الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابـــــــــة

Faculté : Technologie
Département : Electronique
Domaine : Automatique
Filière : Automatique et Systèmes
Spécialité : Automatique et Systèmes

THESE

En vue de l'obtention du Diplôme de doctorat en 3ème cycle

Intitulée :

OPTIMISATION ET GESTION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE MULTI-SOURCES

Présentée par : IZGHECHE Yousra

Encadrant : BAHI Tahar *Professeur* *université Badji Mokhtar -Annaba*

Jury de Soutenance :

DEBBACHE Naser Eddine	Professeur ***émérite***	Univ Badji Mokhtar- Annaba	Président
BAHI Tahar	Professeur	Univ Badji Mokhtar- Annaba	Encadrant
MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 - Guelma	Examinateur
GHARBI Sofiane	Professeur	Univ Badji Mokhtar - Annaba	Examinateur
ARBAOUI Faycal	Professeur	Univ Badji Mokhtar - Annaba	Examinateur
SOUFI Youcef	Professeur	Univ. Chikh Larbi Tebessi - Tebessa	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience pour mener à terme cette thèse dans des meilleures conditions.

Je remercie chaleureusement mon directeur de thèse Mr BAHI Tahar Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba pour son encadrement, ses conseils avisés et son soutien constant. Ses encouragements, sa rigueur et sa disponibilité m'ont permis de mener à bien ce travail scientifique de recherche.

Je tiens également à remercier chaleureusement l'ensemble des membres de mon jury de thèse pour leur temps, leurs remarques constructives et leurs précieux retours.

Je suis profondément reconnaissant envers ma famille pour leur soutien inconditionnel, leur compréhension et leur patience tout au long de ces années. Et, je remercie aussi vivement mon merveilleux mari, qui a été ma force et ma source d'inspiration tout au long de ce parcours. Sans son soutien inébranlable, sa patience et les sacrifices qu'il a consentis pour me donner tout le nécessaire, rien n'aurait été possible. Il a été présent à chaque étape, m'encourageant, me poussant à aller de l'avant, et leur encouragement m'ont été d'un grand secours.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours. Je leur en suis reconnaissante.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- Ma mère et ma grand-mère ;
- Ma famille que Dieu me la garde ;
- Ma précieuse petite fille Israa qui me remplit mon cœur de bonheur ;
- Mon mari qu'il m'a apportée, sa patience, son soutien dans les moments les plus difficiles et son encouragement permanent ;
- Ma mère et ma grand-mère ;
- Mon frère Houssem
- Ma belle-sœur Ines

Vous êtes ma force et ma plus belle aventure.

SOMMAIRE

RESUME i
LISTE DES FIGURES IV
LISTE DES TABLEAUX VI
INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1
GENERALITE SUR LES SYSTEMES MULTI-SOURCES DE PRODUCTION D'ENERGIE

1.1 Introduction 3
1.2 Production et développement durable des énergies renouvelables dans le monde 4
1.2.1 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie 6
1.2.1.1 Potentiel solaire 6
1.2.1.2 Potentiel éolien 7
1.2.1.3 Potentiel géothermique 8
1.2.1.4 Potentiel énergétique de la biomasse 8
1.2.1.5 Potentiel énergétique hydroélectrique 8
1.2.2 Stratégie du développement des énergies renouvelables 9
1.2.3 Programme de développement des énergies renouvelables 10
1.2.4 Aperçu sur les capacités d'énergies renouvelables installées en Algérie 10
1.3 Définition de l'énergie renouvelable 11
1.4 Sources d'énergies renouvelables 12
1.4.1 Avantages des énergies renouvelables 13
1.5 Définition d'un système multi-source 14
1.5.1 Avantages d'un système hybride 14
1.5.2 Inconvénients d'un système hybride 15
1.6 Classifications des systèmes d'énergies hybrides 15
1.6.1 Régime du fonctionnement 16
a) Système d'énergie hybride autonome 17
b) Système d'énergie hybride connecté au réseau 17
1.6.2 Configurations des systèmes multi-sources 17
1.6.2.1 Architecture de Bus à courant continu 18
1.6.2.2 Architecture de bus à courant alternative 18
1.6.2.3 Architecture mixte (DC et AC) 19
1.6.3 Structure du SMS 19
a) Systèmes multi-sources avec source conventionnelle 19
b) Systèmes multi-sources sans source conventionnelle 19
c) Systèmes multi-sources sans stockage 20
d) Système multi-sources avec stockage 20
e) Type de sources d'énergies renouvelable 20
1.7 Système de l'énergie solaire 21
1.7.1 Cellule photovoltaïque 21
1.7.2 Cellule photovoltaïque avec différents types 22

1.7.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 23
1.7.4 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque 23
1.8 Energie éolienne et chaine de conversion eolienne 24
1.8 .1 Configurations d'aérogénérateurs 25
a) Eoliennes à axe vertical 25
b) Eoliennes à axe horizontal 28
1.8.2 Constitution d'une éolienne 28
1.9 Stockage d'énergie électrique 29
1.9.1 Batteries de stockage 29
1.9.2 Charges 30
1.10 Différents modes de stockage de l'électricité 30
1.10.1 Stockage électrochimique 31
1.10.2 Stockage mécanique 31
1.10.3 Stockage thermique 31
1.11 Conclusion 32

CHAPITRE 2
MODELISATION DU SYSTEME MULTI-SOURCES

2.1 Introduction 33
2.2 L'Architecture du système multi-source 33
2.3 Modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque 34
2.3.1 Modélisation de la Cellule Photovoltaïque 34
2.3.2 Description du modèle électrique et mathématique d'un générateur photovoltaïque 35
a) Modèle à une diode 35
b) Modèle à deux diodes 36
2.3.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque 37
a) Tension de circuit ouvert 37
b) Facteur de forme 37
c) Rendement 38
d) Module photovoltaïque 38
e) Mise en série 38
f) Mise en parallèle 39
2.3.4 Influence de l'irradiation sur le générateur photovoltaïque 40
2.3.5 Influence de la température des cellules sur le générateur photovoltaïque (GPV) 40
2.4 Modélisation du système éolien 41
2.4.1 Puissance de la turbine éolienne 41
2.4.2 Coefficient de vitesse réduite 42
2.4.3 Coefficient de puissance 43
2.4.4 Modèle du multiplicateur 43

2.4.5 Equation dynamique de l'arbre 44
2.4.6 Simulation du système éolien 45
2.5 Modélisation du système de stockage 46
2.5.1 Modélisation de la batterie 46
2.5.2 Choix de la batterie 48
2.5.3 Estimation du SOC des batteries 48
2.6 Modélisation des convertisseurs statiques 49
2.6.1 Modélisation du convertisseur continu/continu 49
2.6.1.1 Modélisation du hacheur Boost 49
2.6.1.2 Modélisation Hacheur Buck 51
2.6.1.3 Modélisation du hacheur reversible (Buck-Boost) 53
2.6.2 Convertisseur DC- AC 54
2.6.2.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveau 54
2.6.2.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveau 56
2.6.3 Convertisseur AC-DC 57
2.7 Génératrice Synchrone à Aimant Permanant 59
2.8 Conclusion 61

CHAPITRE 3

OPTIMISATION ET COMMANDE D'UN SYSTEME MULTI-SOURCES

3.1 Introduction 62
3.2 La chaine photovoltaique connecté au réseau 62
3.2.1 Commande MPPT d'un système PV 63
3.2.1.1 Méthode d'observation et de perturbations 63
3.2.1.2 Méthode INCrimental Conductance 64
3.2.1.3 MPPT Double Sliding Mode Control 65
3.2.1.4 Resultats de Simulation 67
3.2.2 Effet de l'ombrage 68
3.2.2.1 Principe de la methode du CUCKOO SEARCH 69
3.2.2.2 Téchnique Algorithme Génétique 71
3.2.2.3 Principe de l'Algorithm du Grey Wolf Optimisation 73
3.2.2.4 Principe de la méthode Horse Herd Optimisation 75
3.2.2.5 Méthode Particle Swarm Optimisation 80
3.2.2.6 Résultats de Simulation 82
3.2.3 Technique de commande des puissances 87
3.2.3.1 Commande orientée tension 87
3.2.3.2 Control réseau avec la Technique de FCS-MPC 88
3.2.3.3 Resultats de Simulation 90
3.3 La chaine Eolienne connecté au réseau 94
3.3.1 Controle de la vitesse variable par FLC-T2I-PSO 95
3.3.2 Commande adaptative Backstepping côté machine 97
3.3.3 Commande prédective côté réseau 98
3.3.4 Résultats de simulation 100
3.4 Conclusion 103

CHAPITRE 4
GESTION D'UN SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE

4.1 Introduction 104
4.2 Gestion et stockage d'un système multi-sources d'énergie (SMS) 104
4.3 Contrôle de gestion du SMS basée sur la logique floue 105
4.4 Stratégie de gestion du SMS connectée au réseau 107
4.4.1 Mode de fonctionnement 107
4.4.2 Résultats de Simulation 109
4.5 Stratégies de gestion du SMS autonome 114
4.5.1 Mode de fonctionnement du SMS Autonome 115
4.5.2 Résultats de Simulation 116
4.6 Dimensionnement du système de gestion et stockage 119
4.7 Conclusion 120

Abstract

The development of renewable energy conversion facilities is an approach widely adopted by many countries. This initiative is considered essential to providing a comprehensive and sustainable response to environmental challenges and the inevitable decline in fossil fuel resources such as oil and coal. Faced with ever-increasing energy demand and environmental preservation requirements related to pollutant emissions, the use of renewable resources for electricity production is a promising solution to support the energy transition. Wind and solar energy are the main renewable sources used in this context. However, their intermittency poses a major challenge, as wind power is directly linked to wind speed, while solar energy varies according to hourly, daily and seasonal variations in solar radiation. This research work consists of developing and applying advanced control strategies to multi-source systems for the management and optimisation of energy flows, taking into account actual climatic conditions, in accordance with the objectives of maximising, optimisation and management of the power produced, with an evaluation of the performance of this hybrid configuration, particularly with regard to energy management between different renewable sources, such as photovoltaic panels, wind turbines and battery energy storage systems.

Résumé

Le développement des installations de conversion d'énergies renouvelables, est une démarche largement adoptée par de nombreux pays. Cette initiative est jugée essentielle pour répondre de manière globale et durable aux enjeux environnementaux, et au déclin inévitable des ressources énergétiques fossiles telles que le pétrole et le charbon. Face à une demande énergétique en constante augmentation et aux impératifs de préservation environnementale liés aux émissions de gaz polluants l'exploitation des ressources renouvelables pour la production d'électricité est une solution prometteuse pour accompagner la transition énergétique. Les énergies éolienne et solaire constituent les principales sources renouvelables utilisées dans ce cadre. Toutefois, leur intermittence représente un défi de taille, car la puissance éolienne est directement liée à la vitesse du vent, tandis que l'énergie solaire varie en fonction des variations horaires, quotidiennes et saisonnières de l'irradiation solaire. Ce travail de recherche consiste à développer et appliquer aux systèmes multi-sources des stratégies de commandes avancées pour la gestion et l'optimisation des flux d'énergie en tenant compte des conditions climatiques réelles, selon les objectifs de maximisation , l'optimisation et la gestion de la puissance produite avec l'évaluation des performances de cette configuration hybride, notamment en ce qui concerne la gestion de l'énergie entre les différentes sources renouvelables, telles que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes et les systèmes de stockage d'énergie par batterie.

ملخص

إن تطوير مرافق تحويل الطاقة المتجددة هو نهج معتمد على نطاق واسع من قبل العديد من البلدان. وتعتبر هذه المبادرة أساسية للاستجابة بشكل شامل ومستدام للتحديات البيئية، وللتراجع الحتمي في موارد الطاقة الأحفورية مثل النفط والفحم. في مواجهة الطلب المتزايد على الطاقة ومتطلبات الحفاظ على البيئة المرتبطة بانبعاثات الغازات الملوثة، يعد استغلال الموارد المتجددة لإنتاج الكهرباء حلاً واعداً لمرافقة التحول الطاقي.
تشكل طاقة الرياح والطاقة الشمسية المصادر المتجددة الرئيسية المستخدمة في هذا الإطار. ومع ذلك، فإن تقطّعها يمثل تحدياً كبيراً، لأن طاقة الرياح مرتبطة مباشرة بسرعة الرياح، في حين أن الطاقة الشمسية تختلف باختلاف التغيرات الساعية واليومية والموسمية في إشعاع الشمس.

تتمثل هذه الأبحاث في تطوير وتطبيق استراتيجيات تحكم متقدمة على الأنظمة متعددة المصادر من أجل إدارة وترشيد تدفقات الطاقة مع مراعاة الظروف المناخية الفعلية، وفقاً لأهداف تعظيم وتحسين إدارة الطاقة المنتجة مع تقييم أداء هذا التكوين الهجين، لا سيما فيما يتعلق بإدارة الطاقة بين مختلف المصادر المتجددة، مثل الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح وأنظمة تخزين الطاقة بالبطاريات.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES SYSTEMES MULTI-SOURCES DE PRODUCTION D'ENERGIE

Figure 1.1	Source : Global Electricity Review 2024, EMBER - Graphique :	5
Figure 1.2	Évolution de la production d'électricité mondiale en 2023	6
Figure 1.3	Sites potentiels d'approvisionnement en électricité solaire depuis l'Afrique du Nord (en kWh/m²/an) et exemple de l'exposition journalière globale reçue (en kWh/m²/jour) en Algérie	7
Figure 1.4	Potentiel éolien en Algérie	7
Figure 1.5	Géothermie en Algérie	8
Figure 1.6	Energie hydroélectrique en Algérie	9
Figure 1.7	Evaluation des énergies renouvelables en Algérie	10
Figure 1.8	Évolution des capacités cumulées d'énergies renouvelables (hors hydroélectricité) installées jusqu'à fin 2023	11
Figure 1.9	Différents types d'énergies renouvelables	12
Figure 1.10	Classification des systèmes d'énergie hybride	16
Figure 1.11	Schéma de système multi-sources à bus DC	18
Figure 1.12	Schéma de Système multi-sources à bus AC	18
Figure 1.13	Structure à bus mixte (DC& AC) d'un système hybride	19
Figure 1.14	Principe de fonctionnement d'une cellule PV	21
Figure 1.15	Composantes d'un GPV	22
Figure 1.16	Principe de la conversion d'énergie éolienne	24
Figure 1.17	Eoliennes à axe vertical	26
Figure 1.18	Composants d'une éolienne à axe horizontal	27
Figure 1.19	Composants d'une turbine éolienne	28

CHAPITRE 2

MODELISATION DU SYSTEME MULTI-SOURCES

Figure 2.1	Architecture du système hybride de production d'énergie	34
Figure 2. 2	Schéma équivalent à une seule diode d'une cellule photovoltaïque	35
Figure 2.3	Schéma équivalent à deux diodes	36
Figure 2. 4	Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série	39
Figure 2.5	Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle	39
Figure .2.6	Caractéristiques $I_{pv}=f(V)$ and $P_{pv}=f(V)$ sous différentes irradiations	40
Figure 2.7	Influence de la température	40
Figure 2.8	Chaine de conversion éolienne	41
Figure 2.9	Conversion de l'énergie aérodynamique en énergie mécanique	42
Fig. 2. 10	Partie mécanique de la turbine éolienne	44
Figure 2.11	Schéma-bloc du système turbine éolienne	44
Figure 2.12	Courbe C_p en fonction de λ pour differentes valeurs de β	45
Figure 2.14	Modèle RC de la batterie	47
Figure 2.15	Schéma électrique d'un hacheur boost	50
Figure 2.16	Schéma électrique d'un hacheur boost pour K fermé	50
Figure 2.17	Schéma électrique d'un hacheur boost pour K ouvert	51
Figure 2.18	Schéma électrique d'un hacheur buck	51
Figure 2.19	Chronogrammes des courant et tension d'un hacheur buck	52
Figure 2.20	Schéma électrique d'un hacheur buck fermé	52
Figure 2.21	Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert	53
Figure 2.22	Schéma de principe d'un hacheur buck-boost	54
Figure 2.23	Onduleur triphasé à deux niveaux	55
Figure 2.24	Structure du circuit de l'onduleur à trois niveaux	56
Figure 2.25	Schéma du redresseur pont triphasé à diodes	57

CHAPITRE 3

COMMANDE D'UN SYSTEME D'ENERGIE MULTI-SOURCES

Figure 3.1	Système photovoltaïque connecté au réseau	63
Figure. 3.2	Principe de la technique P&O	64

Figure.3.3	Organigramme de l'algorithme P&O	64
Figure 3.4	Organigramme de l'algorithme InC	65
Figure 3.5	Caractéristique sous différentes irradiations et à une température constante	67
Figure 3.6	Profil de changement climatique avec température fixe 25°C	67
Figure 3.7	Puissances extraites avec INC, P&O et DISMC, sous irradiation variable	67
Figure 3.8	Structure de la chaine photovoltaïque sous ombrage	69
Figure .3.9	Organigramme de l'algorithme cuckoo search	70
Figure 3.10	Organigramme du génétique algorithme	72
Figure 3.11	Hiérarchie sociale des loups gris	73
Figure.3.12	Organigramme de l'algorithme GWO	74
Figure 3.13	Organigramme de l'algorithme HOA	80
Figure 3.14	Organigramme de l'algorithme PSO	81
Figure 3.15	Les profils étudiés	83
Figure 3.16	Profil standard	84
Figure 3.17	1ier Profil d'ombrage	85
Figure 3.18	2ièm Profil d'ombrage	85
Figure 3.19	3iem Profil d'ombrage	86
Figure 3.20	Schéma de la technique VOC	88
Figure 3.21	Bloc diagramme de la commande MPC	89
Figure 3.22	Algorithme de la commande MPC	89
Figure 3.23	Profil sous irradiation variable	91
Figure 3.24	Profile d'irradiation	91
Figure 3.25	Puissance du GPV	92
Figure 3.26	Puissance active	92
Figure 3.27	Puissance réactive	92
Figure 3.28	Tension DC	93
Figure 3.29	Courant de la phase (a)	93
Figure 3.30	Analyse harmonique du courant de réseau de la phase A: a) THD de la VOC, b) le THD de la FCS- MPC	94
Figure 3.31	Configuration du système de conversion de l'énergie éolien	94
Figure 3.32	Structure du PI accordé FLC de type 2 à intervalles	95

Figure 3.33 Incertitudes Flous pour IT2FLC. 96
Figure 3.34 Algorithme du contrôleur IT2FLC-PSO 97
Figure 3.35 Schéma de principe du système coté réseau avec la commande MPC 99
Figure 3.36 Profile de la vitesse du vent 101
Figure 3.37 Vitesse de rotation 102
Figure 3.38 Puissance de la turbine sous vent variable 103

CHAPITRE 4

GESTION ET STOCKAGE D'UN SYSTEME MULTI-SOURCE EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE

Figure 4.1 Schéma principale de la gestion 105
Figure 4.2 Contrôle de la batterie 105
Figure 4.3 Fonctions d'appartenance du FLC. 106
Figure 4.4 Schéma du SMS connecté au réseau 107
Figure 4.5 Organigramme de gestion d'un SMS connecté au réseau 108
Figure 4.6 Profiles de la vitesse du vent et des niveaux d'irradiation solaire 109
Figure 4.7 Puissance de photovoltaïque et turbine 110
Figure 4.8 Puissances produites 110
Figure 4.9 Courant et tension de la batterie 111
Figure 4.10 État de charge de la batterie pour une charge constante 111
Figure 4. 11 Courant et tension de réseau 111
Figure 4.12 Puissance à différents endroits pour une charge variable 112
Figure 4.13 Courant et tension de la batterie 113
Figure 4.14 État de charge de la batterie pour une charge variable 113
Figure 4.15 Système de conversion multi-sources autonome 114
Figure 4.16 Organigramme de gestion d'un SMS autonome 115
Figure 4.17 Profils de l'irradiation et la vitesse du vent 116
Figure 4.18 Puissances de photovoltaïque et turbine 117
Figure 4.19 Puissances produites 117
Figure 4.20 Courant et tension de la batterie 118
Figure 4.21 Production d'électricité du système hybride 118

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES MULTI-SOURCES DE PRODUCTION D'ENERGIE

Tableau 1.1 Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie 10

CHAPITRE 2 : MODELISATIN DU SYSTEME MULTI-SOURCES

Tableau 2.1 États de commutation du convertisseur à 3 niveaux 57

CHAPITRE 3 : COMMANDE D'UN SYSTEME D'ENERGIE MULTI-SOURCES

Tableau 3.1 Comparaison des trois Techniques d'optimisation 68

Tableau 3.2 Paramètres de GA 72

Tableau 3.3 Paramètres de la méthode PSO 82

Tableau 3.4 Profiles type et spécifications 82

Tableau 3.5 Tableau de comparaison 83

Tableau 3.6 Paramètres du courant et puissances du système PV sous différentes irradiations 90

Tableau 3.7 Paramètres de système éolien étudié 100

CHAPITRE 4 : GESTION ET STOCKAGE D'UN SYSTEME MULTI-SOURCE EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE

Tableau 4.1 Règles de logique floue 107

Tableau 4.2 Paramètres de GPV 121

Tableau 4.3 Paramètres du système éolien 122

Tableau 4.4 Paramètres de la batterie 122

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, on assiste à une augmentation constante et continue de la demande énergétique, tandis que la production d'électricité à partir de sources fossiles (comme le gaz, le pétrole et le charbon) devient de plus en plus incertaine. Car, ces ressources sont vouées à s'épuiser dans les années à venir, ce qui soulève des défis majeurs pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Par conséquent, le développement des énergies renouvelables notamment le photovoltaïque et l'éolienne s'avère incontestable et avantageux sur le plan économique et environnementale. En effet, ces énergies sont adaptées à la production d'électricité et peuvent, favoriser le développement de marchés étendus, en particulier pour les entreprises spécialisées dans les secteurs photovoltaïque et éolien. Toutefois, l'utilisation séparée des sources renouvelables réduit considérablement leurs avantages et aussi bien leurs supériorités [1,2]. Alors, la solution est l'hybridation des sources renouvelables ou multi-sources afin que certaines fournissent de l'énergie quand les autres sont à l'arrêt.

Les sources éolienne et le solaire, sont soumises à des contraintes météorologiques et à des variations géographiques, ce qui rend leur fonctionnement intermittent. Cette intermittence diminue leur efficacité énergétique lorsqu'elles sont utilisées individuellement, d'où la nécessité de recourir à des systèmes multi-sources intégrant plusieurs sources d'énergie renouvelable. L'utilisation de plusieurs sources simultanément, s'impose comme une solution essentielle [3]. Car elle permet à certaines sources de fournir de l'énergie lorsque d'autres sont inactives, assurant ainsi une production d'électricité continue et stable. Cette solution est plus robuste et complète, puisqu'elle exploite les forces complémentaires de différentes sources d'énergie renouvelable pour répondre de manière fiable à la demande croissante en énergie [4].

Les chercheurs et les professionnels du secteur énergétique s'intéressent de plus en plus aux sources et méthodes de production d'énergie renouvelables et respectueuses de l'environnement permettant ainsi une exploitation optimale des énergies propres [5]. Ces sources d'énergie renouvelable (SER) présentent de nombreux avantages: elles sont inépuisables et ont un impact environnemental bien moindre que les énergies traditionnelles, puisqu'elle limite notamment les émissions de gaz à effet de serre et la pollution liée à l'extraction des combustibles fossiles [6]. En plus de permettre la production d'électricité propre, elles favorisent une transition énergétique durable et réduisent la dépendance des ressources fossiles dont l'exploitation est coûteuse et soumise aux fluctuations des marchés internationaux [7]. Toutefois, leur utilisation nécessite de s'adapter aux variations naturelles, parfois imprévisibles. En effet, la production de l'énergie solaire dépend de l'ensoleillement, tandis que l'éolien repose sur la force et la régularité du vent, cette variabilité impose le développement de solutions technologiques comme le stockage d'énergie, les réseaux intelligents (smart grids) et une meilleure intégration avec d'autres sources d'énergie pour assurer un approvisionnement stable et fiable [8].

Les systèmes multi-sources sont une solution efficace pour assurer une production d'électricité plus stable et économiquement viable, tout en réduisant l'impact environnemental [9]. Ils permettent de limiter les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. Le CO_2, deuxième gaz à effet de serre le plus influent après la vapeur d'eau, joue un rôle majeur dans le réchauffement climatique, représentant environ 26 % de l'effet de serre, contre 60 % pour la vapeur d'eau.

L’un des principaux défis des systèmes multi-sources réside dans la gestion efficace de la consommation énergétique afin de garantir un approvisionnement fiable en électricité, quelles que soient les conditions météorologiques. Qu’il s’agisse d’alimenter une résidence isolée en montagne, une cabane ou une habitation, la stabilité et la qualité de l’électricité dépendent d’un contrôle optimal de l’interconnexion dynamique entre les consommateurs et les sources d’énergie renouvelable. La variabilité naturelle des sources solaire photovoltaïque et l’éolien, combinée à l’absence de solutions de stockage adaptées, peut entraîner des fluctuations importantes de la production et occasionner des pertes d’énergie [10]. De plus, les systèmes décentralisés, notamment les panneaux solaires et les éoliennes, peuvent impacter la qualité de la tension électrique, rendant indispensable une gestion avancée du réseau.

