantages de l'utilisation de la logique floue dans cette application spécifique.

Guentri et al. [142] ont mené une recherche innovante utilisant des méthodes heuristiques pour explorer les systèmes de gestion de l'énergie. En plus de démontrer l'efficacité d'une stratégie basée sur des techniques heuristiques telles que PSO (optimisation par essaim de particules) et GA (algorithme génétique) pour la gestion d'un système de stockage d'énergie hybride combinant batteries et supercondensateurs, leurs contributions ont posé les bases conceptuelles pour la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques. Ils ont conclu que l'approche PSO produisait les meilleurs résultats. La recherche pourrait être étendue en explorant les performances de l'approche PSO dans des scénarios à plus grande échelle, afin de comprendre ses limitations pour des applications plus complexes.

Les récents progrès dans l'optimisation des régulateurs proportionnels intégraux d'ordre fractionnaire ont été largement influencés par le travail novateur de Bouderras et al. [143]. Dans le cadre d'un système photovoltaïque connecté au réseau, leur étude se concentre sur la mise en œuvre de la méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour ajuster finement les paramètres du régulateur PI et FOPI. Cette méthode a permis une régulation plus précise et a montré une amélioration notable des performances du système.

Zdiri et al. [144], quant à eux, ont contribué aux stratégies de contrôle pour les systèmes hybrides PV-batterie- supercondensateurs en utilisant la technique de contrôle par réseau de neurones artificiels (ANN) à mode glissant. Cependant, il est important de noter une objection potentielle concernant l'utilisation de l'ANN. Un aspect méritant une attention particulière est la complexité inhérente et la nature boîte noire des modèles ANN, qui peuvent poser des défis en termes de compréhensibilité. La transparence du processus décisionnel dans les systèmes contrôlés par ANN pourrait être une préoccupation. Des études futures pourraient examiner des approches visant à augmenter la transparence des modèles ANN, garantissant ainsi l'harmonie entre leur potentiel d'optimisation puissant et la compréhensibilité nécessaire pour une application utile.

À la lumière de l'examen de tous ces travaux, l'implémentation d'un système de gestion de stockage d'énergie est essentielle pour viser une réponse optimale et dynamique aux fluctuations de la production solaire et de la demande énergétique. Pour atteindre ces objectifs, il est crucial de remplacer les contrôleurs conventionnels par des solutions plus efficaces, caractérisées par une capacité accrue d'ajustement et de régulation. De plus, l'optimisation des paramètres de ces contrôleurs est nécessaire pour assurer une efficacité maximale du système

3.4 Techniques de suivi de point de fonctionnement maximum (MPPT)

Pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques, plusieurs techniques de Suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT) sont utilisées, chacune avec ses propres principes et avantages. Voici une discussion les différentes techniques couramment utilisées [145] :

- **Perturber et Observer (P&O)**

Cette technique consiste à altérer régulièrement la tension ou le courant du dispositif photovoltaïque et à suivre les variations de puissance produite. Si une perturbation provoque une hausse de puissance, elle se poursuit dans le même sens ; dans le cas contraire, elle se déplace dans le sens opposé.

- **Incrément de la Conductance (IncCond)**

La technique de l'incrément de la conductance utilise la dérivée de la puissance par rapport à la tension afin d'ajuster les paramètres du système. Elle compare l'incrément de la conductance instantanée à la conductance incrémentale pour déterminer la direction vers le MPP.

- **Fraction de la Tension en Circuit Ouvert (FCO)**

Cette méthode estime le MPP en mesurant une fraction de la tension en circuit ouvert du PV. La tension MPP est approximativement une fraction constante de la tension en circuit ouvert.

- **Fraction de Courant de Court-Circuit (FCC)**

Similaire à la méthode FCO, cette technique utilise une fraction du courant de court-circuit pour estimer le MPP. Le courant MPP est approximativement une fraction constante du courant de court-circuit.

- **Contrôle à Base de la Logique Floue (LF)**

Cette technique utilise des règles floues pour ajuster la tension ou le courant en fonction des entrées floues dérivées des conditions du système. Elle offre une grande adaptabilité aux variations complexes des conditions météorologiques.

- **Algorithmes Intelligents (GA, PSO, etc.)**

Les algorithmes tels que les algorithmes génétiques (AG) et l'optimisation par essaim de particules (PSO) utilisent des approches évolutives ou stochastiques pour ajuster les paramètres MPPT. Ils sont très efficaces et précis, mais nécessitent des ressources de calcul importantes.

Le tableau 3.4 établit un résumé des différentes techniques de recherche du point de fonctionnement maximum (MPPT), leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Tableau 3.4 Comparatif des techniques MPPT

Technique MPPT	Principe	Avantages	Inconvénients
Perturber et Observer (P&O)	Perturber périodiquement la tension ou le courant et observer l'impact sur la puissance.	Facile à implémenter, peu de calculs, efficace en conditions stables.	Oscillations autour du MPP, moins efficace sous variations rapides d'irradiance.
Incrément de la Conductance (IncCond)	Utilise la dérivée de la puissance par rapport à la tension pour ajuster la tension ou le courant.	Plus précis que P&O, performant sous variations rapides d'irradiance.	Complexité accrue, nécessite davantage de calculs que P&O.
Mesure d'une Fraction de la Tension en Circuit Ouvert (FCO)	Utilise une fraction de la tension en circuit ouvert pour estimer le MPP.	Simple à mettre en œuvre, efficace en faible irradiance.	Moins précis, sensible aux variations de température.
Mesure d'une Fraction de Courant de Court-circuit (FCC)	Utilise une fraction du courant de court-circuit pour estimer le MPP.	Simple à mettre en œuvre, moins affecté par les changements de température.	Moins précis, nécessite ajustements fréquents en raison des variations d'irradiance.
Contrôle à Base de la Logique Floue (LF)	Utilise des règles floues pour ajuster la tension ou le courant en fonction des entrées floues.	Adaptabilité aux variations complexes des conditions météorologiques.	Complexité élevée, nécessite une expertise approfondie.
Algorithmes Intelligents (GA, PSO, etc.)	Utilisation d'algorithmes évolutifs ou d'optimisation stochastique pour ajuster les paramètres MPPT.	Très efficace et précis, haute adaptabilité.	Complexité élevée, nécessite des ressources de calcul importantes.

Dans le cadre de cette étude, la technique MPPT à incrément de la conductance (IncCond) a été choisie. Cette décision est motivée par plusieurs facteurs :

- **Précision Supérieure** : L'IncCond est plus précis que les méthodes simples comme P&O, notamment sous des conditions de variations rapides d'irradiance, ce qui est crucial pour maintenir une performance optimale du système PV.
- **Performance sous Variations Rapides** : Contrairement aux techniques FCO et FCC, l'IncCond s'adapte mieux aux variations rapides des conditions environnementales.
- **Efficacité et Fiabilité** : Cette méthode offre un bon compromis entre complexité et performance, assurant une optimisation efficace avec une fiabilité accrue du système.

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié minutieusement les mécanismes hybrides de stockage d'énergie en combinant batteries et supercondensateurs pour optimiser les performances des systèmes énergétiques solaires. Après une analyse approfondie de la littérature nous avons opté pour une stratégie de gestion hybride qui combine des méthodes basées sur des règles avec des approches intelligentes, appliquées à une architecture incluant deux convertisseurs. Cette approche permet une meilleure adaptation aux fluctuations des conditions de charge et d'ensoleillement, tout en maximisant l'efficacité et la durabilité du système.

Nous avons également exploré différents types de fonctions de fitness pour optimiser la gestion de l'énergie, ce qui permet de mieux répondre aux exigences spécifiques de chaque situation. En outre, ce chapitre a présenté les deux systèmes étudiés : l'un appliquant un algorithme avancé de gestion de l'énergie pour un système autonome avec stockage hybride, et l'autre concernant un système sans stockage connecté au réseau, spécifiquement appliqué à un centre de tri des déchets. Par ailleurs, nous avons effectué une synthèse comparative des différentes techniques de suivi du point de puissance maximale pour évaluer leur efficacité dans les systèmes hybrides de gestion d'énergie. Cette analyse a révélé les méthodes les plus appropriées pour optimiser la collecte et l'utilisation à l'énergie photovoltaïque.

CHAPITRE 4

STRATEGIES PROPOSEES DE COMMANDE ET DE GESTION DE CONTROLE DU FLUX D'ENERGIE POUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

4.1 Introduction

Ce chapitre aborde les méthodes pour contrôler et gérer le flux d'énergie dans les dispositifs de stockage hybrides qui combinent des batteries et des supercondensateurs, un composant crucial pour maximiser la performance des installations photovoltaïques. Il est primordial de piloter ces dispositifs de manière efficace afin de remédier aux interruptions de l'énergie solaire et d'assurer un approvisionnement constant et continu, tout en optimisant la durabilité et l'efficacité des composants de stockage énergétique.

Nous allons explorer les différentes approches de contrôle, en mettant l'accent sur l'utilisation combinée de régulateurs avancés comme le FOPI (Fractional Order Proportional-Integral) et les algorithmes d'optimisation avancés en plus de la décomposition fréquentiel de la puissance. Ces méthodologies seront analysées en termes de leur capacité à ajuster automatiquement les paramètres du système afin d'atteindre des performances optimales, en particulier dans des contextes et des cas de changements imprévisibles des besoins en matière de courant de charge et d'ensoleillement.

En nous appuyant sur ces approches, nous présenterons les stratégies spécifiques de gestion du stockage hybride et leurs impacts sur la performance globale du système photovoltaïque. Ce chapitre mettra en lumière l'importance de l'intégration de solutions avancées de contrôle pour maximiser et augmenter d'une manière significative la flexibilité, la fiabilité et l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

4.2 Présentation et description des systèmes étudiés

Dans le cadre de cette étude, deux systèmes distincts ont été examinés pour évaluer les performances ainsi que les avantages des différentes configurations en lien avec les installations photovoltaïques dans le but de palier aux problèmes liés au stockage.

Système 1 : Système photovoltaïque autonome avec stockage hybride (Batterie et Supercondensateurs)

Le premier système est un système photovoltaïque autonome intégrant une solution de stockage hybride composée de batteries et de supercondensateurs. Ce système a été développé dans le but de garantir une alimentation constante et stable en énergie renouvelable, sans avoir besoin de dépendre du réseau électrique. Il est donc adapté aux zones où le réseau électrique est absent (zone rurale et désertique). Les batteries fournissent l'énergie nécessaire aux charges de base pour une période de fonctionnement prolongée, tandis que les supercondensateurs gèrent les pics de puissance et les variations rapides. L'association de ces deux éléments permet d'accroître la longévité des batteries en diminuant les fluctuations de courant et en optimisant le stockage et la répartition de l'énergie générée par les panneaux solaires.

Système 2 : Système photovoltaïque couplé au réseau alimentant un centre de tri des déchets

Le second système étudié est un système photovoltaïque sans solution de stockage, directement couplé au réseau électrique. Ce système est destiné à alimenter un centre de tri des déchets, en injectant l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques directement dans le réseau. Cette configuration favorise la réduction des dépenses associées au stockage d'énergie tout en profitant de la stabilité et de la fiabilité du réseau pour pallier les fluctuations dans la production solaire.

Les deux dispositifs présentent des opportunités attrayantes pour la gestion de l'énergie et l'incorporation des ressources renouvelables dans des applications particulières. Le premier système permet une autonomie complète et une meilleure gestion des fluctuations de charge, tandis que le second offre une solution économique et simple pour l'intégration de l'énergie solaire dans des infrastructures existantes.

4.2.1 Système photovoltaïque autonome avec stockage hybride (HESS)

Le système photovoltaïque autonome étudié est représenté dans la Figure 4.1 Ce système est conçu pour fonctionner indépendamment du réseau électrique et intègre un générateur photovoltaïque (PV) connecté au bus DC via un convertisseur DC-DC boost. Le Système de Stockage d'Énergie Hybride (HESS) associe des batteries et des supercondensateurs, offrant ainsi une solution de stockage combinée pour optimiser la gestion de l'énergie.

Les principales composantes du système sont les suivantes :

1. **Générateur Photovoltaïque (PV)** : Il convertit l'énergie solaire en électricité et la fournit au bus DC.
2. **Convertisseur DC-DC Boost** : Il régule la tension du générateur PV pour l'adapter aux besoins du bus DC et maximise la puissance extraite grâce à la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking).
3. **Système de Stockage d'Énergie Hybride (HESS)** :
 - **Batteries** : Elles stockent l'énergie excédentaire produite par le PV et la délivrent lorsque la production PV est insuffisante pour satisfaire la demande.
 - **Supercondensateurs** : Ils contrôlent les changements rapides de charge et de production photovoltaïque, offrant une réaction prompte face aux variations de puissance.
4. **Convertisseurs DC-DC Buck-Boost** : Chaque élément du HESS est relié au bus DC par un convertisseur DC-DC buck-boost, ce dernier permettant de gérer les flux de puissance d'une manière bidirectionnels entre les sources de stockage et le bus DC.
5. **Charge DC** : Elle peut être alimentée par l'une des trois sources : le générateur PV, les batteries ou les supercondensateurs.

Dans ce modèle, une stratégie performante pour la gestion de l'énergie (EMS) est mise en place pour optimiser l'exploitation des ressources énergétiques à disposition.

Un contrôleur PI régule chaque convertisseur DC-DC buck-boost pour maintenir un équilibre optimal entre l'offre et la demande d'énergie. Le MPPT est utilisé pour extraire la puissance maximale du générateur PV, tandis que l'EMS coordonne les flux d'énergie pour assurer une alimentation continue et stable de la charge DC.

Ce système hybride offre plusieurs avantages :

Autonomie : Capable de fonctionner indépendamment du réseau électrique, il est idéal pour les sites isolés.

Optimisation de l'énergie : L'association de batteries et de supercondensateurs favorise une gestion efficace des fluctuations de production et de demande, ce qui optimise la performance générale du dispositif.

Réduction du stress sur les composants Les supercondensateurs captent les pics de puissance, diminuant ainsi le stress lié aux batteries tout en prolongeant leur longévité.

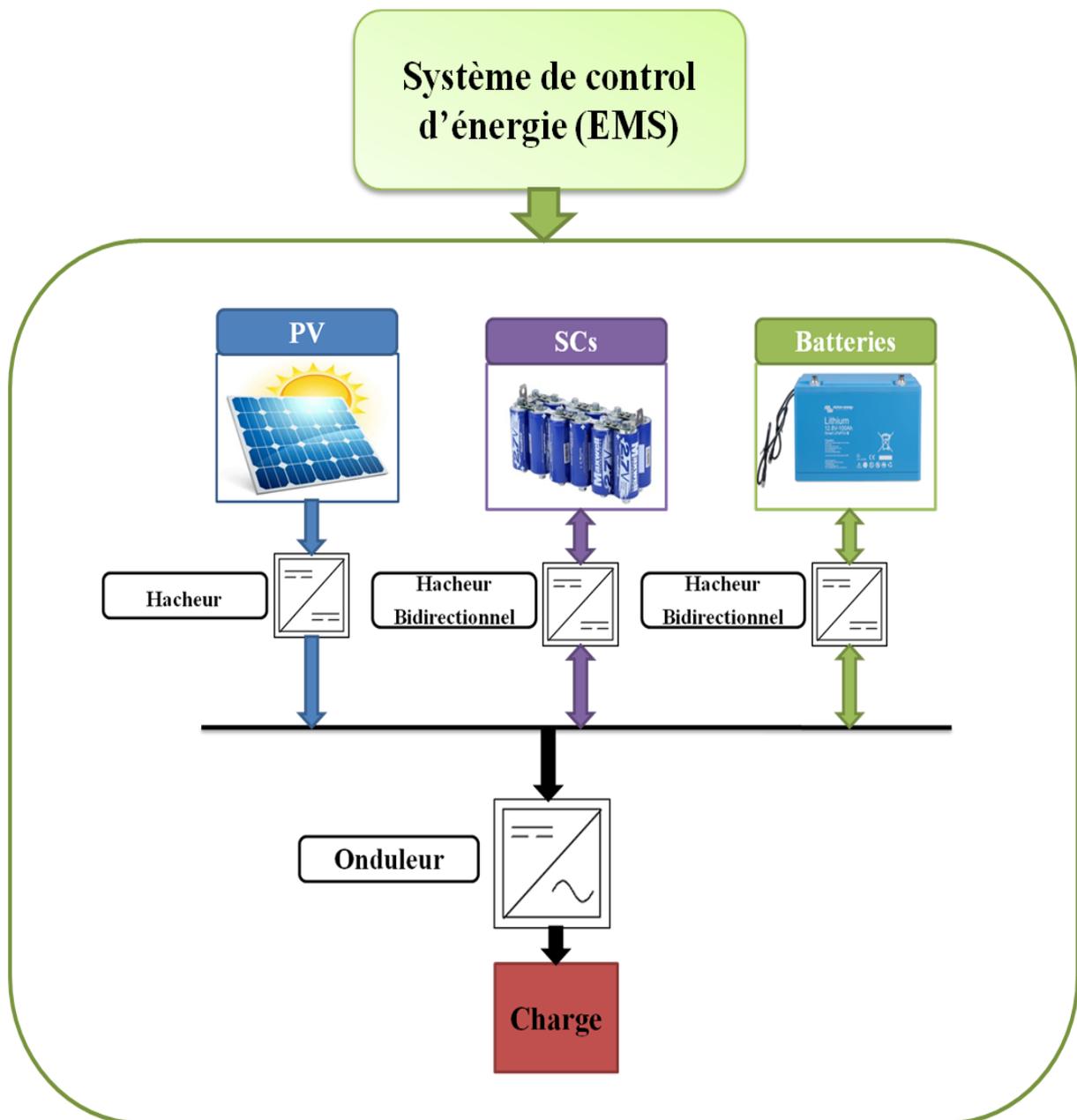


Figure 4.1 Schéma général du système PV autonome avec HESS et système de control d'énergie (EMS).

4.3 Mécanisme et structure de l'approche de contrôle proposée

La structure de la stratégie de contrôle suggérée, qui vise à réduire la repense à la demande de courant de pointe de la batterie se compose de deux éléments principaux : un filtre passe-bas (LPF) et un contrôleur d'ordre fractionnaire (FOPID). Les paramètres du contrôleur FOPID sont optimisés grâce à l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour atteindre des performances optimales. La stratégie de contrôle proposée est donc une hybridation entre une méthode de gestion à base de règles et une méthode d'optimisation intelligente. Les paragraphes qui suivent présentent les différents éléments qui composent la stratégie de contrôle suggérée.

4.3.1 Filtre Passe-bas (LPF)

La production d'énergie photovoltaïque et la demande de charge fluctuent considérablement pendant le fonctionnement. Dans un système conventionnel, ces fluctuations imposent un stress important aux batteries, qui doivent compenser ces variations

Pour éviter cela, il est possible de diviser les variations de puissance entre la génération et la consommation en deux composants distincts : le composant transitoire haut fréquence (HFC) et le composant stable bas fréquence (LFC). La batterie prendra en charge le LFC, tandis que les supercondensateurs géreront le HFC. Cette approche réduit le stress dynamique sur la batterie en empêchant la composante haute fréquence de la solliciter [146].

En pratique, un filtre passe-bas (LPF) est utilisé pour séparer ces deux composants. Le LPF permet de lisser les variations rapides de la puissance, n'autorisant que les variations lentes compatibles avec les caractéristiques de la batterie à passer à travers le filtre. Le schéma du filtre passe-bas est illustré dans la Figure 4.2.

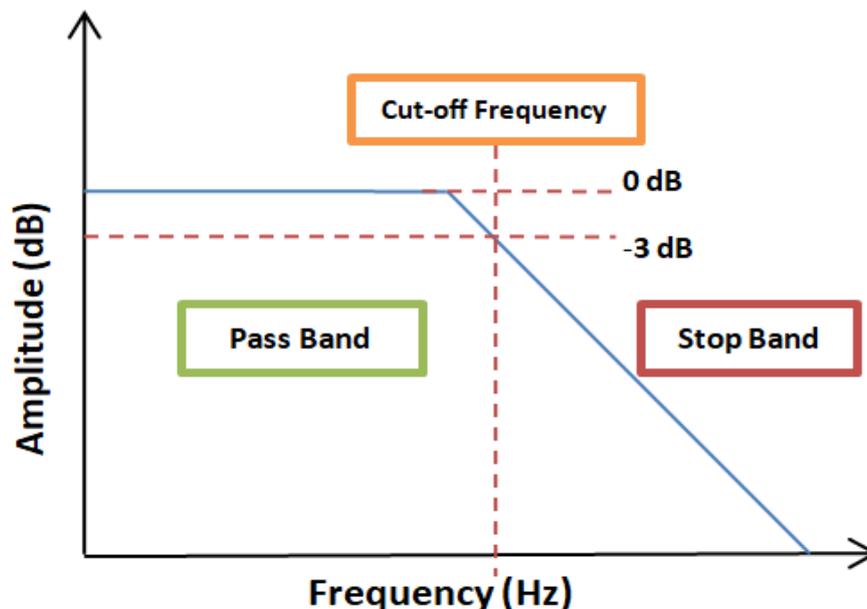


Figure 4.2 Diagramme du filtre passe-bas [147]

4.3.2 Fonctionnement du Filtre Passe-bas

Séparation des Composantes de Fréquence : Le LPF divise le signal de puissance en composants haute fréquence et basse fréquence. Les fluctuations rapides (HFC) sont filtrées, permettant seulement aux fluctuations lentes (LFC) de passer.

Distribution des Tâches : Le signal basse fréquence, correspondant aux fluctuations lentes de la puissance, est pris en charge par la batterie. Les supercondensateurs, quant à eux, s'occupent des variations rapides de la puissance, correspondant aux composantes hautes fréquences.

Réduction du Stress Dynamique : En attribuant les composantes hautes fréquences aux supercondensateurs, le LPF aide à minimiser le stress dynamique sur la batterie. Cela réduit l'usure et prolonge la durée de vie de la batterie.

4.3.3 Avantages du Filtre Passe-bas dans le stockage hybride

Réduction de la Chaleur Générée : En évitant les courants fluctuants élevés, la génération de chaleur interne est minimisée, ce qui réduit la résistance interne et améliore l'efficacité.

Prolongation de la longévité de la Batterie : En limitant les fluctuations rapides, le LPF diminue le stress dynamique, contribuant à prolonger la durée de vie de la batterie.

Optimisation des Performances du Système : La séparation efficace des composantes de fréquence permet une gestion plus optimisée de l'énergie, assurant que chaque composant du système de stockage fonctionne dans ses conditions idéales [146].

4.4 Régulateur PID à Ordre Fractionnaire (FOPID)

Ces dernières années, les chercheurs se sont de plus en plus intéressés à la conception de nouveaux régulateurs PID en raison de leurs avantages par rapport aux régulateurs PID classiques. Ces avantages incluent une amélioration des performances des systèmes dynamiques non linéaires et une sensibilité réduite aux changements des paramètres du système. Cette nouvelle conception peut être appliquée dans de nombreux domaines, notamment les théories de contrôle [147, 148].

En 1999, Podlunby [149] a proposé ce dispositif de contrôle connu sous le nom de régulateur PID à ordre fractionnaire (ou FOPID). Contrairement au régulateur PID classique, qui utilise les paramètres de contrôle K_p (proportionnel), K_i (intégral), et K_d (dérivé), le FOPID inclut également des composantes fractionnaires pour les parties intégrales et dérivées, indiquées par λ et μ . La figure 4.3 illustre le schéma général du contrôleur PID à ordre fractionnaire.

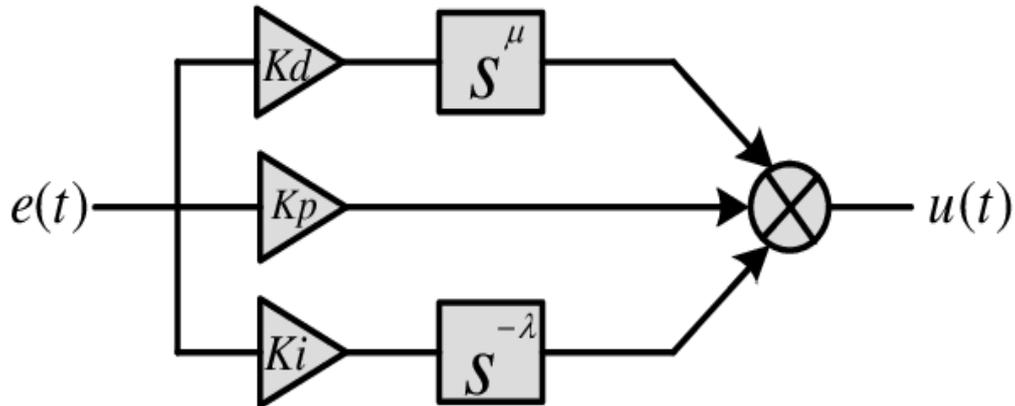


Figure 4.3 Contrôleur PID a ordre fractionnaire (FOPID)

L'équation suivante donne la loi de commande du régulateur PID à ordre fractionnaire:

$$u(t) = (Kp + KiD^{-\lambda} + KdD^{\mu}) e(t) \quad (4.1)$$

- $u(t)$: l'entrée du contrôleur
- $e(t)$: est l'erreur

En appliquant la transformée de Laplace sur l'équation on Equation (4). Equation (5) donne l'équation de transfert du contrôleur dans les conditions initiales.

$$G(s) = Kp + Ki s^{-\lambda} + Kd s^{\mu} \quad (4.2)$$

Les ordres fractionnaires des termes intégral et dérivé sont respectivement notés λ et μ .

Les constantes de gain proportionnel, intégral et dérivé sont représentées par Kp , Ki et Kd . Pour un régulateur PID classique, les valeurs de λ et μ sont égales à 1, ce qui signifie que le PID classique est un cas particulier du FOPID. La Figure 4.4 illustre les domaines de contrôle pour le régulateur FOPID en comparaison avec le PID classique.

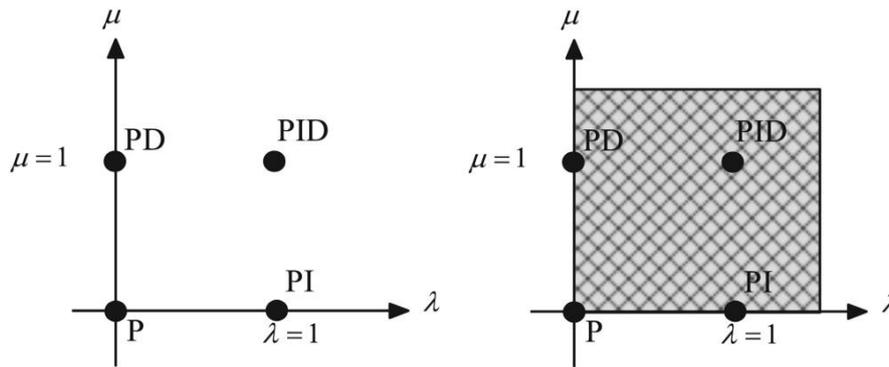


Figure 4.4 Comparaison des domaines de control entre le PID et le FOPID

En résumé, le régulateur FOPID constitue une avancée majeure par rapport aux régulateurs PID, proposant des avantages conséquents en matière de solidité de performance, et de souplesse. Son déploiement dans différents secteurs démontre son efficacité et sa pertinence pour les systèmes complexes.