La régulation efficace des flux d’énergie est cruciale pour garantir une alimentation continue et stable de la charge électrique. C'est dans cette optique que s'inscrit cette thèse, l'objectif est d'optimiser la commande et la gestion énergétique d’un système multi-sources associant énergie photovoltaïque et éolienne (PV-Éolien). L’objectif principal est de proposer une solution de gestion robuste et performante, capable d’améliorer l’efficacité et la fiabilité de ces systèmes face aux enjeux énergétiques actuels, et ce on apportant une contribution significative à la gestion optimisée d’un système multi-sources, ainsi qu’à une exploitation plus efficace des énergies renouvelables. Après la modélisation des différents modules composant le système multi-sources, des stratégies de gestion sont développées pour assurer un fonctionnement optimal et prolonger la durée de vie du système. Ces stratégies s’appuient sur la prédiction des potentiels énergétiques des sources renouvelables, permettant d’anticiper les scénarios futurs et de prendre des décisions adaptées. En outre, des méthodes visant à optimiser l’exploitation des sources d’énergie renouvelable et à maximiser leur productivité sont également explorées. Ces approches visent à renforcer la performance globale du système tout en répondant aux besoins énergétiques de manière durable et fiable. Cette thèse est organisée essentiellement, en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à l’état de l'art sur la production d’énergie ; sur les architectures et stratégies de commandes des systèmes multi sources ; Problématique des systèmes à base d’énergies renouvelables ; Potentiel des énergies renouvelables (Energie solaire, Energie éolienne) ; et Gestion optimale de l’énergie produite par un système multi sources ;
- ✓ Le deuxième chapitre traite la modélisation du système de production, essentiellement, la modélisation des trois sources d’alimentation : le système photovoltaïque, le système éolien et le système de stockage, ainsi que des convertisseurs statiques (Hacheur Boost, Hacheur Buck-Boost, Redresseur et Onduleur).
- ✓ Le troisième chapitre présente différentes stratégies de commandes pour le système photovoltaïque, incluant des méthodes classiques et méta-heuristiques, afin d’extraire le point de puissance maximale (MPPT) sous diverses conditions climatiques. Il propose également deux commandes de régulation de vitesse pour le système éolien, visant à atteindre le point de puissance maximale. Enfin, il traite des commandes avancées pour le système multi-sources et de l’évaluation des performances du système.
- ✓ Le quatrième chapitre se concentre sur la simulation et la gestion du flux énergétique du système composé, essentiellement, de deux sources principales (générateur photovoltaïque et éolienne) et d’une source auxiliaire (batterie). Pour évaluer cette hybridation est intégrée au système de production d’électricité.

La thèse se conclut par une synthèse générale des travaux réalisés et propose des perspectives futures.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES SYSTEMES MULTI-SOURCES DE PRODUCTION D'ENERGIE

1.1 Introduction

Face au tarissement des énergies fossiles, le changement climatique et également l'augmentation globale de la demande en énergie, il devenu crucial de rechercher des solutions durables pour répondre à ces besoins tout en limitant l'impact environnemental. Les énergies renouvelables (EnR) apparaissent comme une réponse essentielle, permettant de diminuer l'usage des énergies fossiles tout en limitant les émissions du gaz à effet de serre [11,12]. Cependant, pour que ces sources d'énergie jouent un rôle essentiel dans la transition énergétique, il est nécessaire de développer des infrastructures adaptées et de surmonter les défis liés à l'intermittence de leur production. A effet, de nombreux pays ont optés pour une transition vers des sources d'énergie plus propres et durables, telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie, ainsi que les biocarburants et l'hydrogène [13]. Par conséquent, il devient essentiel de favoriser le développement des énergies propres.

Les énergies renouvelables jouent un rôle clé dans la construction d'un avenir énergétique durable et donc, de nos jours, de nombreux pays investissent massivement dans leur développement dans le domaine des EnR. Néanmoins, les sources photovoltaïques et éoliennes présentent l'inconvénient de dépendre conséquemment des conditions météorologiques, qui sont souvent instables et difficiles à prévoir avec précision. Alors, pour assurer une production énergétique plus stable, il s'avère efficace de combiner plusieurs sources d'énergie [14]. Ainsi, des avancées technologiques ont été déterminantes dans ce processus, notamment grâce au développement de nouvelles technologies de stockage d'énergie et des réseaux intelligents qui permettent une gestion optimale de la production et de la distribution.

Par exemple, dans un système hybride photovoltaïque/éolien, l'éolien peut générer de l'électricité la nuit, lorsque les panneaux solaires sont inactifs, tandis que par temps ensoleillé, les panneaux assurent une production plus constante même s'il y a des fluctuations du vent. Cette hybridation à deux (2) objectifs principaux : assurer la connexion au réseau énergétique du site en optimisant la récupération de l'énergie disponible et garantir une rentabilité

économique et écologique en maximisant la durée de vie des composants tout en produisant le maximum d'énergie à chaque instant.

Ce chapitre, présente des généralités sur le contexte énergétique, des données sur la production et la consommation énergétique dans le monde et les différentes structures d'un système multi sources à énergies renouvelables.

1.2 Production et développement durable des énergies renouvelables dans le monde

Le développement durable des énergies renouvelables consiste à promouvoir des solutions énergétiques respectueuses de l'environnement, économiquement viables et socialement équitables [15]. C'est une démarche globale qui cherche à répondre aux besoins énergétiques présents tout en garantissant la préservation des ressources pour les générations à venir. Toutefois, bien que le coût des EnR ait baissé ces dernières années, il reste plus au moins élevé que celui des énergies fossiles, compliquant ainsi, l'adoption par les pays à faibles revenus. L'intermittence des sources renouvelables solaire et l'éolien constitue un autre obstacle, exigeant l'utilisation des systèmes de stockage performants pour assurer un approvisionnement continu en électricité [16, 17].

En 1985, les renouvelables qui représentaient 20,82 % de la production d'électricité mondiale, ont diminué progressivement pour atteindre 18,09 % en 2005. Cette baisse est causée par l'augmentation rapide de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles et du nucléaire, qui ont constitué une part croissante de la demande énergétique mondiale [18]. Depuis 2005, la part des énergies renouvelables a connu une progression constante et marquée, portée par des politiques gouvernementales favorables, des avancées technologiques et les efforts engagés dans la lutte contre le changement climatique [19]. Grâce à cela la période post-2010 a particulièrement marqué une accélération de cette tendance, avec une augmentation annuelle moyenne notable, soit une hausse de 18,71% en 2010 et ont également enregistrée des augmentations significatives, notamment en 2020 où la part des renouvelables a grimpé à 28,08%, soutenue par une prise de conscience globale accrue des enjeux environnementaux et des investissements substantiels dans les infrastructures vertes, pour atteindre 30,24% en 2023. Ces tendances soulignent une transition énergétique progressive vers des sources d'énergie plus durables [20-22].

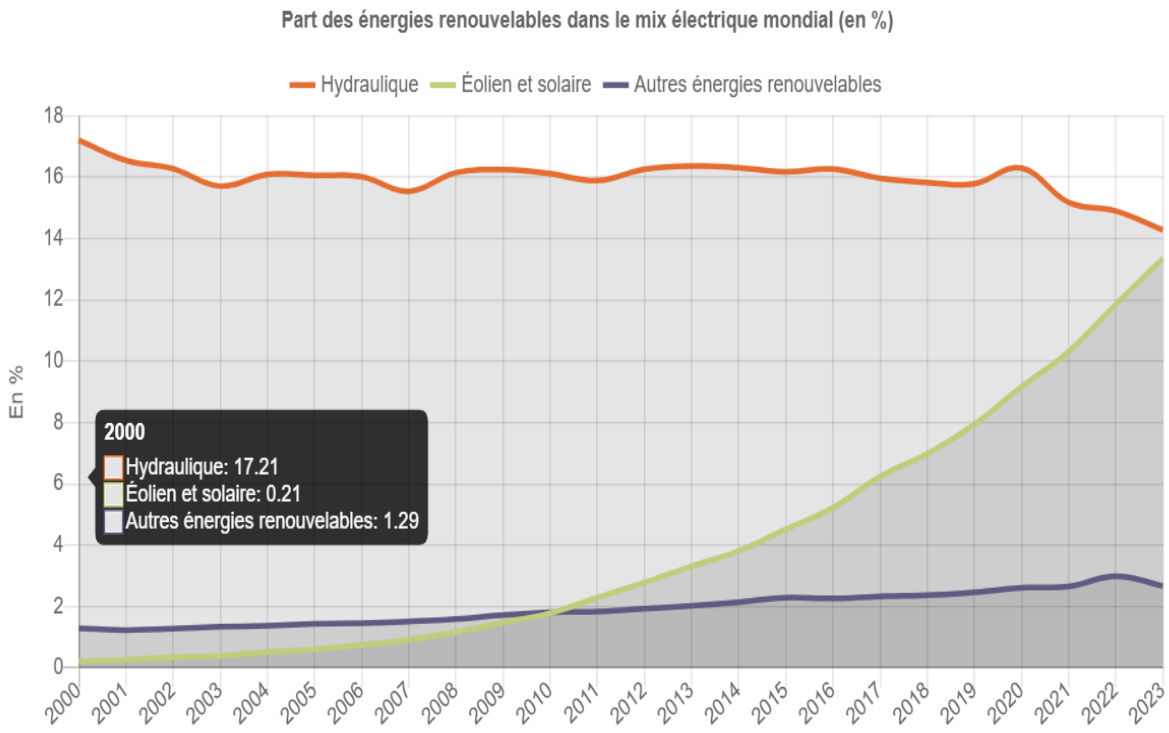


Figure 1.1 Développement mondiale des énergies renouvelables productrices d'électricité [23]

En 2023, la croissance mondiale de la production solaire (+307 TWh, +23%) a dépassé celle de l'éolien (+206 TWh, +9,8%). La production de combustibles fossiles a seulement augmenté de +0,8% .Ainsi, le solaire et l'éolien ont constitué 98% des nouvelles installations de capacités en énergies renouvelables à l'échelle mondiale. Toutes fois, malgré que les gains les plus importants proviennent de l'éolien (+1 475 TWh, +178%) et du solaire (+1 375 TWh, +537%), qui atteint, en 2023 plus de six fois les niveaux de 2015, la production cumulée des énergies renouvelables demeure encore inférieure à celles du charbon. Le charbon (+1 153 TWh, +12%) et le gaz (+1 080 TWh, +19%) ont connu une croissance légèrement inférieure. Les bioénergies (+220 TWh, +46%), l'hydroélectricité (+326 TWh, +8,4%) et le nucléaire (+153 TWh, +6%) ont connu des augmentations moins importantes [24]. La production à partir d'autres sources de combustibles fossiles, comme le pétrole, a chuté de 333 TWh (-30%).

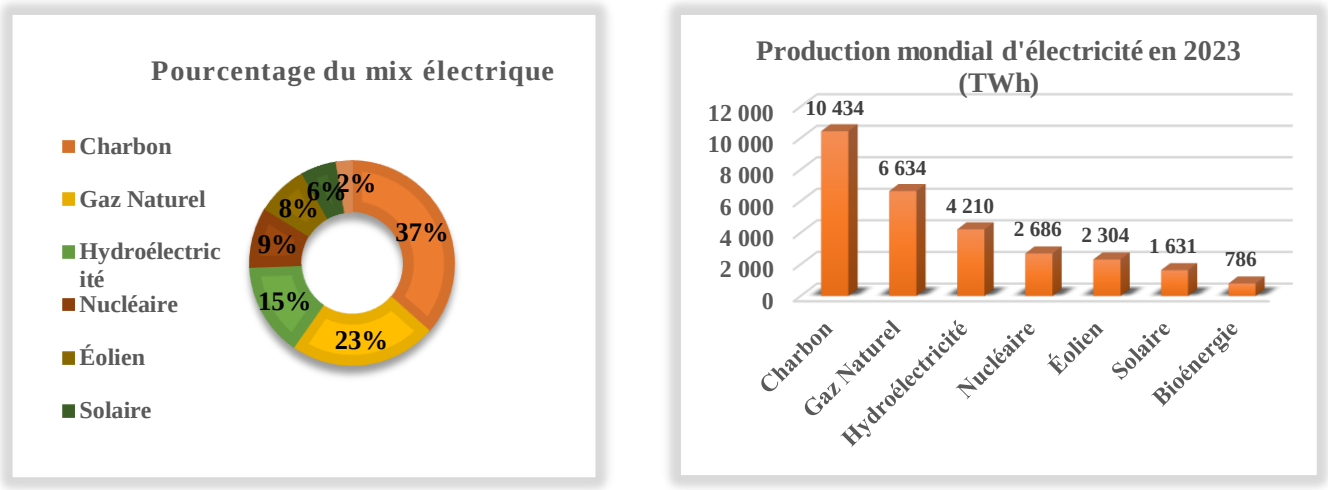


Figure 1.2 Évolution de la production d'électricité mondiale en 2023

1.2.1 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel considérable en énergies renouvelables, dominé, essentiellement, par l'énergie solaire. Celle-ci représente une véritable opportunité pour le pays, constituant un axe stratégique pour la croissance économique et sociale, notamment grâce à la mise en place d'industries créatrices de richesse et génératrices d'emplois [25].

1.2.1.1 Potentiel solaire

L'Algérie dispose d'un immense potentiel en énergie solaire, largement suffisant pour répondre à ses besoins en électricité. Avec une production annuelle estimée à 169,44 TWh, soit 5000 fois la consommation électrique nationale, le pays bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel. Les régions du Nord reçoivent environ 1 700 KWh/m²/an, tandis que les hauts plateaux et le Sahara atteignent jusqu'à 2 263 KWh/m²/an, portant la moyenne nationale à plus de 2 200 KWh/m²/an. Entre 2016 et 2020, quatre centrales solaires thermiques, d'une capacité totale de 1 200 MW, ont été mises en service [26]. Le plan 2021-2030 vise à accélérer cette dynamique avec une augmentation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030 (figure 1.3).

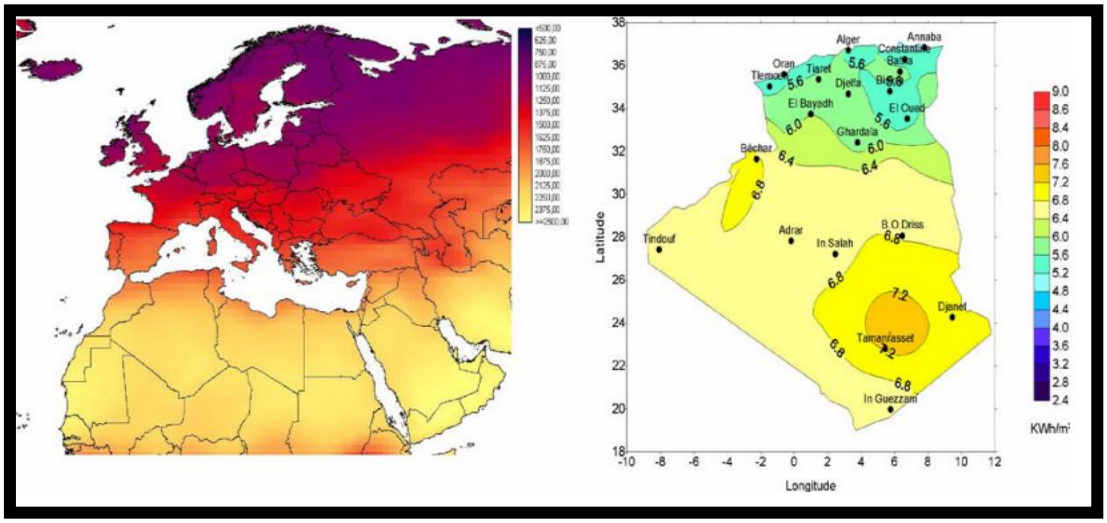


Figure 1.3 Sites potentiels d'approvisionnement en électricité solaire en l'Afrique du Nord

1.2.1.2 Potentiel éolien

L'Algérie bénéficie d'un régime de vent modéré, avec des vitesses variant de 2 à 6 m/s. Dans le Nord, la vitesse moyenne est généralement faible, Malgré la présence de microclimats spécifiques dans les zones côtières d'Oran, Bejaïa et Annaba, ainsi que sur les hauts plateaux de Tiaret et dans la région s'étendant de Bejaïa au nord jusqu'à Biskra au sud. En revanche, le Sud connaît des vitesses de vent plus élevées, notamment dans le Sud-ouest, où elles dépassent les 4 m/s, et peuvent atteindre plus de 6 m/s dans la région d'Adrar. Ce potentiel éolien pourrait être exploité pour des applications telles que le pompage d'eau, notamment sur les hauts plateaux (voir Figure 1.4).

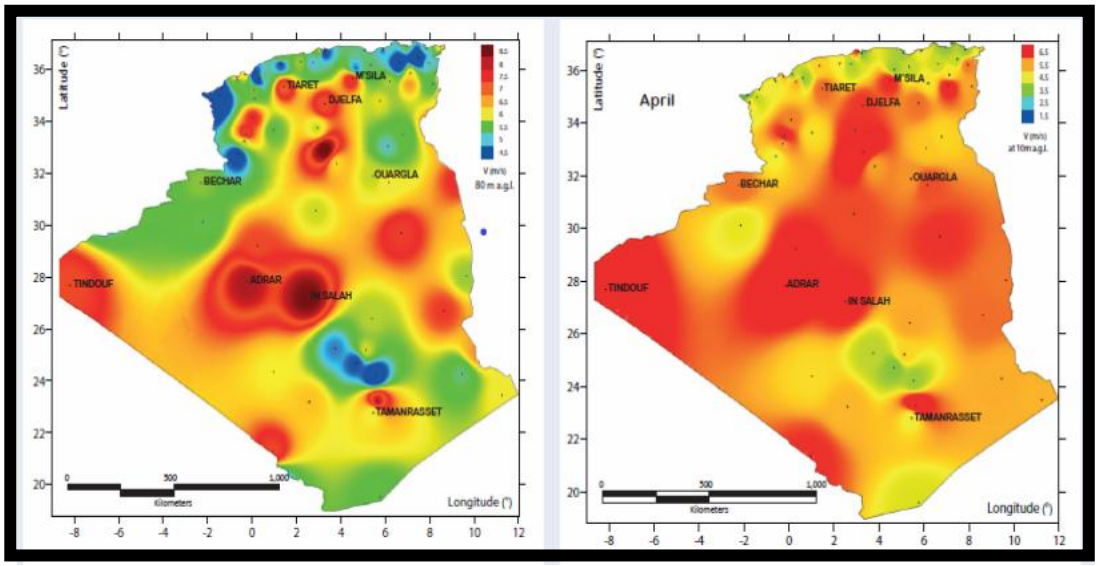


Figure 1.4 Potentiel éolien en Algérie [28]

1.2.1.3 Potentiel géothermique

L'Algérie compte plus de 240 sources thermales, offrant une diversité remarquable en termes de températures. Ces eaux chaudes présentent des variations allant de 22°C à 98°C. La température maximale, 98°C, a été relevée dans le Nord-Est du pays, tandis qu'elle atteint 80°C dans la région centrale et 68°C dans le Nord-Ouest. Dans le Sud, la température moyenne des sources est d'environ 50°C, soulignant une répartition géographique variée et un potentiel géothermique intéressant (voir Figure 1.5).

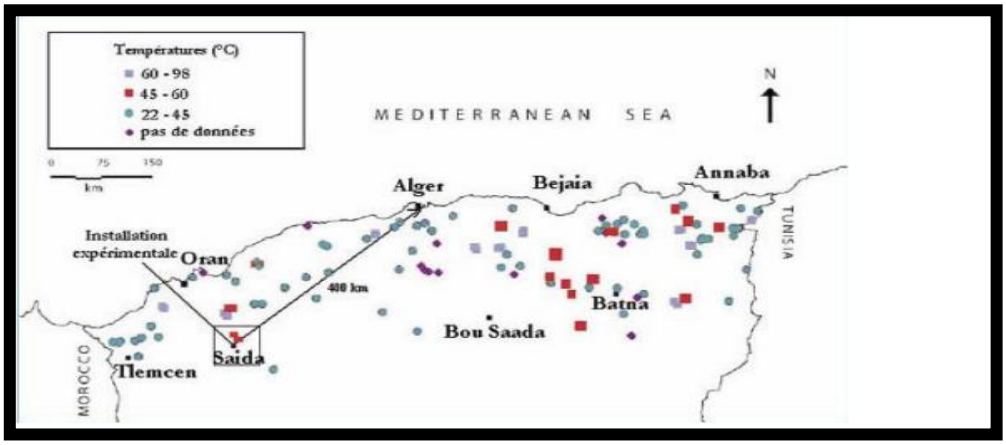


Figure 1.5 Géothermie en Algérie [29].

1.2.1.4 Potentiel énergétique de la biomasse

L'énergie provenant de la biomasse peut être produite principalement de deux façons : par conversion thermochimique via combustion et par digestion anaérobie. En Algérie, les zones forestières couvrent environ 250 millions d'hectares, offrant un potentiel énergétique évalué à 37 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), dont environ 10% sont exploitables. Selon le Centre pour le Développement des Énergies Renouvelables (CDER), la production d'électricité à partir de cette ressource pourrait dépasser 1900 MW/heure, alors que la consommation moyenne par habitant en Algérie est de 1236 kWh [30].

1.2.1.5 Potentiel énergétique hydroélectrique

L'énergie hydraulique provient de l'exploitation des barrages et des masses d'eau des océans et des mers. Cette énergie est générée en construisant un réservoir où l'eau est stockée, puis libérée à un débit constant pour actionner des turbines générant de l'électricité [31]. En Algérie, les débits hydriques sont estimés à 65 milliards de mètres cubes, mais leur potentiel reste limité en

raison de la faible fréquence des précipitations, concentrées dans certaines régions, avec une diminution notable vers le sud. Le pays compte 130 barrages, dont 50 sont en fonctionnement. Ces infrastructures contribuent à environ 5 % de la production énergétique nationale, avec une capacité totale de 269,208 MW répartie sur 13 barrages opérationnels (Figure 1.6).

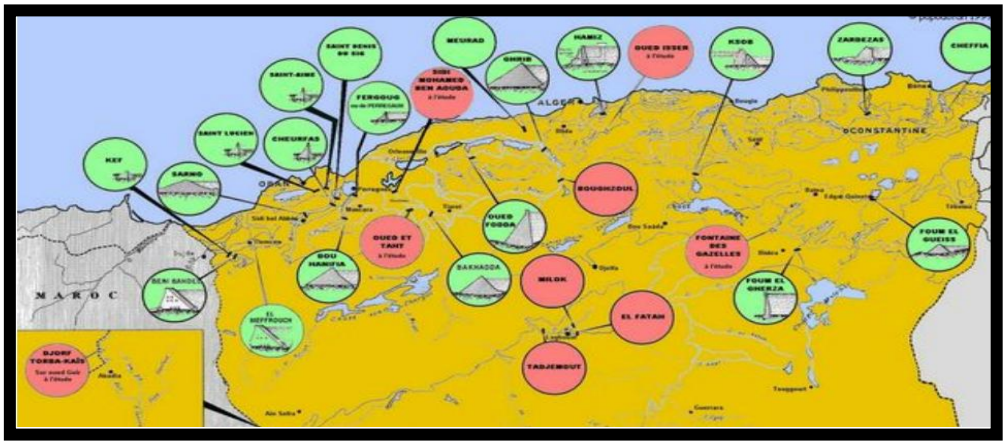


Figure 1.6 Energie hydroélectrique en Algérie [32].

1.2.2 Stratégie du développement des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie ne se limite pas au solaire, elle diversifie ses initiatives en lançant des projets de fermes éoliennes, ainsi que des programmes expérimentaux en biomasse, géothermie et cogénération. Le pays a amorcé un tournant stratégique vers les énergies renouvelables pour répondre aux défis environnementaux et préserver ses ressources fossiles. Ceci s'est concrétisé par un programme ambitieux, adopté en 2011, actualisé en 2015, et élevé au rang de priorité nationale en 2016. L'objectif principal est d'installer une capacité de 22 000 MW issue de sources renouvelables d'ici 2030, principalement pour le marché national, tout en gardant l'option de l'exportation comme une ambition stratégique (Figure 1.7). Ce programme englobe le développement du photovoltaïque, de l'éolien, ainsi que des filières émergentes telles que la biomasse, la cogénération et la géothermie [33]. À ce jour, 23 centrales photovoltaïques totalisant près de 500 MW ont déjà été mises en service, marquant les premiers jalons d'une transition énergétique durable.

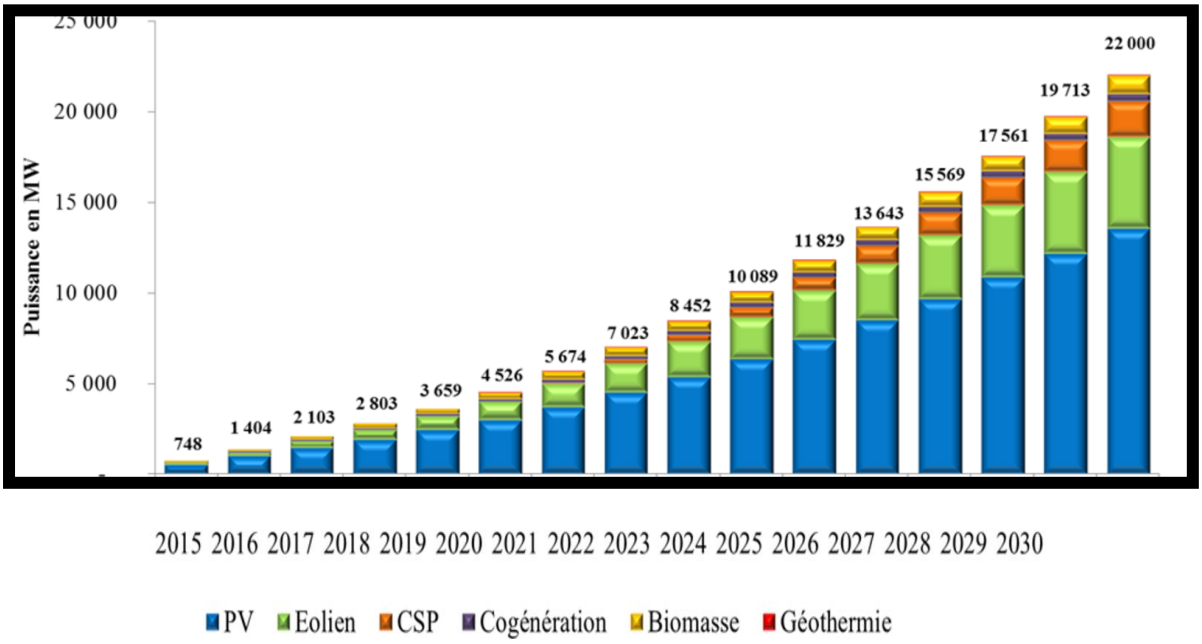


Figure 1.7 Evaluation des énergies renouvelables en Algérie [34]

1.2.3 Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie

Le programme d'énergies renouvelables destiné au marché national algérien pour la période 2015-2030 prévoit une capacité totale de 22 000 MW. Cette capacité est répartie par filière, comme indiqué dans le tableau 1.1, conformément aux données de la référence [35].

Tableau 1.1 Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie

	1ère phase 2015-2020 [MW]	2ème phase 2021-2030 [MW]	Total [MW]
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Total	4525	17475	22000

1.2.4 Aperçu sur les capacités d'énergies renouvelables installées en Algérie

La capacité des nouvelles installations en énergies renouvelables mises en place en 2023 (Figure 1.8) est estimée à 11,17 MW, représentant une augmentation de 2,4 % par rapport à l'année 2022. Cette progression est principalement portée par le Ministère de l'Intérieur avec 5,1 MW (45,7%) et le Ministère de l'Habitat avec 3,45 MW (31%). Entre 2020 et 2023, la

capacité installée a augmenté de 62,8 MW, Cela représente une croissance de 15 % par rapport à 2019. Les principaux acteurs de cette évolution sont le Ministère de l'Énergie et des Mines, avec 28 MW (45 %), suivi du Ministère de l'Intérieur (14,95 MW, soit 23,8 %) et du Ministère de l'Habitat (7 MW, soit 11,2 %).

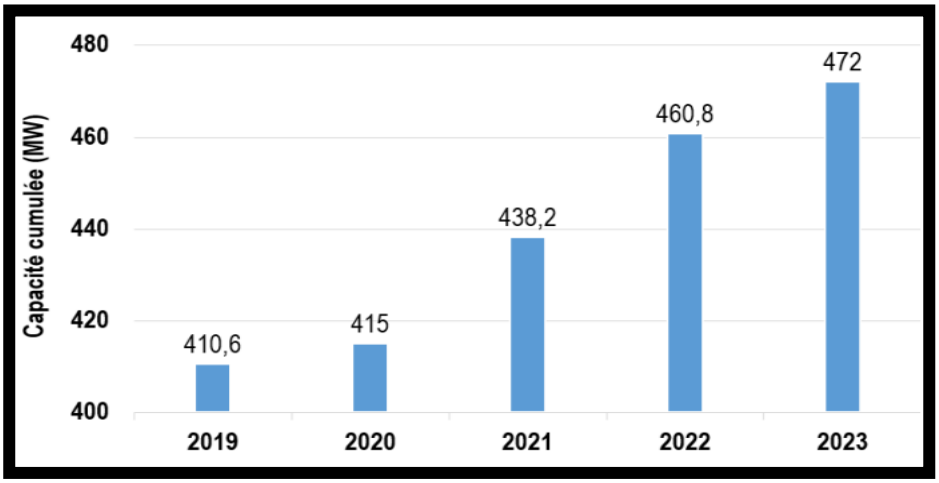


Figure 1.8 Évolution des capacités cumulées d'énergies renouvelables (hors hydroélectricité) installées jusqu'à la fin 2023 [36].

1.3 Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont un ensemble de ressources d'énergie (Figure 1.9) englobent des formes d'énergies issues de sources inépuisables et se régénérant naturellement à l'échelle humaine, garantissant ainsi une disponibilité continue tout en préservant les ressources futures. Les EnR proviennent, essentiellement, de phénomènes naturels, tels que le rayonnement solaire et l'énergie géothermique. Elles constituent une alternative attrayante aux énergies fossiles conventionnelles, en offrant une solution durable pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Elles jouent également un rôle essentiel dans la transition énergétique mondiale et dans lutte contre le changement climatique, favorisant ainsi la protection de l'environnement et la promotion d'un développement durable.

Figure 1.9 Différents types d'énergies renouvelables [37]

1.4 Sources d'énergies renouvelables

Les sources d'énergie renouvelable (SER) désignent des formes d'énergie dont le renouvellement naturel est rapide et durable. Provenant de ressources naturelles telles que le soleil, le vent ou l'eau. Elles sont souvent appelées énergies vertes [38]. Les principales formes des SER incluent l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, la biomasse et la géothermie. Parmi celles-ci, l'énergie solaire, éolienne et hydraulique se distinguent par leur popularité et leur durabilité, représentant ensemble 90,6% de la production mondiale d'énergie renouvelable en 2018.

Les sources d'énergies renouvelables les plus courantes sont :

- ✓ *Énergie solaire :* elle est exploitée selon deux approches. D'une part, L'énergie solaire photovoltaïque qui repose sur l'utilisation de cellules solaires pour transformer la lumière du soleil en électricité. Cette technologie s'appuie sur des matériaux semi-conducteurs qui produisent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. En revanche, l'énergie solaire thermique exploite la chaleur du soleil, qui peut être utilisée pour générer de l'électricité via des centrales thermiques solaires ou pour des applications de chauffage de

l'eau ou des bâtiments. Ces deux (2) approches offrent des solutions durables pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et limiter l'empreinte carbone.

- ✓ *Énergie éolienne :* elle utilise le vent pour faire tourner des éoliennes, lesquelles produisent de l'électricité via un générateur. Elle constitue une alternative propre aux énergies fossiles.
- ✓ *Énergie hydraulique :* Elle utilise l'énergie de l'eau pour générer de l'électricité et se décline en deux principales formes : l'hydroélectricité qui utilise la puissance des chutes d'eau ou des barrages pour actionner des turbines reliées à des générateurs et les hydroliennes qui captent l'énergie des courants marins pour générer de l'électricité. Ces technologies offrent des solutions durables et efficaces pour répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant les émissions de carbone.
- ✓ *Biomasse :* elle utilise la matière organique, comme le bois, les déchets agricoles ou le biogaz pour produire de l'énergie. Elle peut être transformée pour générer de l'électricité, fournir de la chaleur ou produire des biocarburants. Cette méthode permet de valoriser les déchets tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles, ce qui soutient une transition énergétique plus durable.
- ✓ *Géothermie :* elle utilise la chaleur présente dans le sous-sol terrestre. Elle peut être exploitée pour produire de l'électricité, en captant la chaleur des réservoirs géothermiques profonds, ou pour le chauffage, en utilisant les couches superficielles du sol. Cette technologie offre une solution énergétique durable avec un faible impact environnemental et une disponibilité constante, indépendamment des conditions climatiques.
- ✓ *Énergie marine :* regroupe plusieurs technologies renouvelables qui tirent parti des ressources des océans. Elle inclut l'énergie des vagues, générée par le mouvement de la surface de l'eau, l'énergie des marées**,** issue des variations de niveau d'eau dues aux forces gravitationnelles de la lune et du soleil et l'énergie des gradients thermiques qui exploite la différence de température entre les eaux de surface et celles en profondeur. Ces technologies offrent un potentiel énergétique considérable tout en étant respectueuses de l'environnement.

1.4.1 Avantages des énergies renouvelables

- ✓ *Durabilité :* elles se régénèrent naturellement et ne s'épuisent pas comme les énergies fossiles.
- ✓ *Réduction des émissions de gaz à effet de serre :* elles produisent peu ou pas de CO_2, contribuant à la lutte contre le changement climatique.

- ✓ *Indépendance énergétique :* réduit la dépendance aux importations de combustibles fossiles.

1.5 Définition d'un système multi-sources

Un système multi-sources a pour objectif principal de répondre à la demande énergétique en privilégiant l'utilisation d'énergies renouvelables, comme le solaire ou l'éolien, plutôt que des sources auxiliaires, telles que les générateurs à combustibles fossiles. Pour être rentable, les économies réalisées grâce à l'utilisation des énergies renouvelables doivent couvrir au moins les coûts d'installation des équipements renouvelables [39]. La performance de ces systèmes dépend de plusieurs facteurs, notamment la conception, qui englobe le dimensionnement des composants, la technologie utilisée et l'architecture du système, ainsi que la gestion adoptée. Elle est mesurée par les économies sur le carburant ou l'électricité (KWh) et par la fréquence des pannes durant la durée de vie du système. La durée de vie d'un système multi-sources dépend de celle de ses composants, mais il est possible que certains modules aient une durée de vie plus courte dans ce type de système. Étant donné que les sources d'énergie renouvelables ne produisent pas toujours de manière constante en raison des fluctuations climatiques, un système d'énergie multi-sources (SMS) combine au moins deux sources d'approvisionnement, incluant à la fois des sources renouvelables et conventionnelles, pour assurer une production d'électricité plus stable [40]. Un SMS peut également intégrer d'autres éléments, comme des convertisseurs d'énergie et des charges principales ou auxiliaires, tous interconnectés selon différentes configurations. En résumé, ces systèmes visent à optimiser la production d'énergie en utilisant principalement, des sources renouvelables tout en garantissant une fourniture stable d'électricité, leur efficacité dépendant de l'intégration réussie de diverses sources d'énergie.

1.5.1 Avantages d'un système multi-sources

- Les systèmes multi-sources permettent d'assurer une alimentation constante en énergie, en utilisant différentes sources pour compenser les fluctuations de production ;

- Ces systèmes ont pour objectif d'optimiser l'exploitation des sources d'énergie renouvelable disponibles, ce qui favorise la durabilité environnementale ;

- Les technologies SMS facilitent la régulation et l'uniformisation de la puissance produite par les sources d'énergie, assurant ainsi une alimentation plus stable ;

1.5.2 Inconvénients d'un système multi-sources

- La variabilité des sources d'énergie renouvelable peut compliquer la production d'énergie de manière constante, ce qui nécessite une gestion efficace ;

- Les systèmes multi-sources sont complexes à contrôler en raison de l'interconnexion de plusieurs sources, nécessitant des algorithmes sophistiqués pour optimiser les performances ;

- Nécessite un algorithme de contrôle efficace pour garantir des performances globales optimales du système [41] ;

- Les variations rapides de la production d'énergie, comme le démarrage soudain d'une éolienne, peuvent entraîner des problèmes de qualité d'énergie, affectant la stabilité du système ;

- La durée de vie des composants d'un SMS peut être inférieure à celle de chaque composant pris individuellement, ce qui entraîne des défis en matière de maintenance et de remplacement.

1.6 Classifications des systèmes d'énergies multi-sources

Les systèmes d'énergie multi-sources peuvent être classés de différentes manières, en fonction du lieu d'installation et des objectifs visés. Parmi les typologies les plus répandues, trois (3) critères se distinguent selon la composition du système :

- ✓ *Présence d'une source d'énergie conventionnelle :* certains SMS intègrent une source d'énergie conventionnelle telle qu'un générateur diesel, une micro-turbine à gaz, etc... qui peut être utilisée en complément des énergies renouvelables pour assurer une alimentation continue.

- ✓ *Présence d'un dispositif de stockage :* la présence d'un dispositif de stockage, comme une batterie, est un critère important [42]. Le stockage permet d'optimiser l'utilisation de

l'énergie renouvelable en fournissant de l'électricité pendant les périodes où la ressource primaire n'est pas disponible.

- ✓ *Type de sources d'énergie renouvelable utilisées :* Cette classification repose sur les sources d'énergie renouvelable intégrées dans le système. Il peut s'agir d'un système photovoltaïque, éolien, hydraulique, ou d'une combinaison de plusieurs sources renouvelables. Le choix est généralement déterminé par une analyse technique et économique.

La figure 1.10 illustre une généralisation de cette classification, montrant comment ces critères peuvent être combinés pour définir la structure du système d'énergie hybride.

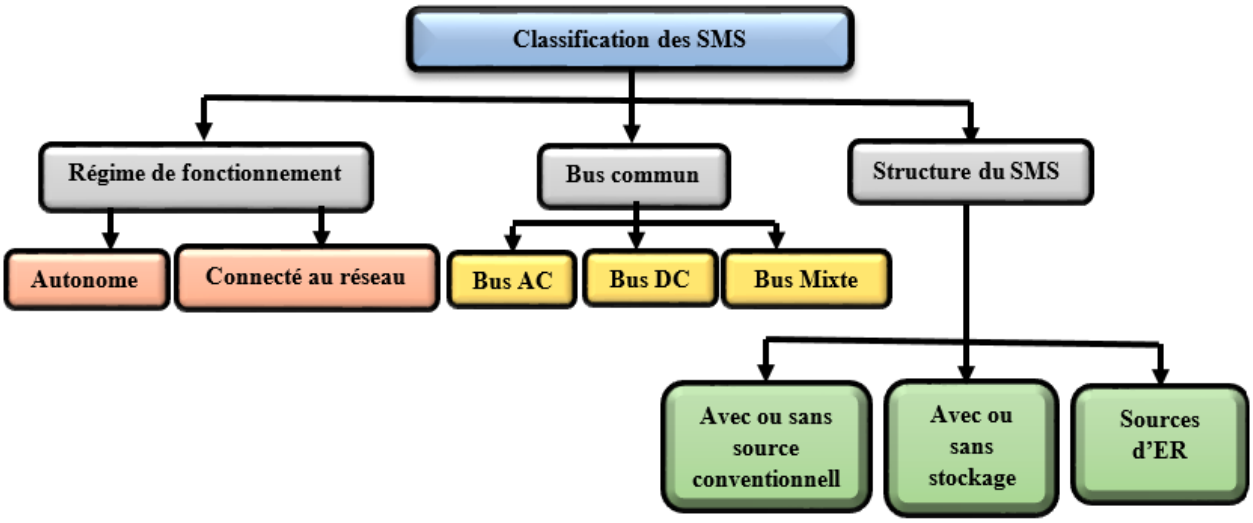


Figure 1.10 Classification des systèmes d'énergie multi-sources

1.6.1 Régime du fonctionnement

Les SMS peuvent être classés en deux grandes familles selon leur régime de fonctionnement. La première regroupe les SMS connectés au réseau, fonctionnant en parallèle et tirant parti de l'interconnexion. En revanche, dans la deuxième catégorie, on retrouve les SMC autonomes, qui sont complètement isolés du réseau, offrant ainsi une indépendance totale [43].

a) Système d'énergie multi-sources autonome

Les SMS autonomes sont conçus pour fournir de l'électricité dans des endroits isolés, mais ils nécessitent un stockage adéquat pour gérer les variations de puissance. Malgré leur efficacité, ils souffrent de coûts élevés des batteries et d'une capacité de stockage limitée, entraînant parfois un gaspillage d'énergie [44-46].

b) Système d'énergie multi-sources connecté au réseau

Les SMS connectés au réseau produisent de l'électricité qui peut être consommée localement ou injectée dans le réseau. Ils n'ont pas toujours besoin de stockage, car le réseau peut compenser les déficits. Ces systèmes permettent de fournir de la puissance active et réactive et nécessitent moins de capacité de stockage grâce à l'appui du réseau, tout en devant respecter des normes spécifiques.

1.6.2 Configurations des systèmes multi-sources

La structure du SMS impose trois (3) différentes, architectures ou configurations de bus (point commun des sources énergies), car les sources d'EnRs ont des caractéristiques opérationnelles très différentes et il est nécessaire d'établir une procédure standard pour intégrer toutes les sources dans un système unique. Ces configurations sont : configuration couplée en courant continu (CC), une configuration couplée en courant alternatif (CA) et une configuration couplée (CA-CC).

1.6.2.1 Architecture de Bus à courant continu

La figure 1.11 représente une telle architecture. On distingue que l'énergie provenant de chaque source du système est acheminée vers un bus continu (DC) à l'aide de convertisseurs DC/DC (hacheurs) ou AC/DC (redresseurs).

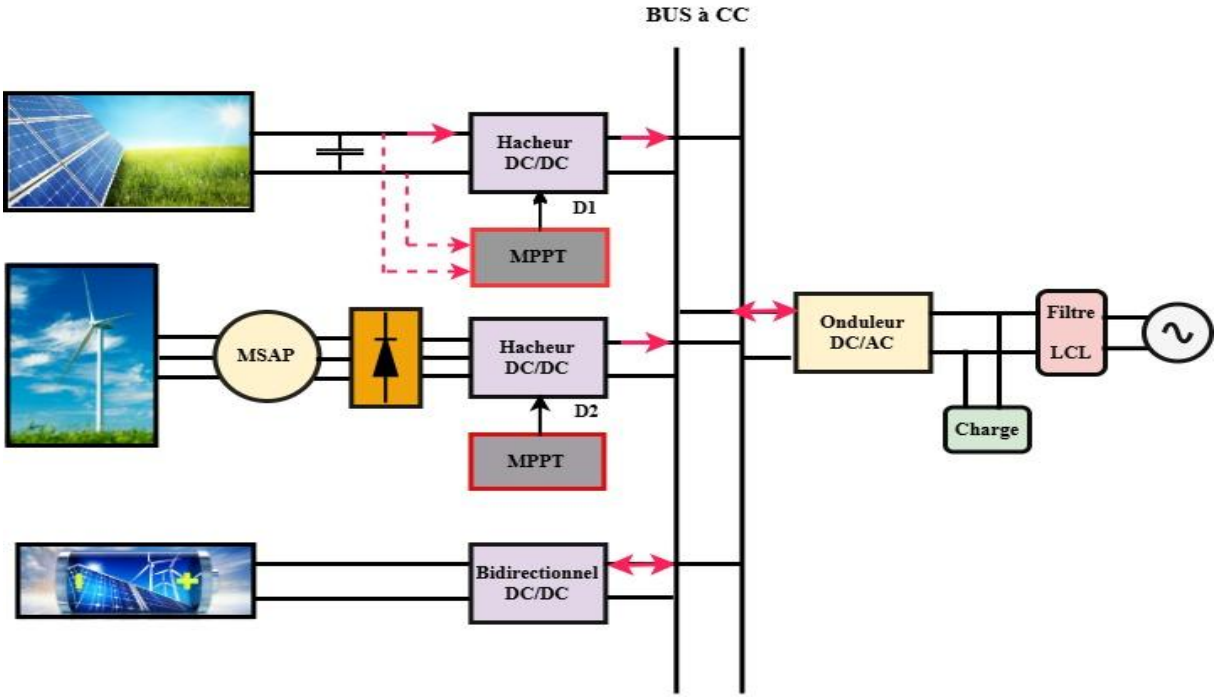


Figure 1.11 Schéma de SMS à Bus DC

1.6.2.2 Architecture de bus à courant alternative

Dans la configuration à bus AC, toutes les sources de production sont intégrées au bus AC via des convertisseurs, comme le montre la figure 1.12 Cette architecture convient mieux à la génération distribuée, c'est-à-dire à celle qui est connectée au réseau électrique.

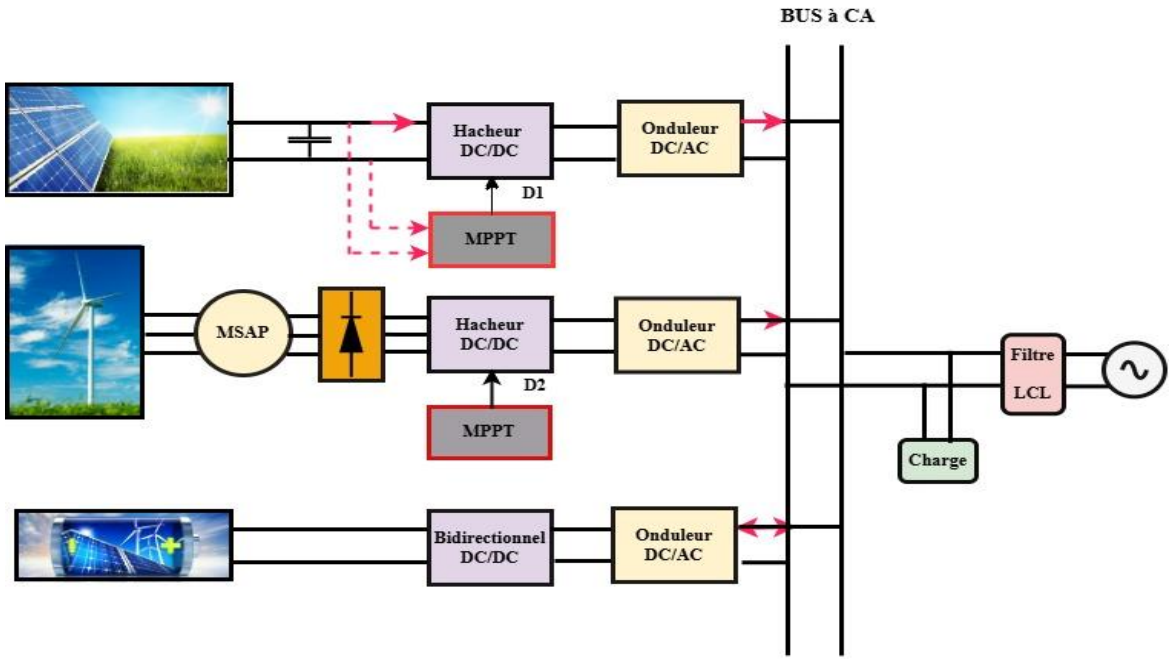


Figure 1.12 Schéma de SMS à Bus AC

1.6.2.3 Architecture mixte (DC et AC)

La figure 1.13, illustre La configuration à bus mixte (DC et AC) d'un système multi-sources permet aux sources d'énergie d'alimenter soit une charge en courant alternatif (AC), soit une charge en courant continu (DC), grâce à un convertisseur bidirectionnel. Ce dernier facilite la conversion entre courant continu et courant alternatif, et vice versa.

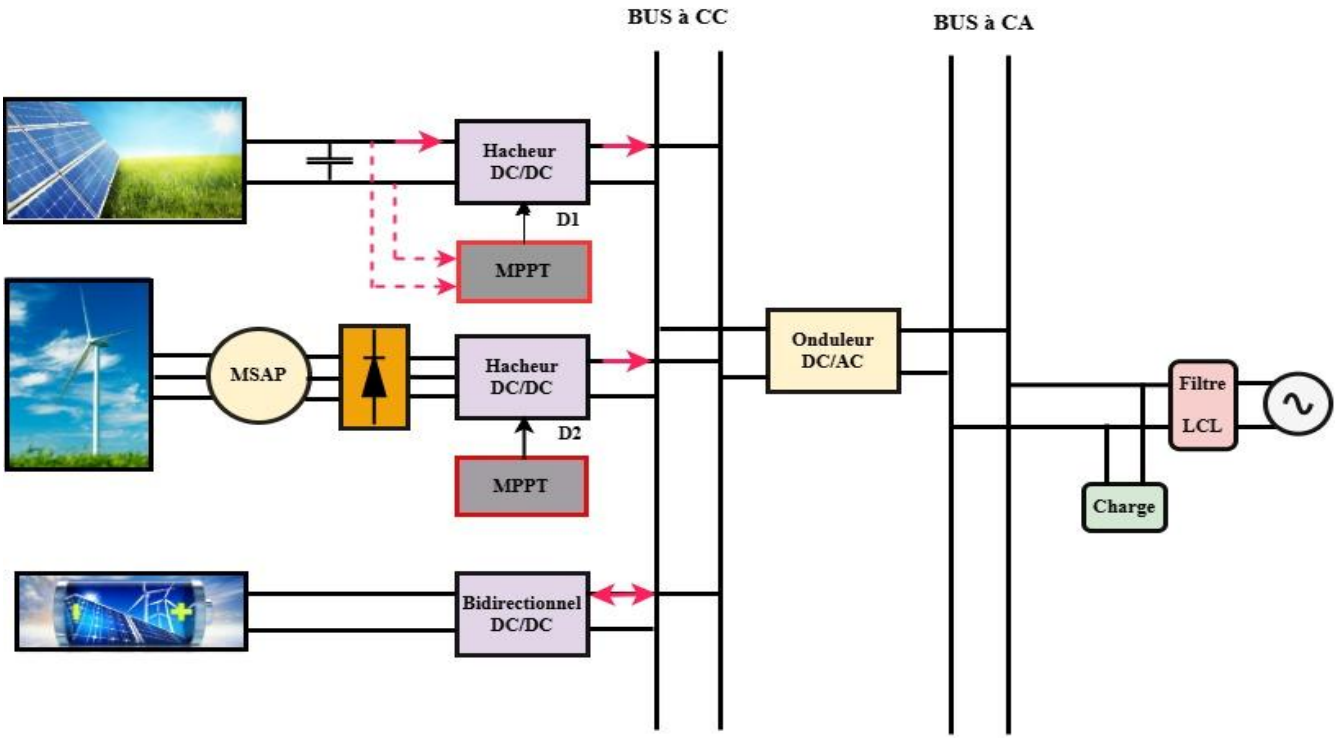


Figure 1.13 Structure à bus mixte (DC et AC) d'un SMS

1.6.3 Structure du SMS

a) Systèmes multi-sources avec source conventionnelle

Ces systèmes intègrent une source d'énergie conventionnelle, généralement un générateur diesel, associée à d'autres sources d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque et l'éolien [47].

b) Systèmes multi-sources sans source conventionnelle

Ces systèmes multi sources opèrent principalement en mode autonome. Ils sont adaptés aux sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est compliqué, voire impossible [48].

c) Systèmes multi-sources sans stockage

Les systèmes multi-sources sans stockage ont une configuration énergétique qui combine au moins deux (2) sources d'énergie pour la production ou la gestion de l'énergie, mais sans intégrer de dispositifs de stockage pour conserver l'énergie excédentaire car l'énergie produite est directement utilisée ou distribuée [49]. Ces systèmes présentent un inconvénient majeur lié au manque de diversité dans l'alimentation, puisqu'ils reposent sur une seule ressource primaire. Cela entraîne divers problèmes, notamment le surdimensionnement des éléments nécessaires pour assurer une alimentation continue, conduisant à des coûts initiaux élevés et limitant le développement de ces systèmes [50]. Une solution à ces inconvénients consiste à incorporer une deuxième source d'énergie.

d) Système multi-sources avec stockage

Un système multi-sources avec stockage combine plusieurs sources d'énergie avec un dispositif de stockage ayant pour rôle de conserver l'excédent d'énergie produit pour une utilisation ultérieure. Ce type de système permet de gérer la variabilité de la production d'énergie et d'assurer une fourniture continue et stable, malgré la nature intermittente des sources de production d'énergie renouvelable [51]. Le dispositif de stockage permet de conserver l'énergie excédentaire produite pendant les périodes de forte production pour l'utiliser lorsque la production est insuffisante ou la demande est élevée.

e) Type de sources d'énergies renouvelable

Le choix des sources d'énergies renouvelables pour les SMS repose sur une étude technique préalable du site, évaluant notamment la vitesse du vent et l'intensité de l'ensoleillement afin d'exploiter au mieux les ressources disponibles.

1.7 Système de l'énergie solaire

L'énergie solaire est exploitée depuis de nombreuses années pour diverses applications. Elle se divise principalement en deux (2) catégories : l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique.

L'énergie solaire thermique utilise des panneaux sombres pour produire de la chaleur. Cette chaleur peut également être utilisée pour générer de la vapeur, qui est ensuite convertie en électricité. En revanche, l'énergie solaire photovoltaïque convertit directement l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ainsi, les systèmes photovoltaïques sont essentiels

pour la production d'énergie électrique renouvelable, offrant une solution efficace pour répondre aux besoins énergétiques contemporains [52].

1.7.1 Cellule photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est produite par la conversion directe d'une portion du rayonnement solaire en électricité continue. Ce processus est possible grâce à la cellule photovoltaïque, qui exploite l'effet photovoltaïque, un phénomène physique produisant une force électromotrice lorsqu'elle est exposée à la lumière [53].