Contrairement au contrôleur PID classique qui n'optimise que trois paramètres (proportionnel K_p , intégral K_i , et dérivé K_d), la conception du contrôleur FOPID nécessite l'optimisation de cinq paramètres : K_p , K_i , K_d , ainsi que les ordres fractionnaires λ et μ . Cette extension permet une flexibilité accrue dans la réalisation de la dynamique du système de contrôle en permettant un ajustement plus précis des réponses transitoires et stationnaires [150].

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi une structure FOPI, où K_d est fixé à zéro. Cette décision est motivée par plusieurs raisons :

Simplification de la conception : En éliminant le terme dérivé, la complexité du contrôleur est réduite, facilitant ainsi son implémentation.

Prévention des réponses instables : Les termes dérivés peuvent introduire des réponses instables, en particulier dans les systèmes avec du bruit élevé ou des variations rapides.

Réduction des coûts : Un contrôleur sans terme dérivé nécessite moins de ressources de calcul, ce qui peut réduire les coûts matériels et énergétiques.

Amélioration de la robustesse : Une structure FOPI sans dérivée est généralement plus robuste face aux variations des paramètres du système, ce qui est crucial pour assurer des performances stables et fiables dans des conditions variées.

Ce choix de configuration répond de manière optimale à nos objectifs spécifiques de simplification, robustesse, et efficacité.

De plus, l'ajustement simultané de cinq variables pour un contrôleur FOPID, au lieu de trois pour un contrôleur FOPI, est nécessaire pour éviter des comportements indésirables tels que le dépassement. Par conséquent, dans certaines situations, comme avec le contrôleur FOPI mentionné précédemment, il peut être préférable d'opter pour des contrôleurs sans terme dérivé lorsque la complexité de mise en œuvre doit être réduite sans affecter les performances globales du système.

Il est intéressant de noter que, dans les références [143] et [150], le terme dérivé a été omis, suggérant une préférence pour des approches de contrôle simplifiées. Cela peut indiquer une tendance à privilégier la stabilité et la simplicité de conception dans ces contextes spécifiques, plutôt que d'opter pour des méthodes plus complexes comme le contrôleur FOPID.

4.5 Types de Fonctions de Fitness

Le processus d'optimisation des contrôleurs de systèmes dynamiques repose sur la définition de fonctions de fitness qui permettent de quantifier la performance d'une solution candidate [151]. Différentes variantes de fonctions de fitness sont fréquemment employées afin d'évaluer les performances des systèmes de contrôle, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients en fonction du contexte d'application. Voici une description détaillée des principaux types de fonctions de fitness :

a) Erreur Absolue Intégrale (IAE)

La fonction de fitness IAE mesure la somme des valeurs absolues de l'erreur au fil du temps. Elle est définie par l'équation suivante :

$$IAE = \int_0^t (|e(t)|) dt \quad (4.3)$$

Où $e(t)$ est l'erreur entre la valeur de référence et la valeur réelle du système.

Cette fonction de fitness est appréciée pour sa simplicité et son interprétation intuitive. Elle pénalise de manière égale toutes les erreurs, quelle que soit leur durée ou leur instant d'apparition.

b) Erreur Quadratique Intégrale (ISE)

La fonction ISE évalue la performance en intégrant le carré de l'erreur au fil du temps Elle est définie par l'équation suivante :

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (4.4)$$

Cette fonction met davantage l'accent sur les grandes erreurs, car celles-ci ont un impact plus significatif sur la valeur de l'ISE en raison de l'élévation au carré. Elle est utile pour les applications où il est crucial de minimiser les erreurs importantes.

c) Erreur Absolue Intégrale Pondérée par le Temps (ITAE)

La fonction ITAE intègre l'erreur absolue pondérée par le temps, ce qui signifie que les erreurs survenant plus tard dans la période d'observation ont un poids plus important. Elle est définie par l'équation suivante :

$$ITAE = \int_0^t t \cdot (e(t))^1 dt \quad (4.5)$$

Cette fonction de fitness est particulièrement utile pour les systèmes où il est essentiel de corriger rapidement les erreurs initiales et d'assurer une réponse stable et rapide.

d) Erreur Quadratique Intégrale Pondérée par le Temps (ITSE)

Semblable à l'ITAE, la fonction ITSE intègre l'erreur au carré pondérée par le temps. Elle est définie par l'équation suivante :

$$ITSE = \int_0^t t \cdot (e(t))^2 dt \quad (4.6)$$

Cette fonction de fitness pénalise sévèrement les grandes erreurs survenant tard dans la période d'observation, favorisant ainsi des solutions qui corrigent rapidement et efficacement les erreurs.

Outre les fonctions d'intégration des erreurs, certains critères de fitness peuvent inclure des paramètres spécifiques tels que le dépassement maximal et le temps de réglage. Ces critères sont essentiels pour des applications où il est crucial de limiter les oscillations et de garantir une convergence rapide vers la valeur de référence.

Le choix d'utiliser l'Erreur Absolue Intégrale (IAE) comme fonction objectif lors de l'optimisation présente plusieurs avantages notables dans le cadre de cette étude :

1. **Sensibilité aux Déviations Absolues** : L'IAE mesure directement les écarts absolus entre les sorties souhaitées et réelles du système. Elle traite de manière équitable les erreurs positives et négatives, ce qui est essentiel dans les systèmes de contrôle où minimiser les erreurs de suivi est crucial indépendamment de leur direction.
2. **Interprétation Intuitive** : La simplicité de l'IAE facilite son interprétation. Elle représente la somme cumulative des valeurs d'erreur absolue sur un intervalle de temps défini, offrant ainsi une mesure claire de la performance globale.
3. **Robustesse** : Contrairement à d'autres métriques telles que l'Erreur Quadratique Intégrale (ISE), l'IAE est moins sensible aux erreurs occasionnelles importantes. Cette robustesse garantit que le processus d'optimisation se concentre sur la réduction globale des erreurs plutôt que de réagir fortement à des valeurs aberrantes isolées.
4. **Stabilité du Système** : Minimiser l'IAE favorise la stabilité des réponses du système. En visant à réduire l'erreur absolue totale, la stratégie de contrôle encourage un comportement plus régulier et cohérent du système, sans introduire d'oscillations excessives ou de corrections trop vigoureuses.
5. **Facilité de Calcul** : Le calcul de l'IAE est efficace sur le plan computationnel et relativement simple par rapport à des métriques plus complexes. Cette efficacité est précieuse lors des processus d'optimisation itératifs, où une évaluation rapide et des ajustements des paramètres de contrôle sont nécessaires.

En résumé, le choix de l'IAE comme fonction objectif est en accord avec les objectifs de l'étude visant à optimiser efficacement les paramètres de contrôle [152].

4.6 Composants du Système Photovoltaïque Autonome avec Stockage Hybride

Le système photovoltaïque autonome étudié est représenté à la Figure 4.5. Ce système comprend un générateur photovoltaïque (PV) connecté au bus DC via un convertisseur DC-DC Boost. Le Système de Stockage d'Énergie Hybride (HESS) est composé d'une combinaison de batteries et de supercondensateurs. Chaque dispositif de stockage d'énergie est relié au bus DC par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC Buck-Boost.

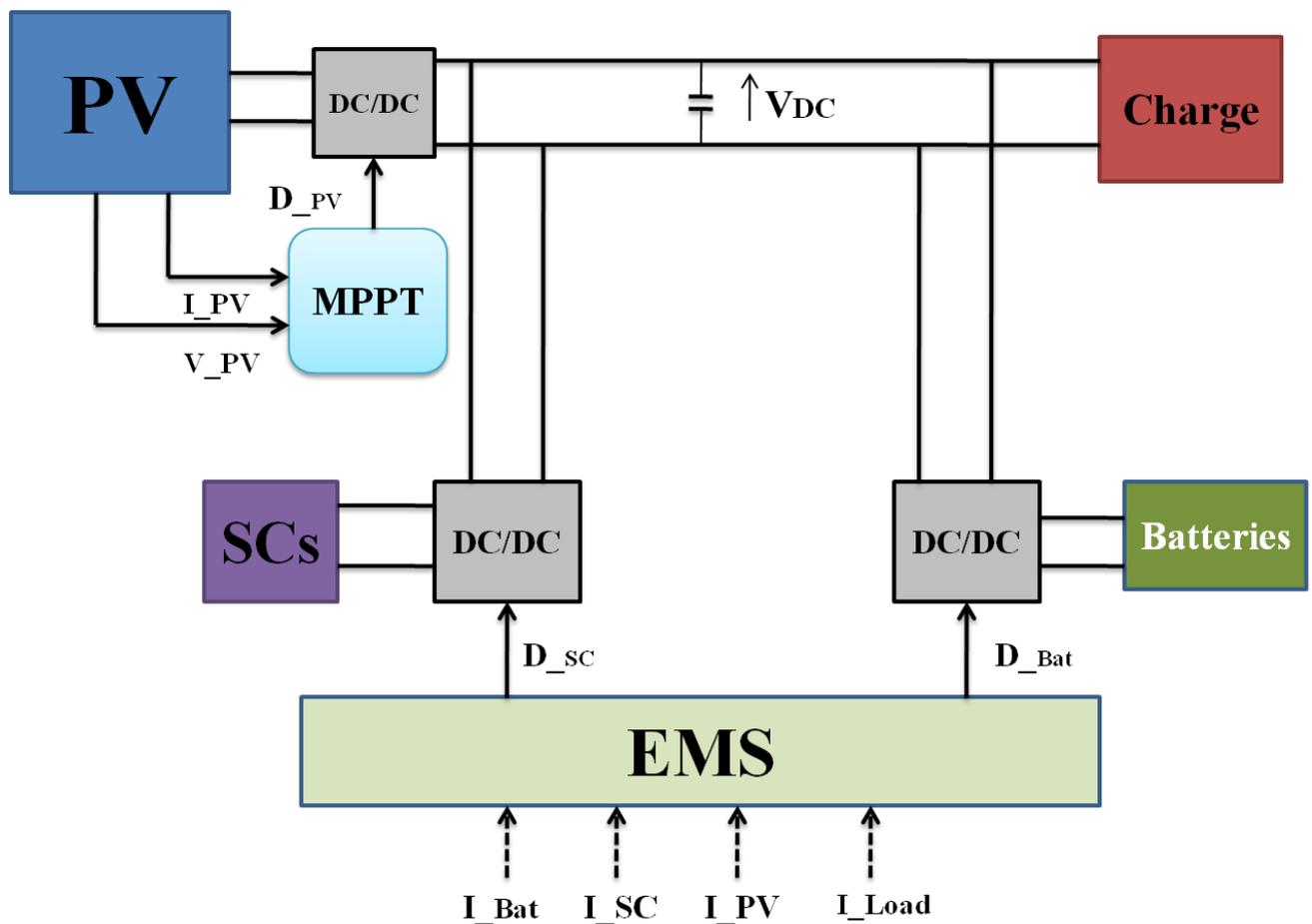


Figure 4.5 Schémas détaillé du système photovoltaïque autonome avec stockage hybride (HESS) et système de gestion d'énergie (EMS)

Trois sources peuvent alimenter une charge en courant continu (DC) : le générateur photovoltaïque, qui est utilisé comme source principale d'énergie ; les batteries, qui sont sollicitées en cas de production excédentaire d'énergie photovoltaïque ou de pénurie ; et les supercondensateurs, qui servent à minimiser les variations de production photovoltaïque ou de la charge.

Pour réguler chaque convertisseur DC-DC buck-boost, un contrôleur proportionnel-intégral (PI) est utilisé. Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est mis en œuvre par le biais

du convertisseur DC-DC afin d'extraire le maximum de puissance de la source photovoltaïque. De plus, une stratégie de gestion de l'énergie (EMS) efficace est employée pour contrôler l'ensemble du système.

Les différentes annotations utilisées sont :

- **I_{PV}** : Le courant généré par le panneau photovoltaïque (PV), qui représente la quantité de courant électrique produit par le panneau en fonction de l'irradiance solaire et des conditions environnementales.
- **V_{PV}** : La tension de sortie du panneau photovoltaïque (PV), qui est la tension électrique produite par le panneau en fonction de l'irradiance et de la température.
- **D_{PV}** : Le rapport cyclique (duty cycle) du convertisseur DC-DC connecté au panneau photovoltaïque, qui régule la quantité de puissance transférée du panneau au bus DC.
- **V_{DC}** : La tension du bus DC (continu) auquel sont connectés les différents éléments du système, représentant la tension commune utilisée pour distribuer l'énergie aux composants du système.
- **I_{SC}** : Le courant de charge ou décharge du supercondensateur, indiquant la vitesse à laquelle le supercondensateur stocke ou fournit de l'énergie.
- **I_{Bat}** : Le courant de charge ou décharge de la batterie, montrant la vitesse à laquelle la batterie stocke ou fournit de l'énergie.
- **D_{SC}** : Le rapport cyclique (duty cycle) du convertisseur DC-DC connecté au supercondensateur, régulant la puissance transférée entre le supercondensateur et le bus DC.
- **D_{Bat}** : Le rapport cyclique (duty cycle) du convertisseur DC-DC connecté à la batterie, régulant la puissance transférée entre la batterie et le bus DC.
- **I_{Load}** : Le courant consommé par la charge DC alimentée par le système, représentant la demande en énergie des appareils connectés au système.

4.6.1 Description des panneaux photovoltaïque

La Figure 4.6 obtenue par simulation Matlab/Simulink présente les caractéristiques d'un module photovoltaïque en fonction de variations d'irradiation, tout en maintenant une température constante (25 degrés Celsius). Cette figure illustre comment les performances du module PV changent lorsque l'irradiation solaire varie.

Courbe I-V (Courant-Tension) : La relation entre le courant de sortie (I) et la tension de sortie (V) du module PV est illustrée par cette courbe.. À mesure que l'irradiation augmente, le courant de sortie augmente également, ce qui est indiqué par les différentes courbes sous diverses conditions d'irradiation.

Courbe P-V (Puissance-Tension) : La courbe montre comment la puissance de sortie (P) et la tension de sortie (V) du module PV sont liées. La puissance maximale du module (point de puissance maximale ou MPP) varie en réponse à l'intensité de l'irradiation.

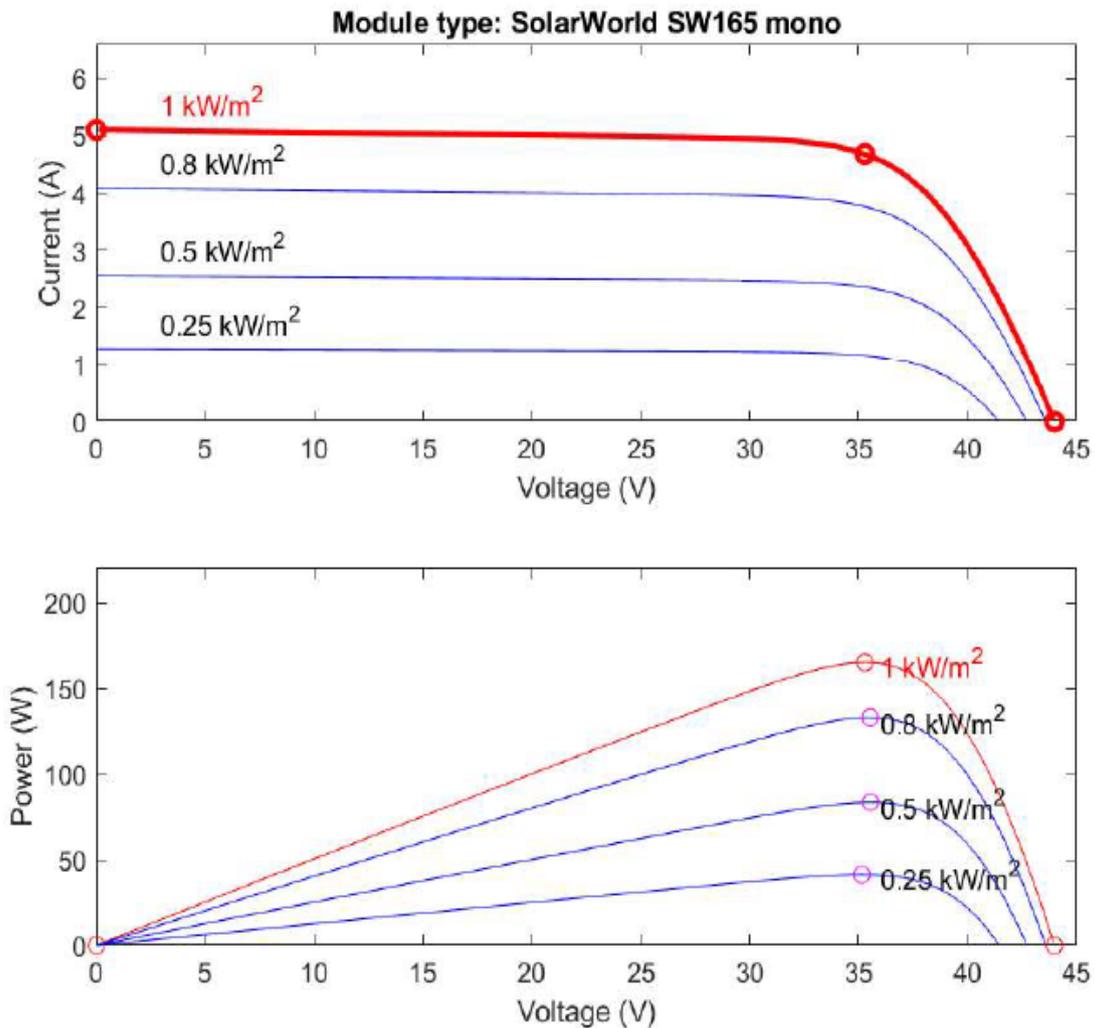


Figure 4.6 Caractéristique du PV sous l'irradiation variable et température constante

L'importance de la gestion efficace de l'énergie et du suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques est mise en évidence dans la figure 4.2. En effet, l'irradiation solaire n'est pas constante et varie selon les heures et les saisons. Il est donc crucial d'être en mesure de modifier le point de fonctionnement du module photovoltaïque pour obtenir la puissance maximale, malgré les variations d'irradiation, afin d'optimiser les performances du système photovoltaïque.

La Figure 4.7 obtenue par simulation Matlab/Simulink illustre les caractéristiques électriques du champ photovoltaïque (PV) en fonction des variations de température tout en maintenant une irradiation constante. Cette figure montre les courbes caractéristiques du module PV pour différentes températures, permettant d'observer l'impact de la température sur les performances du module. La tension décroît pendant que la température s'élève, ce qui entraîne une baisse de la puissance maximale du module photovoltaïque.

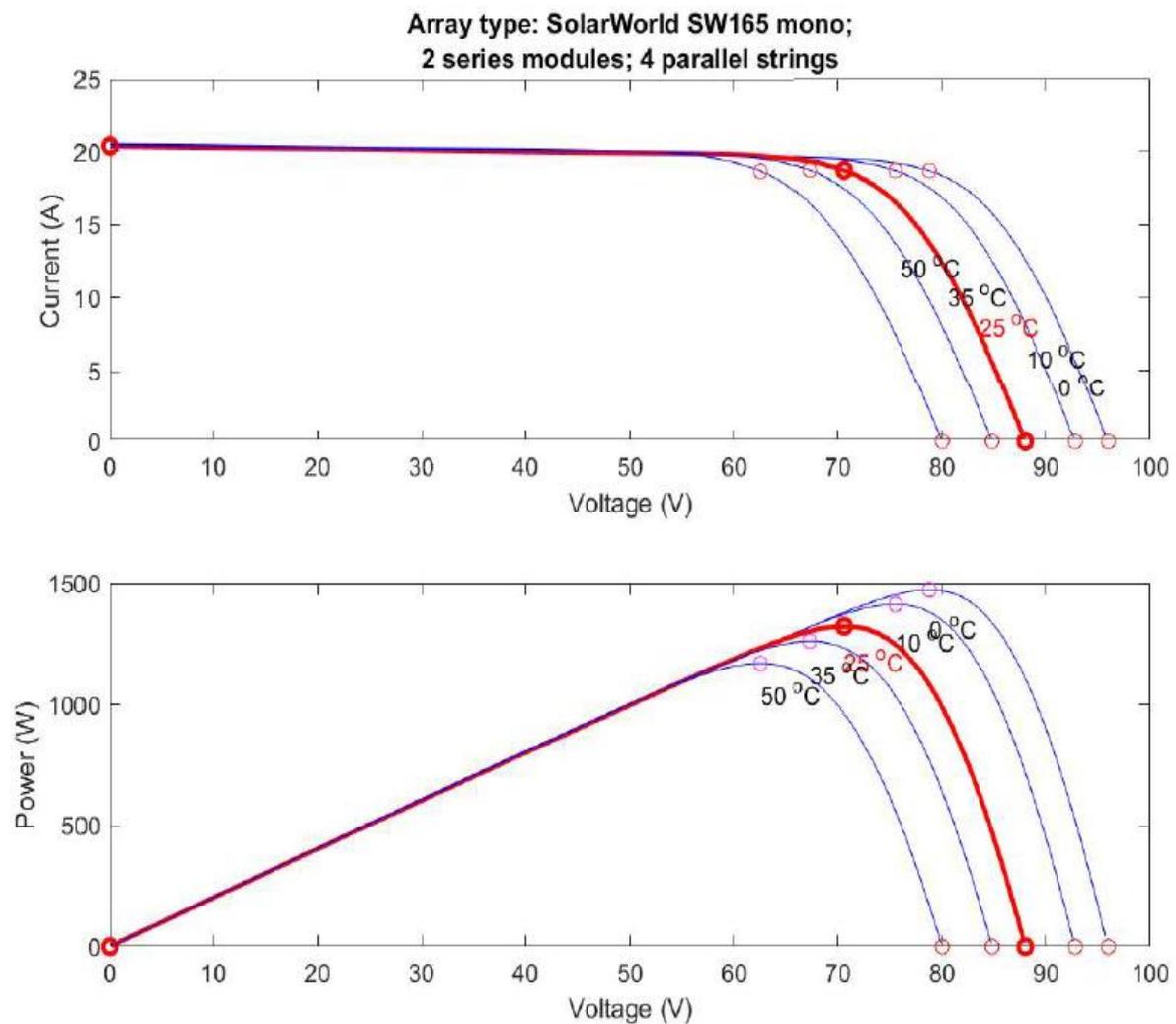


Figure 4.7 Caractéristique du champ PV sous température variable et irradiation constante

Le **Tableau 4.1** présente les caractéristiques techniques du panneau photovoltaïque Solarworld SW165 mono. Ce panneau a une capacité nominale de 165 Wp, ce qui indique la puissance maximale qu'il peut générer sous des conditions standard d'ensoleillement. Au point de puissance maximale (MPP), la tension et le courant sont de 35,2 V et 4,67 A respectivement.

La tension en circuit ouvert de 45 V et le courant de court-circuit de 5,2 A jouent un rôle vital dans la sécurité et les rendements du panneau. Il est possible d'atteindre une tension maximale de 1000 V, ce qui permet une flexibilité dans la mise en série des panneaux.

Tableau 4.1 Caractéristiques technique du PV

Caractéristique	Valeur
Type de panneau	Solarworld SW165 mono
Puissance nominale	165 Wp
Courant au MPP	4.67 A
Tension au MPP	35.2 V
Courant de court-circuit	5.2 A
Tension en circuit ouvert	45 V
Tension maximale	1000 V
Longueur	1610 mm
Largeur	810 mm
Poids	15 kg

Dans notre étude, le système photovoltaïque est configuré de manière à optimiser la production d'énergie et la gestion du stockage. Cette configuration se compose de quatre branches parallèles, chacune contenant deux modules photovoltaïques connectés en série.

4.7 Amélioration et Optimisation de la stratégie de contrôle de l'énergie

Le diagramme de gestion du système hybride de stockage d'énergie (HESS) est illustré dans la figure 4.8. Comme indiqué plus tôt, le but primordial des supercondensateurs est de diminuer le stress lié à la charge de la batterie en captant l'énergie temporaire de pointe qui se produit suite à des fluctuations soudaines de tension ou d'ensoleillement. Cela sera réalisé en divisant le flux de puissance entre les aspects génération et consommation en deux segments distincts : la partie transitoire haute fréquence (HFC) et la partie stable basse fréquence (LFC).

Dans cet algorithme, on effectue une comparaison entre la tension de référence et la tension de sortie en courant continu (DC), et l'erreur est envoyée au contrôleur proportionnel-intégral (PI). Le courant total requis pour le système de stockage d'énergie hybride, ou I_{ref} , est généré par le contrôleur PI.

$$I_{bat_ref} = \text{lowpassfilter}(I_{ref}) \quad (4.1)$$

Le courant de référence pour la batterie représente la composante basse fréquence du courant. L'erreur est envoyée au contrôleur PI après comparaison du courant de référence avec le courant réel de la batterie. Les ratios de commande sont produits par le contrôleur PI. Le générateur PWM reçoit ces ratios de commande et émet des impulsions de commutation correspondant aux interrupteurs de la batterie.

La formule (4.2) ci-dessous fournit la puissance (P_{bat_rest}) restante qui doit être fournie par le SC et qui ne peut pas être compensée par la batterie.

$$P_{Bat_{rest}} = V_{Bat} (I_{Bat_{err}} + I_{ref-HF}) \quad (4.2)$$

Avec

4.7.1 Optimisation du système de control de l'énergie (EMS)

La figure 4.9 présente le schéma optimisé de contrôle du système de stockage d'énergie hybride (HESS), en utilisant le contrôleur (FOPI) et en optimisant l'algorithme de (PSO). L'objectif principal des supercondensateurs (SC) est, comme nous l'avons vu, de diminuer le stress lié à la charge et la décharge de la batterie en absorbant l'énergie transitoire qui se produit lors de variations brusques de charge ou de conditions météorologiques.