La structure d'une cellule photovoltaïque se compose essentiellement de deux (2) couches de semi-conducteurs en silicium dopés N et P, formant une jonction P-N, ainsi que de deux électrodes, comme illustré dans la figure 1.14. L'efficacité d'absorption des photons est optimisée grâce à une couche de verre noir, qui protège la cellule des éléments extérieurs. Un revêtement antireflet réduit les pertes par réflexion à moins de 5%. De plus, une grille de contact permet de minimiser la distance de déplacement des photons pour qu'ils atteignent efficacement les semi-conducteurs. Le cœur du système repose sur la jonction P-N composée de deux fines couches de matériaux semi-conducteurs. Enfin, le contact arrière assure une meilleure conduction [54]. La plupart des cellules photovoltaïques ont une surface d'environ 100 cm² et génèrent une puissance électrique relativement faible, typiquement entre 1 et 3 W, avec une tension comprise entre 0,3 et 0,7 V.

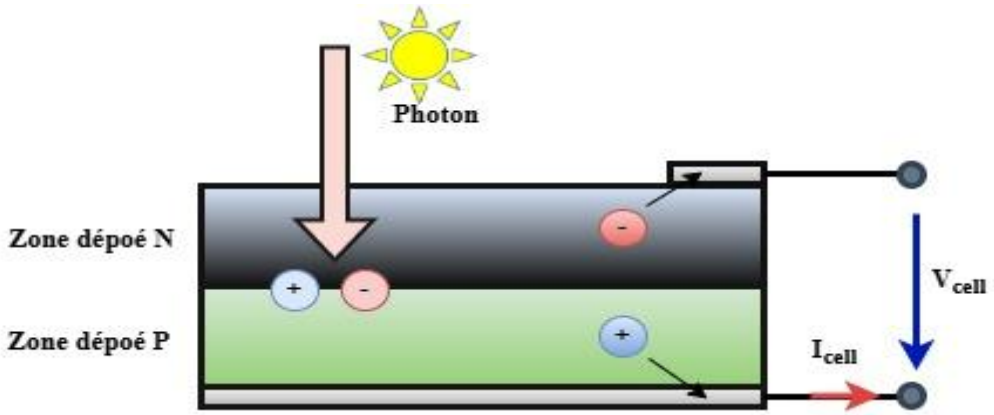


Figure 1.14 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

1.7.2 Cellule photovoltaïque avec différents types

La cellule photovoltaïque, dont le nom est issu des termes ' photon' (grain de lumière) et ''volt'' (unité de tension), est un composant électronique semi-conducteur. Elle est

généralement conçue à partir de silicium, disponible sous trois (3) principales formes. Par l'effet photovoltaïque, elle transforme directement l'énergie lumineuse du rayonnement solaire en électricité sous forme de courant continu à basse tension. Puisque cette énergie provient du soleil, on les appelle cellules photovoltaïques [55].

On distingue trois (3) types principaux de cellules photovoltaïques : monocristallines, polycristallines et amorphes. Chaque type présente des caractéristiques propres en termes de rendement et de coût.

- *Cellules monocristallines:* fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium, elles offrent un rendement élevé (12% à 17%) ;
- *Cellules polycristallines*: issues de plusieurs cristaux de silicium, elles ont un rendement plus faible (11% à 13%) mais sont moins coûteuses ;
- *Cellules amorphes (couches minces):* composées de fines couches photosensibles sur des supports économiques (verre, acier, plastique), elles sont moins performantes (5% à 10%) mais peu coûteuses à produire;

Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont assemblées en cascade pour former des modules. Plusieurs modules connectés en série et/ou parallèle constituent des panneaux photovoltaïques, qui à leur tour forment un générateur photovoltaïque (GPV). La performance du GPV dépend de l'intensité, de la durée de l'ensoleillement et de l'orientation des panneaux.

La figure 1.15 présente les différentes les composantes d'un GPV.

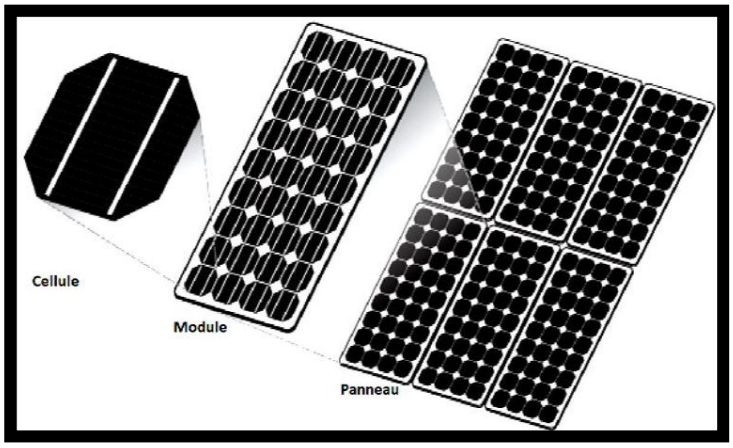


Figure 1.15 Composantes d'un GPV

Les connexions en série de plusieurs modules photovoltaïques permettent d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Dans ce type d'association, chaque cellule est traversée par le même courant électrique. En revanche, lorsque plusieurs modules sont

connectés en parallèle, cela augmente le courant du GPV tout en maintenant la même tension [56].

1.7.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Elle produit une électricité propre et renouvelable ;
- Les systèmes PV sont très fiables ;
- Adaptée aux environnements urbains grâce à leur petite taille et leur fonctionnement silencieux ;
- L'électricité est générée près de son lieu de consommation, permettant une utilisation directe ;
- Les matériaux utilisés, (le verre et l'aluminium) sont résistants aux conditions climatiques extrêmes ;
- Les panneaux ont une longue durée de vie, avec des garanties pouvant atteindre 25 ans ;

Ces caractéristiques en font une solution attrayante pour la production d'énergie.

1.7.4 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

La production d'énergie photovoltaïque présente des variations constantes, principalement en raison de la dépendance à l'ensoleillement. Parmi les inconvénients, on note :

- ✓ Un coût initial très élevé ;
- ✓ Un rendement de conversion relativement faible;
- ✓ Une augmentation des coûts d'installation en raison du besoin de stockage de l'énergie dans des batteries;
- ✓ Une pollution générée lors de la fabrication des panneaux;

Malgré ces défis, le marché du photovoltaïque continue de croître et de trouver de nouvelles applications. Par ailleurs, la technologie photovoltaïque est en phase de maturation, ce qui laisse espérer une atténuation de certains inconvénients, notamment en ce qui concerne les coûts de production [57].

1.8 Système éolien

L'énergie éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à l'aide d'une turbine éolienne, puis en énergie électrique via une génératrice. Il s'agit d'une source d'énergie

renouvelable, propre et largement répartie géographiquement, qui coïncide fréquemment avec la demande accrue en électricité durant l'hiver, période où les vitesses du vent sont généralement maximales. De plus, cette source d'énergie ne produit ni émissions polluantes ni déchets radioactifs. Cependant, l'énergie éolienne présente des inconvénients, notamment son caractère intermittent et la complexité de son captage, nécessitant des pales, des mâts et des dimensions importantes [58]. Un aérogénérateur, ou éolienne, est un appareil qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Cette conversion se déroule en deux (2) étapes :

- ✓ *Au niveau de la turbine (rotor)* : elle capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique;
- ✓ *Au niveau de la génératrice* : elle reçoit l'énergie mécanique et la transforme en énergie électrique;

Le schéma des principaux composants du système de conversion éolienne est illustré par la figure 1.16.

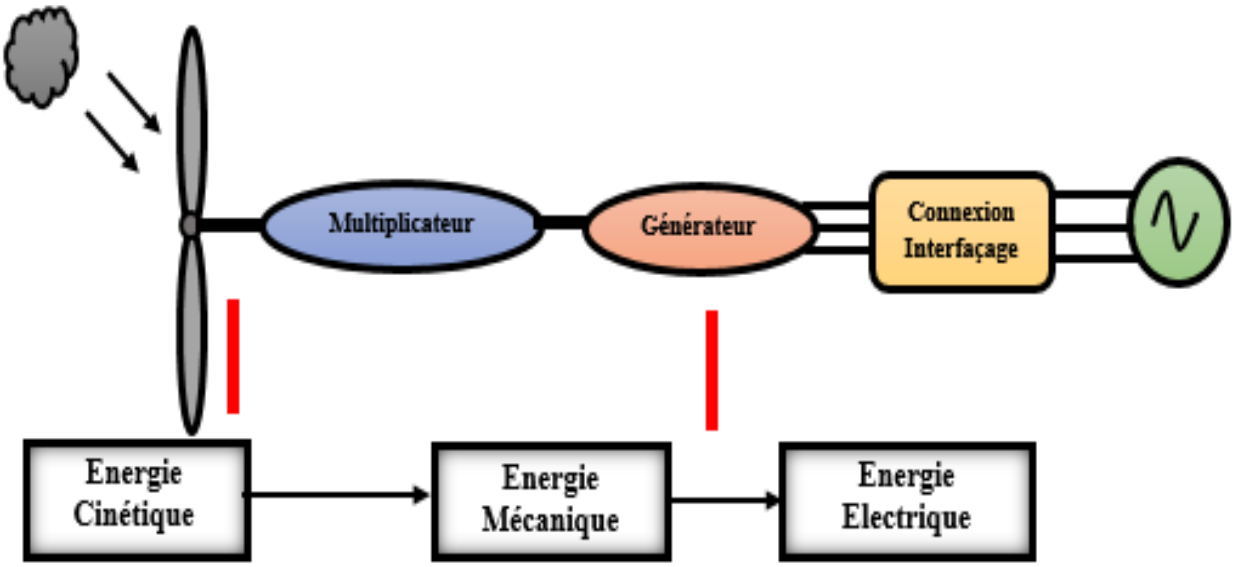


Figure 1.16 Principe de la conversion d'énergie éolienne

L'énergie éolienne est modulaire, permettant de maintenir la majorité de l'installation en fonctionnement même si une pièce est défectueuse et elle est rentable dans les régions bien ventées. Cependant, elle présente plusieurs inconvénients :

- La production d'énergie est affectée par les variations météorologiques ;
- Coût de construction ;
- Les équipements étant situés au sommet de la tour, cela complique les interventions en cas d'incident ;
- Les éoliennes peuvent générer du bruit et altérer le paysage environnant.

1.8 .1 Configurations d'aérogénérateurs

Il existe plusieurs configurations d'aérogénérateurs qui se classifient principalement en deux (2) grandes familles selon leurs structures : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [59].

Les éoliennes à axe vertical ont vu leur utilisation diminuer en raison de leur capacité limitée à capter l'énergie du vent, tandis que les éoliennes à axe horizontal sont les plus courantes et largement utilisées.

a) Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures conçues pour la production d'électricité. Leur principal avantage réside dans le fait que les organes de commande et le générateur sont situés au niveau du sol, ce qui les rend facilement accessibles. Cependant, certaines de ces éoliennes nécessitent un démarrage assisté, ce qui contribue à leur faible popularité et à leur méconnaissance [60].

On distingue principalement trois (3) technologies d'éoliennes à axe vertical (voir la Figure 1.17)

- Turbines Darrieus classiques ;
- Turbines Darrieus à pâles droites (type H) ;
- Turbines de type Savonius .

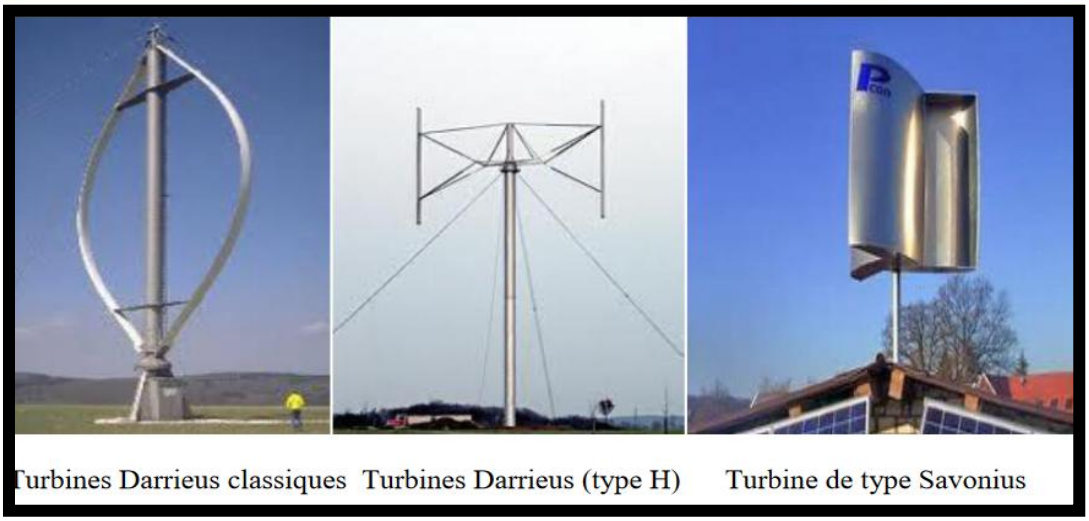


Figure 1.17 Eoliennes à axe vertical [61].

Les avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical sont :

Avantages :

- *Faible vitesse de rotation :* les éoliennes à axe vertical tournent à une vitesse plus faible que celles à axe horizontal, ce qui les rend plus silencieuses et plus sûres ;
- *Performance en vent faible :* elles sont généralement plus efficaces à des vitesses de vent plus faibles, ce qui les rend adaptées aux zones où les vents sont légers ;
- *Adaptabilité :* leur conception compacte leur permet d'être installées dans des espaces restreints, ce qui est particulièrement avantageux pour les installations urbaines ou sur des bâtiments ;

Inconvénients :

- *Coût :* les éoliennes à axe vertical sont souvent plus coûteuses à l'achat que leurs homologues à axe horizontal ;
- *Production d'énergie :* elles produisent généralement moins d'énergie que les éoliennes à axe horizontal de puissance similaire, en raison de leur forme, de leur taille et de leur vitesse de rotation ;
- *Efficacité :* à des vitesses de vent plus élevées, elles tendent à être moins efficaces, ce qui peut limiter leur rendement énergétique ;

b) Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal offrent une production d'énergie élevée et une meilleure efficacité à des vitesses de vent élevées, tout en étant généralement moins couteuses.

Cependant, leur vitesse de rotation peut engendrer des nuisances sonores et des risques pour les oiseaux, et elles sont moins adaptées aux zones avec des vents faibles ou aux installations urbaines.

Une éolienne à axe horizontal montré par la figure 1.18 est généralement constituée par les trois (3) éléments de base qui sont : le mât (tour ou pylône), le rotor (moyeu) et les pales.

Figure 1.18 Composantes d'une éolienne à axe horizontal [62].

Les éoliennes à axe horizontal présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Avantages :

- ✓ *Production d'énergie* : elles produisent généralement plus d'énergie que les éoliennes à axe vertical de puissance équivalente ;
- ✓ *Efficacité* : elles sont plus efficaces à des vitesses de vent élevées, améliorant ainsi leur rendement énergétique ;
- ✓ *Coût* : elles sont généralement moins coûteuses à l'achat que les éoliennes à axe vertical ;

Inconvénients :

- ✓ *Vitesse de rotation élevée* : leur rotation rapide peut générer plus de bruit ;
- ✓ *Performance en vent faible* : elles sont moins efficaces dans des conditions de vent faible, ce qui les rend moins adaptées aux zones peu venteuses ;
- ✓ *Adaptabilité* : elles nécessitent un espace important pour fonctionner, limitant leur utilisation en milieu urbain ;

1.8.2 Constitution d'une éolienne

Les éoliennes se composent principalement d'un mât qui supporte le rotor, les pales et la nacelle (figure 1.19). Le rotor, avec ses pales, convertit l'énergie du vent en énergie mécanique, tandis que le générateur électrique transforme cette énergie en électricité. Le multiplicateur ajuste la vitesse pour optimiser le fonctionnement du générateur.

Une éolienne est constituée de plusieurs composants essentiels.

- ✓ *Mât :* structure en acier ou treillis qui supporte l'éolienne et abrite les câbles d'énergie ;
- ✓ *Rotor* : partie avec des pales qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ;
- ✓ *Pales :* captent l'énergie du vent, leur nombre influence l'efficacité du rotor ;
- ✓ *Moyeu :* support des pales, il régule leur orientation ;
- ✓ *Nacelle* : contient les éléments pour coupler la turbine au générateur ;
- ✓ *Générateur électrique* : transforme l'énergie mécanique en électricité ;
- ✓ *Multiplicateur :* ajuste la vitesse de rotation pour optimiser le générateur .

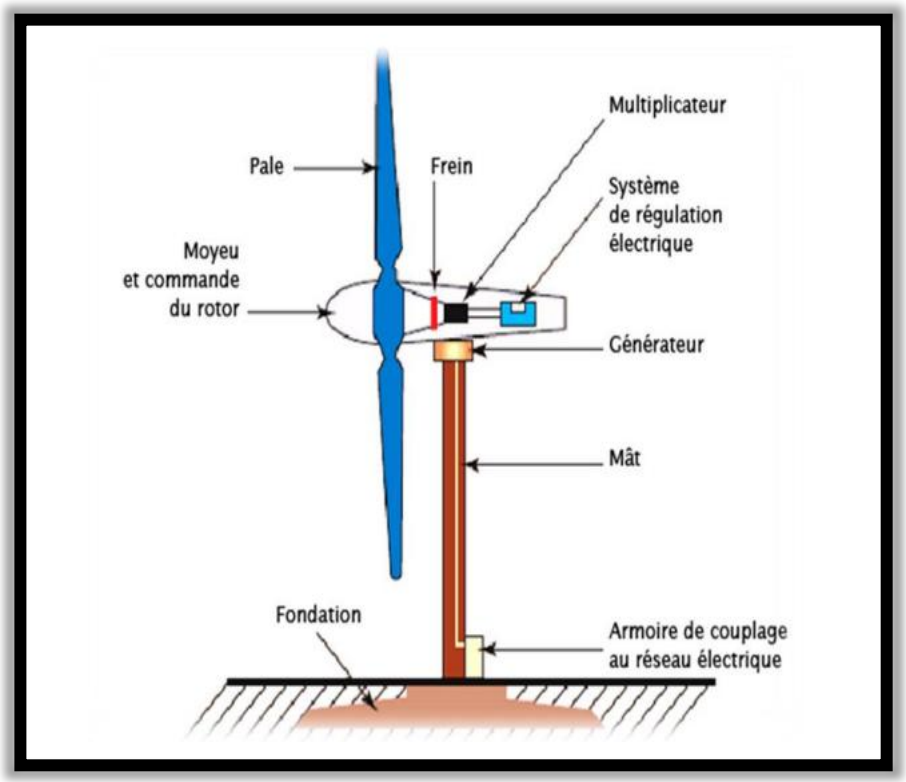


Figure 1.19 Composants d'une turbine éolienne [63]

1.9 Stockage d’énergie électrique

Le stockage d'énergie consiste à conserver une quantité d'énergie provenant d'une source, sous une forme qui pourra être utilisée ultérieurement. Le système de stockage agit comme un réservoir d'énergie, absorbant l'excédent de production lorsque les sources en génèrent trop, et restituant cette énergie lorsque la production est insuffisante. Il existe deux (2) types de stockage : le stockage à long terme (comme les batteries) et le stockage à court terme (comme les super-condensateurs) sont des solutions utilisées pour gérer l'énergie de manière efficace [64]. L'objectif principal d'une gestion énergétique optimale est de produire des biens et de fournir des services tout en réduisant les coûts et les impacts environnementaux. Ainsi, une stratégie énergétique peut être définie comme l'utilisation optimale de l'énergie, tant sur le plan stratégique qu'économique, afin de réduire les coûts, augmenter les profits et améliorer la compétitivité.

Le système de gestion de l’énergie (SGE) vise à garantir une utilisation optimale de l’énergie, réduisant les coûts et les pertes énergétiques, sans compromettre la production ou la qualité [65]. Toutefois, la variabilité des (SER), comme le vent et le soleil, combinée à une demande énergétique imprévisible, exige le développement de stratégies spécifiques pour la gestion et la supervision des systèmes hybrides d’énergies renouvelables.

Ces stratégies, adaptées aux objectifs et configurations des systèmes, influencent directement la performance des systèmes multi-sources. Leur efficacité et leur fiabilité dépendent à la fois du dimensionnement et du choix des composants, de leur configuration et, surtout, de la stratégie de gestion adoptée. Une gestion optimale repose sur un contrôle précis des flux de puissance entre les différentes sources et sur une maîtrise fine des convertisseurs associés. Ces convertisseurs jouent un rôle clé en maximisant la puissance produite ou en ajustant la production en fonction des besoins, tout en assurant le suivi des références, la réponse rapide aux perturbations et une adaptation efficace aux exigences du système [66].

1.9.1 Batteries de stockage

Le mode de stockage d'énergie électrique le plus utilisé actuellement est l'accumulateur. Que ce soit pour les téléphones portables, les voitures ou les installations hybrides, les batteries sont largement répandues. La technologie est fondée sur le principe chimique de la pile, dans lequel l'énergie est stockée sous forme chimique. En essence, une batterie se compose de deux électrodes, l'anode et la cathode, et d'un électrolyte qui entre en contact avec ces électrodes.

L'électrolyte facilite la circulation des ions, ce qui permet la génération d'un courant électrique [67-69]. Les batteries au Nickel-Cadmium sont largement utilisées dans les véhicules électriques. Toutefois, leur principal inconvénient réside dans l'utilisation du cadmium, un métal lourd. Par ailleurs, il existe diverses technologies dérivées des batteries au lithium, telles que les batteries lithium-ion, lithium-polymère, lithium-métal-polymère, etc... Les accumulateurs sont des dispositifs largement utilisés pour le stockage électrochimique de petite taille. Ils reposent sur des technologies bien établies, offrant des coûts compétitifs, et fonctionnent grâce à une réaction d'oxydoréduction, similaire à celle d'une pile, pour stocker de l'énergie électrique. Leur rendement varie autour de 85%, en fonction du type d'accumulateur utilisé [70]. Chaque batterie est constituée d'une anode et d'une cathode plongées dans une solution ionique. Lors de la charge, une réaction d'oxydation se produit au niveau de la cathode, permettant ainsi le stockage de l'énergie.

Les batteries se classifient principalement en trois (3) grandes familles :

- ✓ *Batterie Plomb-Acide :* la plus ancienne et la moins coûteuse des batteries rechargeables ;
- ✓ *Batterie Nickel-Cadmium:* utilise des électrodes en oxyhydroxyde de nickel et en cadmium dans un électrolyte Alcalin ;
- ✓ *Batterie Lithium :* couramment utilisée dans les appareils électroniques, comme les ordinateurs et les téléphones portables ;

1.9.2 Charges

Les charges électriques se divisent en deux catégories : résistives et inductives. Les charges résistives comprennent des appareils tels que les ampoules à incandescence et les chauffe-eaux [71]. Les dispositifs équipés de moteurs électriques constituent des charges à la fois résistives et inductives, étant les principaux responsables de la consommation de puissance réactive. Bien que les charges à courant continu puissent aussi comporter des éléments inductifs, ces derniers génèrent principalement des variations transitoires de tension et de courant lors des réglages du fonctionnement du système.

1.10 Différents modes de stockage de l'électricité

L'énergie électrique ne peut pas être stockée directement. Il est nécessaire de la transformer préalablement en une autre forme d'énergie stockable (comme l'énergie mécanique ou électrochimique), qui peut être conservée, puis reconvertie en électricité lorsque cela est

nécessaire. Il existe diverses solutions technologiques pour effectuer ces transformations. Voici quelques exemples de méthodes utilisées pour le stockage de l'électricité [72]:

1.10.1 Stockage électrochimique

Le stockage sous forme de batteries électrochimiques est la méthode la plus courante. Bien que les batteries au plomb restent une référence, d'importantes avancées ont été réalisés avec l'émergence des batteries alcalines (notamment Nickel-Métal Hydrure), puis des batteries au lithium. Parmi celles-ci, la technologie Lithium-ion domine aujourd'hui dans les applications exigeantes en performance [73]. Une autre innovation prometteuse est celle des super-condensateurs, qui offrent une puissance élevée et des temps de réponse très courts, bien que leur capacité de stockage soit plus limitée que celle des batteries.

1.10.2 Stockage mécanique

Stockage gravitaire **:** cette méthode repose sur le pompage de l'eau vers un réservoir en altitude pendant la phase de stockage. Lorsqu'il est nécessaire de récupérer l'énergie, l'eau redescend en entraînant une turbine couplée à un générateur. Grâce à son excellent rendement technique et économique, cette solution est la plus utilisée à l'échelle mondiale.

Stockage par air comprimé : cette approche consiste à comprimer de l'air pour le stocker, puis à le libérer pour générer de l'énergie. Pour des volumes importants, des cavités souterraines, comme des cavités salines, peuvent être utilisées pour optimiser la capacité de stockage.

1.10.3 Stockage thermique

Le stockage thermique permet d'accumuler de la chaleur sous différentes formes :

- ✓ *Stockage sensible* : chauffe un liquide ou un solide pour restituer la chaleur ultérieurement ;
- ✓ *Stockage par changement de phase* : exploite des matériaux capables de stocker une grande quantité de chaleur à température constante ;
- ✓ *Stockage physicochimique* : utilise des réactions d'adsorption ou d'absorption réversibles pour limiter les pertes thermiques dans le temps.

Les méthodes de stockage d'énergie se classent en trois (3) grandes catégories :

- ✓ *Stockage court terme* (quelques heures à quelques jours) : utilisé pour des sources d'énergie intermittentes comme le rayonnement solaire, l'éolien, l'énergie des vagues, l'hydraulique au fil de l'eau et la marée.

- ✓ *Stockage moyen terme* (quelques mois) : concerne les grands barrages, l'énergie thermique des mers et les cultures énergétiques annuelles.

- ✓ *Stockage long terme* (une année ou plus) : s'applique à la biomasse forestière et à la géothermie dans les nappes aquifères.

1.11 Conclusion

Ce chapitre offre un aperçu des systèmes de production d'énergie renouvelable. Nous avons commencé par définir ce qu'est un système multi-sources, en soulignant ses avantages et ses limites, ainsi que les diverses architectures des systèmes électriques multi-sources. Ensuite, nous avons présenté les principales sources d'énergie qui les composent, notamment l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne, les batteries et les convertisseurs. Enfin, la dernière section est dédiée à la classification des stratégies de gestion identifiées dans la littérature, en fonction des architectures des systèmes multi-sources et des objectifs spécifiques des utilisateurs.

CHAPITRE 2

MODELISATION DU SYSTEME MULTI-SOURCES

2.1 Introduction

Les énergies renouvelables englobent diverses technologies dont le fonctionnement varie selon la source d'énergie primaire exploitée et le type d'énergie utile générée, principalement l'électricité. Parmi ces sources, l'énergie solaire et l'énergie éolienne se positionnent comme des solutions durables et prometteuses pour la production d'électricité. Dans ce contexte, les laboratoires de recherche se focalisent sur le développement de systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables. Avec l'objectif d'optimiser l'efficacité, d'améliorer les performances et de maximiser l'utilisation des ressources afin de répondre aux besoins énergétiques de manière durable [74-77].

Ce chapitre aborde la modélisation du système multi-sources dans le cadre de notre étude de cas. Au début, une analyse détaillée des modèles relatifs à chaque composant du système, en particulier l'énergie solaire, l'énergie éolienne et le stockage sur batteries. Puis, les modèles de chaque élément essentiel du système multi sources (SMS) sont développés pour être analysé par simulations par la suite. Cette approche permet ainsi d'analyser le comportement du flux énergétique du système de manière approfondie et pertinente.

2.2 Architecture du système multi-sources

Les systèmes multi-sources se répartissent en deux (2) catégories principales. La première regroupe ceux qui sont connectés au réseau électrique afin de contribuer pour couvrir le besoin en énergie des utilisateurs. En revanche, la deuxième catégorie comprend ceux qui sont isolés, conçus pour fonctionner de manière autonome, indépendamment du réseau électrique.

L'architecture globale du SMS étudié dans ce travail est représentée par la figure 2.1. Elle intègre principalement, trois (3) sources d'énergies, La structure et l'interconnexion des différents éléments du système est constituée par :

- Un système GPV composé de plusieurs panneaux solaires, relié au bus DC via un hacheur boost qui optimise la puissance grâce à un algorithme MPPT ;
- Une éolienne qui comprend une turbine à axe horizontal, couplée à une machine synchrone à aimants permanents qui convertit l'énergie AC en DC via un pont à diodes et un hacheur boost, également optimisé par un algorithme MPPT ;

- Un système de stockage composé de batteries connecté au bus DC via un convertisseur bidirectionnel, permettant de réguler le flux de courant et d'ajuster la tension entre les batteries et le bus [78].

Ces différentes sources d'énergie sont connectées à un bus DC, qui fournit de l'énergie à la fois à une charge en courant continu et à une charge en courant alternatif à un onduleur triphasé, assurent la conversion et l'interface nécessaires. L'architecture et les interconnexions des composants du système sont conçues pour garantir un fonctionnement harmonieux et optimal.

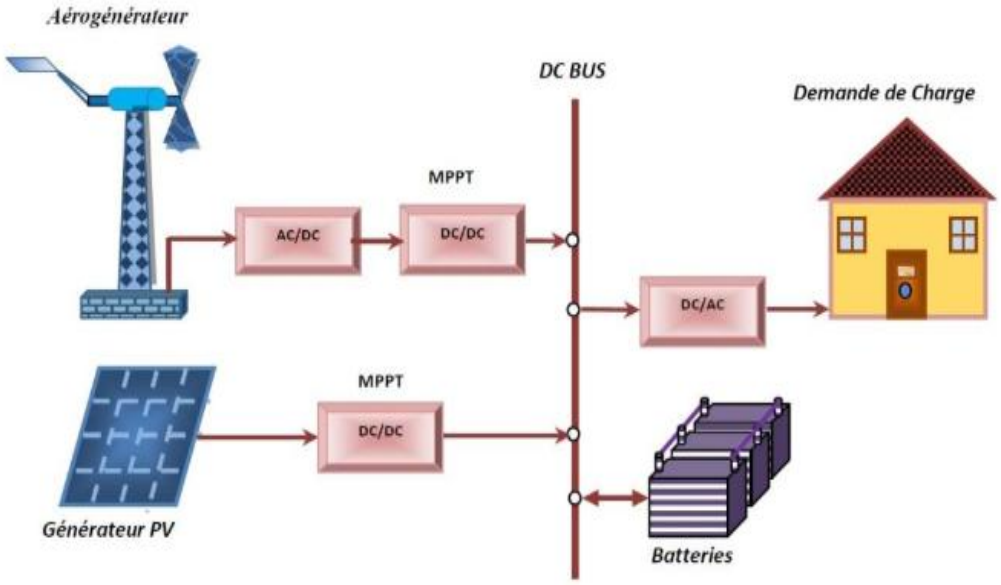


Figure 2.1 Architecture du (SMS) de production d'énergie

2.3 Modélisation de système photovoltaïque

2.3.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur capable de convertir une partie de l'énergie solaire en électricité, déterminant ainsi son rendement de conversion. Elle constitue l'élément fondamental des systèmes photovoltaïques [79]. En effet, pour augmenter la quantité de la puissance produite, plusieurs cellules sont assemblées en modules. La connexion en série des cellules permet d'augmenter la tension, tandis que le branchement en parallèle augmente l'intensité du courant. Les panneaux solaires sont formés par l'association, en série et/ou en parallèle, de ces modules [80-83].

La modélisation des cellules photovoltaïques dépend du type de modèle employé (à une ou à deux diodes). Ces modèles se distinguent par le nombre de paramètres qui affectent la tension et le courant en sortie du générateur photovoltaïque.

2.3.2 Description du modèle électrique et mathématique d'un générateur photovoltaïque

a) Modèle à une diode

Le modèle le plus couramment utilisé dans la littérature représente le panneau photovoltaïque à l'aide d'un générateur de courant simulant le flux lumineux incident, d'une diode reproduisant les effets de polarisation, ainsi que de deux résistances : une en série (R_s) et une en parallèle (R_{sh}). Ce modèle est illustré par la figure 2.2.

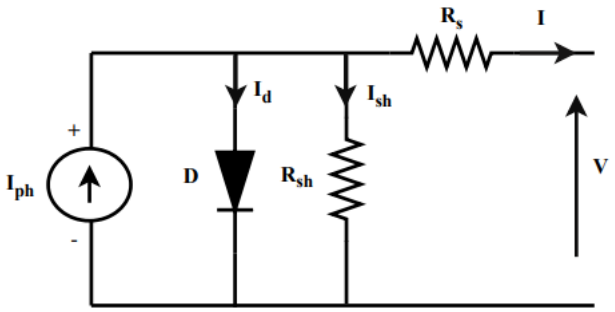


Figure 2. 2 Schéma équivalent du modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque

Où,

- *Résistance série :* représente la résistance interne de la cellule, principalement liée au matériau semi-conducteur utilisé ;
- *Résistance shunt :* correspond au courant de fuite à travers la jonction, influencée par la qualité de sa fabrication.

Les résistances R_S et R_{Sh} influencent la relation entre le courant (I) et la tension (V), le courant de la diode (I_d) et celui de la cellule (I) sont, respectivement, données par les relations (2.1) et (2.2) suivantes :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{g.(V+R_S.I)}{A.K.T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Le courant généré par la cellule PV est déterminée par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.2)$$

Donc,

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{g.(V+R_S.I)}{A.K.T}} - 1\right) - \left(\frac{V+R_S.I}{R_{sh}}\right) \quad (2.3)$$

Où,

I : courant de cellule (A) ;

V : tension de cellule (V) ;

I_{ph} : photo-courant de la cellule (A) ;

R_s : résistance série de la cellule (Ω) ;

R_{sh} : résistance shunt de la cellule (Ω) ;

T : température de la cellule (°K) ;

q : charge de l'électron e =1.6.10^{-19} (C) ;

I_0 : courant de saturation (A) ;

K : constante de Boltzmann (1.3854.10-^{23} J/K) ;

n : facteur de non idéalité de la diode.

b) Modèle à deux diodes

La cellule photovoltaïque est également modélisée par un circuit électrique équivalent, comme illustré dans la figure 2.3. Ce circuit comprend une source de courant qui reproduit l'effet du flux lumineux, deux diodes (D_1 et D_2) modélisant La polarisation de la cellule est représentées par une résistance en parallèle (shunt) et une résistance en série [84].

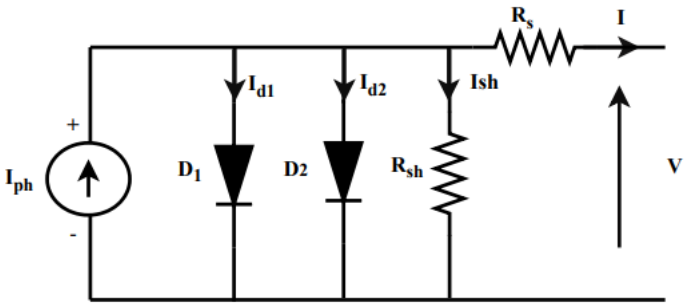


Figure 2.3 Schéma équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

Le courant généré par la cellule PV est déterminé en appliquant la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (2.4)$$

$$I_{d1} = I_{01}\left(e^{\frac{g.(V+R_S.I)}{A.K.T}} - 1\right) \quad (2.5)$$

$$I_{d2} = I_{02}\left(e^{\frac{g.(V+R_S.I)}{A.K.T}} - 1\right) \quad (2.6)$$

Avec, I_{01} et I_{02} courants de saturation des diodes D_1 et D_2, respectivement.

Au final, on obtient :

$$I = I_{ph} - I_{01}\left(e^{\frac{g.(V+R_S.I)}{A.K.T}} - 1\right) - I_{02}\left(e^{\frac{g.(V+R_S.I)}{A.K.T}}\right) - \left(\frac{V+R_S.I}{R_{sh}}\right) \quad (2.7)$$

2.3.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres du modèle peuvent être determines à partir des équations caractéristiques *I=f(V)*. Le courant de court-circuit (I_{CC}) représente le courant circulant lorsque la tension aux bornes de la cellule ou du générateur photovoltaïque est égale à zero. Dans le cas idéal (avec $R_s = 0$ et $R_{sh} = \infty$), ce courant est égal au photocourant (I_{ph}).

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0\left(e^{q\left(\frac{R_S I_{cc}}{n.K.T}\right)} - 1\right) - \frac{I_{cc}R_s}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

Pour la majorité des cellules photovoltaïques, la résistance série est faible. Par consequent, il est possible de la négliger dans l'équation (2.8), et donc on ontient:

$$I_0\left(e^{q\left(\frac{R_S I_{cc}}{n.K.T}\right)} - 1\right) \quad (2.9)$$

Ainsi, l'expression simplifiée du courant de court-circuit devient:

$$I_{cc} = \frac{I_p}{\left(1-\frac{R_S}{R_{sh}}\right)} \quad (2.10)$$

a) Tension de circuit ouvert

La tension en circuit ouvert (V_{co}) correspond à la tension maximale qu'une cellule ou un GPV peut atteindre lorsque aucun courant n'est délivré [85].

$$I_{cc} = I_p - I_0\left(e^{q\left(\frac{V_{co}}{n.K.T}\right)} - 1\right) - \frac{V_{c0}}{R_{sh}} \quad (2.11)$$

Dans des conditions idéales, la valeur de (V_{co}) est légèrement inférieure à celle théoriquement prévue :

$$V_{c0} = \left(\frac{q}{nKT}\right).ln\left(\frac{I_p}{I_0} + 1\right) \quad (2.12)$$

b) Facteur de forme

Le facteur de forme (FF) est déterminé par le rapport entre la puissance maximale que l'on peut extraire ($V_{pm} \cdot I_{pm}$) de la cellule photovoltaïque dans des conditions de test standardisées et le produit de la tension en circuit ouvert (V_{co}) par le courant de court-circuit (I_{cc}).

$$FF = \frac{I_{pm}V_{pm}}{I_{cc}V_{c0}} \quad (2.13)$$

c) Rendement

Le rendement (η) des cellules photovoltaïques correspond à la conversion de puissance. IL est calculé comme le rapport entre la puissance maximale (P_m) générée par la cellule et la puissance lumineuse incidente (P_{in}).

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF.V_{c0}\, I_{CC}}{P_{in}} \tag{2.14}$$

L'amélioration de ce rendement passe par l'augmentation du facteur de forme, de l'intensité du courant de court-circuit ainsi que, de la tension en circuit ouvert.

d) Module photovoltaïque

La puissance disponible en sortie du module photovoltaïque est donnée par:

$$P_{pv} = N_s.V_{pv}.N_p.I_{pv} \tag{2.15}$$

Avec,

N_S: nombre de cellules photovoltaïques connectées en série;

N_P: nombre de cellules photovoltaïques connectées en parallèle.

e) Connection en série

La connexion en série de N_s cellules permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules étant traversées par le même courant, la tension globale du groupement en série est obtenue en additionnant les tensions individuelles de chaque cellule, comme le montre la figure 2.4. Le système d'équations (2.16) décrit les propriétés électriques d'un assemblage en série de N_s cellules [86].

$$\begin{cases} I_{cc,\eta s} = I_{cc} \\ V_{c0,\eta s} = N_s.V_{c0} \end{cases} \tag{2.16}$$

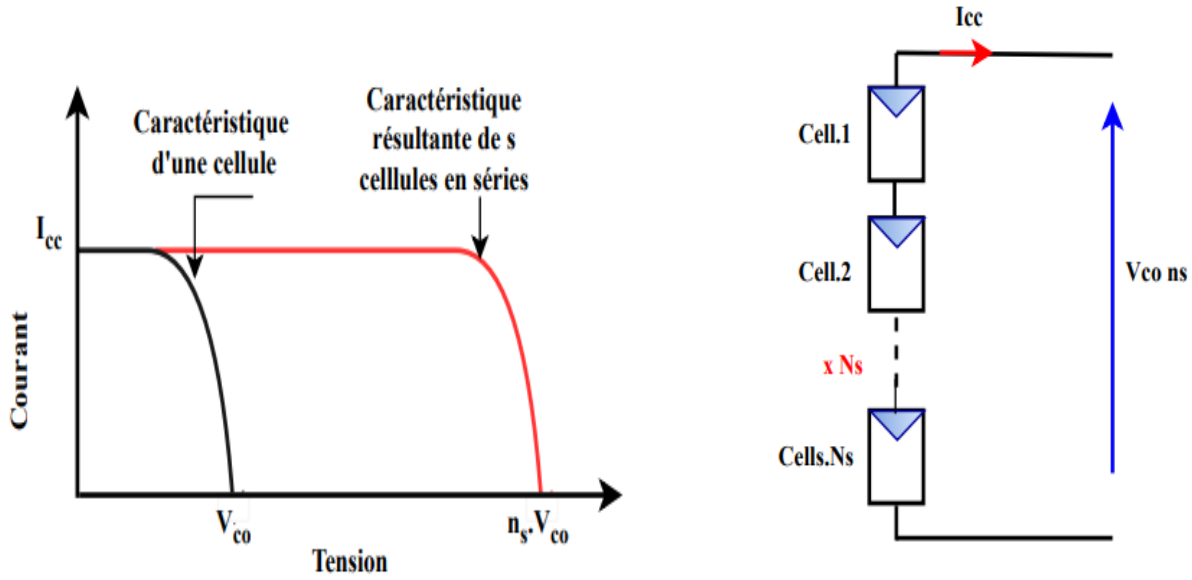


Figure 2. 4 Caractéristiques d'une connexion N_s cellules en série

f) Connection en parallèle

Une connexion en parallèle de Np cellules permet d'augmenter le courant de sortie. Lorsque des cellules identiques sont connectées en parallèle, elles sont toutes soumises à la même tension. La caractéristique globale est alors obtenue en sommant les courants individuels de chaque cellule, comme le montre la figure 2.5. Le système d'équations (2.17) synthétise les caractéristiques électriques d'un montage en parallèle de Np cellules.

$$\begin{cases} I_{cc,\eta s} = N_s . I_{cc} \\ V_{c0,\eta s} = V_{c0} \end{cases} \quad (2.17)$$

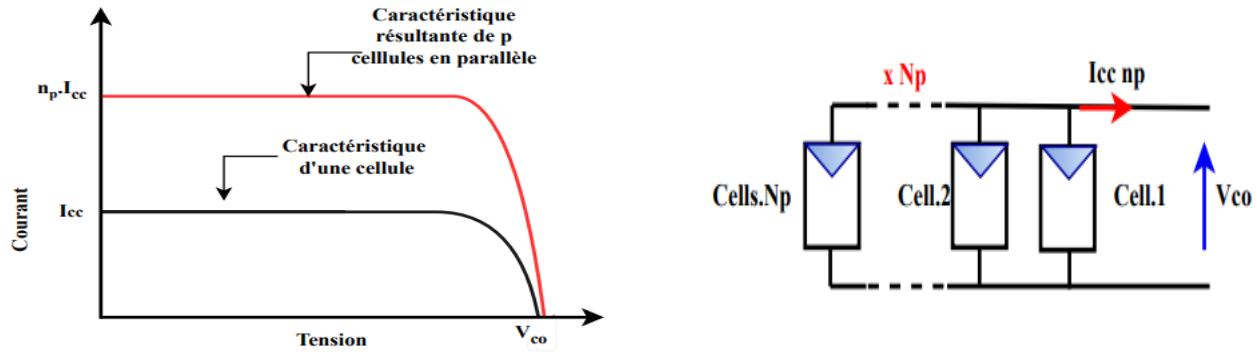


Figure 2.5 Caractéristiques d'un groupement de Np cellules en parallèle

2.3.4 Influence de l'irradiation sur le générateur photovoltaïque

L'influence de l'ensoleillement (irradiation solaire) sur les caractéristiques du panneau est illustrée par la figure 2.6, qui représente les courbes $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour différentes températures, à irradiation fixe [87]. On observe que l'effet de la température sur le courant est négligeable. Cependant, il est clair que l'augmentation de la température provoque une baisse de la tension en circuit ouvert:

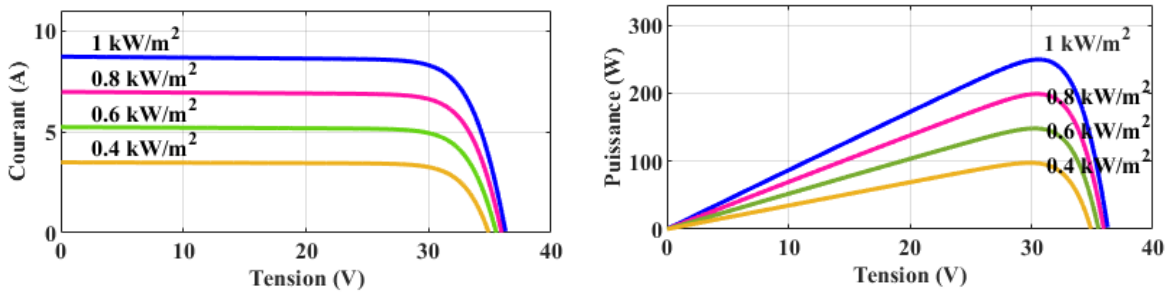


Figure 2.6. Caractéristiques de $I_{pv}=f(V)$ and $P_{pv}=f(V)$ sous différentes irradiations

La puissance générée par le panneau croît avec l'irradiation solaire, ce qui entraîne une augmentation du courant produit. Ce courant est quasiment proportionnel à l'intensité de l'irradiation solaire. L'ensoleillement affecte à la fois le courant de court-circuit et, dans une moindre mesure, la tension en circuit ouvert, ce qui implique que la position du point de puissance maximale varie en fonction de l'éclairement.

2.3.5 Influence de la température des cellules sur le générateur photovoltaïque

L'influence de la température des cellules sur la caractéristique du panneau est illustrée par la figure 2.7.

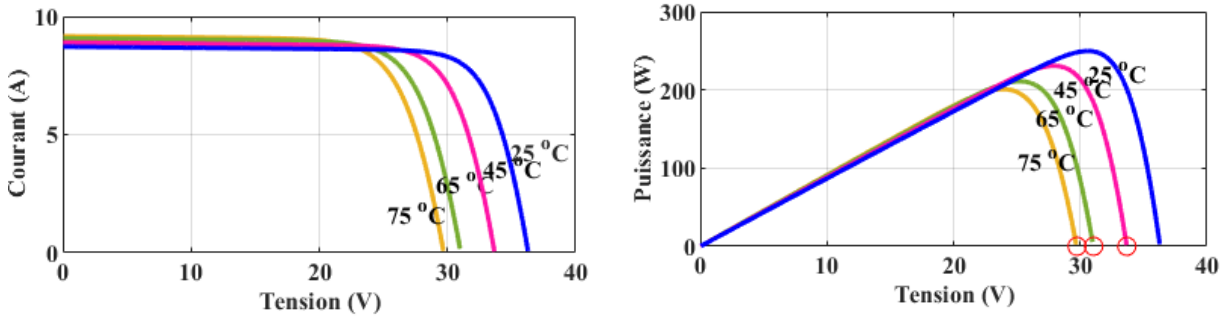


Figure 2.7 Influence de la température

Contrairement à l'irradiation solaire, la température des cellules a un effet négatif sur la puissance délivrée par le panneau. En effet, une augmentation de la température provoque une baisse de la puissance et de la tension aux bornes du panneau.

Les courbes illustrées dans les figures 2.6 et 2.7 sont obtenues à partir d'un panneau de 250 W, avec $N_p = 1$ et $N_s = 8$. On observe que l'ensoleillement affecte principalement le courant I_{pv} du générateur, tandis que la tension V_{pv} est moins impactée. En revanche, la température influence surtout la tension plutôt que le courant. Ainsi, l'ensoleillement augmente la puissance produite par le module, alors que la température la diminue.

2.4 Modélisation du système éolienne

Le transfert de puissance entre le moyeu des pales et le générateur est généralement assuré par un multiplicateur de vitesse. Un convertisseur de puissance est installé entre le générateur et la charge pour adapter l'énergie produite aux exigences de la charge. Un système de contrôle et de régulation garantit une conversion optimale, tant en régime stationnaire qu'en régime dynamique [88-91].

La chaîne de conversion éolienne retenue pour cette étude concerne une éolienne à axe horizontal, dotée de trois pales et d'une génératrice synchrone à aimants permanents (PMSG), comme illustré dans la figure 2.8.

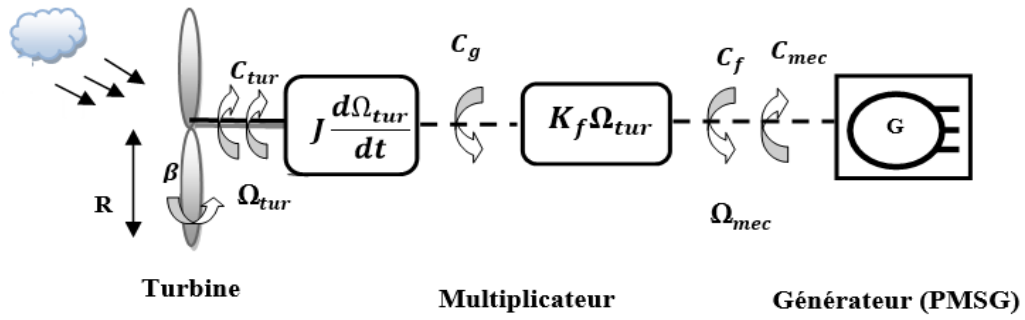


Figure 2.8 Chaine de conversion éolienne

2.4.1 Puissance de la turbine éolienne

Une éolienne se compose de deux éléments essentiels: un système mécanique et un système aérodynamique. L'énergie (dE) d'une colonne d'air de longueur (dl), de section (S) et de masse volumique (ρ), se déplaçant à une vitesse (V_v) (voir Figure 2.9), peut être exprimée à l'aide de l'équation 2.18 [92].

$dE = \frac{1}{2} \rho S dl V_v^2$ (2.18)

La puissance éolienne est donnée par:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho . S . V_v^3 \quad (2.19)$$

Avec,

P_t: puissance de la turbine (W) , ρ : densité de l'air (kg/m^3) , S : surface de la voilure (m^2), V_v^3 : vitesse du vent (m/s) .

Où,

$$S = 2 . R . H \quad (2.20)$$

R : rayon de la voilure (m) , H : hauteur de la turbine (m) .

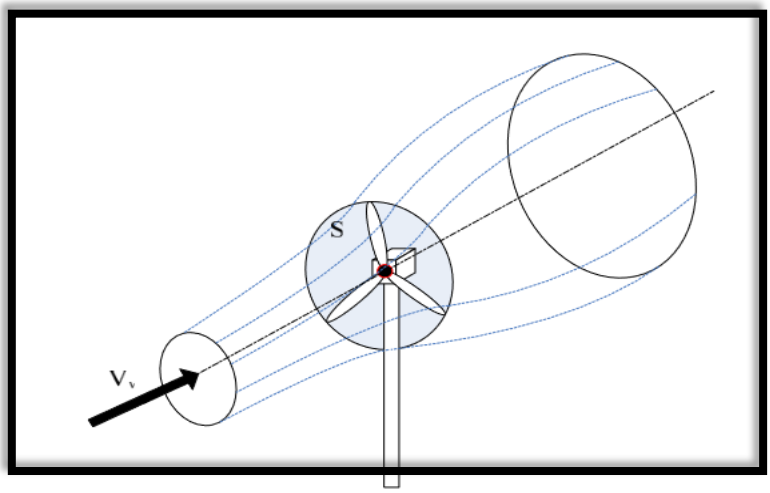


Figure 2.9 Conversion de l'énergie aérodynamique en énergie mécanique [93]

2.4.2 Coefficient de vitesse réduite

Le coefficient de vitesse réduite (λ) est un paramètre clé caractérisant l'aérodynamisme des turbines éoliennes. Il correspond au rapport entre la vitesse tangentielle à l'extrémité des pales et la vitesse instantanée du vent V_v [94] :

$$\lambda = \frac{R\Omega_{mec}}{V_v} \quad (2.21)$$

Ω_m : vitesse de rotation mécanique (rad/s) , R : rayon des pales (m) .

2.4.3 Coefficient de puissance

Une éolienne ne peut pas exploiter l'intégralité de la puissance (P) du flux d'air, car cela entraînerait une vitesse du vent nulle après son passage à travers les pales, bloquant ainsi la circulation de l'air [95]. L'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique est mesurée par le coefficient de puissance (C_p), défini par l'équation suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P} = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho S V^3 v} \quad (2.22)$$

Où, P_t est la puissance captée par la turbine éolienne.

Le C_p est une grandeur variable en fonction de λ et de l'angle de calage des pales (β). La valeur maximale théorique possible est $C_p = 0.5926$, connue sous le nom de limite de Betz [96]. Elle représente la fraction maximale d'énergie cinétique du vent qu'une éolienne peut convertir en énergie mécanique et elle est donnée par l'équation (2.23).