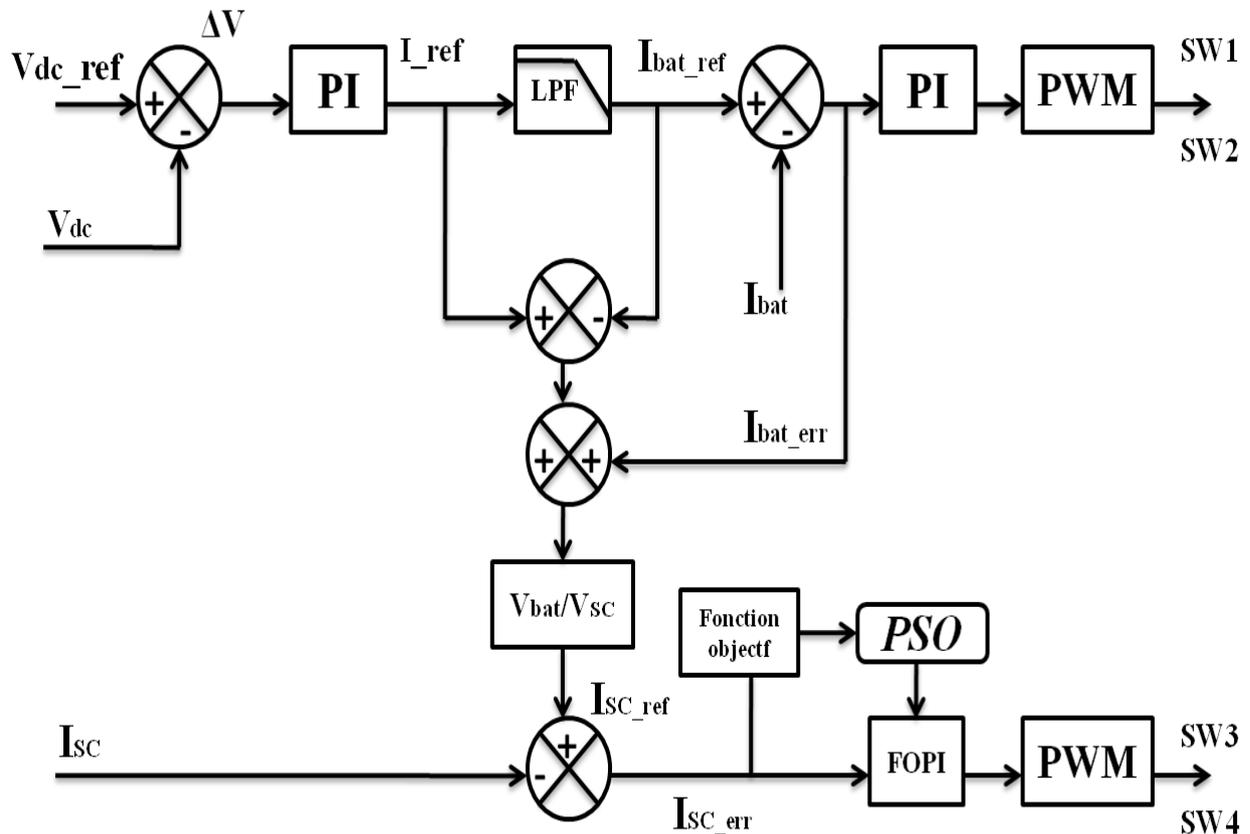


Figure 4.9 Schéma Optimisé par FOPI-PSO du système de control de l'énergie (EMS) pour le système photovoltaïque avec stockage hybride (HESS)

Comme dans le précédent système, après avoir comparé I_{SC_ref} avec le courant réel du supercondensateur I_{SC} , l'erreur est transmise au contrôleur FOPI, qui produit les ratios de commande nécessaires. Le générateur PWM se sert de ces ratios de commande pour générer des impulsions de commutation correspondant aux interrupteurs du SC [153].

La synergie entre le régulateur FOPI et l'optimisation PSO repose sur leurs forces complémentaires. Alors que le FOPI fournit un cadre de contrôle robuste et adaptatif capable de gérer les incertitudes et non-linéarités du système, le PSO facilite l'ajustement automatique des paramètres du régulateur pour atteindre des performances optimales. Cette combinaison exploite les avantages des deux méthodologies, résultant en une stratégie de contrôle puissante et polyvalente.

Dans cette étude, l'utilisation exclusive du FOPI-PSO sur la boucle de contrôle du supercondensateur (voir Figure 4.5) a été motivée par la nécessité d'une approche d'optimisation spécialisée adaptée aux dynamiques complexes et aux paramètres divers associés au contrôle des supercondensateurs. Cette application ciblée permet un ajustement et une adaptation plus précis des paramètres du contrôleur FOPI pour améliorer les performances globales du supercondensateur au sein du système [153].

4.7.2 Optimisation des paramètres du contrôleur par PSO

L'un des outils les plus prisés pour résoudre les problèmes d'optimisation aujourd'hui est l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). Sa simplicité, ses performances élevées et son coût computationnel réduit en font une méthode d'optimisation prometteuse et efficace. Les algorithmes PSO sont largement appliqués dans divers domaines scientifiques et se révèlent efficaces pour résoudre la majorité des problèmes d'optimisation.

Dans le cadre de cette étude, la technique PSO est recommandée pour ajuster les gains du contrôleur, afin d'atteindre les paramètres idéaux du contrôleur et, par conséquent, le meilleur rendement du système.

On calcule les mises à jour de position et de vitesse pour chaque particule dans la population en utilisant les expressions mathématiques suivantes à chaque cycle:

$$V_i(k+1) = w \cdot V_i(k) + C1 \cdot r1 [P_i(k) - x_i(k)] + C2 \cdot r2 [G_i(k) - x_i(k)] \quad (4.5)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + V_i \quad (4.6)$$

La Figure 4.10 montre l'organigramme illustrant le processus étape par étape de l'optimisation par essaim de particules (PSO). Cet organigramme décrit comment les particules mettent à jour leurs positions et vitesses de manière itérative, offrant une représentation claire des dynamiques et de la logique de l'algorithme d'optimisation.

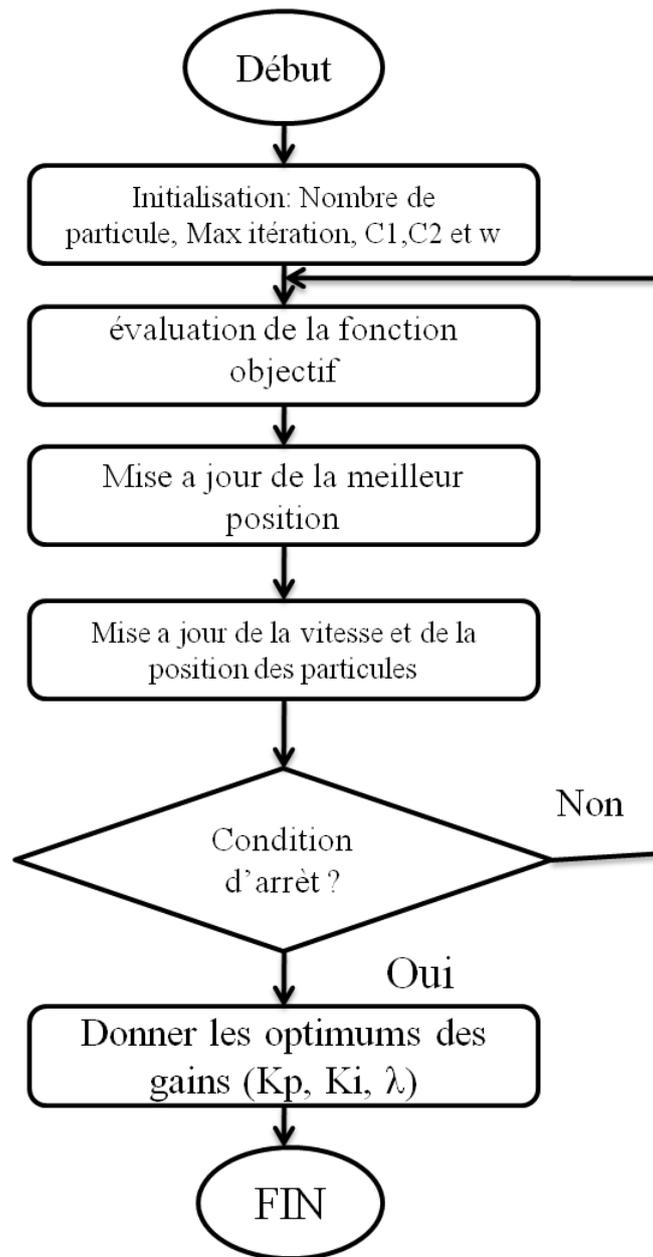


Figure 4.10 Organigramme de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO)

Le Tableau 4.2 présente les paramètres fondamentaux employés dans l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) employé dans ce travail. Les paramètres clés mentionnés sont cruciaux pour ajuster et assurer le bon fonctionnement de l'algorithme PSO, ce qui a un impact sur l'efficacité et les performances de l'optimisation.

Tableau 4.2 Paramètres utilisés pour de l’algorithme d’optimisation par essaim de particules (PSO)

Paramètres	Valeur
Nombre de particules	50
Max itérations	100
C1	0.2
C2	1.1
w	0.7

Les valeurs des paramètres de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) ont été choisies après une analyse approfondie de leur impact sur la performance de l'algorithme, combinée à des ajustements empiriques afin d'optimiser les résultats dans le cadre spécifique de notre problème d'optimisation.

Le processus d'optimisation utilise divers critères de performance, tels que l'Erreur Absolue Intégrale (IAE), l'Erreur Quadratique Intégrale (ISE) et l'Erreur Absolue Intégrale Pondérée par le Temps (ITAE), pour évaluer la performance du système. Dans ce contexte, la fonction de fitness employée pour évaluer la réponse en sortie du système est l'Erreur Absolue Intégrale (IAE). L'IAE est définie comme suit :

$$IAE = \int_0^t (|Isc_err|) dt \quad (4.7)$$

Avec :

$$Isc_{err} = Isc_{ref} - Isc \quad (4.8)$$

- Isc_err Est le courant de commande du supercondensateur.

L'utilisation de l'Erreur Absolue Intégrale (IAE) comme fonction de fitness dans le processus d'optimisation est justifiée par le fait qu'elle fournit une mesure intuitive, robuste et facilement interprétable de la performance du système. Cela la rend particulièrement adaptée pour évaluer et améliorer l'efficacité de l'algorithme de contrôle proposé.

La Figure 4.11 présente le schéma bloc illustrant le processus d'optimisation pour le contrôleur FOPI-PSO.

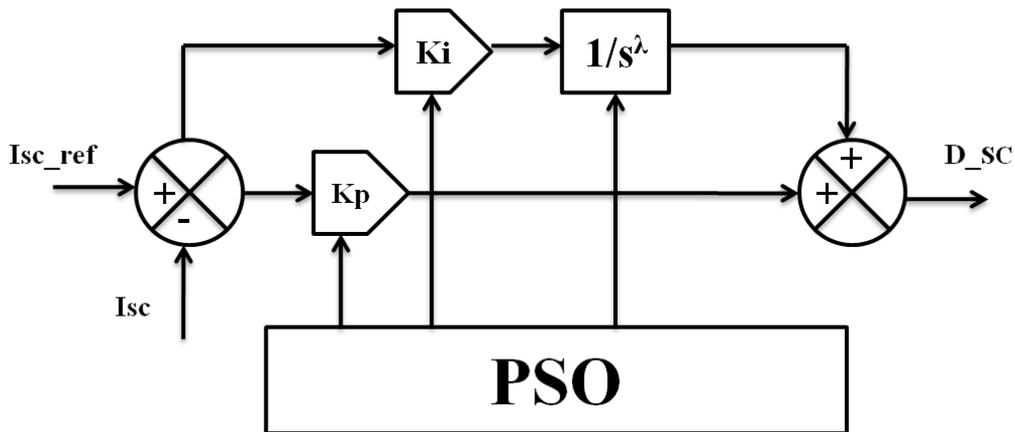


Figure 4.11 Schéma d'optimisation du contrôleur FOPI-PSO.

L'algorithme d'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) ajuste les paramètres du contrôleur FOPI. Les particules dans l'essaim explorent l'espace des paramètres pour minimiser l'IAE. Le PSO met à jour les positions et les vitesses des particules en fonction de leur propre expérience et de celle de leurs voisins pour converger vers les meilleurs paramètres.

Les paramètres optimisés sont appliqués au contrôleur FOPI. La performance du système est évaluée en utilisant l'IAE pour déterminer si les paramètres ajustés offrent une meilleure performance.

En fonction des résultats obtenus, le PSO ajuste les paramètres du contrôleur FOPI pour affiner encore plus la performance du système, en minimisant l'erreur et en améliorant la réponse globale. Ce processus est répété de manière itérative jusqu'à ce que les paramètres optimaux soient trouvés et que le système réponde aux exigences de performance définies.

4.8 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé une version perfectionnée de la stratégie d'administration et de gestion du flux d'énergie pour les dispositifs de stockage hybrides qui associent batteries et supercondensateurs. L'objectif principal était d'optimiser la performance et la durabilité des systèmes photovoltaïques en réponse aux défis liés à l'intermittence de la production solaire et aux besoins spécifiques en matière de stockage d'énergie.

L'approche proposée se concentre sur l'utilisation synergique des batteries et des supercondensateurs pour tirer parti des caractéristiques complémentaires de ces deux technologies : les batteries pour une capacité de stockage élevée et les supercondensateurs pour des cycles de charge/décharge rapides et une meilleure résistance aux températures extrêmes. En intégrant des algorithmes de gestion avancés, nous avons démontré que les systèmes hybrides permettent non seulement d'améliorer la stabilité de l'alimentation, mais aussi de prolonger la durée de vie des composants de stockage tout en optimisant l'efficacité énergétique globale du système.

Une partie clé de cette étude repose sur la synergie entre le régulateur **FOPI** (Fractional Order Proportional-Integral) et l'optimisation **PSO**. Cette combinaison tire parti des forces complémentaires de ces deux méthodologies : le **FOPI** fournit un cadre de contrôle robuste et

adaptatif capable de gérer les incertitudes et non-linéarités du système, tandis que le **PSO** facilite l'ajustement automatique des paramètres du régulateur afin d'atteindre des performances optimales. Ensemble, ils forment une stratégie de contrôle puissante et polyvalente.

Dans cette étude, l'utilisation exclusive du **FOPI-PSO** sur la boucle de contrôle du supercondensateur (voir Figure 4.5) a été motivée par la nécessité d'une approche d'optimisation spécialisée adaptée aux dynamiques complexes et aux paramètres divers associés au contrôle des supercondensateurs. Cette application ciblée permet un ajustement et une adaptation plus précis des paramètres du contrôleur **FOPI**, améliorant ainsi les performances globales du supercondensateur au sein du système.

Les originalités principales de cette stratégie peuvent être résumées comme suit :

1. **Combinaison innovante FOPI-PSO pour une gestion optimisée des supercondensateurs** : La synergie entre le régulateur FOPI (Fractional Order Proportional-Integral) et l'optimisation PSO (Particle Swarm Optimization) apporte une solution de contrôle robuste et adaptative. Cette approche combine la capacité du FOPI à gérer les non-linéarités et les incertitudes avec l'efficacité du PSO pour optimiser automatiquement les paramètres, permettant des performances accrues dans un contexte de gestion dynamique.
2. **Application ciblée du FOPI-PSO au contrôle des supercondensateurs** : Contrairement aux approches générales qui s'appliquent aux deux technologies de stockage, l'utilisation exclusive de FOPI-PSO pour le contrôle des supercondensateurs (voir Figure 4.5) reflète une démarche spécifique et adaptée aux dynamiques rapides et aux contraintes particulières des supercondensateurs. Cette spécialisation a permis un ajustement précis des paramètres de commande, renforçant la réactivité et la stabilité du système.
3. **Amélioration de la durabilité et des performances grâce à une gestion énergétique sophistiquée** : Cette stratégie, en incorporant des techniques de gestion sophistiquées, prolonge la longévité des batteries en distribuant les fluctuations temporaires vers les supercondensateurs. Cela réduit l'usure des composants de stockage et prolonge leur longévité, tout en garantissant une efficacité énergétique optimale.
4. **Adaptabilité du système aux variations de conditions** : La méthodologie développée dans cette étude permet une adaptation rapide aux fluctuations de l'irradiance solaire et aux changements de charge, offrant une robustesse accrue dans des environnements dynamiques. Les simulations et scénarios de test, présentés dans le chapitre suivant, démontreront la capacité de cette stratégie à maintenir une alimentation stable et efficace, même en présence de perturbations.

Ces éléments distinctifs démontrent non seulement l'innovation de notre approche, mais aussi son potentiel pour améliorer la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques hybrides. Dans le prochain chapitre, nous allons évaluer la performance de notre système en effectuant des simulations qui considèrent des variations d'irradiance solaire et de charge. Ces simulations permettront d'évaluer la robustesse des stratégies de gestion proposées et leur capacité à optimiser le flux d'énergie dans des conditions d'exploitation. Les résultats obtenus nous fourniront des informations précieuses sur l'efficacité du système dans un environnement dynamique.

CHAPITRE 5

RESULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSION DES STRATEGIES PROPOSEES

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons une étude détaillée des solutions suggérées pour relever les défis liés au stockage d'énergie dans les dispositifs photovoltaïques. Le but est d'analyser les résultats, les avantages et les contraintes de deux méthodes de gestion énergétique, chacune conçue pour des applications particulières. Cette étude permettra d'identifier les atouts et les contraintes des approches en vue de proposer des améliorations futures.

Les solutions explorées incluent un système autonome intégrant un stockage hybride composé de batteries et de supercondensateurs, ainsi qu'un système photovoltaïque connecté au réseau pour un centre de tri des déchets, dépourvu de stockage d'énergie local.

La première solution concerne un système autonome intégrant un stockage hybride composé de batteries et de supercondensateurs. Pour cette solution, un algorithme avancé de gestion de l'énergie a été appliqué, visant à améliorer l'efficacité du stockage et de l'utilisation de l'énergie produite. Cette approche vise à maximiser la performance globale du système tout en répondant aux besoins énergétiques de manière autonome dans des cas de fluctuation de la demande électrique et de variation de l'irradiation solaire, l'objectif est de démontrer que l'intégration d'un contrôleur FOPI-PSO dans un algorithme de gestion de l'énergie amélioré permet d'obtenir une réponse plus stable, une réduction du dépassement de crête, et une précision accrue dans le contrôle des flux d'énergie il est attendu que le système autonome soit capable de :

- Fournir une réponse stable, même dans des conditions d'irradiance solaire fluctuantes,
- Réduire les dépassements de crête lors des variations de la charge,
- Optimiser la précision dans le contrôle des flux d'énergie, tout en maintenant une efficacité élevée.

La deuxième solution est spécifiquement conçue pour un centre de tri des déchets, où un système photovoltaïque connecté au réseau sans stockage est proposé. Cette solution tire parti de la connexion directe au réseau électrique pour une gestion optimisée de l'énergie produite, en minimisant les besoins en stockage et en adaptant le système aux exigences opérationnelles du centre de tri.

Dans cette configuration, le système photovoltaïque est principalement utilisé pour compenser la consommation énergétique du centre de tri et injecter tout surplus dans le réseau, minimisant ainsi l'impact énergétique de l'installation. Ce système :

- Tire parti d'une gestion optimisée de l'énergie produite, assurant une régulation continue de l'alimentation,
- Limite les pertes d'énergie et réduit les investissements en équipements de stockage,

- S'adapte aux besoins spécifiques du centre de tri, garantissant un approvisionnement en énergie stable et répondant aux exigences opérationnelles du site.

Nous examinerons en profondeur les deux stratégies dans ce chapitre, en évaluant leurs performances respectives à l'aide de simulations effectuées avec Matlab Simulink et PVsyst. L'étude s'orientera sur l'efficacité, la stabilité et la durabilité des systèmes, en soulignant les bénéfices et les contraintes de chaque méthode, tout en suggérant des améliorations à venir. L'objectif de ces travaux est de proposer des réponses concrètes et performantes aux défis actuels liés au stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques, tout en favorisant la transition vers des infrastructures énergétiques durables

5.2 Résultats et discussion de la stratégie 1

Une simulation utilisant le programme MATLAB/Simulink a été réalisée pour vérifier l'efficacité de la méthode proposée et la comparer avec la technique classique. Les schémas de contrôle illustrés en Figure 4.4 et 4.5 ont été implantés dans le système photovoltaïque illustré dans la figure 4.1

Deux scénarios ont été utilisés pour tester les deux stratégies de contrôle : la stratégie utilisant un contrôleur PI classique et celle utilisant le contrôleur FOPI-PSO proposé.

5.2.1 Scénario 1 : variation de l'irradiation solaire

Dans ce cas particulier, la simulation implique l'utilisation d'une irradiation solaire fluctuante en association avec une charge électrique constante ($P_{load} = 1000 \text{ W}$), comme le montre visuellement la Figure 5.1.

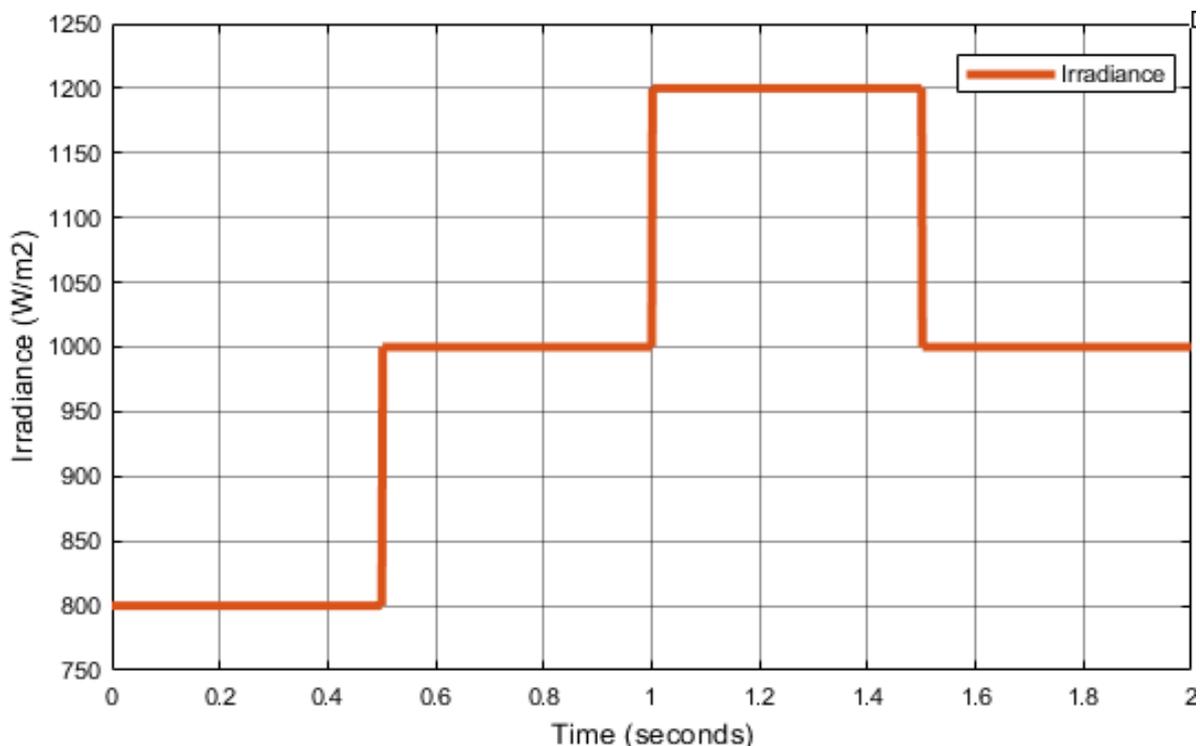


Figure 5.1 Profil de l'irradiation solaire

La Figure 5.2 illustre la réponse de la tension du bus continu en présence d'un profil d'irradiation variable. On observe que la tension DC maintient sa stabilité à 58 V, malgré les fluctuations de la puissance photovoltaïque. Cette stabilité démontre l'efficacité du système à réguler la tension du bus continu, assurant ainsi une performance fiable malgré les variations des conditions d'ensoleillement.

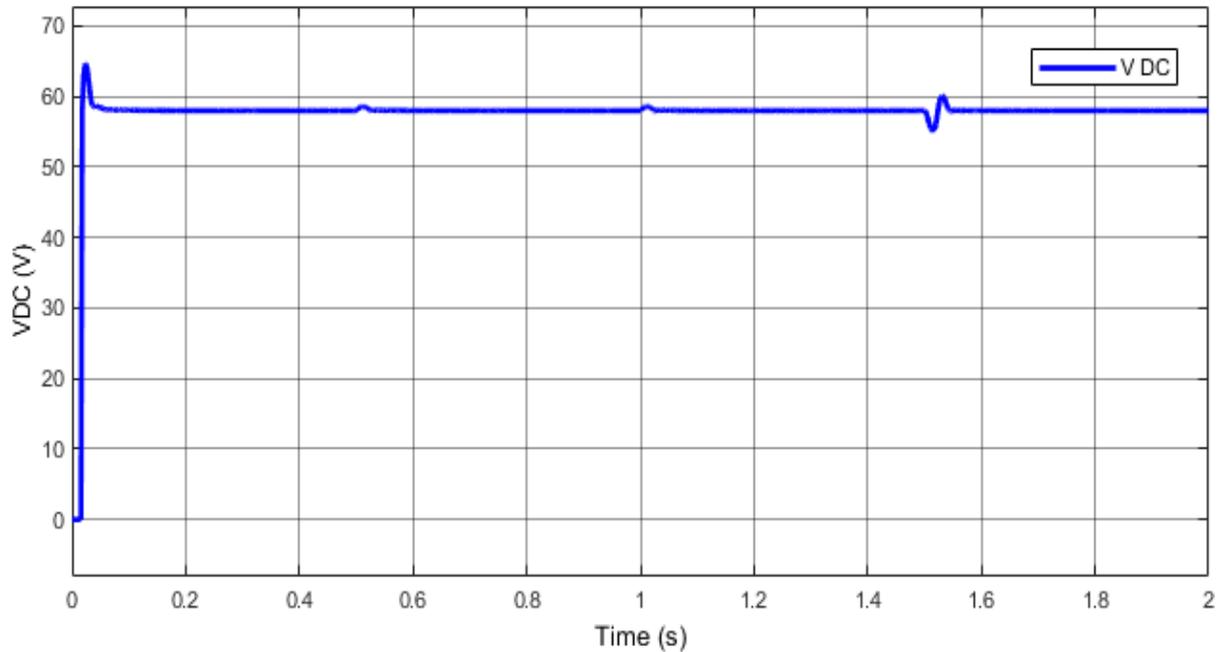


Figure 5.2 Tension du bus continue

La Figure 5.3 présente de manière précise les dynamiques des divers éléments énergétiques, notamment la puissance photovoltaïque (P_{pv}), la puissance de la batterie (P_{bat}) et la puissance de charge (P_{load}). Lors de la simulation, l'analyse montre que la batterie commence par se décharger entre 0 et 0,5 secondes, en réponse à un déficit énergétique initial. Ce phénomène est dû à une insuffisance de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques par rapport à la demande de la charge.

À 0,5 secondes, une augmentation significative de l'irradiation solaire génère un excédent d'énergie. La batterie, ayant épuisé une partie de son énergie précédemment, passe alors en mode de chargement pour absorber cet excédent. Cette phase de chargement rapide se poursuit jusqu'à 1 seconde. Lorsque l'irradiation continue de croître après 1 seconde, l'énergie excédentaire disponible provoque une charge accélérée de la batterie, améliorant ainsi son état de charge jusqu'à 1,5 secondes. Cependant, à 1,5 secondes, une diminution de l'irradiation entraîne un apport d'énergie moins important. En conséquence, la batterie passe à un mode de chargement lent pour maintenir une charge stable pendant la période allant de 1,5 à 2 secondes.