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5\right) exp\left(\frac{21}{\lambda_i}\right) + 0.0068\lambda \quad (2.23)$$

Avec,

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.24)$$

La puissance éolienne s'écrira:

$$P_t = C_p P = \frac{1}{2}\rho . \pi . R^2 . {V_v}^3 . C_p(\lambda) \quad (2.25)$$

P_t: puissance éolienne, C_p: coefficient de puissance, β: angle de calage , λ: vitesse spécifique.

2.4.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur joue un rôle essentiel en ajustant la faible vitesse de rotation de la turbine à la plus grande vitesse requise par la génératrice, tout en transformant le couple aérodynamique en un couple compatible avec cette dernière (voir la figure 2.10). Il contribue ainsi à garantir le fonctionnement optimal du système [97].

$$C_g = \frac{C_{tur}}{G} \quad (2.26)$$

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.27)$$

C_g : couple de la géneratrice ;

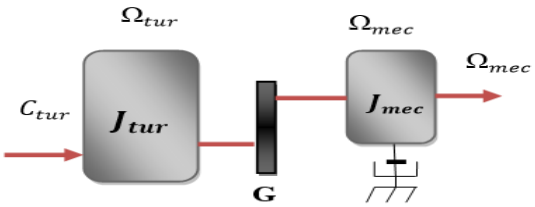


Fig. 2. 10 Partie mécanique de la turbine éolienne

2.4.5 Equation dynamique de l'arbre

L'équation dynamique s'écrit ainsi :

$$J\frac{d\Omega_{tur}}{dt} = C_g - C_{em} - C_f \quad (2.28)$$

$$C_f = K_f\Omega_{mec} \quad (2.29)$$

Ω_{tur} : vitesse angulaire mécanique de l'arbre (rad/s) ;

J : inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice ;

$\frac{d\Omega_{tur}}{dt}$: accélération angulaire ;

C_{mec} : couple mécanique produit par le générateur (N.m) ;

C_f : couple de frottements ;

K_f : coefficient de frottement .

À partir des relations précédemment établies, le comportement dynamique de la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être représenté à l'aide du schéma-bloc illustré par la figure 2.11.

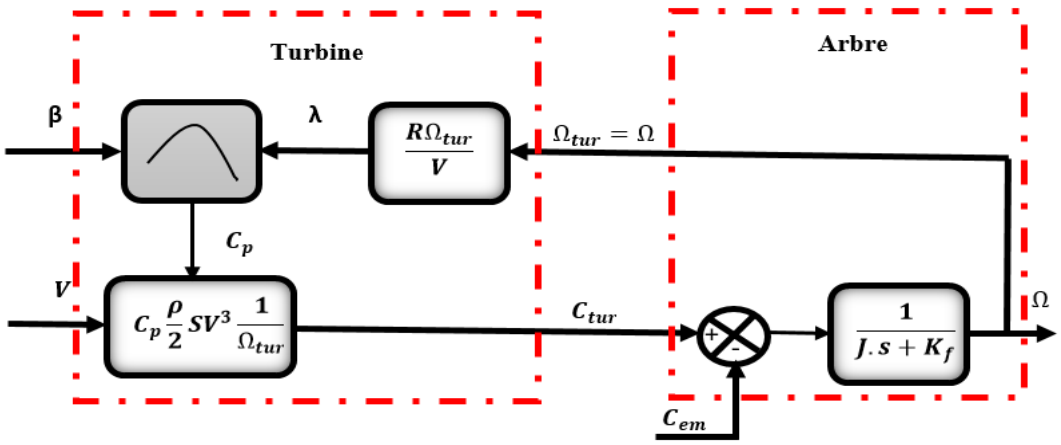


Figure 2.11 Schéma bloc du système turbine éolienne

2.4.6 Simulation du système éolien

La figure 2.12 illustre la variation du coefficient de puissance en fonction de λ et β.

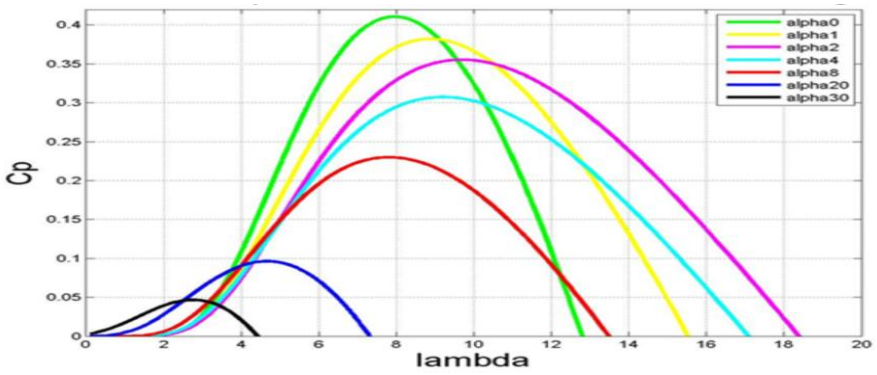


Figure 2.12 Courbe C_p en fonction de λ pour differentes valeurs de β

La puissance captée par la turbine éolienne dépend de plusieurs facteurs, notamment la vitesse du vent, l'angle des pales, la densité de l'air, etc... Elle est décrite par l'équation (2.30).

$$P_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\lambda,\beta){V_v}^3 \qquad (2.30)$$

En substituant l'expression de la vitesse réduite (λ) donnée par l'équation (2.24) dans l'équation (2.25), il devient possible de tracer les caractéristiques de puissance de l'éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω_{mec} . Ces caractéristiques varient en fonction de la vitesse du vent et sont présentées par la figure 2.13.

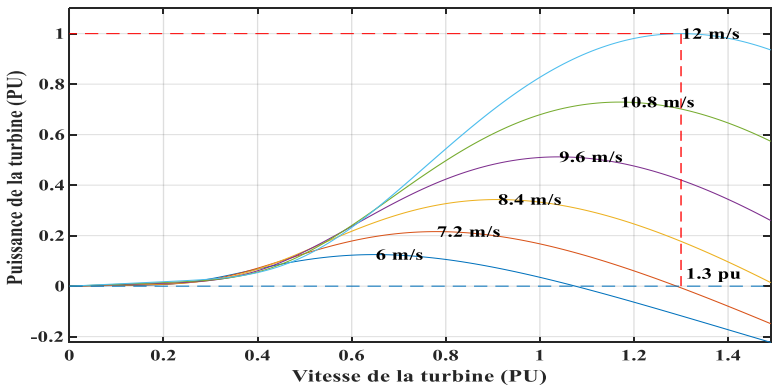


Figure 2.13 Caractéristiques de la turbine

On observe qu'à chaque vitesse de vent spécifique, il existe une unique vitesse de rotation à laquelle l'éolienne génère sa puissance maximale.

2.5 Modélisation du sytème de stockage

Particulièrement, les SMS qui sont géographiquement isolés (non connectés au réseau) doivent intégrer au moins une source d'énergie renouvelable et nécessitent un système de stockage [98-100]. On distingue deux (2) types de stockage : le stockage à court terme atténue les fluctuations des EnR et réduit la consommation de carburant, tandis que le stockage à long terme assure une continuité d'approvisionnement, même pour les systèmes raccordés au réseau. Les méthodes de stockage de l'électricité sont diverses et varient en fonction des besoins spécifiques et des types d'applications.

Les systèmes de conversion d'énergies renouvelables produisent de l'électricité en fonction des conditions climatiques, comme l'ensoleillement, la température et la vitesse du vent. Étant donné que la production d'un SMS peut parfois excéder les besoins énergétiques de la charge, l'intégration d'un dispositif de stockage d'énergie devient indispensable [107-108]. Ce dernier permet d'accumuler l'excédent d'énergie produite (charge des batteries) et de la restituer lorsque la demande dépasse la capacité de production (décharge des batteries), assurant ainsi une alimentation continue, indépendamment des variations climatiques. L'énergie stockée peut ainsi être utilisée aux moments les plus opportuns [101].
Les batteries, en tant que systèmes de stockage d'énergie, requièrent une optimisation continue pour maximiser leur efficacité. Leurs caractéristiques principales comprennent : les paramètres à considérer incluent la résistance interne (R_i), la tension à vide (E_0), la tension nominale, la tension de fin de décharge, la capacité, les taux de charge et de décharge, la profondeur de décharge, l'impact des conditions extérieures, la durée de vie et le nombre de jours d'autonomie. De plus, l'état de charge (EDC), exprimé en pourcentage, est un élément clé à prendre en compte [102].

2.5.1 Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs types de batteries, mais leur intégration demeure complexe en raison des nombreux paramètres à considérer. Leur performance et leur comportement varient selon les applications et les contraintes spécifiques. Par conséquent, aucun modèle unique ne peut convenir à toutes les situations [103].

Des modèles mathématiques, comme le circuit équivalent, sont fréquemment utilisés pour représenter le fonctionnement des batteries et prévoir leurs performances dans différents

contextes d'utilisation. La figure 2.14 illustre le circuit électrique équivalent de la batterie utilisée, tandis que les équations (2.29) et (2.30) permettent d'évaluer ses performances.

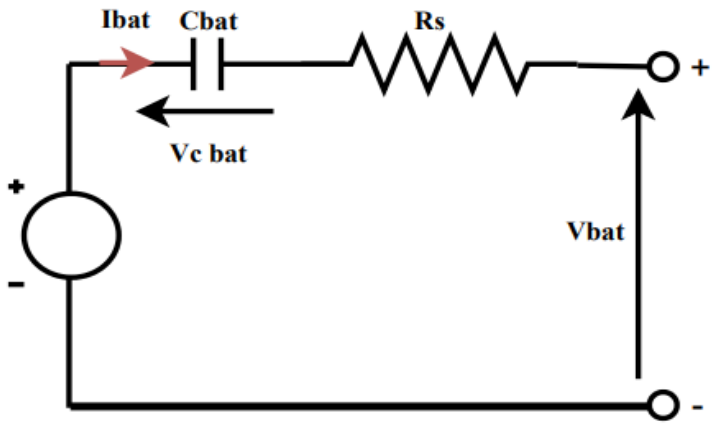


Figure 2. 14 Modèle RC de la batterie

V_{cbat} : source de tension idéale d'entrée (V);

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

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

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

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

La tension aux bornes d'une batterie est donnée par relation suivante :

$$V_{bat} = E_0 - R_{bat}I_{bat} - k.\int \frac{I_{bat}}{Q} dt \quad (2.31)$$

Et, l'état de charge (EDC) d'une batterie est :

$$EDC\% = 100(1 + \frac{\int I_{bat} dt}{Q}) \quad (2.32)$$

Avec, Q est la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}.

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur le stockage réversible, englobant les processus de charge et de décharge, en vue de son intégration dans la configuration du système analysé. Pour assurer une performance optimale, le système de stockage doit permettre une gestion efficace du chargement et du déchargement.

2.5.2 Choix de la batterie

Le choix du type de la batterie solaire est essentiel, notamment pour son intégration dans les systèmes multi-sources. Selon leur technologie, elles se répartissent en trois catégories : les batteries sans entretien, offrant un rendement d'environ 80% ; les batteries au plomb, avec un rendement avoisinant 90% ; et les batteries au lithium-ion, les plus performantes, atteignant un rendement d'environ 98% [104]. L'utilisation des batteries lithium-ion dans les systèmes de gestion des flux énergétiques d'un SMS est justifiée par plusieurs facteurs clés qui répondent aux exigences spécifiques de ces systèmes. Comparées aux batteries plomb-acide ou nickel-cadmium, les batteries lithium-ion offrent une densité énergétique supérieure, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications de stockage d'énergie nécessitant une fiabilité à long terme [105]. Elles présentent également une faible perte d'énergie lors des processus de stockage et de décharge, et sont capables de répondre rapidement aux besoins de charge et de décharge. De plus, les batteries lithium-ion sont généralement plus légères et plus compactes que les autres types de batteries. Un autre indicateur important est la profondeur de décharge **(**DOD, pour *Depth of Discharge* en anglais).

$$DOD = 1 - SOC \tag{2.33}$$

$$D = \frac{BT\ voltage}{V_{out} * \eta} \tag{2.34}$$

$$L_2 = \frac{D.T_s(V_{out} - BTvoltage)}{\Delta IL} \tag{2.35}$$

$$C_2 = \frac{(1-D) * V_{out} * {T_s}^2}{8.L.\Delta V_{out}} \tag{2.36}$$

Il s'agit de l'ondulation de la tension de sortie souhaitée (ΔV_{out}), généralement fixée à 1 % de la tension de sortie. Le paramètre η représente l'efficacité du convertisseur, qui est généralement estimée entre 90% et 95%. Cela concerne également les estimations de l'état de charge des batteries.

2.5.3 Estimation du seuil de charge des batteries

Le seuil de charge représente la capacité restante de la batterie, exprimée en pourcentage de sa capacité totale dans une situation donnée. Une valeur de 100 % indique que la batterie est pleinement chargée à sa capacité maximale, tandis qu'une valeur de 0 % signifie qu'elle est complètement déchargée. Plusieurs méthodes ont été élaborées pour estimer l'état de charge (SOC) de la batterie [106].

2.6 Modélisation des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un dispositif électronique qui converti l'énergie électrique, en utilisant des composants semi-conducteurs (transistors, diodes). Il existe plusieurs types : les redresseurs (AC-DC), les onduleurs (DC-AC) et les hacheurs (DC-DC). Ces convertisseurs statiques sont largement utilisés dans les alimentations électriques, les énergies renouvelables et l'électronique de puissance pour adapter la tension, le courant ou la fréquence selon les besoins des applications.

- ✓ Les DC/DC, qui fournissent une tension continue (DC) différente de celle en entrée;
- ✓ Les DC/AC , qui transforment la tension continue en tension alternative (AC).

2.6.1 Modélisation du convertisseur continu/continu

Dans un SMS alimenté par des sources de tension continue, les convertisseurs DC/DC (hacheurs) assurent la gestion de la puissance et de la tension de sortie. Ces convertisseurs DC/DC permettent d'obtenir une tension fixe ou variable à partir de n'importe quelle tension continue [107].

Il existe trois (3) types de hacheurs couramment utilisés pour réguler la sortie des sources d'énergie continue dans les systèmes multi-sources:

- ✓ Hacheur Boost (Elevateur);
- ✓ Hacheur Buck (Abaisseur);
- ✓ Hacheur Buck-Boost (Reversible).

2.6.1.1 Modélisation du hacheur Boost

Le hacheur boost est un convertisseur DC-DC dont le schéma électrique équivalent est illustré par la figure 2.15. Il se compose d'une inductance (L) en série avec une source de tension (V_e), tandis que la sortie fournit une tension continue (V_s), représentée par un condensateur (C_2) en parallèle. L'interrupteur (K) peut être remplacé par un transistor, étant donné que le courant demeure toujours positif et que les commutations nécessitent un contrôle précis. Une application courante du hacheur boost est d'augmenter la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie plus élevée.

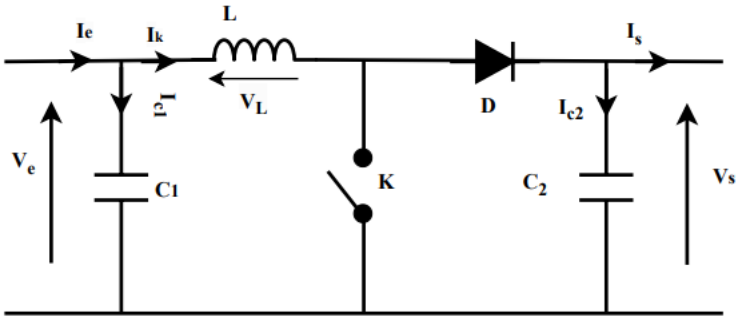


Figure 2.15 Schéma électrique d'un hacheur boost

Le fonctionnement du hacheur se décompose en deux phases distinctes :

- **Intervalle [0, αT] :**

Durant cet intervalle, l'interrupteur K est fermé (état passant), le circuit électrique équivalent du convertisseur boost est illustré à la figure 2.16. Cette configuration permet à l'inductance (L) de stocker de l'énergie sous forme magnétique. La diode étant polarisée en inverse, se bloque et isole ainsi la charge de la source d'alimentation.

$$V_s(1-\alpha) = V_e \tag{2.37}$$

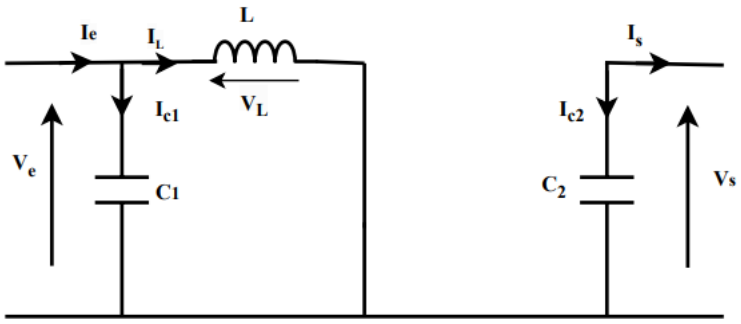


Figure 2.16 Circuit électrique d'un hacheur Boost lorsque K est fermé.

De la figure 2.16, on déduit :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I_e(t) - I_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_e(t) \end{cases} \tag{2.38}$$

- **Intervalle [αT_c , T_c] :**

Durant cet intervalle, l'interrupteur K est ouvert, et donc la diode est passante.
La figure 2.17 représente le circuit électrique équivalent correspondant à cet intervalle.

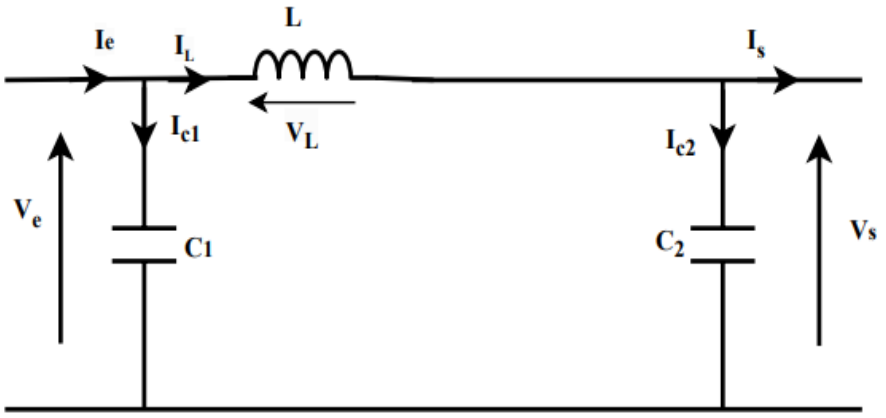


Figure 2.17 Circuit électrique d'un hacheur boost lorsque K est ouvert

De la figure 2.17, on déduit :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I_e(t) - I_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) \end{cases} \quad (2.39)$$

2.6.1.2 Modélisation du hacheur Buck

Le convertisseur buck, souvent désigné dans la littérature sous les termes de hacheur dévolteur ou hacheur série, est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue, tandis que la charge de sortie est de type source de courant continue [108]. Le schéma électrique du hacheur buck est illustré par la figure 2.16.

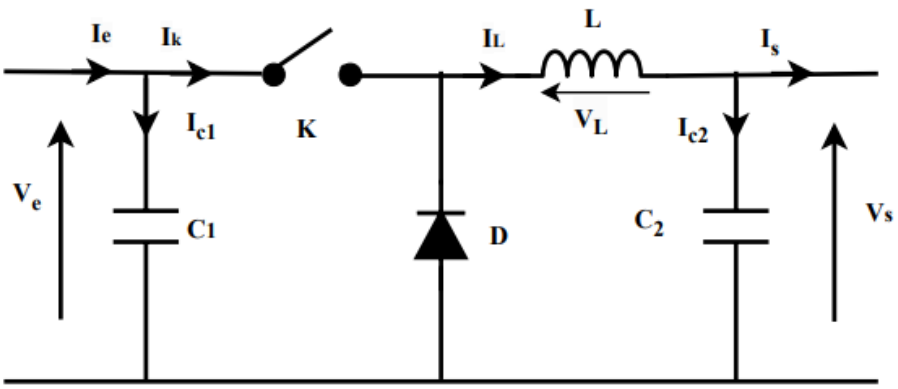


Figure 2. 18 Circuit électrique d'un hacheur buck

a) Fonctionnement

Les chronogrammes de la figure 2.19, tracées dans un cas idéal, montrent un mode de conduction continue, ce qui signifie que le courant ne passe jamais par zéro. Pour établir la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie, on se base sur le principe que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est égale à zéro.

Pendant la durée αT_c où l'interrupteur est fermé, la tension est appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est piloté à une fréquence de découpage $f_c=1/T_c$. Durant cette période, la source V_i alimente à la fois la charge et l'inductance en énergie. Ensuite, dans l'intervalle $t \epsilon[\alpha T_c, T_c]$, l'interrupteur s'ouvre, et l'énergie accumulée dans l'inductance permet au courant de passer à travers la diode de roue libre D. La tension aux bornes de la diode chutte alors à zéro [109].

α : rapport cyclique des impulsions qui commandent les semi-conducteurs.

T_c : étant la période des impulsions.

$$Vo = \alpha Vi \tag{2.40}$$

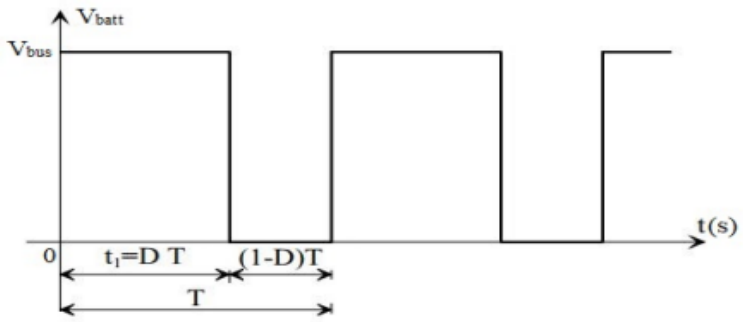


Figure 2.19 Chronogrammes temporels illustrant le courant et la tension d'un hacheur buck

- **Intervalle [0, αT_c] :**

La figure 2.20 illustre le circuit électrique équivalent d'un hacheur buck. quand K est fermé dans cet intervalle .

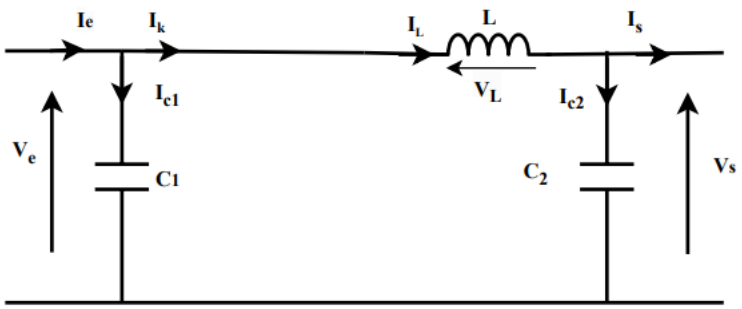


Figure 2.20 Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

En appliquant la loi de Kirchhoff au circuit précédent, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I_e(t) - I_L(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = I_e(t) - I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) \end{cases} \quad (2.41)$$

- **Intervalle [αT_c, T_c]**

La figure 2.21 illustre le convertisseur Buck lorsque l'interrupteur K est ouvert pendant la durée (1-α)T_c.

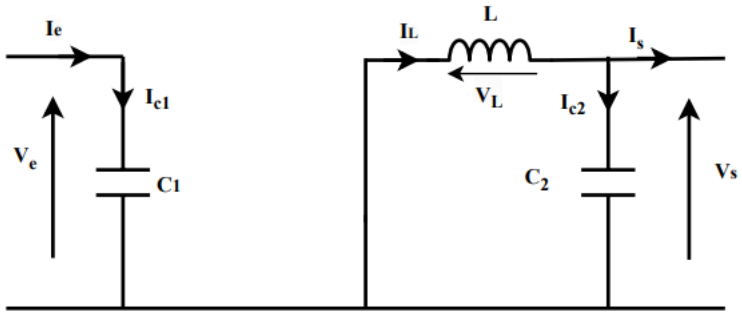


Figure 2.21 Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert

Durant cet intervalle, l'interrupteur K reste ouvert, et la diode est conductrice. Les équations décrivant ce fonctionnement sont les suivantes :

$$\begin{cases} I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_e(t)}{dt} = I_e(t) \\ I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_s(t) \end{cases} \quad (2.42)$$

2.6.1.2 Modélisation du hacheur Buck-Boost

Le hacheur Buck-Boost est un convertisseur qui permet une réversibilité dans l'échange d'énergie (Figure 2.22). Si la source d'alimentation fournit suffisamment d'énergie, le circuit fonctionne en mode charge pour stocker l'excédent dans la batterie [110]. Dans le cas inverse, il bascule en mode de décharge pour alimenter la charge en fournissant l'énergie requise. Ainsi, ce convertisseur assure une alimentation stable et fiable à la charge, indépendamment du bon fonctionnement de la source d'alimentation.

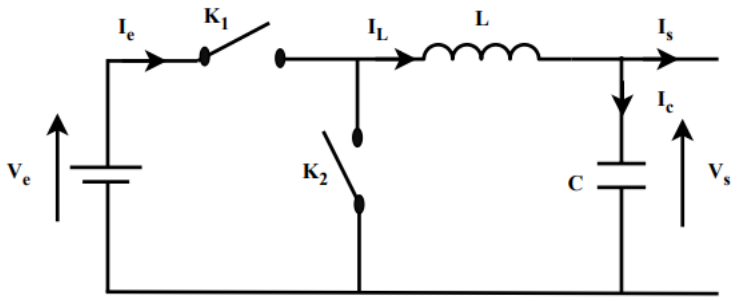


Figure 2.22 Représentation schématique d'un hacheur buck-boost.

Le transfert de l'énergie est défini par le sens du courant I_L, ce qui permet d'identifier deux configurations distinctes:

- **Fonctionnement Buck (Etat de charge)**

Dans ce mode de fonctionnement, le convertisseur agit comme un abaisseur de tension, faisant intervenir l'IGBT (T_1) et la diode D_2. L'énergie fournie par la source (photovoltaïque ou autre) est suffisante, et l'excédent est stocké dans les batteries, qui sont considérées comme des charges par rapport à cette source.