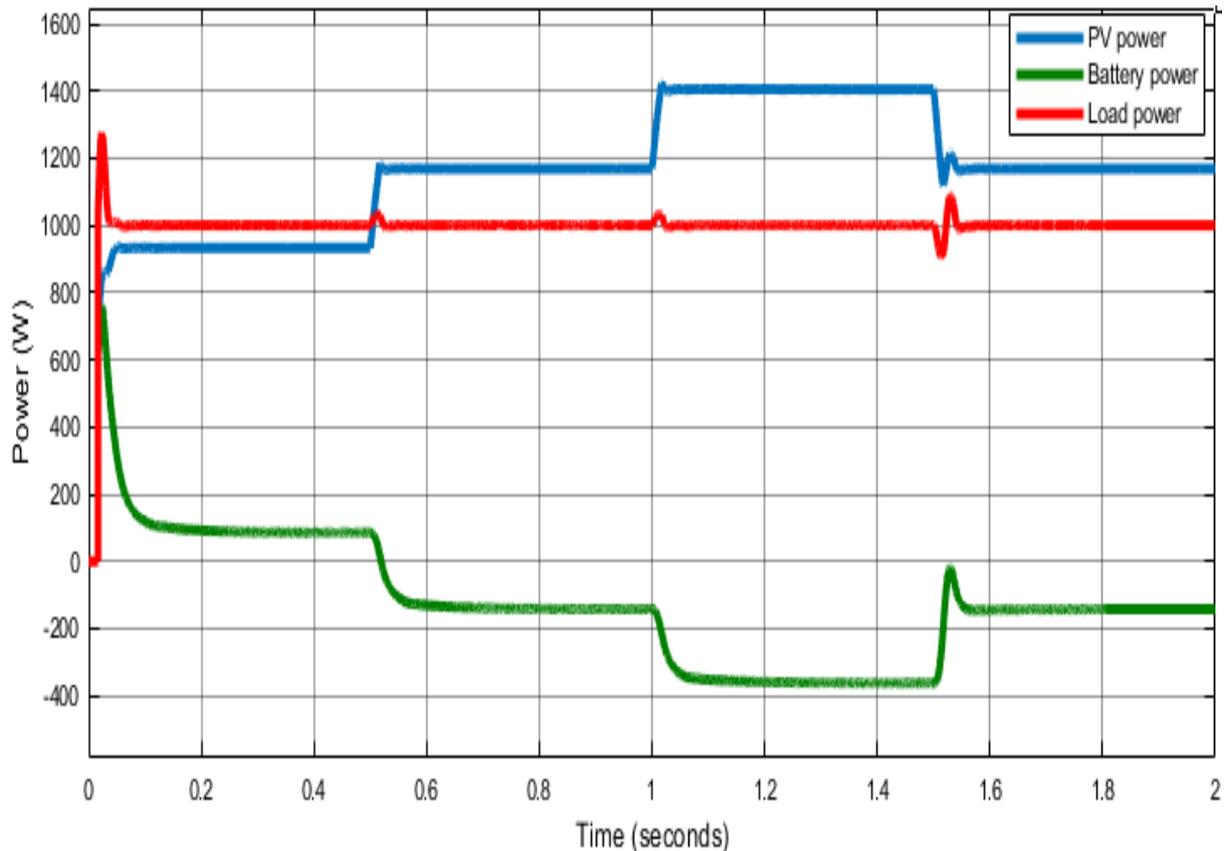


Figure 5.3 Réponse des puissances de la charge, la batterie et le champ PV dans des conditions d'irradiation solaire variable

La Figure 5.4 montre la réponse du supercondensateur (SC) pendant la simulation, en comparaison entre le contrôleur FOPI proposé et le contrôleur PI traditionnel. Pour atténuer le stress sur la batterie, le supercondensateur joue un rôle crucial. Lors de l'augmentation de l'irradiation, le supercondensateur absorbe une partie de l'énergie excédentaire (à 0,5 secondes et 1 seconde), contribuant ainsi à réduire la charge sur la batterie. Cette absorption d'énergie permet au supercondensateur de prendre en charge les variations rapides de la production d'énergie et de la demande de charge, tout en maintenant un niveau de stress réduit sur la batterie.

Lorsque l'irradiation diminue (à 1,5 secondes), le supercondensateur fournit l'énergie nécessaire pour compenser le manque d'apport énergétique, réduisant ainsi le stress sur la batterie et améliorant la stabilité du système. Cette capacité du supercondensateur à gérer les variations rapides d'énergie pendant la phase transitoire montre son efficacité dans la gestion des pics de puissance et des fluctuations de la demande énergétique.

L'application du contrôleur (FOPI) se révèle particulièrement bénéfique. Le FOPI permet une gestion plus fine et plus adaptable du supercondensateur, ce qui se traduit par une amélioration notable des caractéristiques de réponse. En particulier, le contrôleur FOPI optimise l'utilisation de l'énergie du supercondensateur, ce qui se traduit par une efficacité accrue et une meilleure performance globale du système de stockage hybride. Cette amélioration est observable dans la réduction des pics de courant et une meilleure régulation de la charge, contribuant ainsi à une gestion énergétique plus stable et plus efficace.

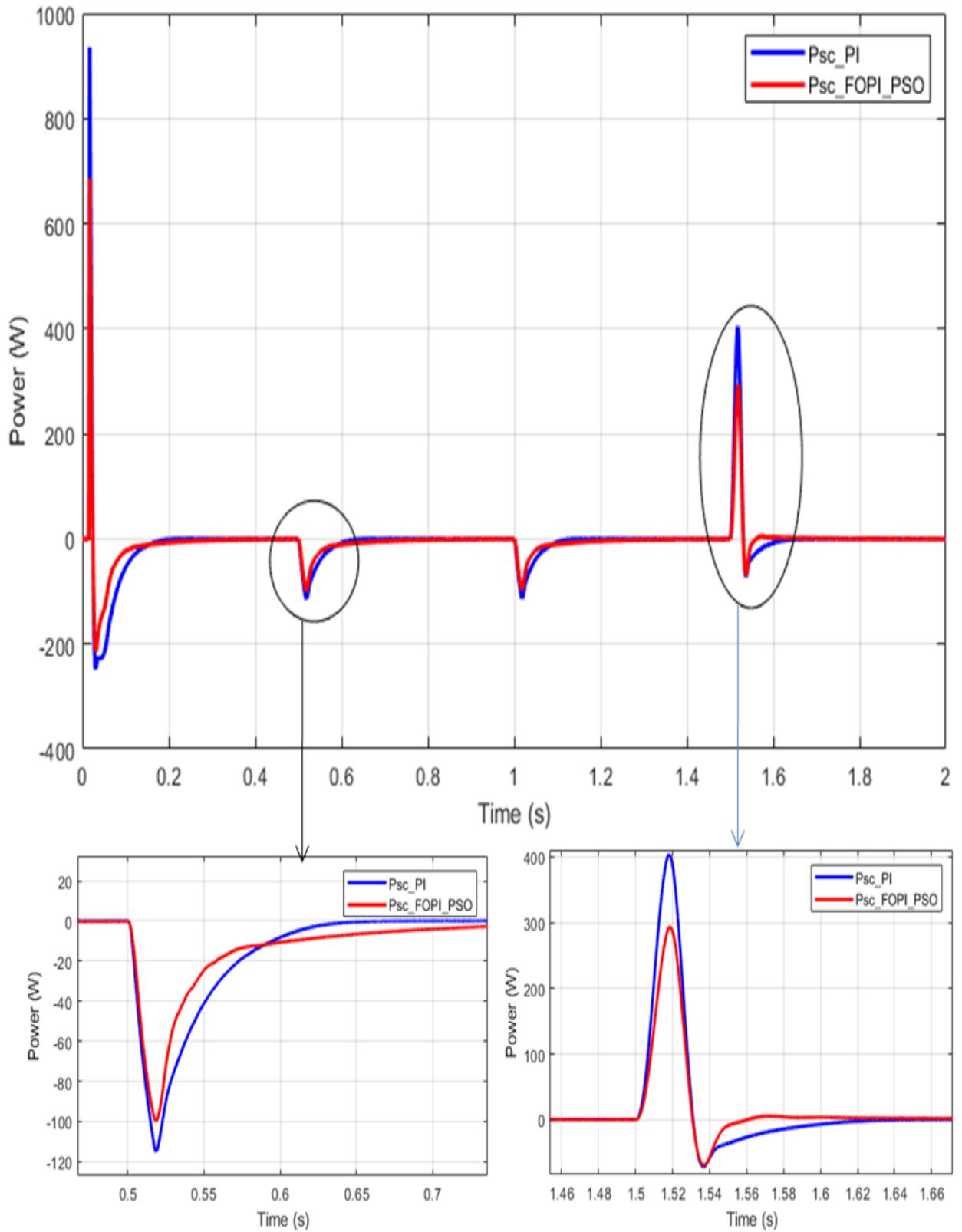


Figure 5.4 Réponse du supercondensateur avec une irradiation variable pour les contrôleurs PI et FOPI-PSO

5.2.2 Scénario 2 : Variation de la charge

Le deuxième scénario de simulation vise à évaluer l'efficacité du schéma de contrôle proposé dans des conditions de charge variable. Pour cette simulation, une puissance photovoltaïque constante de $P_{pv}=1180$ W a été maintenue tout au long de l'expérience. L'objectif principal est d'examiner comment le Système de Gestion de l'Énergie (EMS) réagit face à des variations dans la demande de charge.

La Figure 5.5 illustre la performance de l'EMS sous différentes conditions de charge. Cette analyse permet de déterminer comment le système gère les fluctuations de la demande en énergie tout en maintenant une génération photovoltaïque constante. En observant les résultats, on peut évaluer l'efficacité du schéma de contrôle proposé dans la régulation et l'équilibrage des ressources énergétiques, en particulier en ce qui concerne la gestion des excédents et des déficits d'énergie en fonction des charges variables.

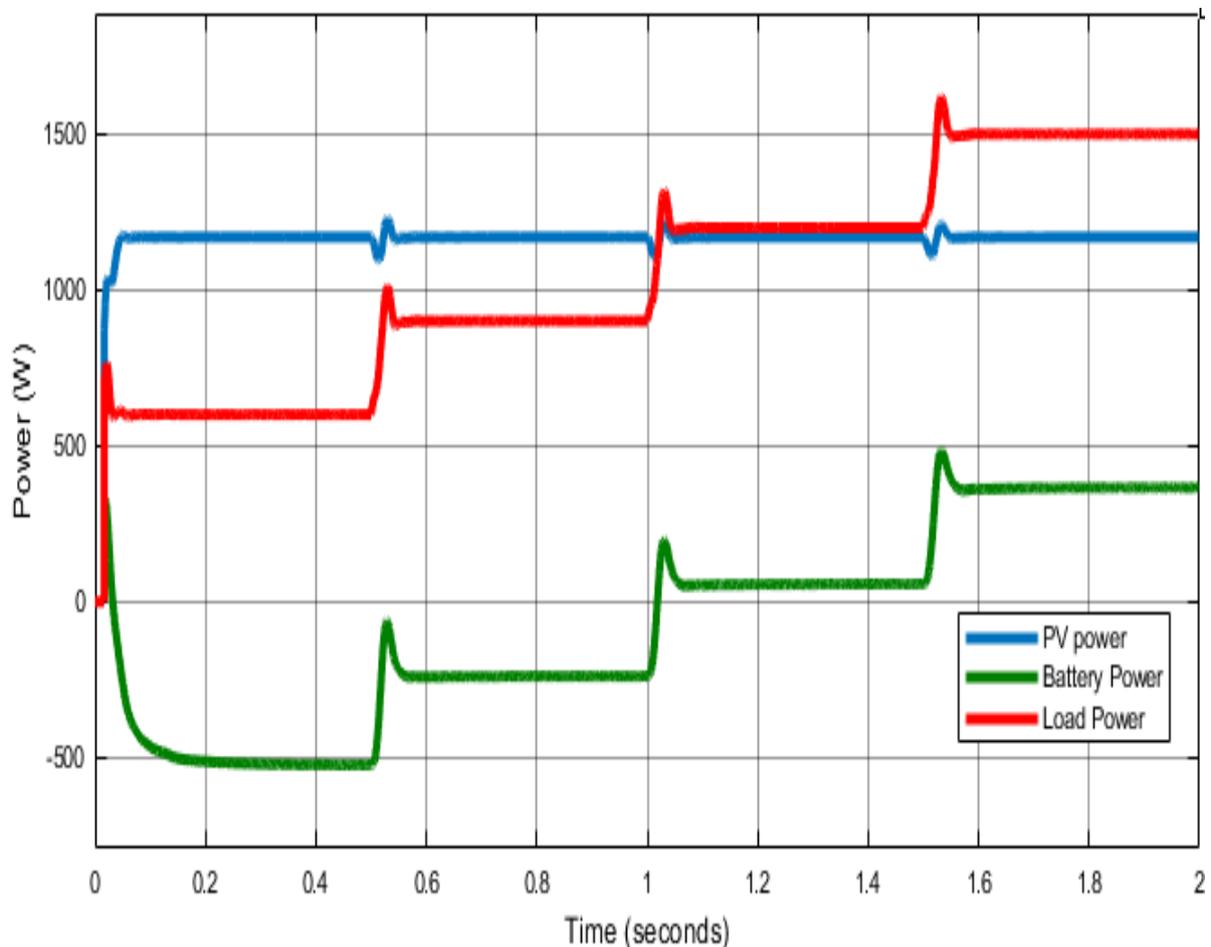


Figure 5.5 Réponse des puissances de charge, la batterie et le champ PV dans des conditions charge variable

La Figure 5.6 illustre les réponses en puissance des supercondensateurs (SC) sous des conditions de charge variable. L'intégration des contrôleurs Proportionnel-Intégral (PI) et du contrôleur FOPI avec optimisation par essaim de particules (FOPI-PSO) vise à affiner le comportement de charge et de décharge des supercondensateurs, soulignant ainsi les avantages significatifs du Système de Stockage d'Énergie Hybride Batterie-Supercondensateur (HESS). Cette amélioration est cruciale pour obtenir une réduction du stress sur la batterie.

Dans ce scénario, la comparaison entre les contrôleurs PI traditionnels et le contrôleur FOPI-PSO révèle une amélioration notable des performances des supercondensateurs. Comme observé dans les simulations avec irradiation variable, l'utilisation du contrôleur FOPI se traduit par une meilleure réponse des supercondensateurs.

L'implémentation du contrôleur FOPI se distingue par une réduction marquée de la consommation énergétique des supercondensateurs. Cette observation peut être attribuée aux dynamiques de charge et de décharge améliorées, facilitées par le contrôle plus efficace fourni par le terme intégral du contrôleur FOPI. Ce contrôleur permet une gestion plus précise de l'énergie stockée et libérée par les supercondensateurs. Ainsi, l'intégration du contrôleur FOPI dans le système HESS permet de maximiser les avantages des supercondensateurs tout en minimisant le stress sur les batteries, ce qui est essentiel pour améliorer la durabilité et l'efficacité globale du système hybride de stockage d'énergie.

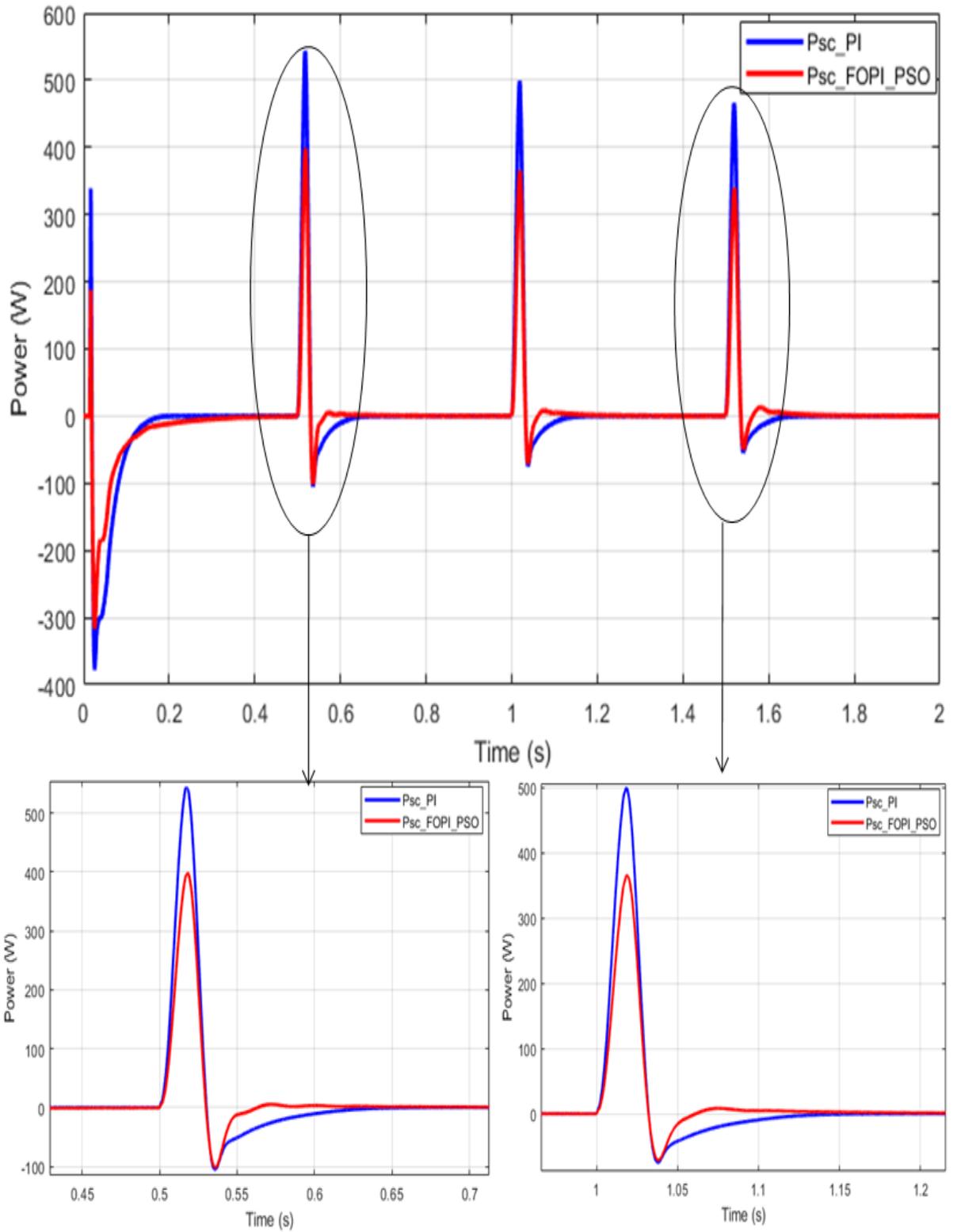


Figure 5.6 Comparaison des Repenses du supercondensateur avec une charge variable pour les contrôleurs PI et FOPI-PSO

Il est également important de noter que les Figure 5.5 et Figure 5.6 offrent une représentation visuelle de l'État de la batterie tout au long de la simulation. L'état initial de la charge de la batterie est de 60%. Voici un aperçu détaillé des différentes phases observées :

- **De 0 à 0,5 secondes** : Un excédent d'énergie entraîne la batterie en mode de charge rapide. Pendant cette période, la batterie bénéficie d'une quantité suffisante d'énergie pour entrer dans une phase de charge rapide, augmentant ainsi son niveau de charge de manière significative.
- **À 0,5 secondes** : Malgré une demande de courant soutenue par le supercondensateur, l'excédent d'énergie persiste. Cette situation entraîne la batterie dans un état de charge plus lente, même si le supercondensateur prend en charge une partie de la demande.
- **De 0,5 à 1 seconde** : La batterie fonctionne en mode de charge lente. Durant cette période, la charge se poursuit, mais à un rythme plus modéré, ce qui permet à la batterie de s'ajuster à un excédent d'énergie moins important.
- **À 1 seconde** : Une nouvelle demande de courant, supportée par le supercondensateur, provoque une transition de la batterie de la charge vers la décharge en raison d'un léger déficit énergétique. Cette transition est une réponse directe à la demande accrue de courant qui dépasse la Puissance de la batterie.
- **De 1 à 1,5 secondes** : La batterie est en mode de décharge lente. Au cours de cette phase, la batterie fournit de l'énergie pour répondre à la demande, mais à une vitesse plus réduite, permettant une gestion plus douce du déficit énergétique.
- **À 1,5 secondes** : Une nouvelle demande de courant soutenue par le supercondensateur pousse la batterie à entrer en mode de décharge rapide. Ce mode est nécessaire pour combler un déficit énergétique plus important et répondre rapidement à la demande accrue.
- **De 1,5 à 2 secondes** : La batterie reste en mode de décharge rapide en raison d'un déficit énergétique substantiel. Cette phase prolongée de décharge rapide souligne la capacité de la batterie à faire face à des conditions de demande énergétique élevées.

La Figure 5.7, clarifie comment l'état de charge (SOC) de la batterie évolue dynamiquement au cours de ces différentes phases opérationnelles. Elle fournit une vision approfondie de la façon dont le système ajuste ses performances en réponse aux variations de la demande énergétique et de la disponibilité de l'énergie, permettant ainsi une gestion optimisée de la charge de la batterie tout au long du processus de simulation.

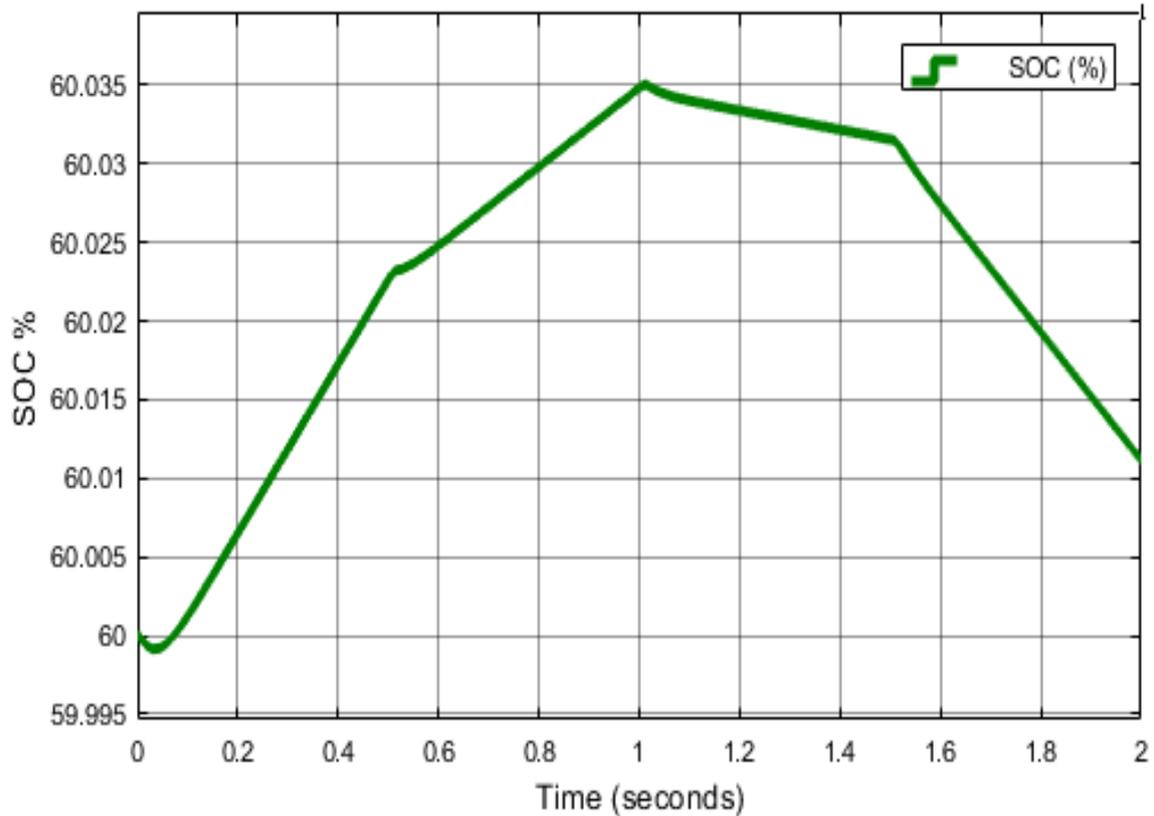


Figure 5.7 Evolution de l'état de charge de la batterie (SOC)

5.2.3 Test de robustesse

Le Tableau 5.1 présente une comparaison des performances entre l'approche proposée FOPI-PSO et la technique conventionnelle PI en présence de variations de charge. Lors des simulations, diverses situations de variation de charge ont été prises en compte, ce qui a permis d'élargir considérablement le champ d'analyse. Ces simulations étaient essentielles pour évaluer l'efficacité et la robustesse des deux approches dans des environnements dynamiques.

5.2.3.1 Importance des Simulations de Variations de Charge

En incluant différentes variations de charge, nous avons pu obtenir une compréhension approfondie des performances des deux stratégies. Tester les systèmes de contrôle sous différentes charges permet d'évaluer comment chaque méthode s'adapte aux nouvelles conditions et maintient une performance optimale. Cette analyse est cruciale pour les applications réelles où les conditions de charge peuvent varier de manière imprévisible.

5.2.3.2 Analyse des Critères de Performance

Les critères de performance utilisés pour évaluer les deux approches incluent le dépassement de crête, le temps de montée, le temps de stabilisation et l'erreur en régime permanent. Ces métriques fournissent une vision complète de la réactivité et de la stabilité du système de contrôle.

a. Dépassement (%)

Le dépassement de crête mesure la hauteur du pic maximal par rapport à la valeur de consigne après un changement brusque de charge. Un dépassement élevé peut indiquer une sur-réaction du système, potentiellement dommageable pour les composants.

b. Temps de Montée (s)

Le temps de montée est le temps nécessaire pour que la réponse atteigne un certain pourcentage (généralement 90 %) de la valeur de consigne pour la première fois. Un temps de montée rapide est souvent souhaitable pour une réponse rapide du système.

c. Temps de Stabilisation (s)

Le temps de stabilisation est le temps nécessaire pour que la réponse reste à l'intérieur d'une bande de tolérance autour de la valeur de consigne sans en sortir. Un temps de stabilisation court indique que le système atteint rapidement un état stable.

d. Erreur en Régime Permanent (%)

L'erreur en régime permanent est la différence entre la valeur de consigne et la valeur réelle une fois que le système a atteint un état stable. Une erreur faible ou négligeable est souhaitable pour maintenir la précision du système.

Tableau 5.1 Test de robustesse

	Dépassement %	Temps de montée	Temps de stabilisation	Erreur statique
PI	20.41%	3.87 e-3	3.094 e-3	3%
FOPI-PSO	9.37%	3.58 e-3	2.541 e-3	Négligeable

Les résultats montrent que le contrôleur FOPI-PSO offre des améliorations significatives par rapport au contrôleur PI conventionnel. Le dépassement de crête est réduit de plus de moitié, passant de 20,41 % avec le PI à 9,37 % avec le FOPI-PSO, ce qui diminue le risque de sur-réaction et de stress sur les composants du système.

Le temps de montée est légèrement amélioré avec le FOPI-PSO, permettant au système de réagir plus rapidement aux changements de charge. De plus, le temps de stabilisation est considérablement réduit, ce qui indique que le système atteint un état stable plus rapidement avec le FOPI-PSO, améliorant ainsi la réactivité globale du système.

Enfin, l'erreur en régime permanent est pratiquement éliminée avec le FOPI-PSO, assurant une précision optimale du système de contrôle. Cette faible erreur est cruciale pour maintenir la performance et l'efficacité énergétique du système dans des conditions de charge variables.

En conclusion, l'approche FOPI-PSO s'est révélée supérieure à la méthode utilisant le contrôleur PI traditionnelle dans le test de robustesse sous diverses conditions de charge. Les améliorations apportées par le FOPI-PSO, notamment en termes de réduction du dépassement de crête, de temps de montée plus rapide, de temps de stabilisation plus court et d'erreur en régime permanent négligeable, démontrent son efficacité et sa robustesse accrues pour les applications de gestion de l'énergie dans des environnements dynamiques.

5.2.4 Conclusion de la stratégie 1

Ce travail propose et simule un système photovoltaïque autonome intégrant un système hybride de stockage d'énergie à base de batterie et supercondensateur, contrôlé par un EMS utilisant un régulateur Fractional Order Proportional Integral (FOPI). Le contrôleur FOPI-PSO introduit, caractérisé par une flexibilité accrue des paramètres, a démontré des performances supérieures par rapport au contrôleur PI conventionnel. En exploitant la technique d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour l'ajustement simultané de plusieurs paramètres, le contrôleur FOPI-PSO proposé a été ajusté pour atteindre des réglages optimaux.

Les simulations menées dans des scénarios variés, incluant des fluctuations de charge et de l'ensoleillement, ont permis d'évaluer de manière approfondie l'efficacité et la robustesse des deux types de contrôleurs, PI et FOPI-PSO. Les résultats obtenus montrent que le FOPI-PSO surpasse systématiquement le contrôleur PI en termes de stabilité, de réactivité aux variations de charge et de conditions climatiques, et de gestion des ressources de stockage. Cette supériorité est manifeste dans les domaines suivants :

- **Réduction des dépassements de crête** : Le FOPI-PSO a permis de limiter les dépassements de crête lors des variations brusques de charge, assurant une meilleure stabilité de l'alimentation.
- **Réponse dynamique améliorée** : La capacité du FOPI-PSO à réagir aux changements d'ensoleillement et aux fluctuations de charge est nettement accrue, ce qui renforce la continuité de l'alimentation énergétique et la préservation des composants du système.
- **Efficacité énergétique** : En optimisant la gestion du flux d'énergie entre la batterie et le supercondensateur, le FOPI-PSO maximise l'utilisation des capacités de stockage disponibles et limite l'usure des composants, ce qui contribue à la durabilité globale du système.

Ainsi, cette recherche met en avant le potentiel du contrôle FOPI-PSO pour optimiser les systèmes photovoltaïques autonomes intégrant des solutions de stockage hybride. Ce contrôleur offre non seulement une adaptabilité supérieure mais aussi une efficacité accrue, en particulier dans des systèmes soumis à des variations fréquentes de la demande et des conditions d'ensoleillement. Cependant, cette approche présente également certaines limitations importantes, qui nécessitent d'être prises en compte pour une éventuelle application en conditions réelles, ces limitations vont être abordées dans la conclusion générale.

5.3 Résultat et simulation de la Stratégie 2 : Alimentation d'un centre de tri des déchets par un système photovoltaïque couplé au réseau

Après avoir examiné la première solution basée sur un système autonome intégrant un stockage hybride de batteries et de supercondensateurs, nous abordons maintenant la seconde stratégie, qui vise une approche différente adaptée à un contexte spécifique : l'alimentation d'un centre de tri des déchets. Cette seconde solution exploite la connexion directe au réseau pour gérer l'énergie photovoltaïque produite sans nécessiter de stockage local. En tirant parti de l'infrastructure du réseau électrique, cette approche optimise l'utilisation de l'énergie générée tout en répondant aux besoins énergétiques fluctuants du centre de tri, offrant ainsi une alternative économique et efficace. La performance de cette solution sera évaluée à travers des simulations réalisées avec le logiciel PVsyst, permettant d'analyser en détail son efficacité énergétique et sa rentabilité dans des conditions opérationnelles réelles.

Avant d'être recyclés, les déchets soigneusement sélectionnés sont triés, emballés et stockés dans des installations de tri des déchets (Figure 4.15), également appelées centres municipaux de tri des déchets. Parmi les types de déchets traités, on trouve :

- **Matériaux creux** : aluminium, acier, plastique et verre.
- **Objets plats** : magazines et journaux, papiers, cartons, verre, acier et aluminium.

Ces centres comprennent diverses étapes telles que la réception, un espace de stockage en amont, le tri, l'emballage, le stockage en aval, l'enlèvement des articles emballés et le tri des rejets, entre autres étapes [154].

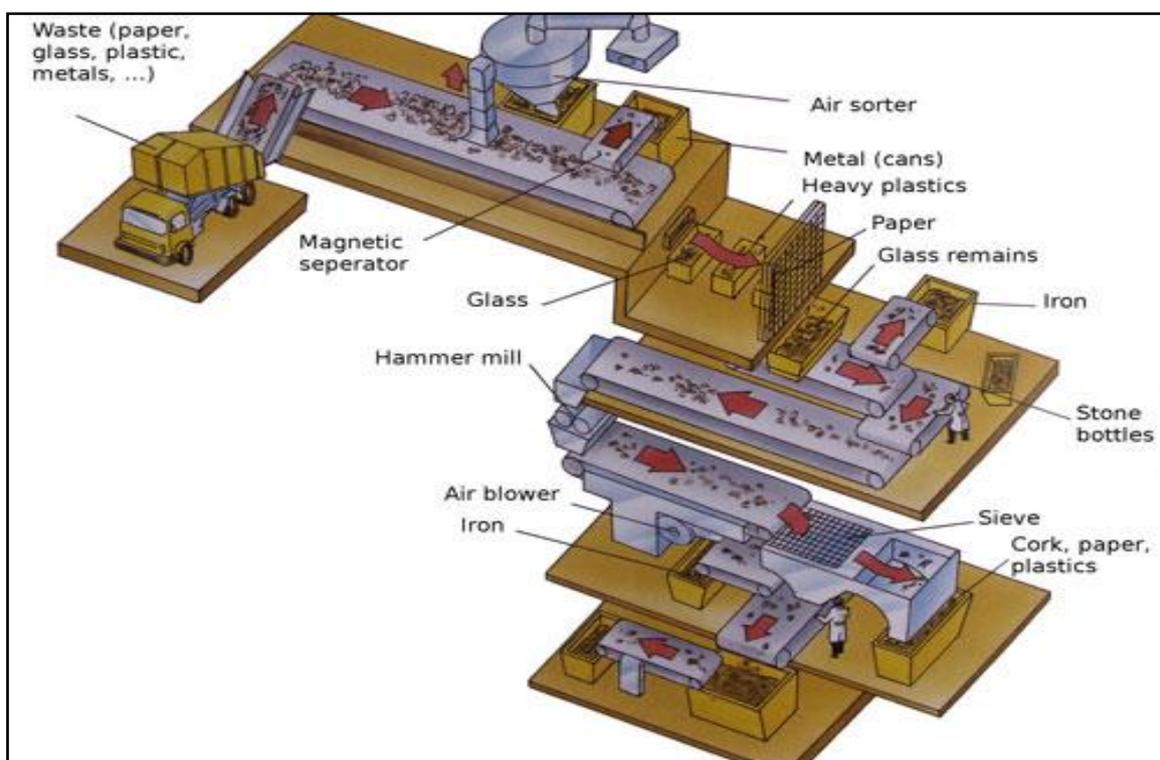


Figure 5.8 Site de traitement des déchets solides

Les opérations de tri et de traitement nécessitent l'utilisation d'équipements industriels sophistiqués tels que des convoyeurs, des compacteurs et des broyeurs, actuellement alimentés par le réseau électrique local. Cependant, cette dépendance au réseau présente des inconvénients en termes de coûts énergétiques et de durabilité environnementale [155-156], car elle entraîne des émissions de carbone plus élevées et une vulnérabilité accrue aux coupures de courant.

5.3.1 Description de l'Équipement du Centre de Tri des Déchets

La figure 5.9 montre une image du convoyeur, un élément crucial de l'infrastructure du centre de gestion des déchets. Cet appareil est essentiel pour déplacer les déchets à travers les différentes étapes du processus de tri de manière efficace. La fiabilité opérationnelle continue du convoyeur est cruciale pour maintenir la production maximale du centre.



Figure 5.9 Image du système de convoyeur dans une installation de tri des déchets

Réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks, la figure 5.10 présente une représentation tridimensionnelle détaillée offrant une vue globale et réaliste de l'installation de tri des déchets. Cette représentation capture de manière précise l'agencement spatial de l'installation, y compris l'organisation des différentes étapes de tri, des zones de stockage et des divers équipements utilisés dans le processus de tri. Cette visualisation permet de mieux comprendre l'organisation structurelle et fonctionnelle du centre de tri.

La figure 5.10 est une ressource précieuse pour les parties prenantes de la gestion des déchets et de la planification des installations, car elle offre une vue d'ensemble réaliste et complète. En fournissant des informations sur l'agencement de l'installation, les procédures de travail et les zones d'amélioration potentielles, elle facilite une prise de décision éclairée et, en fin de compte, améliore l'efficacité et l'efficience des opérations de gestion des déchets.



Figure 5.10 Rendu 3D du centre de tri des déchets réalisé avec SolidWorks

Le tableau 5.2 et la figure 5.11 fournissent une analyse détaillée de la consommation d'énergie et de la distribution des différents équipements utilisés dans le système. Le tableau comprend les informations suivantes :

1. **Équipements** : Liste les types d'équipements inclus dans l'analyse, tels que les éclairages LED, les moteurs de convoyeurs, l'automatisation du contrôle, les pompes des presses hydrauliques, les extracteurs d'air, les moteurs de convoyeurs de chargement, et autres.
2. **Quantité** : Indique le nombre de chaque type d'équipement utilisé dans le système.
3. **Puissance (W)** : Spécifie la consommation de puissance de chaque équipement en watts.
4. **Utilisation (h/jour)** : Montre la durée moyenne d'utilisation quotidienne de chaque équipement en heures.
5. **Puissance totale (W)** : Calcule la consommation totale de puissance de chaque type d'équipement en multipliant la quantité par la consommation de puissance.
6. **Consommation quotidienne (Wh/jour)** : Présente la consommation d'énergie quotidienne de chaque type d'équipement en Wattheures, calculée en multipliant la puissance totale par la durée moyenne d'utilisation quotidienne.

Ce tableau offre une vue d'ensemble complète des besoins énergétiques des différents équipements du système, ce qui est essentiel pour la conception et l'optimisation de l'approvisionnement en énergie, tel que le système photovoltaïque connecté au réseau proposé [157, 158].

Tableau 5.2 Puissances et consommation journalière

Equipments	Quantity	Power (W)	Usage (h/day)	Total power (W)	Daily Consumption (Wh/day)
LED lights	15	200	8	3000	24000
Conveyor motors	4	3000	8	12000	96000
PCs and control automation	2	200	8	400	3200
Pump hydraulic presses	1	3200	2	3200	6400
Air extractor	3	500	8	1500	12000
Loading conveyor motors	1	3500	5	3500	17500
Others	1	2000	3	2000	6000
TOTALS				25600	46893,29

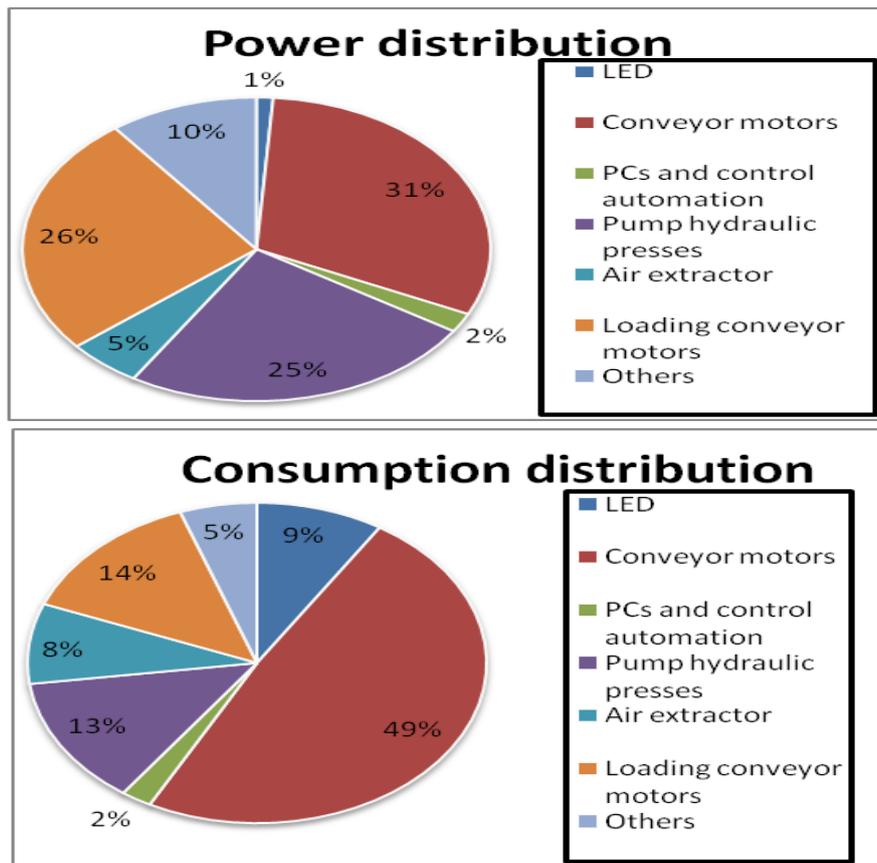


Figure 5.11 Distribution de la puissance et de l'énergie

5.3.2 Description du système photovoltaïque connecté au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont des installations complexes qui intègrent plusieurs composants essentiels pour la conversion et la distribution de l'énergie solaire. Au cœur de ces systèmes se trouve un onduleur bidirectionnel, qui joue un rôle crucial en convertissant l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif compatible avec le réseau électrique. Les panneaux photovoltaïques capturent l'énergie solaire et la transforment en courant continu (DC), lequel est ensuite acheminé vers un bus DC où il est régulé et distribué de manière efficace. Simultanément, un bus de courant alternatif (AC) facilite la connexion du système photovoltaïque au réseau électrique, garantissant l'interopérabilité et la synchronisation avec d'autres sources d'énergie.

Ce type de système présente un avantage significatif en termes d'utilisation efficace de l'énergie solaire, car il évite les pertes associées au stockage d'énergie, souvent observées dans les systèmes de stockage par batterie. En effet, l'électricité générée par les panneaux photovoltaïques peut être directement injectée dans le réseau électrique et utilisée instantanément par les équipements électriques connectés au réseau. De plus, les systèmes photovoltaïques connectés au réseau peuvent bénéficier de mécanismes de compensation d'énergie, permettant aux propriétaires de vendre l'excédent d'électricité générée au réseau et de générer des revenus supplémentaires.

Pour illustrer plus concrètement ces concepts, le modèle proposé est détaillé à la Figure 5.12, générée à l'aide du logiciel PVSyst. Cette visualisation fournit une vue d'ensemble du système et de son fonctionnement, permettant ainsi de mieux comprendre son efficacité et son potentiel dans le contexte spécifique du projet de simulation pour l'installation photovoltaïque connectée au réseau destinée à alimenter le centre de tri des déchets [159].

Les systèmes d'énergie solaire photovoltaïque connectés au réseau se composent des éléments suivants :

- **Modules photovoltaïques** arrangés en configurations série et parallèle, pour produire de l'énergie en courant continu à partir de la capture de la lumière solaire.
- **Technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT)**, garantissant que les modules solaires photovoltaïques fonctionnent à leur puissance optimale tout au long des heures de la journée.
- **Convertisseurs DC/AC** reliés au réseau, assurant que l'énergie en courant alternatif convertie de manière sécurisée soit fournie à l'infrastructure du réseau.

Ce système maximise l'utilisation de l'énergie produite par le solaire en éliminant les pertes liées au stockage d'énergie [160].

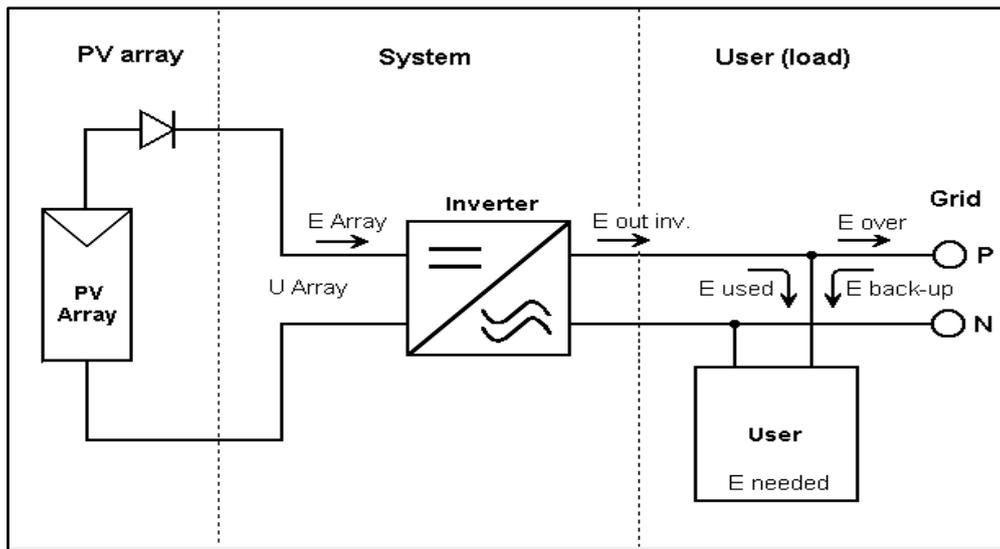


Figure 5.12 Schémas du système photovoltaïque en autoconsommation connecté au réseau

5.3.2 Optimisation de l'Inclinaison et l'Orientaion

L'optimisation d'un système photovoltaïque dépend principalement de deux paramètres : l'orientation et l'angle d'inclinaison. L'angle d'inclinaison des panneaux (Figure 5.13) sera fixé à 33° , et leur orientation sera systématiquement dirigée plein sud [161].

Les Figures 5.13 et 5.14 présentent des informations cruciales pour l'évaluation et l'optimisation des performances du système photovoltaïque (PV). Dans la Figure 4.20, l'angle d'inclinaison du champ PV représente l'angle optimal d'inclinaison des panneaux photovoltaïques par rapport à la surface horizontale. Cette inclinaison est d'une importance capitale, car elle influence directement la quantité de lumière solaire captée par les panneaux, et par conséquent leur efficacité globale [161].

Une courbe de performance solaire précise, illustrée dans la Figure 4.21, offre une représentation graphique des performances du système PV en fonction de divers paramètres tels que l'intensité lumineuse, la température ou d'autres conditions environnementales variables. Ces deux figures fournissent des données essentielles pour orienter la conception et l'optimisation du système photovoltaïque, permettant ainsi de déterminer l'angle d'inclinaison optimal des panneaux et de prédire leurs performances dans des conditions variées.

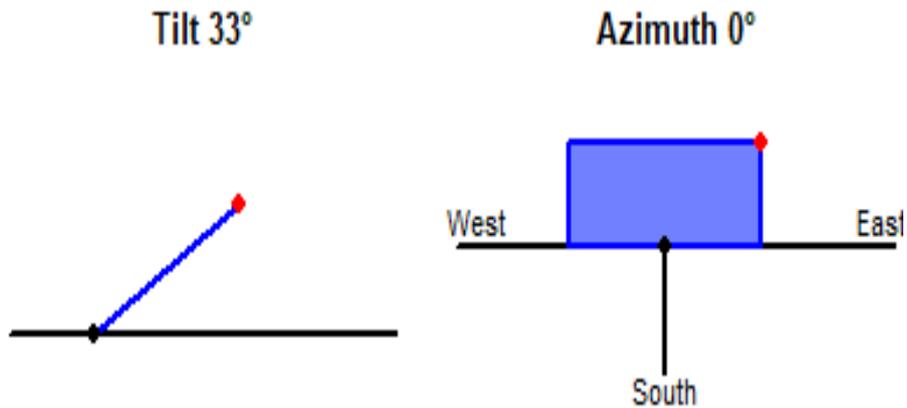


Figure 5.13 Angle d'inclinaison du champ PV.

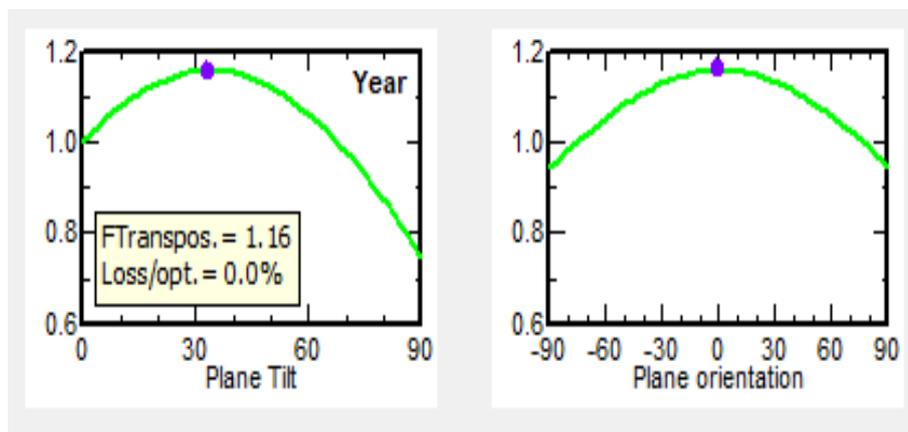


Figure 5.14 Courbe de performances

5.3.3 Processus de dimensionnement du champ Photovoltaïque

Le champ photovoltaïque est composé de 110 panneaux monocristallins JinkoSolar, chacun ayant une puissance nominale de 300 watts crête (Wc). Ces panneaux sont configurés en 5 chaînes connectées en parallèle. Chaque chaîne comprend 22 panneaux connectés en série, ce qui permet d'atteindre une puissance totale de **33 kilowatts (kW)**.

Le Tableau 5.3 présente un aperçu détaillé des spécifications des modules photovoltaïques utilisés dans cette étude. Chaque paramètre joue un rôle crucial dans l'évaluation globale des performances et de la capacité du système photovoltaïque. La puissance nominale du module, exprimée en watts, représente sa capacité maximale de production d'énergie dans des conditions standardisées. L'efficacité du module, exprimée en pourcentage, reflète sa capacité à convertir la lumière solaire en électricité. De plus, des informations sur la tension maximale, le courant maximal, et d'autres caractéristiques électriques sont incluses pour garantir une conception adéquate du système photovoltaïque, assurant ainsi son fonctionnement efficace et sécurisé. Ces données détaillées sont essentielles pour une évaluation précise des performances globales du système.

Tableau 5.3 Spécifications technique du module JinkoSolar 300Wc

Power mpp	301.1W
PTC Power Rating	276.73W ¹
STC Power per unit of area	17.0W/ft ² (183.3W/m ²)
Efficiency	18.33%
Power Tolerances	0%/+3%
Number of Cells	60
Impp	9.42A
Vmpp	32V
Isc	10.02A
Voc	39.1V
NOCT	45°C
Temp. Coefficient of Isc	0.05%/K
Temp. Coefficient of Power	-0.39%/K
Temp. Coefficient of Voltage	-0,116V/K
Maximum System Voltage	1000V

Les Figures 5.15 et 5.16 illustrent respectivement les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) des panneaux solaires photovoltaïques utilisés. La Figure 5.15 montre la relation entre la tension appliquée au panneau solaire et le courant résultant, fournissant des informations sur le comportement électrique du panneau sous différentes conditions de luminosité et de température. La Figure 5.16, quant à elle, représente la relation entre la tension et la puissance électrique produite par le panneau, permettant d'identifier le point de fonctionnement optimal où la production de puissance électrique est maximisée. Ces caractéristiques sont essentielles pour évaluer et optimiser les performances des panneaux solaires dans les systèmes photovoltaïques. Il est important de noter que le panneau utilisé dans cette étude est le JinkoSolar JKM 300-60.

PV module: Jinkosolar, JKM 300M-60

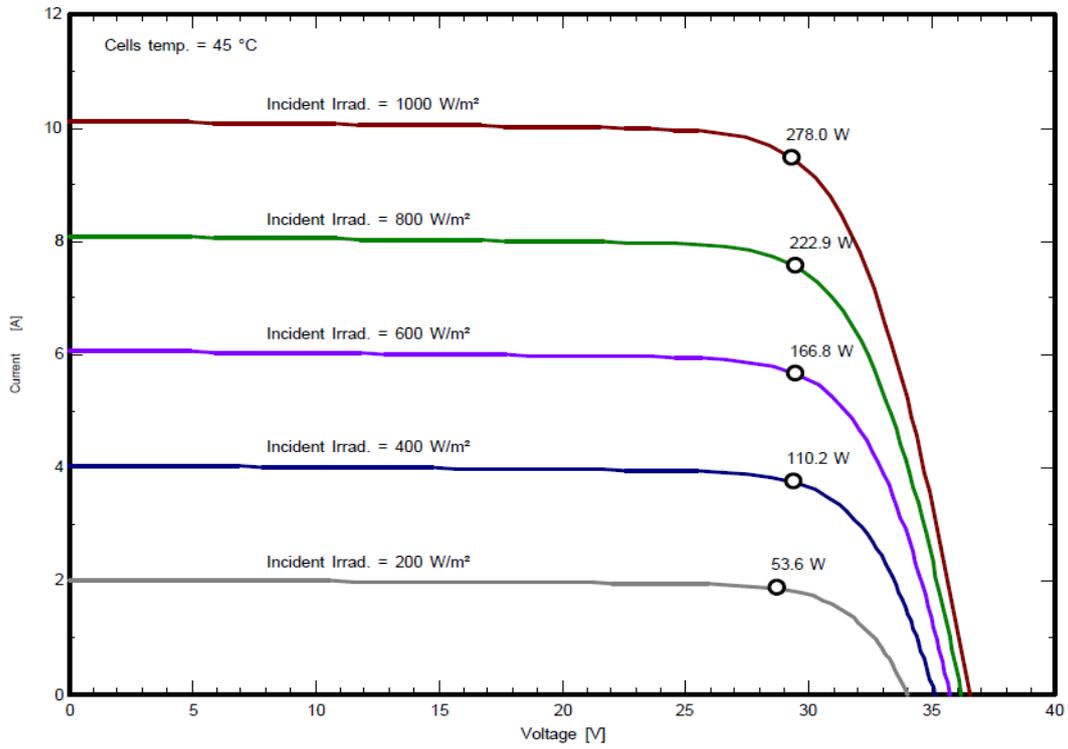


Figure 5.15 Caractéristique Courant-Tension pour le module JinkoSolar JKM 300-60

PV module: Jinkosolar, JKM 300M-60

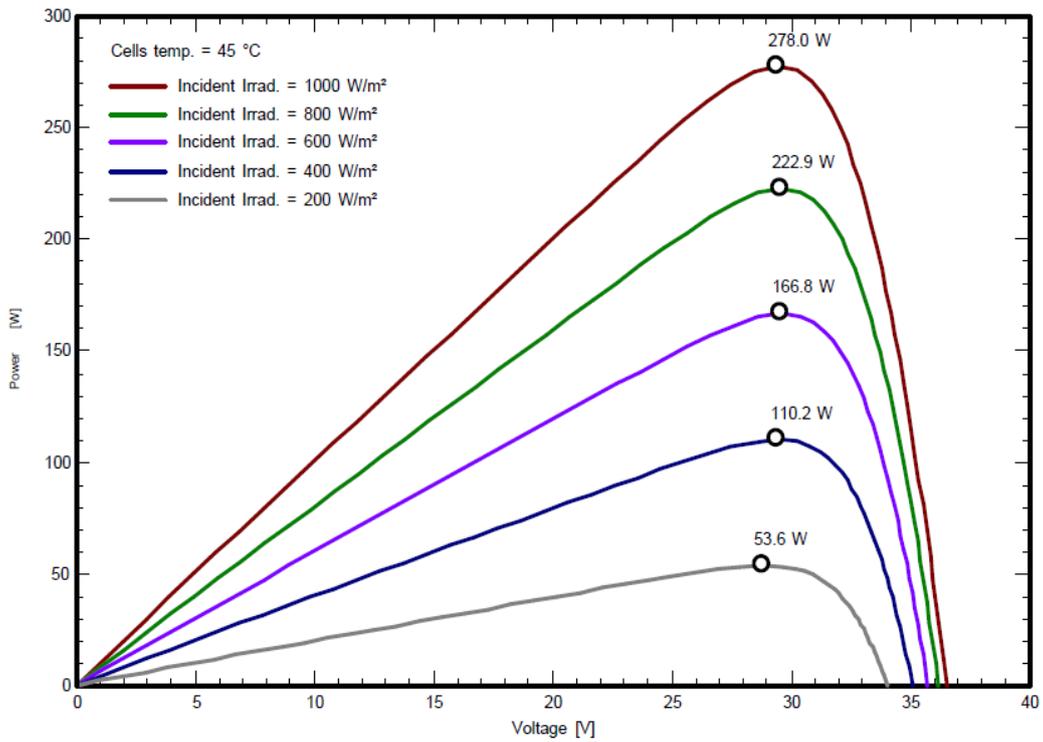


Figure 5.16 Caractéristique Puissance-Tension pour le module JinkoSolar JKM 300-60

5.3.4 Processus de dimensionnement de l'Onduleur

Le Tableau 5.4 présente les spécifications techniques de l'onduleur modèle ABB-PRO-33,0-TL-OUTD utilisé dans le système photovoltaïque. Le tableau inclut des détails sur les paramètres d'entrée (DC) et de sortie (AC) de l'onduleur.