- **Fonctionnement Boost (Etat de décharge)**

Dans ce deuxième mode de fonctionnement, le convertisseur agit comme un élévateur de tension, faisant intervenir l'IGBT (T_2) et la diode (D_1). L'énergie fournie par la source (photovoltaïque ou autre) est insuffisante pour répondre aux besoins de la charge, et le déficit est compensé par les batteries, qui sont alors considérées comme des sources de tension.

2.6.2 Convertisseur DC/AC

2.6.2.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur triphasé à deux (2) niveaux est un dispositif conçu pour convertir le courant continu en courant alternatif est constitué de composants de commutation de semi-conducteurs tels que des IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) , de trois (3) bras, chacun comprenant deux (2) semi-conducteurs. Le fonctionnement de ces semi-conducteurs doit être complémentaire afin d'éviter tout court-circuit de la source de courant continu [111].

La figure 2.23 représente le schema d'un onduleur triphasé à deux niveaux composé de six (6) semi-conducteurs commandés.

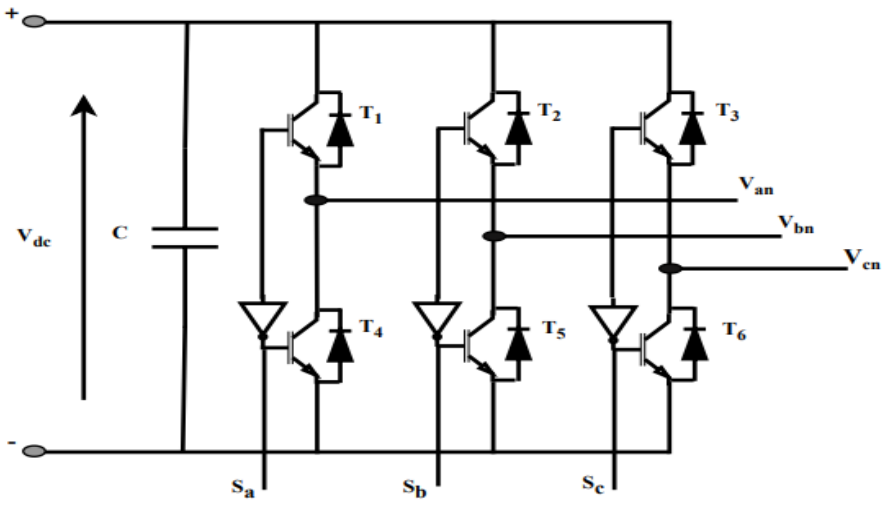


Figure 2.23 Onduleur triphasé à deux niveaux

En prenant en compte du point fictif « o », les tensions simples appliquées aux trois (3) phases du stator sont déterminées à l'aide des relations suivantes:

$$\begin{cases} V_{an} = V_{a0} + V_{on} \\ V_{bn} = V_{b0} + V_{on} \\ V_{cn} = V_{c0} + V_{on} \end{cases} \Longrightarrow \quad V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} + 3V_{0n} \tag{2.43}$$

Le système de tensions triphasées :

$$V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} + 3V_{0n} = 0 \tag{2.44}$$

D'où,

$$V_{on} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \tag{2.45}$$

On obtient:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{a0} + 2V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{a0} - V_{b0} + 2V_{c0}) \end{cases} \tag{2.46}$$

Après avoir réarrangé les équations des deux systems, on obtient la representation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{dc}S_a \\ V_{b0} = V_{dc}S_b \\ V_{b0} = V_{dc}S_c \end{cases} \tag{2.48}$$

Les signaux de commande (S_a, S_b, S_c) définissent l'état de chacun des semi-conteurs comme suit :

$$S_a = \begin{cases} \textbf{1 si T1 fermé et T4 ouvert} \\ \textbf{0 si T1 ouvert et T4 fermé} \end{cases}$$
$$S_b = \begin{cases} \textbf{1 si T2 fermé et T5 ouvert} \\ \textbf{0 si T2 ouvert et T5 fermé} \end{cases} \quad (2.50)$$
$$S_c = \begin{cases} \textbf{1 si T3 fermé et T6 ouvert} \\ \textbf{0 si T3 ouvert et T6 fermé} \end{cases}$$

Finalement,

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

2.6.2.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux

La figure 2.24 montre la structure d'un onduleur de tension triphasé à trois (3) niveaux. Cet onduleur est composé de trois (3) bras et de deux (2) sources de tension continue. Chaque bras comprend quatre (4) semi-conducteurs en série, ainsi que deux diodes centrales. Chaque semi-conducteur est constitué d'un transistor et d'une diode assemblés en configuration [112].

Pour garantir le bon fonctionnement de l'onduleur, il est essentiel de contrôler correctement la tension continue appliquée à son entrée, ainsi que les états de commutation de tous ses composants semi-conducteurs. Cela permet d'assurer un suivi adéquat de la tension de référence requise au niveau du bus continu (entrée de l'onduleur) et de minimiser les harmoniques dans les tensions de sortie alimentant la charge ou injectées dans le réseau de distribution.

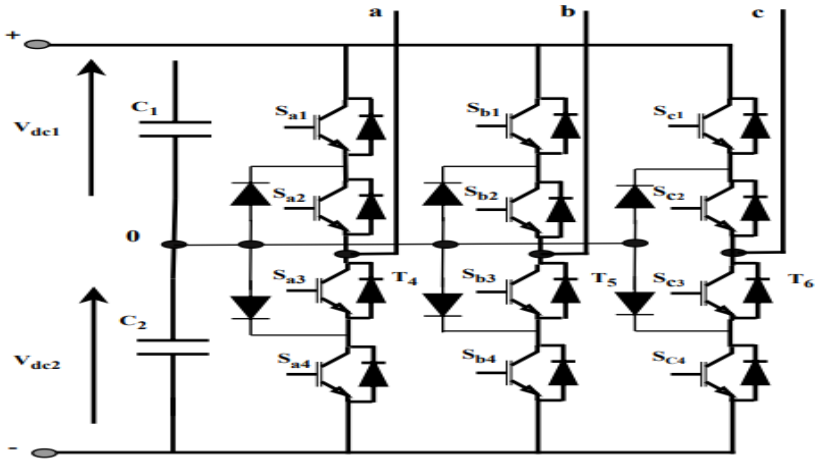


Figure 2.24 Structure du circuit de l'onduleur à trois niveaux

Étant donné que l'onduleur à trois niveaux est symétrique, l'étude peut se restreindre au fonctionnement d'un seul bras. Toutefois, l'analyse des différentes configurations de fonctionnement d'un bras montre que sur les 2^4 = 16 combinaisons possibles, mais parmi lesquelles seules trois sont réalisables : S_{ij}=1100, S_{ij}=0110 et S_{ij}=0011 comme le montre le tableau 2.1. C'est pourquoi les autres ne sont pas fonctionnelles et doivent être évitées car elles provoquent des court-circuits des sources de tension continue ou isolent la charge [113].

Tableau 2.1 États de commutations du convertisseur à trois (3) niveaux

État des commutateurs				V_i
1	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

2.6.3 Convertisseur AC-DC

Un convertisseur AC/DC, également appelé redresseur, est un dispositif électronique qui transforme le courant alternatif (AC) en courant continu (DC) en utilisant des composants comme des diodes ou des transistors. Ce type de convertisseur est couramment utilisé pour alimenter des appareils nécessitant une source de courant continu à partir d'une alimentation en courant alternatif [114]. Dans notre cas, on considère un redresseur triphasé idéal, modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. En se référant au schéma de la figure 2.25, les équations sont déduites en supposant que le réseau électrique triphasé de l'éolienne est représenté par une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée.

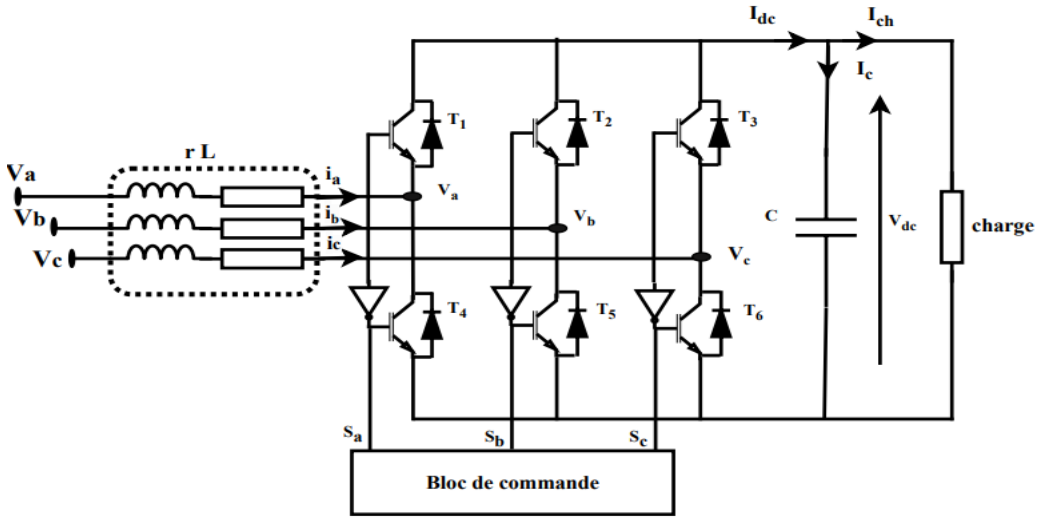


Figure 2.25 Schéma du redresseur pont triphasé à diodes

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.52)$$

Où, V_a, V_b et V_c sont les tensions mesurées par rapport au neutre du réseau .

La loi des mailles donne :

$$\begin{cases} V_a = L\frac{di_a}{dt} + ri_a + V_{ra} \\ V_b = L\frac{di_b}{dt} + ri_b + V_{rb} \\ V_c = L\frac{di_a}{dt} + ri_c + V_{rc} \end{cases} \quad (2.53)$$

Avec r : résistance série interne négligeable et L : inductance série.

Les tensions d'entrée du redresseur V_a , V_b et V_c sont reliées à la tension de sortie (V_{dc}) par la relation suivante :

$$\begin{cases} V_{ra} = \left[S_a - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c)\right] V_{dc} \\ V_{rb} = \left[S_b - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c)\right] V_{dc} \\ V_{rc} = \left[S_c - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c)\right] V_{dc} \end{cases} \Longleftrightarrow \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Avec,

Si 1'état de commutation est supposé parfait :

S_i = 1, si 1' interrupteur en haut est fermé et 1' interrupteur en bas est ouvert ;

S_i = 0, si l'interrupteur en haut est ouvert et celui d'en bas fermé ;

Le courant du redresseur est donné par la relation suivante :

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (2.55)$$

D'où :

$$\begin{cases} V_a = L\frac{di_a}{dt} + ri_a + \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ V_b = L\frac{di_b}{dt} + ri_a + \frac{-S_a + 2S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ V_c = L\frac{di_c}{dt} + ri_a + \frac{-S_a - S_b + 2S_c}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (2.56)$$

Avec :

V_a, V_b et V_c : tensions de références ;

V_{dc} : tension redressée ;

I_{dc} : courant modulé par le redresseur ;

S_a, S_b et S_c : fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

2.7 Génératrice synchrone à aimant permanant

Un redresseur, ou convertisseur AC-DC, est utilisé pour alimenter une charge continue (inductive ou capacitive) à partir d'une source alternative. Son schéma est présenté ci-dessous.

La topologie la plus répandue dans les éoliennes à vitesse variable repose sur des génératrices à induction, notamment les génératrices à double alimentation. Cependant, les génératrices synchrones à aimants permanents (GSAP) ont gagné en popularité ces dernières années, occupant une part croissante du marché [115]. Comparées aux machines à induction, elles offrent une meilleure efficacité, un encombrement réduit et une commande plus simple [116].

Les équations régissant le fonctionnement des machines électriques triphasées dépendent des résistances et des inductances du stator et du rotor, ainsi que des inductances mutuelles entre ces deux éléments. Ces inductances mutuelles varient en fonction de la position relative du rotor par rapport au stator [117].

- Equations électriques

Les équations triphasées des tensions statoriques s'expriment par:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

V_a , V_b et V_c : tensions des phases statoriques ;

R_s: résistance statorique;

i_a, i_b: courants des phases statoriques;

φ_a, φ_b, φ_c: flux totaux statoriques ;

- Equations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = [L_{ss}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_r \cos(\theta_r) \\ \varphi_r \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \varphi_r \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

φ_r : amplitude du flux produit par les aimants permanents;

De manière générale, pour les machines synchrones à pôles saillants (sans enroulements amortisseurs), $[L_{ss}]$: matrice qui se compose de termes variables et de termes constants;

Elle peut s'écrire comme suit:

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{sv}] \quad (2.59)$$

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Et,

$$[L_{sv}] = L_{sv}\begin{bmatrix} \cos(2\theta_e) & \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \text{os}(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_e) \\ \text{os}(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_e) & \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Où,

L_{s0}, L_{sv} et M_{s0}: inductances propres et mutuelles, respectivement. Elles sont constantes;

- Equation de la transformation triphasé-diphasé (dq)

Les équations de tensions d'une GSAP triphasée exprimées dans le référentiel du rotor en utilisant une transformation de Park étendue sécrivent sous forme matricielle comme suit [128]:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

ω : vitesse angulaire électrique du rotor ;

Des réductions similaires sont possibles pour les flux statoriques (2.56) dont les expressions dans le repère de Park (dq) prennent la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Où,

L_d et L_q : inductances respectives des axes d et q.

Dans le repère de Park, ces inductances sont indépendantes de la position du rotor θ_r. Ainsi, les grandeurs L_d, L_q et θ_r deviennent des grandeurs invariantes dans le temps. Cela simplifie beaucoup l'analyse, la modélisation et le contrôle de la MSAP.

En remplaçant (2.56) dans (2.55), on obtient l' équations des tensions statoriques:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\theta_r \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Où,

V_d et V_q : tensions du stator dans l'axe (d,q) ;

i_d et i_q : courants dans l'axe (d,q) ;

R_s : résistance du stator ;

L_d et L_d : inductances de l'axe (d,q),

- Le couple développé du GSAP peut être exprimé comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p\left[\varphi\, i_q + \left(L_d - L_q\right)i_q i_d\right] \quad (2.65)$$

L'équation mécanique du GSAP est donnée par:

$$C_{mec} = C_{em} + k_f\Omega_m + J\frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.66)$$

Où,

$\Omega_e = p\Omega_m$ (2.67)

p: nombre de paires de poles ;

ω_m : vitesse angulaire du rotor de la turbine ;

φ : flux permanente;

k_f : coefficient de frottement ;

J : moment d'inertie total ;

C_{mec} : couple mécanique produit par une éolienne ;

C_{em} : couple électromagnétique du GSAP.

2.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des divers éléments constitutifs d'un système de conversion multi-sources et présente en détail les principes de fonctionnement en soulignant l'impact des conditions météorologiques telles que l'ensoleillement, la température et la vitesse du vent. L'utilisation des énergies renouvelables est intrinsèquement complexe, car elle combine plusieurs sources de production d'énergie, chacune présentant des caractéristiques et des contraintes propres. Ainsi, sa conception nécessite une modélisation précise et approfondie de ses composants. Cette modélisation permet d'analyser le comportement du système considéré dans différentes conditions météorologiques, ce qui est essentiel pour optimiser son efficacité et sa fiabilité. Cette approche est particulièrement pertinente, intégrant l'énergie solaire, l'énergie éolienne et un système de stockage par batteries. En effet, ces sources d'énergie sont fortement dépendantes des variations climatiques, et leur combinaison nécessite une gestion fine pour assurer une production d'énergie stable et continue.

CHAPITRE 3

COMMANDE D'UN SYSTEME D'ENERGIE MULTI-SOURCES

3.1 Introduction

Les systèmes énergétiques multi-sources combinant des technologies photovoltaïques (PV) et éoliennes représentent une solution innovante et durable pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en minimisant l'impact environnemental. Ces systèmes exploitent les avantages complémentaires de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne pour assurer une production d'électricité plus fiable et stable [118].

Ce chapitre est présenté en deux (2) parties essentielles : la première traite l'etude d'un système photovoltaïque connecté au réseau, en analysant l'impact des variations de l''irradiation et de la température à l'aide de méthodes classiques notamment, P&O et InC, comparées à la méthode de mode glissant à double intégrale (DISMC) pour maximiser le MPPT. Elle aborde également l'effet de l'ombrage partiel avec des variations non uniformes sur trois (3) panneaux, en utilisant des algorithmes métaheuristiques d'optimisation (GWO, GA, CS, HHO et PSO), ainsi que, une étude comparative sur la commande prédictive (MPC) et la commande orientée tension (VOC) appliquée pour gérer la puissance fournie au réseau électrique. La seconde partie présente la structure du système éolien et le développement de la commande MPPT via un contrôleur intelligent à base de logic floue type 2 à intervalle optimisée par l'algorithme PSO (PI-IT2FLC-PSO). Deux (2) stratégies de commandes avancées sont utilisées, pour la commande machine en utilisant une commande backstepping adaptative et du côté réseau une commande prédictive, afin d'améliorer la robustesse et l'efficacité du système. Les résultats de cette analyse montrent l'importance de choisir des algorithmes adaptés pour répondre aux variations dynamiques des conditions environnementales.

3.2 Chaine photovoltaique connectée au réseau

La configuration étudiée dans ce travail comprend principalement : un générateur photovoltaïque (GPV) qui convertit l'irradiation solaire en courant continu, un convertisseur de puissance de type hacheur boost piloté par un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT), un filtre, ainsi qu'un onduleur connecté à un réseau de distribution triphasé, comme l'illustre la figure 3.1.

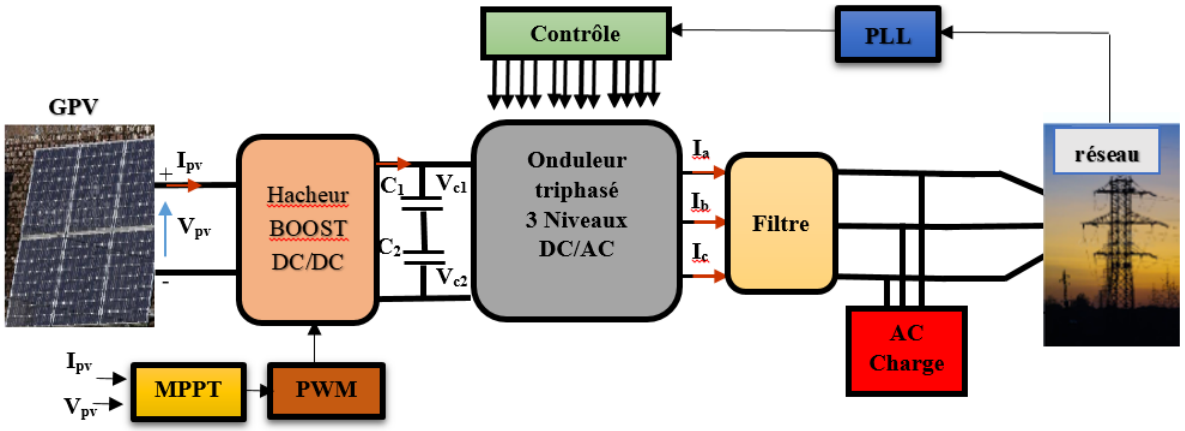


Figure 3.1 Système photovoltaique connecté au réseau

3.2.1 Commande MPPT d'un system PV

L'importance de l'MPPT dans le fonctionnement du GPV est d'extraire la puissance maximale dans différentes conditions météorologiques et d'améliorer le rendement du système en évaluant la puissance maximale [119-121]. Gràce à la tension et le courant de crête maximum. Il y a différents point de puissance maximun (MPP) sur les courbes de puissance par rapport à la tension sous un ombrage partiel. Il existe de nombreuses techniques MPPT utilisées pour suivre le MPP dans différentes conditions météorologiques. Mais certaines techniques suivent rapidement le MPP sous des conditions d'irradiation uniforme constante et d'autres techniques donnent des résultats précis dans le suivi du MPP.

3.2.1.1 Technique de perturbations et d'observation

La méthode MPPT de type Perturb and Observe (P&O) consiste à perturber légèrement la tension du panneau photovoltaïque (V_{PV}) autour de sa valeur initiale, puis à observer l'impact sur la puissance générée (P_{PV}). Les figures 3.2 et 3.3 présentent, respectivement, le principe de fonctionnement et l'organigramme détaillé de cette approche [122]. Lorsqu'une augmentation de V_{PV} conduit à une augmenttation P_{PV}, cela indique que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point de puissance maximale (PPM). Inversement, si la puissance diminue après cette perturbation, cela signifie que le système a dépassé le PPM. Le même raisonnement s'applique en cas de diminution de la tension [123]. En analysant les variations de puissance en fonction des changements de tension ($P_{PV} = f(V_{PV})$), il est possible de localiser la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Cette analyse permet ensuite d'ajuster la commande pour faire converger le système vers le point de puissance maximale, optimisant ainsi la production d'énergie [124].

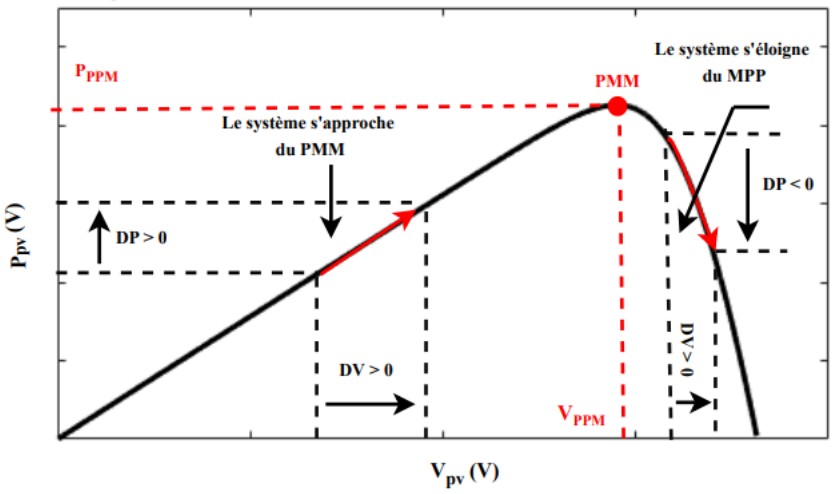


Figure. 3.2 Principe de la technique P&O.

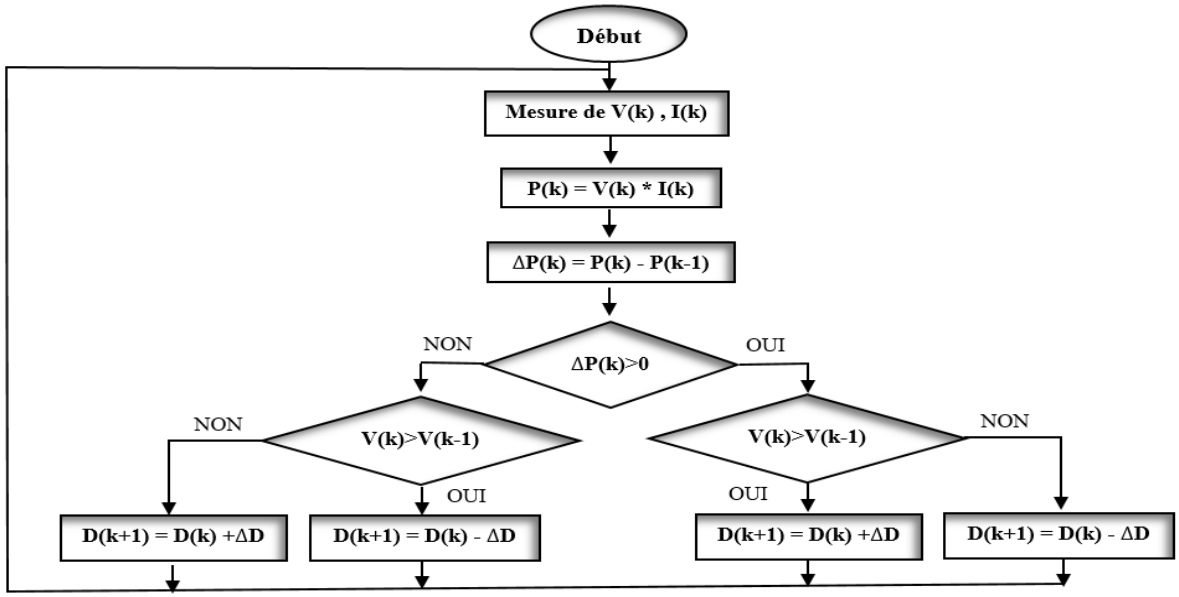


Figure.3.3 Organigramme de l'algorithme P&O

3.2.1.2 Méthode de conductance incrimentale

L'algorithme de la méthode de conductance incrimentale (Inc) est une approche MPPT largement répandue, nécessitant l'utilisation de deux capteurs pour mesurer la tension de fonctionnement (V_{PV}) et le courant (I_{PV}) du panneau solaire [125-127]. Cette méthode repose sur l'idée qu'au point de puissance maximale (MPP), la variation de la puissance de sortie (P_{PV}) par rapport à la tension atteint une valeur nulle (V_{PV}). Cette condition se traduit par les équations suivantes:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \quad (3.1)$$

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad \leftrightarrow \quad \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.2)$$

D'après l'algorithme MPPT de conductance incrimentale illustré par la Figure 3.4, la fonction principale repose sur les conditions suivantes pour atteindre le point de puissance maximale (MPP).

$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} & pour\ V = V_{mp} \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} & pour\ V < V_{mp} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} & pour\ V > V_{mp} \end{cases} \quad (3.3)$$

V_{mp} : tension correspondant au MPP.