Dans la section d'entrée (DC), on trouve des informations telles que la tension d'entrée maximale et minimale (VDC max et VDC min), la plage de tension pour le suivi du point de puissance maximale (VMPP), le nombre de trackers de point de puissance maximale (Multi MPPT), ainsi que le nombre de sorties DC. Pour la section de sortie (AC), les détails incluent la puissance AC maximale (AC power Max), la plage de tension de sortie AC (VAC Output), la tension AC maximale (VAC max), le courant AC maximal (IAC max), la fréquence, le facteur de puissance (Cos ϕ), la distorsion harmonique totale (THD), le nombre de phases de puissance, et l'efficacité maximale.

Tableau 5.4 Fiche technique de l'onduleur ABB-PRO-33,0-TL-OUTD

Model	ABB-PRO-33,0-TL-OUTD
Input (DC)	
VDC max	950 V
VDC min	610 V
V MPP	580~850 V
Multi MPPT	1
DC Output	1
Output (AC)	
AC power Max	33 kW
V AC Output	320~480 V
V AC max	400 V
IAC max	50,3 A
Frequency	50, 60 Hz
Cos ϕ	0,995
THD	< 3 %
Number of power phases	3
Maximum efficiency	98,3 %

La Figure 5.17, généré par le logiciel PvSyst, met en avant le processus de synchronisation de la tension de l'onduleur avec le champ photovoltaïque. Le graphique illustre la manière dont l'onduleur ajuste sa tension de sortie pour correspondre à celle générée par le champ photovoltaïque. Cette synchronisation est essentielle pour optimiser l'efficacité de conversion de l'énergie et garantir que l'onduleur fonctionne dans des limites de tension sécurisées [162].

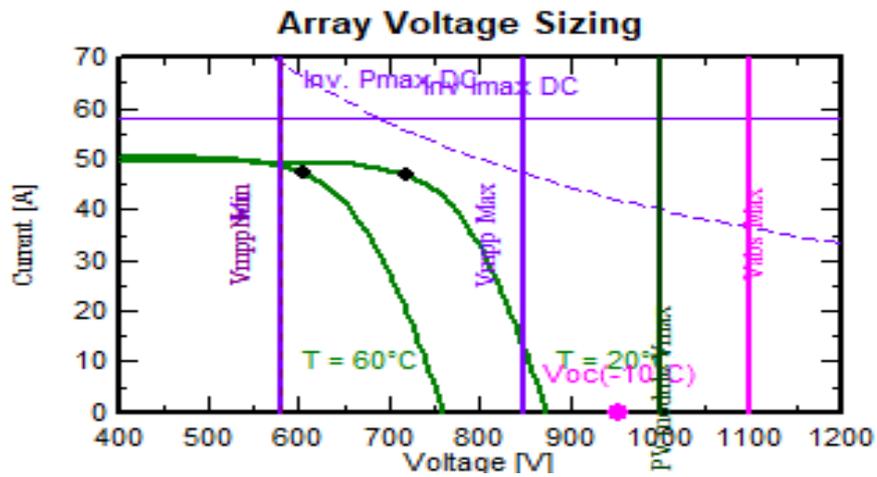


Figure 5.17 Courbe illustrant le processus de dimensionnement de l'onduleur

La Figure 5.18 illustre le profil d'efficacité de l'onduleur en fonction de la puissance d'entrée. Le graphique montre la relation entre la puissance d'entrée fournie à l'onduleur et son efficacité. L'efficacité est représentée sur l'axe des ordonnées, généralement exprimée en pourcentage, tandis que la puissance d'entrée est indiquée sur l'axe des abscisses. Il est à noter que l'efficacité maximale est de 98,3 % à une tension de 600 V. Ce profil fournit des informations précieuses sur la façon dont l'onduleur convertit la puissance d'entrée en puissance de sortie utilisable. Comprendre cette relation est essentiel pour optimiser les performances et le rendement énergétique du système photovoltaïque, car cela permet d'identifier les points de fonctionnement les plus efficaces de l'onduleur sous différentes conditions de charge.

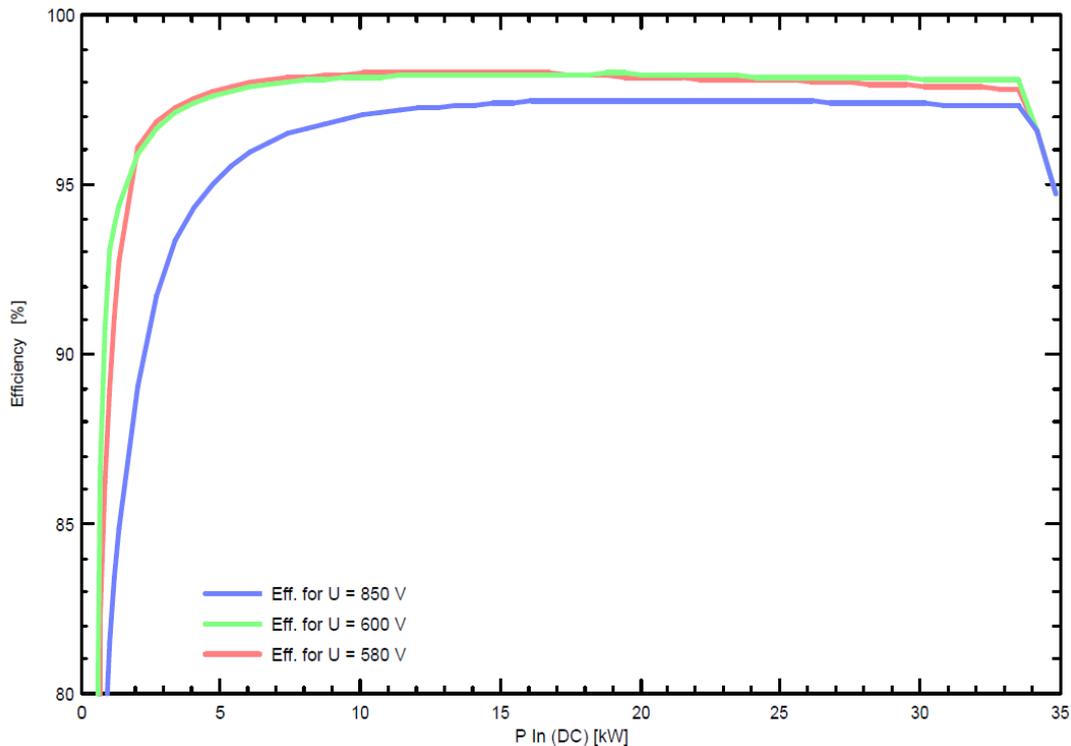


Figure 5.18 Profile d'efficacité de l'onduleur pour 580V, 600V et 850V

5.3.5 Résultats et discussions de la stratégie 2

Le tableau 5.5 présente les résultats de la simulation réalisée avec PVsyst. Il comprend des données mensuelles sur l'irradiation solaire, la production d'énergie, les pertes et la performance du système. Nous allons par la suite effectuer une analyse détaillée, mois par mois, des résultats :

5.3.5.1 Analyse de l'irradiation et de la température

- **GlobHor (Irradiation Globale Horizontale) :**

L'irradiation globale sur une surface horizontale varie considérablement au cours de l'année, atteignant un minimum en décembre (72,9 kWh/m²) et un maximum en juillet (238,8 kWh/m²).

L'irradiation est naturellement plus élevée durant les mois d'été, particulièrement entre mai et août, avec un pic en juillet à 238,8 kWh/m². Cela correspond à des conditions d'ensoleillement plus intenses et de jours plus longs.

- **DiffHor (Irradiation Diffuse Horizontale) :**

L'irradiation diffuse, quant à elle, suit également un schéma saisonnier, avec une valeur maximale en mai (86,75 kWh/m²) et un minimum en décembre (27,73 kWh/m²). Les mois avec une irradiation diffuse plus élevée (mai, avril) montrent des conditions météorologiques plus nuageuses, même si l'irradiation globale reste élevée.

T Amb (Température ambiante) :

La température moyenne ambiante varie de 10,23°C en janvier à 26,27°C en août. La hausse des températures durant les mois d'été (juin, juillet, août) a un effet direct sur les performances des panneaux solaires, car l'efficacité des modules photovoltaïques diminue avec l'augmentation de la température.

5.3.5.2 Analyse de la Production d'énergie et du Rendement

GlobInc (Irradiation Globale Inclinée) :

L'irradiation globale sur la surface inclinée des panneaux suit une tendance similaire à celle de l'irradiation horizontale, atteignant 225,4 kWh/m² en juillet et descendant à 123,6 kWh/m² en décembre. La configuration inclinée permet d'optimiser la captation de l'énergie solaire, en particulier pendant les mois où l'angle du soleil est moins élevé.

GlobEff (Irradiation Globale Effective) :

Il s'agit de l'énergie solaire réellement utilisable après correction des pertes dues à l'angle d'incidence. On observe ici une valeur très proche de celle de l'irradiation inclinée, ce qui montre une perte minimale dans les conditions d'exploitation de l'installation. En juillet, par exemple, la GlobEff est de 218,7 kWh/m² contre 225,4 kWh/m² pour la GlobInc, ce qui indique des pertes liées à l'angle d'incidence.

EArray (Production d'énergie totale des panneaux) :

La production mensuelle d'énergie par l'ensemble des panneaux solaires atteint un pic en juillet avec 6220 kWh, tandis que le mois de décembre présente la plus faible production avec 3734 kWh. Les mois d'été (juin, juillet, août) produisent la majeure partie de l'énergie, avec une production totale de 17 939 kWh sur cette période.

E_Grid (Énergie injectée dans le réseau) :

L'énergie injectée dans le réseau suit la production d'énergie des panneaux. Par exemple, en juillet, sur les 6220 kWh produits, 6086 kWh sont injectés dans le réseau. Les pertes entre la production des panneaux et l'injection dans le réseau sont liées aux inefficacités de conversion et de transport. Les pertes mensuelles varient entre 1,7 % et 2,7 %, les plus élevées étant observées en juin et juillet.

5.3.5.3 Analyse du Ratio de Performanc (PR)

PR mensuel :

Le Ratio de Performance (PR) est un indicateur clé qui mesure l'efficacité globale du système photovoltaïque. Il tient compte des pertes dues à la température, à l'angle d'incidence, et à d'autres facteurs de conversion.

Le PR est le plus élevé en janvier (0,898) et en février (0,896), des mois où la température ambiante est plus basse, ce qui améliore l'efficacité des modules.

Le PR diminue pendant les mois chauds, atteignant un minimum de 0,818 en juillet et 0,820 en août. Cela s'explique par la diminution des performances des modules à haute température, combinée à une irradiation globale maximale qui sollicite fortement le système.

Ratio de Performance annuel :

Le **PR annuel moyen** est de **0,855**, ce qui est une valeur correcte pour un système photovoltaïque bien optimisé. Cela signifie que le système fonctionne à environ 85,5 % de son potentiel théorique après correction des pertes.

Des pertes de 14,5 % sur l'année sont attendues en raison de facteurs tels que la chaleur, l'ombre, l'efficacité des composants et la qualité du système de gestion de l'énergie.

5.3.5.4 Bilan de performance annuel

GlobHor annuelle : D'une valeur de 1788,5 kWh/m². L'irradiation globale horizontale annuelle représente la quantité totale d'énergie solaire disponible pour l'installation photovoltaïque sur une surface horizontale.

GlobInc annuelle : D'une valeur de 2048,3 kWh/m². Cette valeur montre l'irradiation reçue par les panneaux inclinés sur l'année, optimisant la captation d'énergie solaire.

Production totale (EArray) : D'une valeur de 59 083 kWh. Sur l'année, les panneaux solaires ont produit un total de 59 083 kWh, soit une moyenne d'environ 4923 kWh par mois.

Énergie injectée dans le réseau (E_Grid) : D'une valeur de 57 778 kWh. Après conversion et pertes, 57 778 kWh ont été injectés dans le réseau, soit environ 97,8 % de la production totale. Cela montre que le système de conversion et d'injection est assez efficace, avec seulement 2,2 % de pertes annuelles.

5.3.5.2 Résumé saisonnier de la production énergétique :

On remarque d'après ces résultats que la production énergétique est fortement saisonnière, avec environ 30 % de l'énergie produite durant les trois mois d'été (juin, juillet, août). L'hiver, bien que moins productif, montre un PR plus élevé, ce qui indique que malgré la baisse d'ensoleillement, le système reste performant en termes d'efficacité.

Tableau 5.5 Bilans et Résultats Principaux du Système PV Connecté au Réseau

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	81.1	32.79	10.23	129.3	126.4	3.926	3.834	0.898
February	91.4	42.74	10.99	126.8	123.5	3.834	3.747	0.896
March	140.6	63.04	13.55	169.4	164.9	5.007	4.894	0.876
April	166.8	73.09	15.49	176.6	171.3	5.154	5.037	0.865
May	198.0	86.75	19.06	189.2	183.0	5.447	5.325	0.853
June	223.9	80.67	22.90	205.9	199.3	5.797	5.671	0.834
July	238.8	70.58	26.08	225.4	218.7	6.220	6.086	0.818
August	206.6	73.15	26.27	214.1	208.1	5.922	5.797	0.820
September	157.3	58.11	22.99	183.5	178.7	5.168	5.056	0.835
October	123.9	45.82	20.12	168.0	164.0	4.822	4.717	0.851
November	87.1	32.45	14.47	136.6	133.3	4.055	3.966	0.880
December	72.9	27.73	11.80	123.6	120.6	3.734	3.649	0.895
Year	1788.5	686.91	17.87	2048.3	1991.9	59.083	57.778	0.855

Legends:	GlobHor	Horizontal global irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
	DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
	T Amb	Ambient Temperature	E_Grid	Energy injected into grid
	GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio

La figure 5.19 montre les pertes du système, les pertes de collecte du champ photovoltaïque, ainsi que la production d'énergie utile qui sont respectivement :

- $L_c = 0,71 \text{ kWh/kWc/jour}$
- $L_s = 0,11 \text{ kWh/kWc/jour}$
- $Y_f = 4,8 \text{ kWh/kWc/jour}$

D'après les résultats de la simulation, le mois le plus favorable en termes de production d'énergie pour une puissance du nominale de 33 kWc est juillet. Cependant, il est important de noter que c'est aussi le mois où les pertes sont les plus élevées en raison des températures élevées, ce qui peut affecter négativement l'efficacité du système. En revanche, décembre produit moins d'énergie, mais est également associé à des pertes moindres. Cette tendance s'explique par les températures plus fraîches en décembre, qui peuvent aider à maintenir les composants du système à des niveaux de performance optimaux malgré une production d'énergie réduite.

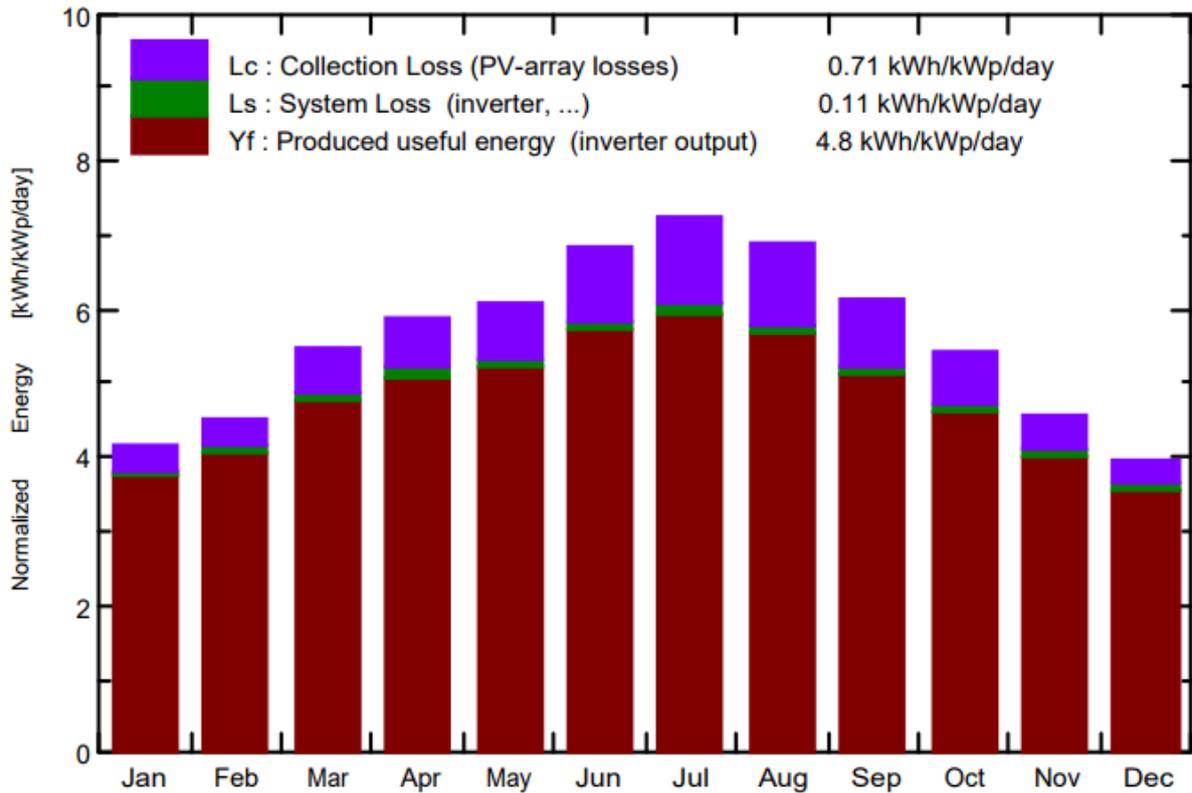


Figure 5.19 Graphique de la puissance nominale mensuelle durant une année de production solaire

Dans l'analyse de la figure 5.20, il est à noter que le mois le plus favorable en termes de facteur de performance est décembre, tandis que le mois le moins favorable est juillet. Cette observation met en évidence des tendances saisonnières significatives dans l'efficacité du système photovoltaïque. Comme mentionné précédemment, les mois d'hiver affichent généralement une meilleure performance par rapport aux mois d'été. Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment des températures plus fraîches et des conditions atmosphériques plus favorables durant l'hiver, ce qui favorise une meilleure conversion de l'énergie solaire en électricité. À l'inverse, les températures élevées en été, en particulier en juillet, peuvent entraîner des pertes d'efficacité plus importantes, affectant ainsi négativement le facteur de performance du système photovoltaïque. Le ratio moyen tout au long de l'année est de 85,5 %, ce qui indique que l'efficacité du système est très satisfaisante.

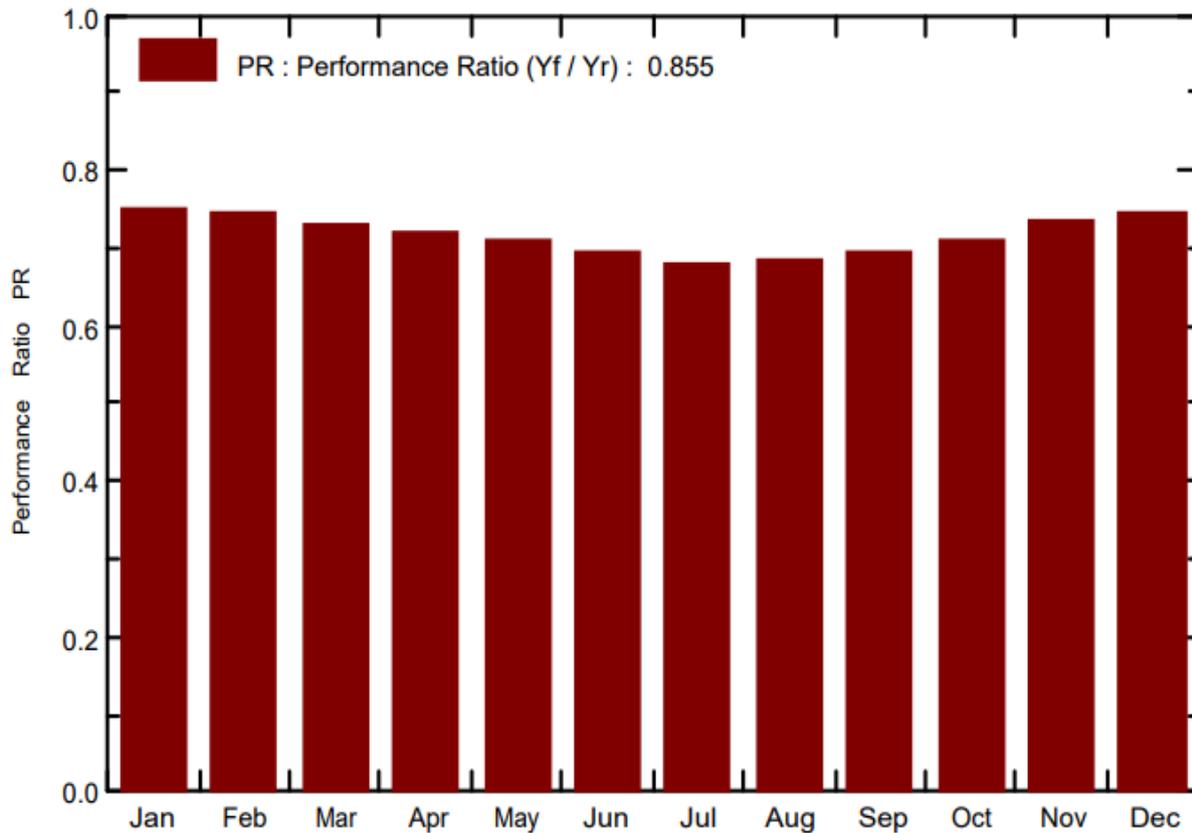


Figure 5.20 Ratio de performance correspondant a chaque mois durant l'année

La figure 5.21 présente un rapport annuel détaillé qui répertorie toutes les pertes survenant dans le système, depuis le moment où le rayonnement solaire initial interagit avec les panneaux photovoltaïques jusqu'à la distribution de l'énergie électrique dans le réseau. Il est important de noter que l'irradiation globale horizontale totale est évaluée à 1788 kWh/m², tandis que l'énergie captée par le champ photovoltaïque s'élève à 66,1 MWh, avec une énergie injectée dans le réseau atteignant 57,8 MWh. Les différentes pertes du système sont analysées de manière minutieuse et exprimées en pourcentages sur le diagramme correspondant.

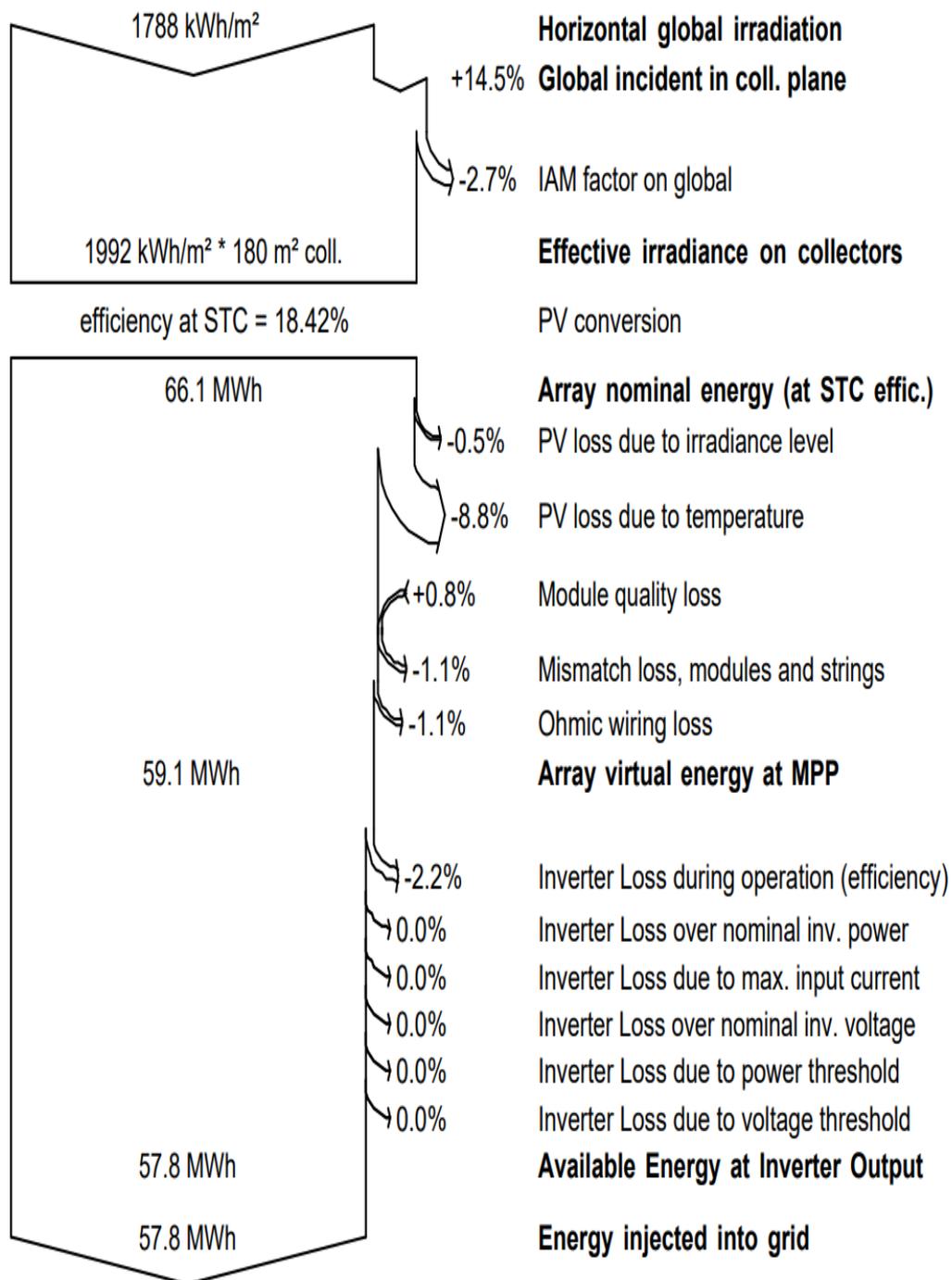


Figure 5.21 Diagramme de pertes du système photovoltaïque durant l'année

Comme le montre la figure 5.22, cet outil propre au logiciel Pvsyst offre une évaluation détaillée des réductions prévues des émissions de CO₂ découlant de l'installation du système photovoltaïque. Cet instrument est essentiel pour évaluer l'impact environnemental du système solaire et comprendre comment il contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'évaluation repose sur les Émissions du Cycle de Vie (ECV), qui englobent toutes les

émissions de CO₂ liées à une certaine quantité d'énergie ou à un composant sur l'ensemble de son cycle de vie, incluant les phases de production, d'exploitation et de maintenance.

Dans ce cas particulier, les résultats montrent qu'au cours des 30 prochaines années, 858,7 tonnes d'émissions de CO₂ seront économisées. Cette réduction significative des émissions met en évidence les avantages environnementaux à long terme d'investir dans des projets d'énergie renouvelable tels que les systèmes solaires. En outre, cette analyse détaillée souligne l'importance de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie des systèmes énergétiques, et pas seulement leur phase opérationnelle, lors de l'évaluation de leur durabilité environnementale.

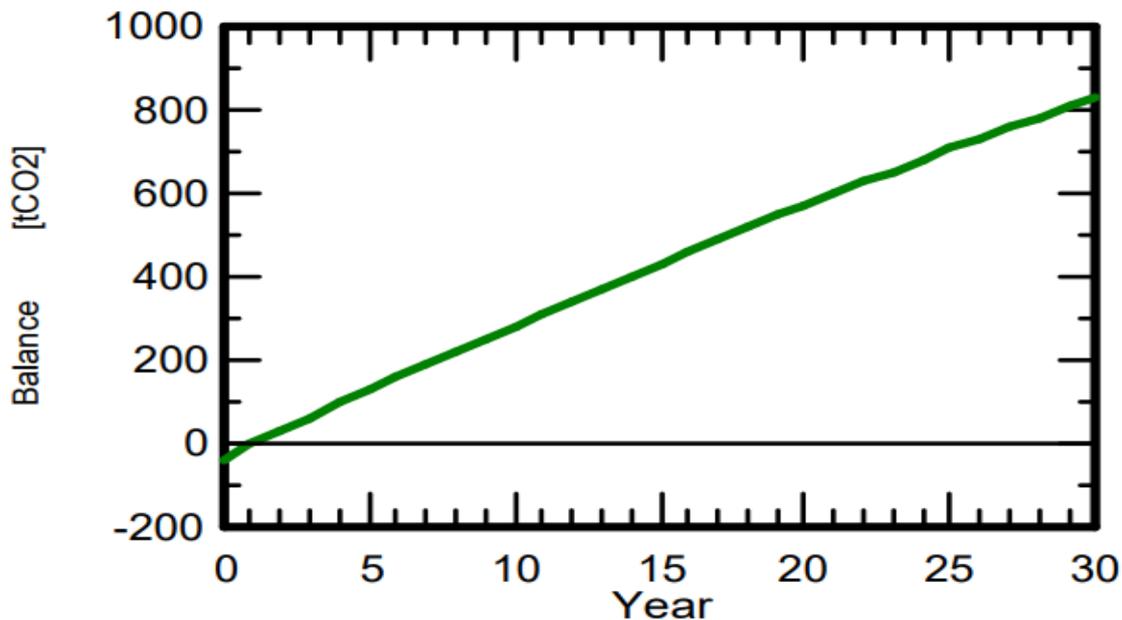


Figure 5.22 Evaluation de la balance carbone durant le cycle de vie de l'installation photovoltaïque

Après l'analyse de la balance carbone de l'installation nous allons nous intéresser à sa dégradation. La figure 5.23 offre une analyse complète de la dégradation anticipée du module photovoltaïque sur une période de 30 ans. Cette figure se compose de trois graphiques distincts qui fournissent des informations essentielles sur la performance et la durabilité du module :

1. **Dégradation de base du module** : Ce graphique montre la dégradation progressive des performances du module au fil du temps. Il met en évidence la diminution graduelle de l'efficacité du module due à des facteurs tels que l'exposition aux éléments environnementaux et les conditions normales de fonctionnement.
2. **Dégradation avec augmentation annuelle du déséquilibre** : Ce graphique illustre la dégradation du module en tenant compte des écarts croissants entre les performances réelles et attendues, année après année. Il montre comment ces écarts contribuent à la dégradation des performances du module au fil du temps.
3. **Garantie du module** : Ce graphique représente les spécifications de performance garanties par le fabricant pendant la période de garantie du module. Il sert de point de référence pour évaluer la dégradation réelle par rapport aux attentes initiales et constitue un indicateur critique de la fiabilité du module au fil du temps.

En examinant ces courbes, on peut observer l'évolution de la dégradation du module sur une période de 30 ans. Il est notable que, selon le graphique orange, la dégradation devrait atteindre environ 20 % après 30 ans de vie utile. Cette analyse offre des informations précieuses pour évaluer la durabilité et la fiabilité à long terme du système photovoltaïque, ainsi que pour planifier efficacement l'entretien et le remplacement des composants si nécessaire.

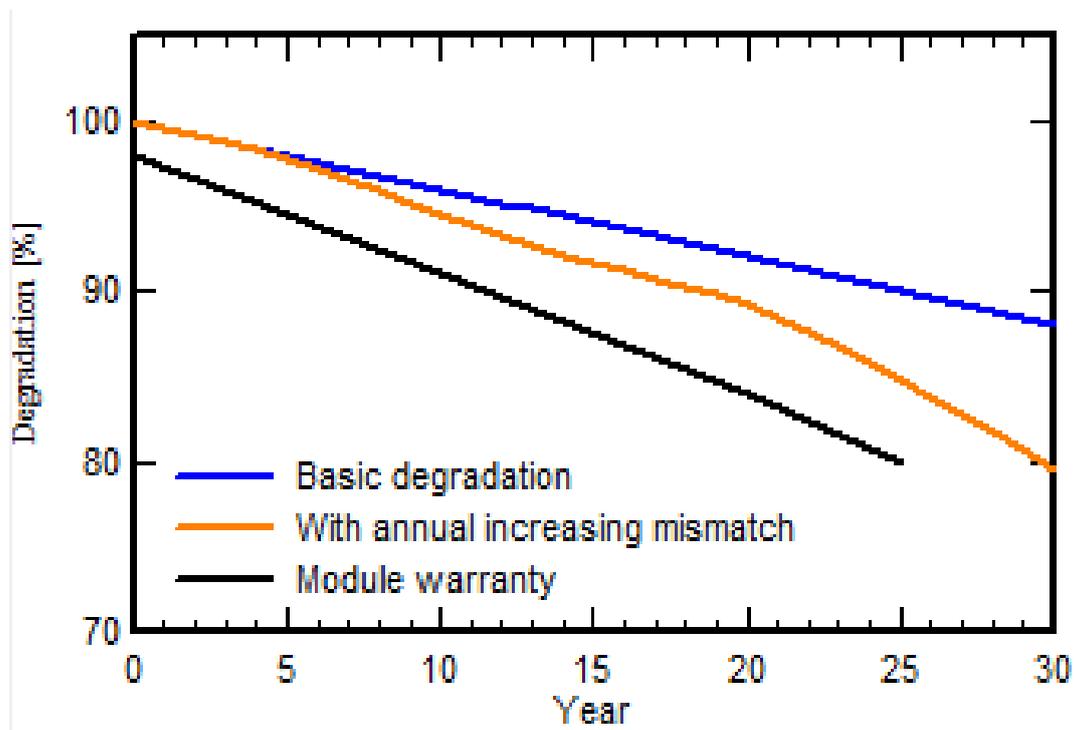


Figure 5.23 Diagramme de dégradation pour une durée de vie de 30 ans

5.3.6 Conclusion de la stratégie 2

Cette stratégie vise à explorer les dynamiques complexes des systèmes photovoltaïques solaires connectés au réseau, en particulier en ce qui concerne l'alimentation des centres de tri des déchets dans le contexte climatique de l'Algérie. L'objectif principal est de réaliser une analyse approfondie de divers indicateurs de performance pour évaluer l'efficacité de ces installations. La configuration du système proposée comprend 110 panneaux solaires de 300Wc chacun, associés à des onduleurs de 30 kW. Grâce à une combinaison rigoureuse de simulations et d'expérimentations, il a été déterminé que l'angle d'inclinaison optimal pour maximiser la capture de l'énergie solaire est de 33°.

Les évaluations quantitatives montrent que le système est capable de produire annuellement 56,3 MWh d'énergie, avec un excellent ratio de performance de 85 %. La dégradation prévue atteint environ 20 % après 30 ans de durée de vie. Ces résultats soulignent le potentiel considérable de l'utilisation des ressources solaires en Afrique du Nord, une région réputée pour son climat favorable et sa position géographique idéale.

En outre, l'adoption de ces alternatives d'énergie renouvelable offre une opportunité réelle de réduire significativement la dépendance aux sources d'énergie issues des combustibles fossiles. Au cours de la durée de vie opérationnelle de l'installation, cette transition pourrait permettre de diminuer jusqu'à 858,7 tonnes d'émissions de CO₂, l'un des impacts environnementaux les plus importants. De plus, ce type d'installation connectée au réseau peut également atténuer les problèmes liés à l'utilisation des batteries de stockage dans les centrales solaires, en permettant une utilisation directe de l'énergie produite et en réduisant les coûts et les contraintes d'entretien associés aux systèmes de stockage.

À l'avenir, une piste de recherche possible consisterait à comparer les performances de cette installation spécifique avec celles d'autres installations similaires opérant dans des climats différents. Ces types de projets pourraient fournir des informations nouvelles et cruciales sur les interactions complexes entre les facteurs environnementaux et l'efficacité des systèmes photovoltaïques, contribuant ainsi à orienter les décisions futures sur la construction d'infrastructures énergétiques durables.

5.4 Conclusion

Cette conclusion rassemble les résultats des deux stratégies suggérées pour faire face aux défis liés au stockage dans les systèmes photovoltaïques, en soulignant l'efficacité des solutions autonomes et connectées au réseau, développées respectivement avec Matlab/Simulink et PVsyst.

Dans la première stratégie, nous avons développé et simulé un système photovoltaïque autonome intégrant un stockage hybride composé de batteries et de supercondensateurs, contrôlé par un système de gestion de l'énergie utilisant un régulateur FOPI. Le contrôleur avancé FOPI-PSO, optimisé via l'algorithme d'optimisation par essaim de particules, a démontré des performances supérieures au contrôleur PI conventionnel, en offrant une meilleure adaptabilité et robustesse face aux variations de charge et d'ensoleillement.

Le risque de sur-réaction et de stress sur les composants du système est réduit de plus de moitié, passant de 20,41 % avec le PI à 9,37 % avec le FOPI-PSO, ce qui réduit également le dépassement de crête. Le FOPI-PSO améliore le temps de montée, ce qui permet au système de réagir plus rapidement aux variations de charge, et réduit la période de stabilisation, suggérant que le système atteint un état stable plus rapidement, ce qui améliore la réactivité globale. Enfin, le FOPI-PSO élimine pratiquement l'erreur en régime permanent, assurant une précision optimale du système de contrôle.

Malgré ces améliorations, certains défis persistent, tels que la sensibilité de l'algorithme PSO aux conditions initiales et l'impact des variations environnementales réelles sur la performance du système. Des recherches futures pourraient inclure des validations expérimentales, l'intégration de techniques d'apprentissage automatique pour améliorer l'adaptabilité, et l'optimisation multi-objectif pour la réduction des coûts d'exploitation.

La seconde stratégie, simulée avec PVsyst, explore les dynamiques des systèmes photovoltaïques connectés au réseau, appliqués à un centre de tri des déchets en Algérie. Cette approche se distingue par sa capacité à réduire la dépendance aux énergies fossiles et les émissions de CO₂, tout en minimisant les problèmes liés au stockage de l'énergie dans les centrales solaires. La configuration du système comprend 110 panneaux solaires de 300 Wc

chacun, associés à des onduleurs de 30 kW. Les simulations ont montré que le système pouvait produire annuellement 56,3 MWh d'énergie avec un ratio de performance de 85 %, et une dégradation prévue d'environ 20 % sur 30 ans. L'inclinaison optimale des panneaux a été déterminée à 33° pour maximiser la capture de l'énergie solaire.

Ces résultats mettent en lumière le potentiel des systèmes photovoltaïques et démontrent l'efficacité des stratégies autonomes et connectées au réseau. L'application pratique de ces deux approches offre des solutions prometteuses pour l'exploitation des énergies renouvelables, tout en répondant aux défis du stockage et de la durabilité dans un contexte de transition énergétique.

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse a examiné en détail les obstacles et les possibilités d'amélioration des installations photovoltaïques, en se concentrant sur les problèmes de stockage et les stratégies de gestion de l'énergie, notamment en Algérie. Le travail s'est articulé autour de cinq chapitres qui ont progressivement construit une compréhension complète des technologies photovoltaïques, des défis associés au stockage de l'énergie et des solutions modernes et innovantes pour améliorer l'efficacité des systèmes solaires.

Le premier chapitre a fourni une revue exhaustive des avancées dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque, en détaillant et analysant les technologies de cellules photovoltaïques disponibles, les différents types d'architecture de centrales solaires et les méthodes d'amélioration de l'efficacité. Cette analyse a établi une base solide pour comprendre les diverses approches et leurs applications, ainsi que les contraintes technologiques et environnementales qui influencent les performances des installations photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, une analyse détaillée des constituants et composants des systèmes photovoltaïques et de leurs modèles mathématiques a été réalisée. L'accent a été mis sur les diverses interactions complexes entre les dispositifs de production d'énergie, les systèmes de stockage et les composants d'électronique de puissance, avec une attention particulière aux problèmes liés au stockage par batterie. L'option d'une hybridation des sources de stockage, combinant batteries et supercondensateurs, a été proposée comme une solution prometteuse pour maximiser les performances et la durabilité des systèmes photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre, nous avons examiné en détail les dispositifs hybrides de stockage d'énergie en combinant batteries et supercondensateurs pour optimiser les performances des systèmes énergétiques solaires. Après une analyse approfondie de la littérature, nous avons opté pour une stratégie de gestion hybride qui combine des méthodes basées sur des règles avec des approches intelligentes, appliquées à une architecture incluant deux convertisseurs. Cette approche permet une meilleure adaptation aux fluctuations des conditions de charge et d'ensoleillement, tout en maximisant l'efficacité et la durabilité du système. Nous avons également exploré différentes fonctions de fitness pour optimiser la gestion de l'énergie, ce qui permet de mieux répondre aux exigences spécifiques de chaque situation. Par ailleurs, ce chapitre a présenté les deux systèmes étudiés : l'un appliquant un algorithme avancé de gestion de l'énergie pour un système autonome avec stockage hybride, et l'autre concernant un système sans stockage connecté au réseau, spécifiquement appliqué à un centre de tri des déchets. Un comparatif des techniques de suivi MPPT a permis d'identifier les approches les plus adaptées pour maximiser la collecte et l'utilisation de l'énergie solaire.

Dans le quatrième chapitre, l'accent a été mis sur les mécanismes de gestion et de contrôle du flux d'énergie dans les systèmes de stockage hybrides. Une approche hybride de gestion a été développée, intégrant des stratégies basées sur des règles déterministes et des méthodes intelligentes, appliquées dans une architecture double convertisseur. Cette approche a montré une adaptation efficace aux variations des conditions opérationnelles, optimisant ainsi l'efficacité globale du système. Deux configurations spécifiques ont été explorées : une

solution autonome avec stockage hybride utilisant un algorithme avancé de gestion de l'énergie, et une solution sans stockage connectée au réseau pour un centre de tri des déchets.

Le cinquième chapitre a consolidé les résultats des simulations pour les deux stratégies suggérées, en soulignant l'efficacité des solutions développées. La première stratégie a démontré après analyse des résultats obtenus par simulation Malab/Simulink les avantages d'un système photovoltaïque autonome avec stockage hybride, optimisé par un contrôleur FOPI-PSO via l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO). Ce contrôleur a surpassé les méthodes classiques, réduisant de moitié les risques de sur-réaction indésirables et de stress sur les composants du système, améliorant le temps de montée, et éliminant pratiquement l'erreur en régime permanent. Certains défis demeurent malgré ces améliorations, comme la sensibilité de l'algorithme PSO aux conditions initiales et l'effet des perturbations environnementales réelles sur la performance du système. Des recherches ultérieures pourraient prendre en compte des validations expérimentales, l'intégration de techniques d'apprentissage automatique pour améliorer l'adaptabilité et l'optimisation multi-objectif pour prendre en considération la réduction des coûts d'exploitation.

La seconde stratégie, simulée avec le logiciel PVsyst appliqué pour l'alimentation d'un centre de tri des déchets en Algérie, a révélé une production annuelle de 56,3 MWh avec un ratio de performance de 85 % et une dégradation estimée à environ 20 % sur 30 ans, avec une inclinaison optimale des panneaux à 33°.

Le potentiel immense des systèmes photovoltaïques pour changer le paysage énergétique est mis en lumière par ces résultats, surtout dans le contexte algérien. L'incorporation de ces systèmes contribue non seulement à diminuer la dépendance aux énergies fossiles, mais également à réduire considérablement les émissions de CO₂, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

Les originalités de la recherche menée dans ce travail peuvent être listées comme suit :

- Intégration d'un système hybride de stockage : Ce travail a mis en œuvre une combinaison de batteries et de supercondensateurs pour le stockage d'énergie, permettant une gestion plus dynamique et efficace des fluctuations de charge et des variations d'ensoleillement.
- Utilisation d'un contrôleur FOPI-PSO optimisé : Le régulateur Fractional Order Proportional Integral (FOPI) associé à l'algorithme PSO a démontré des performances supérieures aux méthodes conventionnelles, notamment en termes de réduction des dépassements de crête, de réactivité et de stabilité du système.
- Optimisation via l'algorithme d'essaim de particules (PSO) : L'ajustement simultané de plusieurs paramètres grâce au PSO a permis d'atteindre des performances optimales pour le contrôleur FOPI, réduisant ainsi les risques de sur-réaction et améliorant le temps de réponse du système.

- Approche avancée pour la simulation des variations environnementales : La robustesse du contrôleur FOPI-PSO a été évaluée dans des scénarios simulant des conditions environnementales variées, ce qui a permis de mieux comprendre les limites et les capacités adaptatives de la solution proposée.
- Évaluation et simulation de systèmes connectés au réseau pour des applications spécifiques : Le choix d'étudier une solution sans stockage énergétique, connectée au réseau et adaptée à un centre de tri des déchets, permet d'exploiter les avantages de la connexion directe au réseau et d'analyser les impacts à long terme en termes de performance et de durabilité.
- Adaptation de la configuration pour maximiser le rendement solaire : La détermination d'un angle d'inclinaison optimal de 33° et la conception d'une installation de panneaux de 110 unités de 300Wc ont permis d'atteindre une production annuelle de 56,3 MWh, avec un ratio de performance élevé de 85 %.
- Effet positif sur l'environnement quantifié : La diminution des rejets de CO₂ au cours du temps d'utilisation de l'installation (estimation d'environ 858,7 tonnes de CO₂ évitées) met en lumière le potentiel écologique des solutions suggérées en Algérie.
- Analyse de la dégradation sur 30 ans : En anticipant une dégradation d'environ 20 % de l'efficacité des panneaux sur trois décennies, cette recherche apporte des perspectives à long terme sur la durabilité des installations solaires dans des environnements spécifiques.

Ces aspects soulignent les contributions innovantes de cette thèse, avec des implications pratiques et écologiques pour le déploiement des systèmes photovoltaïques dans des environnements variés, en vue de maximiser l'impact positif de l'énergie solaire tout en minimisant les contraintes liées au stockage.

Dans le cadre de cette recherche, plusieurs limitations ont été identifiées, qui méritent une attention particulière pour améliorer les systèmes photovoltaïques autonomes intégrant des solutions de stockage hybride. Ces limitations peuvent avoir un impact significatif sur les performances et l'efficacité des algorithmes de gestion de l'énergie proposés.

Tout d'abord, la dépendance aux conditions initiales constitue un défi majeur. Bien que l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) ait prouvé son efficacité dans l'optimisation des paramètres du contrôleur, il reste sensible à la sélection initiale de ces paramètres. Une configuration inadéquate peut altérer les performances du système, soulignant ainsi la nécessité de réaliser des essais supplémentaires afin d'explorer divers scénarios et de garantir la robustesse de l'approche dans des conditions variées.

De plus, l'impact des variations environnementales réelles sur la performance du système ne peut être sous-estimé. Les simulations effectuées dans le cadre de cette étude, bien qu'utiles, ne reflètent pas toujours la complexité des environnements réels. Des facteurs tels que des changements climatiques soudains, l'ombrage partiel, ou encore des variations significatives de température peuvent influencer le comportement du système photovoltaïque de manière imprévisible. Ainsi, la prise en compte de ces variations en temps réel nécessiterait des ajustements dynamiques et une robustesse accrue des algorithmes de gestion pour assurer une performance stable et fiable.

Pour répondre à ces limitations, plusieurs pistes de recherche futures peuvent être envisagées. La première consiste à réaliser des validations expérimentales sur des systèmes réels, permettant ainsi de confirmer l'efficacité des approches développées dans des conditions concrètes. Ensuite, l'intégration de techniques d'apprentissage automatique pourrait améliorer la capacité d'adaptation des contrôleurs aux variations du système et de l'environnement. Enfin, une optimisation multi-objective serait bénéfique pour prendre en compte simultanément plusieurs critères, notamment la réduction des coûts d'exploitation, contribuant ainsi à rendre les systèmes photovoltaïques encore plus performants et économiquement viables.

La stratégie 2, qui vise à analyser les performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau pour alimenter des centres de tri des déchets en Algérie, présente plusieurs limitations importantes qui méritent d'être prises en compte.

Tout d'abord, la dépendance aux conditions climatiques locales est un facteur déterminant. Les performances du système photovoltaïque peuvent varier en fonction de l'ensoleillement, de la température et de l'humidité, ce qui peut affecter la production d'énergie et la rentabilité globale du système. De plus, bien que la dégradation des panneaux solaires soit estimée à environ 20 % sur 30 ans, des éléments externes tels que les variations de température extrêmes, l'ombrage ou l'accumulation de poussière peuvent entraîner une dégradation plus rapide et réduire l'efficacité.

Ensuite, l'intermittence de l'approvisionnement énergétique est une préoccupation. La connexion au réseau électrique implique que le système peut faire face à des problèmes d'intermittence, notamment en cas de défaillance du réseau ou de fluctuations rapides de la demande. De plus, les coûts d'intégration au réseau peuvent engendrer des dépenses additionnelles, influençant la viabilité économique du projet sur le long terme.

Pour pallier ces limitations, plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées. Il serait pertinent de mener une analyse de la performance sur le long terme, en suivant les installations photovoltaïques sur plusieurs années pour évaluer leur fonctionnement réel dans différentes conditions climatiques. De plus, des études de cas comparatives entre des systèmes similaires dans divers contextes géographiques pourraient fournir des informations précieuses sur l'impact des conditions locales sur l'efficacité des systèmes.

Par ailleurs, l'optimisation des opérations de maintenance est essentielle. Développer des protocoles d'entretien adaptés aux spécificités climatiques locales peut minimiser la dégradation des panneaux solaires et garantir un fonctionnement optimal sur le long terme. L'exploration de solutions de stockage complémentaire, telles que des batteries, pourrait également atténuer les problèmes d'intermittence, assurant un approvisionnement énergétique stable pour le centre de tri des déchets, même en cas de fluctuations du réseau.

Enfin, une évaluation économique approfondie est nécessaire. Réaliser des analyses coûts-bénéfices détaillées pour examiner l'impact des coûts d'intégration et de maintenance sur la rentabilité du système permettrait de mieux orienter les décisions futures. Cela inclut également l'étude des subventions et des incitations gouvernementales pour l'énergie renouvelable, contribuant ainsi à renforcer la viabilité des projets photovoltaïques en Algérie.

Les approches mises en place dans cette thèse démontrent qu'il est envisageable de dépasser les contraintes habituelles du stockage d'énergie, proposant des solutions solides et adaptées aux conditions particulières de l'Algérie. L'utilisation concrète de ces méthodes, que ce soit pour des systèmes autonomes dotés d'un stockage hybride ou des solutions connectées au réseau, met en évidence une meilleure capacité à exploiter les ressources solaires tout en assurant une performance élevée et persistante. En rendant l'adoption de ces technologies renouvelables plus facile, ces solutions jouent un rôle essentiel dans la diversification du mix énergétique global, tout en soutenant une transition énergétique plus écologique et plus durable.

REFERENCES

- [1] PEMNDJE, Joseph. 'Hybridation des sources d'énergie pour la réduction des émissions des gaz à effet de serre'. 2017. Thèse de doctorat. Université du Québec à Rimouski.
- [2] Kabir, Ehsanul, et al. "Solar energy: Potential and future prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018): 894-900.
- [3] Stambouli, A. Boudghene, et al. "A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues." *Renewable and sustainable energy reviews* 16.7 (2012): 4445-4460.
- [4] Fares, Tarek, Abdelghani Djeddi, and Naouel Nouioua. "Solar energy in Algeria between exploitation policies and export potential." *2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA)*. IEEE, 2019.
- [5] Grand, Dominique, et al. "La transition énergétique sous contrainte de gestion de l'intermittence des énergies renouvelables." *La Revue de l'Énergie* 636 (2018).
- [6] Desportes, Louis. *Apprentissage, prédiction et optimisation des apports énergétiques pour un bâtiment à faible impact environnemental*. Diss. CY Cergy Paris Université, 2022.
- [7] Han, Xuejiao, Jared Garrison, and Gabriela Hug. "Techno-economic analysis of PV-battery systems in Switzerland." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158 (2022): 112028.
- [8] Herath, Akila, et al. "Comparison of Optimization-and Rule-Based EMS for Domestic PV-Battery Installation with Time-Varying Local SoC Limits." *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2019.1 (2019): 8162475.
- [9] Yang, Ye, et al. "Integrated size and energy management design of battery storage to enhance grid integration of large-scale PV power plants." *IEEE Transactions on industrial electronics* 65.1 (2017): 394-402.
- [10] Lepasant, Gilles. "La transition énergétique face au défi des métaux critiques." *Études de l'Ifri* (2018): 1-58.
- [11] Nge, Chee Lim, et al. "A real-time energy management system for smart grid integrated photovoltaic generation with battery storage." *Renewable energy* 130 (2019): 774-785.
- [12] Argyrou, Maria C., et al. "Modeling a residential grid-connected PV system with battery-supercapacitor storage: Control design and stability analysis." *Energy Reports* 7 (2021): 4988-5002.
- [13] Zheng, Huiying, et al. "Coordinated control for grid integration of PV array, battery storage, and supercapacitor." *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. IEEE, 2013.
- [14] Raut, Kiran, et al. "Modeling and simulation of photovoltaic powered battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles." *Journal of Energy Storage* 82 (2024): 110324.
- [15] Das, Madhumita. "Photovoltaic-Battery-Supercapacitor Water Pumping System and Its Reliability Under Fluctuating Environmental Conditions." *ES Energy & Environment* 24 (2024): 1128.
- [16] Murlon, Sophie. "Réduction des consommations et décarbonation: les deux piliers de la stratégie française pour l'énergie et le climat." *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*. No. 1. Cairn/Softwin, 2024.
- [17] Diemer, Arnaud, Chafia Bessalem, and Delice Musafili Isimbi. "Les scénarios de transitions énergétiques de la France à l'horizon 2050, quelques éléments de compréhension." *Current Opinion* 4.5 (2024): 827-877.
- [18] Solar resource maps & GIS data for 200+ countries | Solargis. <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=world>

- [19] Ministère de l'énergie. <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [20] Ministère de l'énergie. <https://www.energy.gov.dz/?article=programme-de-developpement-des-energies-renouvelables>
- [21] Sabrina. (2023, May 3). Clôture du Programme d'appui au secteur des Energies Renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie. <https://www.me.gov.dz/fr/cloture-du-programme-dappui-au-secteur-des-energies-renouvelables-et-de-lefficacite-energetique-en-algerie/>
- [22] Ministère de l'énergie. <https://www.energy.gov.dz/?article=programme-de-developpement-des-energies-renouvelables>
- [23] Solar resource maps & GIS data for 200+ countries Solargis.. <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=algeria>
- [24] BOULKEDRA, Naziha, and Nabila LAKHAL. "Les Photovoltaïques: une Idée, une Réalisation et un Impact Economique en Algérie." *Al Bashaer Economic Journal* 7.2 (2021).
- [25] Dubois, Sébastien. *Influence des interactions impureté-défaut et impureté-impureté sur le rendement de conversion des cellules photovoltaïques au silicium cristallin*. Diss. Aix-Marseille 3, 2007.
- [26] Vidyanandan, K. V. "An overview of factors affecting the performance of solar PV systems." *Energy Scan* 27.28 (2017): 216.
- [27] Sherwani, A. F., and J. A. Usmani. "Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.1 (2010): 540-544.
- [28] Yilmaz, Saban, et al. "The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation—A case study in Kahramanmaras, Turkey." *Renewable and sustainable energy reviews* 52 (2015): 1015-1024.
- [29] Wang, Yonghua, et al. "Research progress in doped absorber layer of CdTe solar cells." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2023): 113427.
- [30] Barbato, Marco, et al. "CdTe solar cells: technology, operation and reliability." *Journal of Physics D: Applied Physics* 54.33 (2021): 333002.
- [31] Zghaibeh, Manaf, et al. "CdTe solar cells fabrication and examination techniques: a focused review." *International Journal of Green Energy* 20.5 (2023): 555-570.
- [32] Mufti, Nandang, et al. "Review of CIGS-based solar cells manufacturing by structural engineering." *Solar energy* 207 (2020): 1146-1157.
- [33] Lin, Leqi, and N. M. Ravindra. "Temperature dependence of CIGS and perovskite solar cell performance: an overview." *SN Applied Sciences* 2.8 (2020): 1361.
- [34] Ramanujam, Jeyakumar, et al. "Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: A review." *Progress in Materials Science* 110 (2020): 100619.
- [35] Efaz, Erteza Tawsif, et al. "A review of primary technologies of thin-film solar cells." *Engineering Research Express* 3.3 (2021): 032001.
- [36] Salhi, Billel. "The photovoltaic cell based on CIGS: principles and technologies." *Materials* 15.5 (2022): 1908.
- [37] Lin, Leqi, and Nuggehalli M. Ravindra. "CIGS and perovskite solar cells—an overview." *Emerging Materials Research* 9.3 (2020): 812-824.
- [38] Shao, Jiang-Yang, et al. "Recent progress in perovskite solar cells: material science." *Science China Chemistry* 66.1 (2023): 10-64.
- [39] Mohammad, Ashif, and Farhana Mahjabeen. "Promises and challenges of perovskite solar cells: a comprehensive review." *BULLET: Jurnal Multidisiplin Ilmu* 2.5 (2023): 1147-1157.

- [40] Zhao, Xiaoming, Tianran Liu, and Yueh-Lin Loo. "Advancing 2D perovskites for efficient and stable solar cells: challenges and opportunities." *Advanced Materials* 34.3 (2022): 2105849.
- [41] Rasal, Akash S., et al. "Stability of quantum dot-sensitized solar cells: A review and prospects." *Nano Energy* 94 (2022): 106854.
- [42] Chi, Weiguang, and Sanjay K. Banerjee. "Application of perovskite quantum dots as an absorber in perovskite solar cells." *Angewandte Chemie International Edition* 61.9 (2022): e202112412.
- [43] Al Mahmud Al Mamun, Enamul Kabir, and Hazra SS MD. "A short review on the renewable energy resources and development of the solar house." *Material Sci & Eng* 6.1 (2022): 20-23.
- [44] Alhousni, Fadhil Khadoum, et al. "A review of PV solar energy system operations and applications in Dhofar Oman." *AIMS Energy* 10.4 (2022): 858-884.
- [45] Lazdins, Roberts, Anna Mutule, and Diana Zalostiba. "PV energy communities—Challenges and barriers from a consumer perspective: A literature review." *Energies* 14.16 (2021): 4873.
- [46] Zidane, Tekai Eddine Khalil, et al. "Grid-connected Solar PV power plants optimization: A review." *IEEE Access* (2023).
- [47] Ong, Nur Aliah Fatin Mohd Nizam, et al. "Development of fire safety best practices for rooftops grid-connected photovoltaic (PV) systems installation using systematic review methodology." *Sustainable Cities and Society* 78 (2022): 103637.
- [48] He, Yi, et al. "A state-of-the-art review and bibliometric analysis on the sizing optimization of off-grid hybrid renewable energy systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 183 (2023): 113476.
- [49] Dorel, Stoica, et al. "Exploring Optimal Charging Strategies for Off-Grid Solar Photovoltaic Systems: A Comparative Study on Battery Storage Techniques." *Batteries* 9.9 (2023): 470.
- [50] Peng, Jinqing, and Lin Lu. "Investigation on the development potential of rooftop PV system in Hong Kong and its environmental benefits." *Renewable and sustainable energy reviews* 27 (2013): 149-162.
- [51] Fakhraian, Elham, et al. "The urban rooftop photovoltaic potential determination." *Sustainability* 13.13 (2021): 7447.
- [52] Sánchez-Lozano, Juan M., et al. "Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain." *Renewable and sustainable energy reviews* 24 (2013): 544-556.
- [53] Haddoum, Saliha, Hocine Bennour, and Toudert Ahmed Zaïd. "Algerian energy policy: Perspectives, barriers, and missed opportunities." *Global Challenges* 2.8 (2018): 1700134.
- [54] Pvresources. (s. d.). Large-Scale photovoltaic power Plants - Top 50. Denis Lenardic 2001-2014, Pvresources. <https://www.pvresources.com/en/top50pv.php>
- [55] Yang, Liwei, et al. "Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas." *Solar Energy* 144 (2017): 244-253.
- [56] Varma, Rajiv K., Shah Arifur Rahman, and Tim Vanderheide. "New control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM) for increasing grid power transmission limits during night and day." *IEEE transactions on power delivery* 30.2 (2014): 755-763.
- [57] Pringle, Adam M., R. M. Handler, and Joshua M. Pearce. "Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80 (2017): 572-584.

- [58] Amer, Ayman, et al. "Floating photovoltaics: assessing the potential, advantages, and challenges of harnessing solar energy on water bodies." *Journal of Ecological Engineering* 24.10 (2023): 324-339.
- [59] Tu, Yongguang, et al. "Perovskite solar cells for space applications: progress and challenges." *Advanced Materials* 33.21 (2021): 2006545.
- [60] Verduci, Rosaria, et al. "Solar energy in space applications: review and technology perspectives." *Advanced Energy Materials* 12.29 (2022): 2200125.
- [61] Ho-Baillie, Anita WY, et al. "Deployment opportunities for space photovoltaics and the prospects for perovskite solar cells." *Advanced Materials Technologies* 7.3 (2022): 2101059.
- [62] Kuhn, Tilmann E., et al. "Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV)." *Energy and Buildings* 231 (2021): 110381.
- [63] Esimike, H., O. Igbologe, and C. Chiejine. "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF EFFICIENT SOLAR MOBILE PHONE/BATTERY CHARGER." *Advance Journal of Science, Engineering and Technology* 9.4 (2024): 38-48.
- [64] Kikuchi, Shinichi, et al. "L'effet photovoltaïque des halogénures d'argent." *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 33.1 (1960): 104-108.
- [65] Janolin, Pierre-Eymeric. *De l'effet photovoltaïque aux cellules photoélectriques*. Editions TI, 2013.
- [66] Rappaport, Paul. "The photovoltaic effect and its utilization." *Solar Energy* 3.4 (1959): 8-18.
- [67] Keevers, M. J., and M. A. Green. "Efficiency improvements of silicon solar cells by the impurity photovoltaic effect." *Journal of Applied Physics* 75.8 (1994): 4022-4031.
- [68] Li, Yan, et al. "Conception and policy implications of photovoltaic modules end-of-life management in China." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 10.1 (2021): e387.
- [69] Fouad, M. M., Lamia A. Shihata, and ElSayed I. Morgan. "An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80 (2017): 1499-1511.
- [70] Jathar, Laxmikant D., et al. "Comprehensive review of environmental factors influencing the performance of photovoltaic panels: Concern over emissions at various phases throughout the lifecycle." *Environmental Pollution* 326 (2023): 121474.
- [71] Ali Khan, Muhammad Yasir, et al. "A comprehensive review on grid connected photovoltaic inverters, their modulation techniques, and control strategies." *Energies* 13.16 (2020): 4185.
- [72] Nazer, Afshin, et al. "Optimal photovoltaic multi-string inverter topology selection based on reliability and cost analysis." *IEEE transactions on sustainable energy* 12.2 (2020): 1186-1195.
- [73] Arsalis, Alexandros, Panos Papanastasiou, and George E. Georghiou. "A comparative review of lithium-ion battery and regenerative hydrogen fuel cell technologies for integration with photovoltaic applications." *Renewable Energy* 191 (2022): 943-960.
- [74] Loukil, Jihen, Ferdaous Masmoudi, and Nabil Derbel. "A real-time estimator for model parameters and state of charge of lead acid batteries in photovoltaic applications." *Journal of Energy Storage* 34 (2021): 102184.
- [75] Muslimin, Selamat, et al. "Comparison of batteries used in electrical vehicles." *5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)*. Atlantis Press, 2022.
- [76] Raut, Kiran, et al. "Modeling and simulation of photovoltaic powered battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles." *Journal of Energy Storage* 82 (2024): 110324.

- [77] Raj, Akhil, Sabha Raj Arya, and Jyoti Gupta. "Solar PV array-based DC–DC converter with MPPT for low power applications." *Renewable Energy Focus* 34 (2020): 109-119.
- [78] Abdel-Rahim, Omar, and Haoyu Wang. "A new high gain DC-DC converter with model-predictive-control based MPPT technique for photovoltaic systems." *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications* 5.2 (2020): 191-200.
- [79] Hasan, Khaled, et al. "Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review." *Energy Science & Engineering* 10.2 (2022): 656-675.
- [80] Al-Bashir, Adnan, et al. "Analysis of effects of solar irradiance, cell temperature and wind speed on photovoltaic systems performance." *International journal of energy economics and policy* 10.1 (2020): 353-359.
- [81] Božiková, Monika, et al. "The effect of azimuth and tilt angle changes on the energy balance of photovoltaic system installed in the Southern Slovakia region." *Applied Sciences* 11.19 (2021): 8998.
- [82] Mustafa, Ramadan J., et al. "Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems." *Sustainability* 12.2 (2020): 608.
- [83] Ramful, Raviduth, and Nashil Sowaruth. "Low-cost solar tracker to maximize the capture of solar energy in tropical countries." *Energy Reports* 8 (2022): 295-302.
- [84] Agyekum, Ephraim Bonah, et al. "Effect of dual surface cooling of solar photovoltaic panel on the efficiency of the module: experimental investigation." *Heliyon* 7.9 (2021).
- [85] Machín, Abniel, and Francisco Márquez. "Advancements in photovoltaic cell materials: Silicon, Organic, and Perovskite Solar cells." *Materials* 17.5 (2024): 1165.
- [86] Gholami, Aslan, et al. "Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 49 (2022): 101711.
- [87] Patel, Jay, and Gaurag Sharma. "Modeling and simulation of solar photovoltaic module using matlab/simulink." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2.3 (2013): 225-228.
- [88] Ghani, Faisal, et al. "The numerical calculation of single-diode solar-cell modelling parameters." *Renewable Energy* 72 (2014): 105-112.
- [89] Alabdali, Qasim A., Abdulwahab M. Bajawi, and Ahmed M. Nahhas. "Review of recent advances of shading effect on PV solar cells generation." *Sustainable Energy* 8.1 (2020): 1-5.
- [90] Sukarso, Adimas Pradityo, and Kyung Nam Kim. "Cooling effect on the floating solar PV: Performance and economic analysis on the case of west Java province in Indonesia." *Energies* 13.9 (2020): 2126.
- [91] Vidyanandan, K. V. "An overview of factors affecting the performance of solar PV systems." *Energy Scan* 27.28 (2017): 216.
- [92] Hossain, M. Z., and N. A. Rahim. "Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018): 205-230.
- [93] Rahimi, Tohid, et al. "Design and implementation of a high step-up dc-dc converter based on the conventional boost and buck-boost converters with high value of the efficiency suitable for renewable application." *Sustainability* 13.19 (2021): 10699.
- [94] Junaid, KA Mohamed, et al. "PV-based DC-DC buck-boost converter for LED driver." *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 5 (2023): 100271.
- [95] Rana, Md Masud, et al. "A review on hybrid photovoltaic–Battery energy storage system: Current status, challenges, and future directions." *Journal of Energy Storage* 51 (2022): 104597.

- [96] Roy, Kingshuk, Abhik Banerjee, and Satishchandra Ogale. "Search for new anode materials for high performance Li-ion batteries." *ACS Applied Materials & Interfaces* 14.18 (2022): 20326-20348.
- [97] Berrueta, Alberto, et al. "Identification of critical parameters for the design of energy management algorithms for li-ion batteries operating in PV power plants." *IEEE Transactions on Industry Applications* 56.5 (2020): 4670-4678.
- [98] Beyers, Inga, Astrid Bensmann, and Richard Hanke-Rauschenbach. "Ragone plots revisited: A review of methodology and application across energy storage technologies." *Journal of Energy Storage* 73 (2023): 109097.
- [99] Ehret, Ch, et al. "State-of-charge determination for lead-acid batteries in PV-applications." *Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Routledge, 2020.
- [100] Arsalis, Alexandros, Panos Papanastasiou, and George E. Georghiou. "A comparative review of lithium-ion battery and regenerative hydrogen fuel cell technologies for integration with photovoltaic applications." *Renewable Energy* 191 (2022): 943-960.
- [101] Bhatta, Sunil Kumar, et al. "Storage Essentiality in Solar PV Incorporated Grid Connected System Estimating its Lifespan." *2022 1st IEEE International Conference on Industrial Electronics: Developments & Applications (ICIDeA)*. IEEE, 2022.
- [102] Azhar, Izzuddin Fathin, Lesnanto Multa Putranto, and Sasongko Pramono Hadi. "Design of battery energy storage system control scheme for frequency regulation for PV integrated power system." *2020 FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*. IEEE, 2020.
- [103] Šimić, Zvonimir, et al. "Battery energy storage technologies overview." *International journal of electrical and computer engineering systems* 12.1 (2021): 53-65.
- [104] Birou, Camille, et al. "Techno-economic analysis of second-life lithium-ion batteries integration in microgrids." *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*. IEEE, 2020.
- [105] Adaikkappan, Maheshwari, and Nageswari Sathiyamoorthy. "Modeling, state of charge estimation, and charging of lithium-ion battery in electric vehicle: a review." *International Journal of Energy Research* 46.3 (2022): 2141-2165.
- [106] VENET, Pascal. "Stéphane BUTTERBACH Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd." *Université Bordeaux 1* (2012).
- [107] Zwicker, M. F. R., et al. "Automotive battery pack manufacturing—a review of battery to tab joining." *Journal of Advanced Joining Processes* 1 (2020): 100017.
- [108] Xiong, Rui, et al. "Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131 (2020): 110048.
- [109] Meng, Fanbo, et al. "Strategies for improving electrochemical reaction kinetics of cathode materials for subzero-temperature Li-ion batteries: A review." *Energy Storage Materials* 44 (2022): 390-407.
- [110] Miranda, João PD, Luis AM Barros, and José Gabriel Pinto. "A review on power electronic converters for modular BMS with active balancing." *Energies* 16.7 (2023): 3255.
- [111] Datta, Ujjwal, Akhtar Kalam, and Juan Shi. "A review of key functionalities of battery energy storage system in renewable energy integrated power systems." *Energy Storage* 3.5 (2021): e224.
- [112] Hannan, Mohammad Abdul, et al. "Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues." *Journal of Energy Storage* 42 (2021): 103023.

- [113] Christensen, Paul A., et al. "Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148 (2021): 111240.
- [114] Soudagar, Manzoore Elahi M., et al. "An overview of the existing and future state of the art advancement of hybrid energy systems based on PV-solar and wind." *International Journal of Low-Carbon Technologies* 19 (2024): 207-216.
- [115] Alharbi, Sultan J., and Abdulaziz S. Alaboodi. "A review on techno-economic study for supporting building with PV-Grid-connected systems under Saudi regulations." *Energies* 16.3 (2023): 1531.
- [116] Heubner, Christian, et al. "Recent insights into rate performance limitations of Li-ion batteries." *Batteries & Supercaps* 4.2 (2021): 268-285.
- [117] Reveles-Miranda, María, Victor Ramirez-Rivera, and Daniella Pacheco-Catalán. "Hybrid energy storage: Features, applications, and ancillary benefits." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 192 (2024): 114196.
- [118] Kafando, Jean Guétinsom, Daniel Yamegueu, and Etienne Tchhoffo Houdji. "Review on sizing and management of stand-alone PV/WIND systems with storage." *Heliyon* 10.18 (2024).
- [119] Wardana, Ariq Kusuma, and Vita Lystianingrum Budiharto Putri. "Optimization control strategy of battery-supercapacitor to mitigate PV power fluctuation using dynamic programming algorithm." *2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. IEEE, (2022).
- [120] Dutta, Arindam, et al. "A comprehensive review on batteries and supercapacitors: Development and challenges since their inception." *Energy Storage* 5.1 (2023): e339.
- [121] Zhao, Jingyuan, and Andrew F. Burke. "Review on supercapacitors: Technologies and performance evaluation." *Journal of energy chemistry* 59 (2021): 276-291.
- [122] Ates, Murat, and Achref Chebil. "Supercapacitor and battery performances of multi-component nanocomposites: Real circuit and equivalent circuit model analysis." *Journal of Energy Storage* 53 (2022): 105093.
- [123] Berrueta, Alberto, et al. "Supercapacitors: electrical characteristics, modeling, applications, and future trends." *Ieee Access* 7 (2019): 50869-50896.
- [124] Koochi-Fayegh, Seama, and Marc A. Rosen. "A review of energy storage types, applications and recent developments." *Journal of Energy Storage* 27 (2020): 101047.
- [125] Luo, Xing, et al. "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation." *Applied energy* 137 (2015): 511-536.
- [126] Jing, Wenlong, et al. "A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification." *Applied energy* 224 (2018): 340-356.
- [127] Jiang, Wei, and Babak Fahimi. "Active current sharing and source management in fuel cell–battery hybrid power system." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57.2 (2009): 752-761.
- [128] Wang, Yanzhi, et al. "Single-source, single-destination charge migration in hybrid electrical energy storage systems." *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 22.12 (2014): 2752-2765.
- [129] A. Eddahech, "Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride," Thèse de doctorat 2013.
- [130] Allègre, Anne-Laure, Alain Bouscayrol, and Rochdi Trigui. "Flexible real-time control of a hybrid energy storage system for electric vehicles." *IET Electrical Systems in Transportation* 3.3 (2013): 79-85.

- [131] T. Mesbahi, "Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique," Thèse de doctorat, 2016.
- [132] A. Florescu, S. Bacha, I. Munteanu, A. I. Bratcu, and A. Rumeau, "Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 280, no. Supplement C, (2015). 410–421,
- [133] Lambora, Annu, Kunal Gupta, and Kriti Chopra. "Genetic algorithm-A literature review." *2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon)*. IEEE, 2019.
- [134] Souhe, Felix Ghislain Yem, et al. "Optimized forecasting of photovoltaic power generation using hybrid deep learning model based on GRU and SVM." *Electrical Engineering* (2024): 1-20.
- [135] Periasamy, Madhumathi, et al. "Various PSO methods investigation in renewable and nonrenewable sources." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 13.4 (2022): 2498.
- [136] Belaalia, I., et al. "MPPT command enhancement based on an ameliorated grey wolf optimization algorithm for a standalone PV system." *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration* 10.109 (2023): 1696.
- [137] Alam, Md Shafiul, et al. "Solar and wind energy integrated system frequency control: A critical review on recent developments." *Energies* 16.2 (2023): 812.
- [138] Vanchinathan, K., et al. "Numerical simulation and experimental verification of fractional-order PI λ controller for solar PV fed sensorless brushless DC motor using whale optimization algorithm." *Electric Power Components and Systems* 50.1-2 (2022): 64-80.
- [139] Saadi, Saadi I., and Ibrahim K. Mohammed. "Power Control Approach for PV Panel System Based on PSO and INC Optimization Algorithms." *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 55.6 (2022).
- [140] Cabrane, Zineb, Mohammed Ouassaid, and Mohamed Maaroufi. "Integration of supercapacitor in photovoltaic energy storage: Modelling and control." *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. IEEE, (2014).
- [141] Guentri, Hocine, et al. "Power management and control of a photovoltaic system with hybrid battery-supercapacitor energy storage based on heuristics methods." *Journal of Energy Storage* 39 (2021): 102578.
- [142] Bouderrès, Nacer, et al. "Optimization of Fractional Order PI Controller by PSO Algorithm Applied to a GridConnected Photovoltaic System." *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 65.4 (2022).
- [143] Zdiri, Mohamed Ali, et al. "Design and analysis of sliding-mode artificial neural network control strategy for hybrid PV-battery-supercapacitor system." *Energies* 15.11 (2022): 4099.
- [144] Karami, Nabil, Nazih Moubayed, and Rachid Outbib. "General review and classification of different MPPT Techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (2017): 1-18.
- [145] Pal, Bachaknabi, P. K. Sahu, and Srikanta Mohapatra. "A review on feedback current control techniques of grid-connected PV inverter system with LCL filters." *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)* (2018): 1-6.
- [146] Perarasi, T., R. Gayathri, and P. Hamsagayathri. "Filter Design for High Frequency Applications." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 764. No. 1. IOP Publishing, (2020).

- [147] Singh, Kalyan, Sumit Saroha, and Avnesh Verma. "Comparative Analysis of Optimization Techniques for FOPID Design in Grid Integration." *2024 3rd International conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*. IEEE, (2024).
- [148] Podlubny, Igor. "Fractional-order systems and PI/spl lambda/D/spl mu/-controllers." *IEEE Transactions on automatic control* 44.1 (1999): 208-214.
- [149] Bingul, Zafer, and Oguzhan Karahan. "Comparison of PID and FOPID controllers tuned by PSO and ABC algorithms for unstable and integrating systems with time delay." *Optimal Control Applications and Methods* 39.4 (2018): 1431-1450.
- [150] Alireza, Valipour, et al. "An enhanced multi-objective optimization approach for risk allocation in public-private partnership projects: a case study of Malaysia." *Canadian Journal of Civil Engineering* 41.2 (2014): 164-177.
- [151] DOUADI, FADILA. *Méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur PID pour un système CSTR*. Diss. 2016.
- [152] Zermane Akram Issam, and Tarik Bordjiba. "Optimizing Energy Management of Hybrid Battery-Supercapacitor Energy Storage System by Using PSO-Based Fractional Order Controller for Photovoltaic Off-Grid Installation." *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 57.2 (2024).
- [153] Moya, Diego, et al. "Waste-To-Energy Technologies: an opportunity of energy recovery from Municipal Solid Waste, using Quito-Ecuador as case study." *Energy Procedia* 134 (2017): 327-336.
- [154] Razzaq, Asif, et al. "Dynamic and causality interrelationships from municipal solid waste recycling to economic growth, carbon emissions and energy efficiency using a novel bootstrapping autoregressive distributed lag." *Resources, Conservation and Recycling* 166 (2021): 105372.
- [155] Lee, Chew Tin, et al. "Low-carbon emission development in Asia: energy sector, waste management and environmental management system." *Clean Technologies and Environmental Policy* 20 (2018): 443-449.
- [156] Cai, Wei, et al. "Optimal sizing and location based on economic parameters for an off-grid application of a hybrid system with photovoltaic, battery and diesel technology." *Energy* 201 (2020): 117480.
- [157] Xu, Xiao, et al. "Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system." *Renewable Energy* 147 (2020): 1418-1431.
- [158] Shrivastava, Anurag, et al. "Solar energy capacity assessment and performance evaluation of a standalone PV system using PVSYS." *Materials Today: Proceedings* 80 (2023): 3385-3392.
- [159] Baqir, Mohammad, and Harpreet Kaur Channi. "Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software." *Materials Today: Proceedings* 48 (2022): 1332-1338.
- [160] Yunus Khan, T. M., et al. "Optimum location and influence of tilt angle on performance of solar PV panels." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 141 (2020): 511-532.
- [161] Howlader, Abdul Motin, et al. "Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters." *Applied Energy* 258 (2020): 114000.