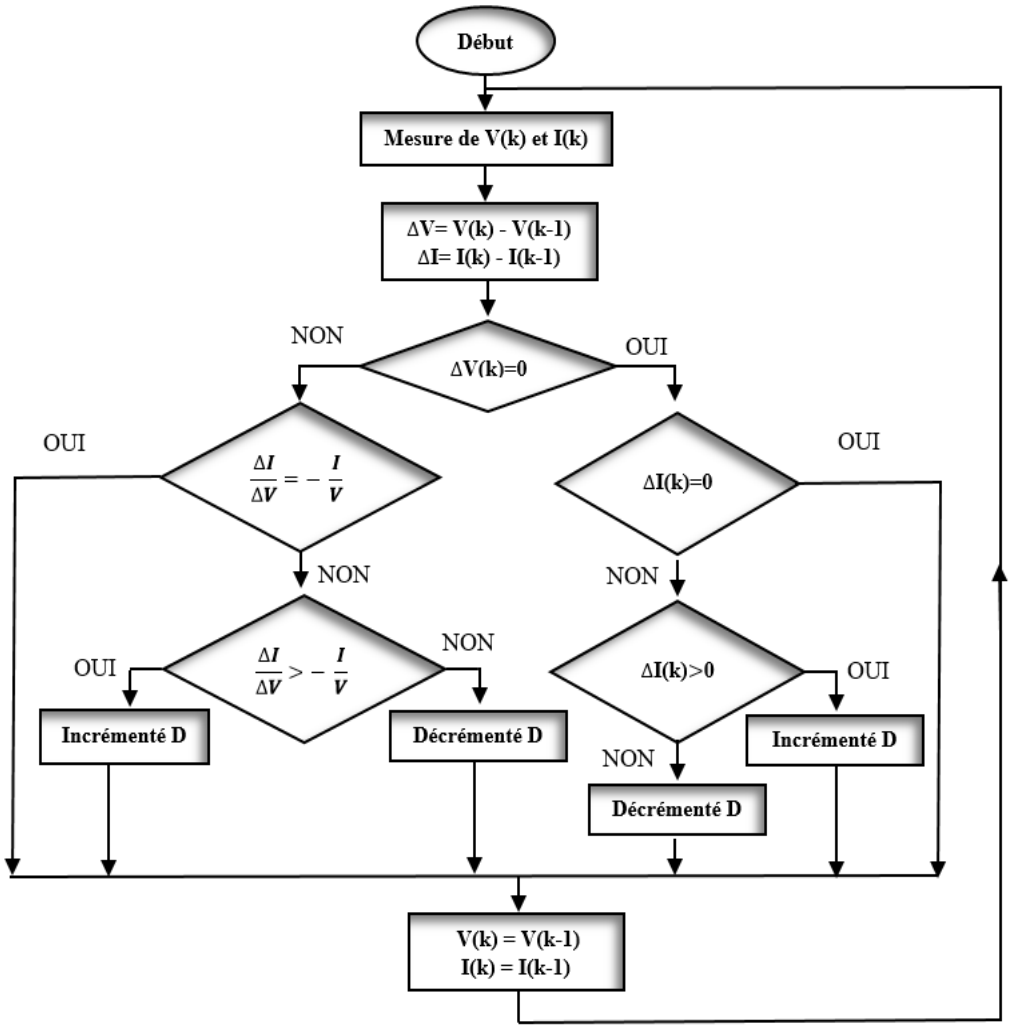


Figure 3.4 Organigramme de l'algorithme InC

3.2.1.3 MPPT à mode glissant à double intégrale

Afin d'obtenir une puissance de sortie maximale, l'MPPT à base de la commande par mode glissant à double integrale (en anglais : Double Integral Sliding Mode Control (DISMC) a été appliquée. Cette commande est conçue pour éliminer les oscillations générées par les commutations indésirables dans les systèmes photovoltaïques [128 ,129].

La surface glissement S(t) est définie par :

$$S(t) = \{x \backslash S(x,t) = \dot{S}(x,t) = 0\} \quad (3.4)$$

Elle est sélectionnée de manière à garantir la puissance de sortie maximale :

$$(\partial P_{pv}/\partial I_{pv}) = 0,\ (\partial P_{pv}/\partial I_{pv}) = I_{pv}\left((\partial V_{pv}/\partial I_{pv}) + (V_{pv}/I_{pv})\right) \quad (3.5)$$

Alors,

$$S(t,x) = \left((\partial V_{pv}/\partial I_{pv}) + (V_{pv}/I_{pv})\right) \quad (3.6)$$

L'erreur de suivie donnée par (3.6) permet de concevoir le controleur :

$$S(x) = e(x) \quad ou, \quad e(x) = e(x_1) + e(x_2) \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} e(x_1) = \int(\Delta P/\Delta I) \\ e(x_2) = \int\{\int(\Delta P/\Delta I)dt\}dt \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} \Delta P = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1) \\ \Delta I = I_{pv}(k) - I_{pv}(k-1) \end{cases} \quad (3.8)$$

En générale, la loi de commande en mode glissant se compose de deux éléments : un terme de commande équivalent (U_{eq}) et un terme de commande discontinu (U_n). L'algorithme DISMC est employé pour stabiliser le système et l'amener à converger vers la surface désirée au moment approprié [130].

$$u = u_{eq} + u_n \quad (3.9)$$

Afin d'obtenir un contrôle équivalent, la condition de stabilité doit être assurée :

$$\begin{cases} S(x) = 0 \\ \dot{S}(x) = 0 \end{cases} \Longrightarrow \quad u \cong u_{eq} \quad (3.10)$$

Le contrôle équivalent peut être obtenu en résolvant l'équation algébrique suivante :

$$\begin{cases} \dot{S} = [dS/dx]^T \\ \dot{x} = [dS/dx]^T.\left(f(x) + g(x)u_{eq}\right) = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$u_{eq} = -([dS/dx]^T f(x))/([dS/dx]^T g(x)) = 1 - \left(K_1 \int S + V_{pv}\right)/V_s \quad (3.12)$$

En tenant compte du fait que le contrôle discontinu doit vérifier le critère de stabilité de Lyapunov:

$$S(x).\dot{S}(x) < 0 \quad (3.13)$$

L'expression de la loi de commande discontinue est donnée par :

$$u_n = K_2.|S|^{\alpha}.\sin g(S) \quad \Longrightarrow \quad 0 < \alpha < 1 \quad (3.14)$$

$$\begin{cases} sing(S) = 1 \quad if\ S(x) > 0 \\ sing(S) = 0 \quad if\ S(x) = 0 \\ sing(S) = -1 \ if\ S(x) < 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$u = u_{eq} + u_n = \left[1 + K_2.|S(x)|^{\alpha}.\mathrm{sing}(S) - \left(K_1 \int S(x)dx + V_{pv}\right)/V_s\right] \quad (3.16)$$

Où, K_1 et K_2 sont des constantes positives.

3.2.1.4 Résultats de Simulation

Les caractéristiques de la puissance produite par un générateur dépendent de sa tension de sortie. Il est possible d'extraire la puissance maximale disponible en forçant le GPV à fonctionner à une tension capable de la produire. C'est pourquoi, il convient d'utiliser un convertisseur DC-DC boost pour contrôler la tension de sortie du GPV.

Les techniques P&O, INC et DISMC sont vérifieés sous un profile de d'irradiation représenté par la figure 3.6.

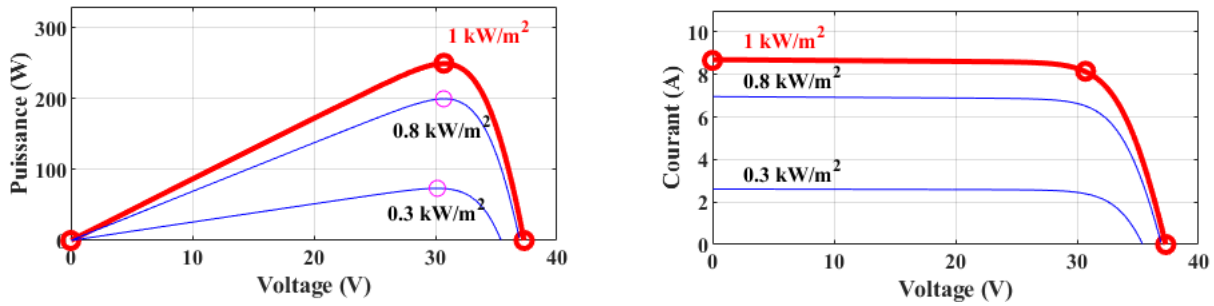


Figure 3.5 Caractéristique sous différentes irradiations et à une température constante

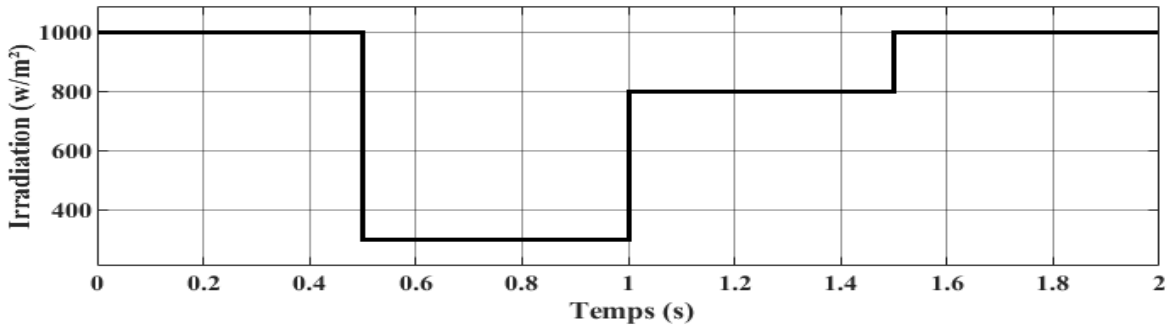


Figure 3.6 Profile de changement de l'irradiation

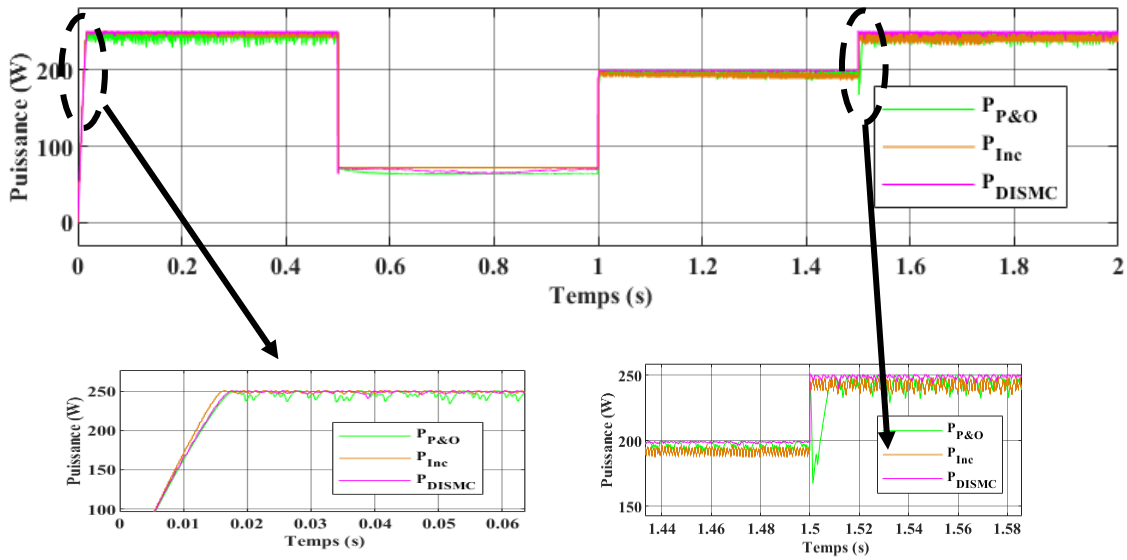


Figure 3.7 Puissances extraites avec INC, P&O et DISMC, sous irradiation variable

Les figure 3.6 et 3.7 montrent les résultats obtenus par simulation du système photovoltaïque sous différents niveaux d'irradiations E=1000W/m^2, 800W/m^2, 300W/m^2 (irradiation variable) et une température standard constante (25°C).

Le tableau 3.1 montre que la méthode P&O, bien qu'efficace pour des conditions d'ensoleillement stables, présente des limitations en termes de rapidité de réponse et de précision lors des changements rapides des conditions environnementales. Elle tend à osciller autour du point de puissance maximale, ce qui peut entraîner une légère perte de performances. En revanche, la méthode de conductance incrimentale (Inc_Cond) présente une meilleure précision que la P&O pour localiser le MPP et s'adapte plus efficacement aux variations rapides des conditions d'ensoleillement. Néanmoins, sa complexité accrue par rapport à la P&O est qu'elle nécessite des mesures précises et peut augmenter les coûts de mise en œuvre. La DISMC se distingue par son temps de réponse très court et une efficacité à suivre le point de puissance maximale avec une convergence plus rapide que P&O et Inc_Cond. Cette méthode réduit significativement la perte de puissance, améliorant ainsi l'efficacité globale du système.

Tableau 3.1 Comparaison des trois techniques d'optimisation

Techniques MPPT	Erreur statique (w)	Temps de réponse (s)	Rendement (%)
P&O	0.8	0.2	99.51
Inc_Cond	0.7	0.7	99.63
DISMC	0.5	0.018	99.87

Les résultats de la simulation montrent que DISMC maintient une performance optimale même sous des irradiances variables, attestant de sa robustesse. La complexité inhérente à la mise en œuvre de DISMC est compensée par les gains substantiels en termes de performance et d'efficacité énergétique.

3.2.2 Effet de l'ombrage

L'effet d'ombrage se produit lorsque toute ou une partie de la surface d'un panneau photovoltaïque est couverte par un obstacle, tel qu'un bâtiment, un arbre ou des nuages, réduisant ainsi la quantité de lumière solaire atteignant les cellules solaires. On peut distinguer deux (2) types d'ombrages [131-133] :

- L'ombrage partiel : se produit lorsqu'une partie seulement d'un panneau solaire est couverte par un obstacle, laissant le reste du panneau exposé à la lumière solaire ;

• L’ombrage total : se produit lorsque l'intégralité d'un panneau solaire est couverte par un obstacle, bloquant complètement la lumière solaire.

La Figure 3.8 montre la configuration du système de conversion que nous avons considéré. IL se compose principalement d'un GPV, d'un bloc MPPT, un convertisseur DC-DC boost et d'une charge.

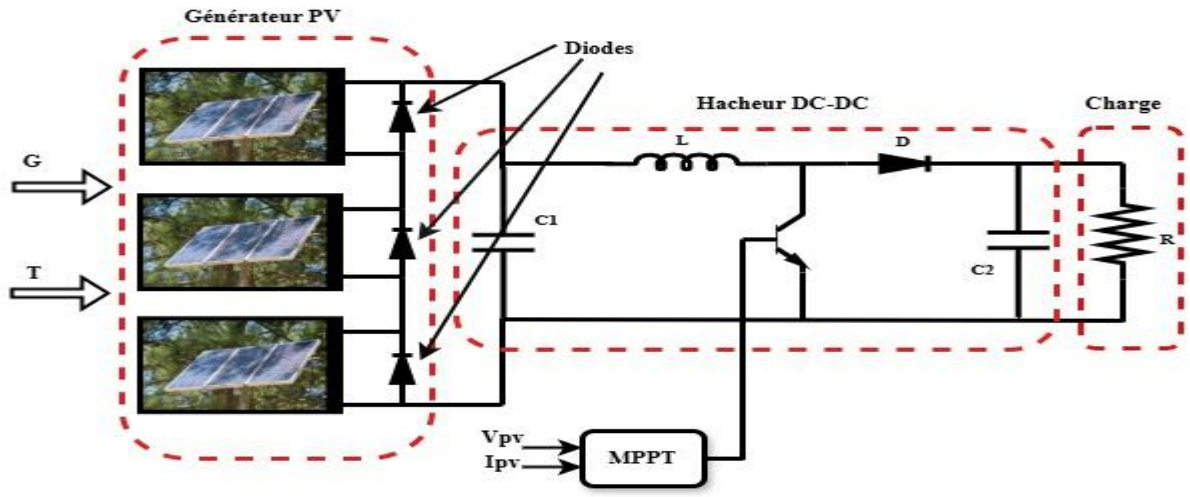


Figure 3.8 Structure de la chaine photovoltaique sous ombrage

3.2.2.1 Technique de Cuckoo Search

La méthode de recherche Cuckoo Search présente de nombreux avantages en raison de sa facilité et de sa simplicité de mise en œuvre, et des contraintes moindres en matière de réglage périodique, ce qui lui permet de résoudre efficacement des problèmes non linéaires en temps reel [134] . La convergence de la méthode CS-MPPT repose principalement sur la fonction de vol de Levy et s'inspire de l'intelligence parasitaire du troupeau de coucous. La localisation de l'ensemble du parasite est réalisée par une autre espèce de coucou [135].

La recherche du parasite se déroule en trois phases: Intraspécifique, acquise, coopérative. Certains coucous imitent la couleur et la forme de leurs oiseaux hôtes pour augmenter leur capacité de production. Différents cycles d'utilisation sont d'abord lancés de manière aléatoire, puis chacun d'entre eux est envoyé au système photovoltaïque et la tension et le courant générés sont utilisés pour estimer le coût du système [136].

Les tensions et courants générés sont utilisés pour estimer la performance. Le cycle d'utilisation est mis à jour jusqu'à ce que le cycle d'utilisation optimal et les fonctions d'aptitude soient atteints.

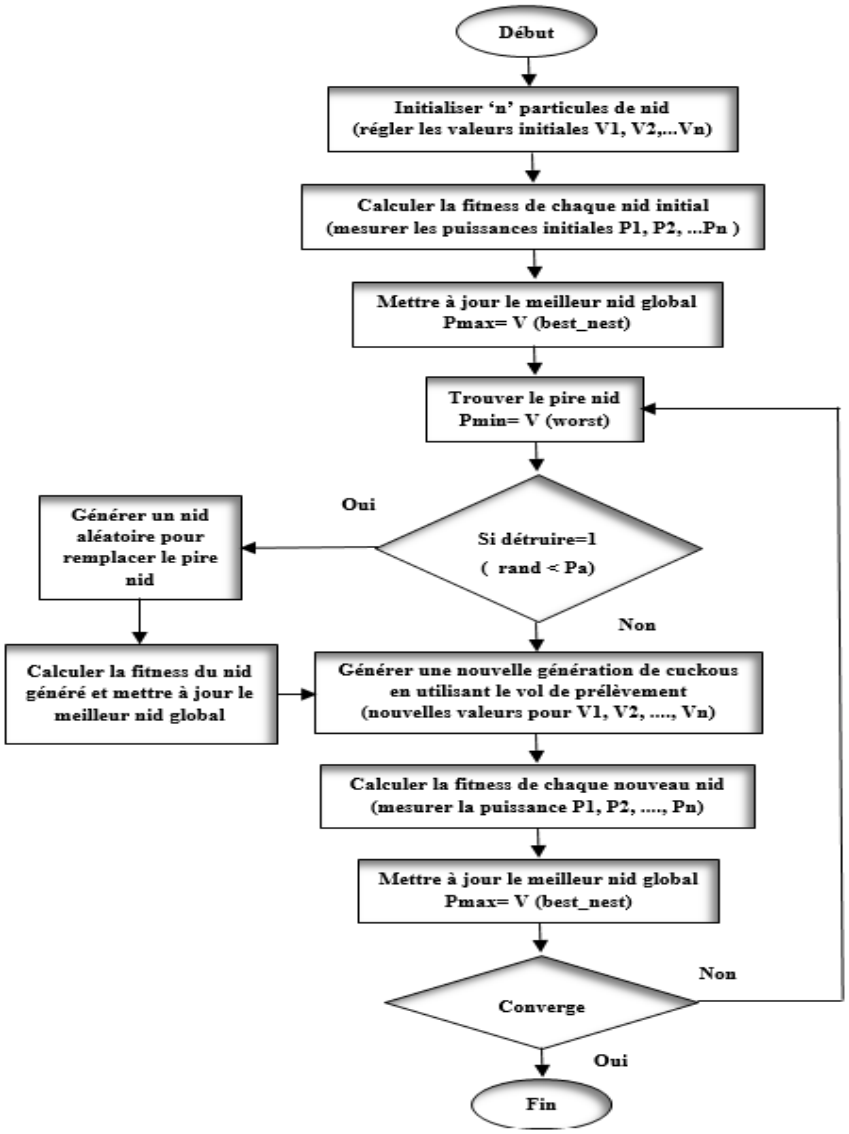


Figure .3.9 Organigramme de l'algorithme CS

Les étapes de l'algorithme sont expliquées par l'organigramme présenté à la figure 3. 9.

Etape 1: le courant ET la tension du système sont mesurés.

Etape 2: le cycle d'utilisation associé à la meilleure fonction de correspondance a été choisi comme la meilleure imbrication actuelle (dbest).

Etape 3: on applique LeviFlight pour créer une nouvelle imbrication.

Etape 4: le pire nid est détruit au hasard avec une probabilité (Pa). Ce processus simule le comportement de l'oiseau hôte qui trouve et détruit les œufs de coucou.

Etape 5: le nouveau nid remplace celui qui a été détruit par Levy Flight.

Etape 6: la puissance photovoltaïque est ensuite mesurée et le nid optimal actuel est sélectionné.

Etape 7: le CS s'arrête et fournit le cycle de travail optimal pour la performance globale.

3.2.2.2 Téchnique Algorithme Génétique

L'Algorithme Génétique (AG) est une téchnique d'optimisation heuristique et adaptative, qui repose sur la génération, l'évaluation systématique et l'amélioration itérative de solutions potentielles jusqu'à l'arret du cycle de travail. Cette téchnique, de nature parallèle et sans gradient, utilise un critère de performance pour évaluer les solutions et explore une population de solutions possibles afin d'identifier l'optimum global [137]. Les AG sont particulièrement efficaces pour traiter des espaces de solutions complexes et irréguliers, et ont été appliqués à une grande variété de problèmes complèxes d'optimisation difficiles. Leur fonctionnement repose sur trois opérateurs fondamentaux suivants :

- La sélection qui est un mécanisme qui permet de choisir, parmi les chromosomes de la population actuelle, ceux qui seront retenus pour la génération suivante en fonction de leur aptitude (fitness).
- Le croisement qui consiste à combiner deux chromosomes parents pour générer un nouveau chromosome (descendant), favorisant ainsi l'exploration de nouvelles solutions.
- Enfin, la mutation introduit une variabilité stochastique en modifiant aléatoirement certains gènes des chromosomes, ce qui maintient la diversité génétique et accélère la convergence vers une solution optimale [138].

Les paramètres de l'algorithme generique sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Paramètres de l'algorithme generique

Dimension du problème	Valeur
Taille de la population	100
Iteration Max	200
Probabilité de croisement	0.8
L'accouplement	Croisement à point unique

Les étapes de fonctionnement de GA sont présentées par la figure 3. 10 :

Étape 1 : définir la fonction objective et identifier les paramètres de conception.

Étape 2 : génération d'une population initiale.

Étape 3 : évaluation de la population en fonction de la fonction objective.

Étape 4 : test de convergence. Si la convergence est satisfaisante, elle s'arrête, sinon elle continue.

Étape 5 : lancement du processus de reproduction par l'application des opérateurs génétiques : Sélection, Croisement et Mutation. Le processus est initié par l'application des opérateurs génétiques : sélection, croisement et mutation.

Étape 6 : évolution de la nouvelle génération. Passez à l'étape 3.

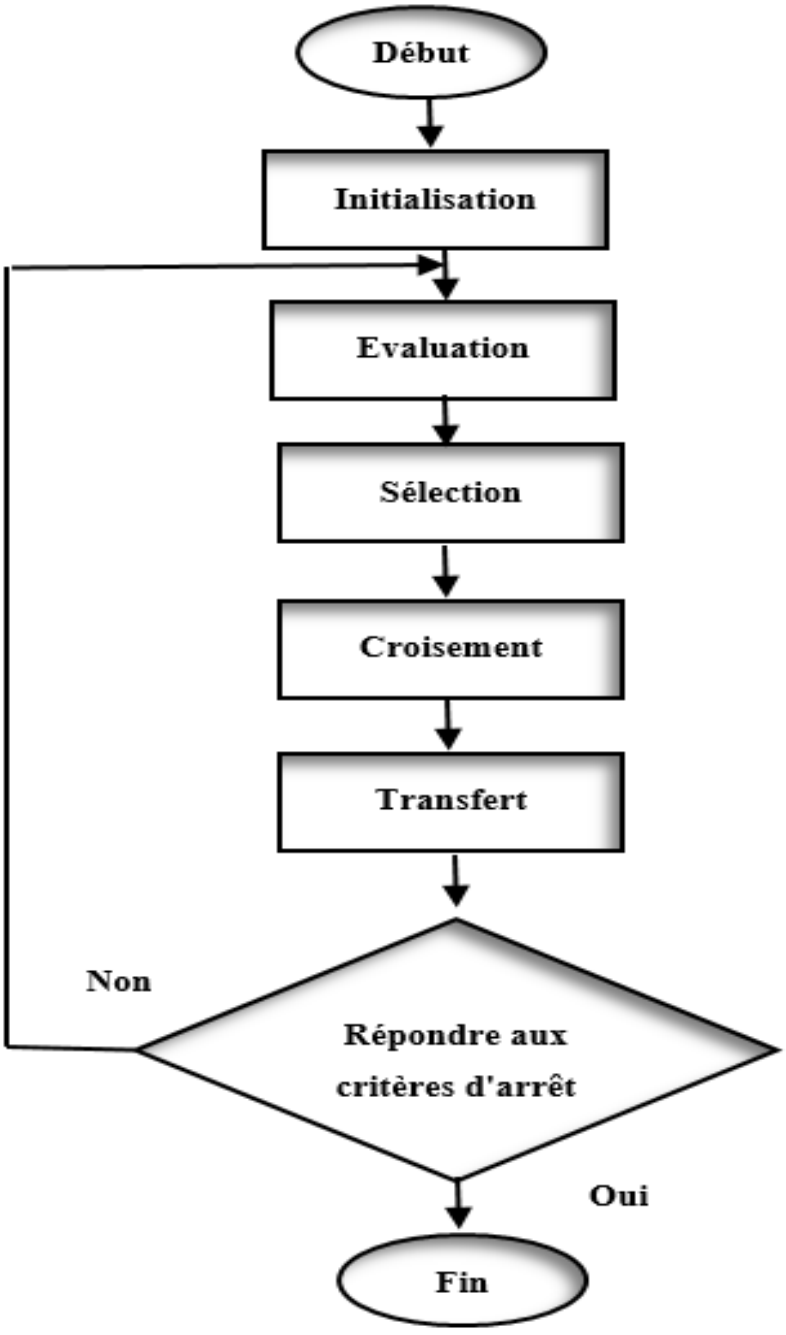


Figure 3.10 Organigramme de l'algorithme génétique

3.2.2.3 Technique de l'algorithme Optimisation du loup gris

La stratégie de chasse du loup gris (Grey Wolf Optimisation GWO) est un algorithme d'optimisation bio-inspiré de la façon dont les loups chassent leurs proies (Figure 3.11). L'idée de base est de simuler le comportement du loup gris pour trouver la solution optimale à un problème particulier. Cet algorithme utilise une meute de loups pour explorer un espace de recherche de solutions possibles. Chaque loup représente une solution possible et sa position de recherche correspond à la valeur de la fonction objective à optimiser. Les loups voyagent ensemble, chassent et améliorent la qualité des solutions trouvées [175].

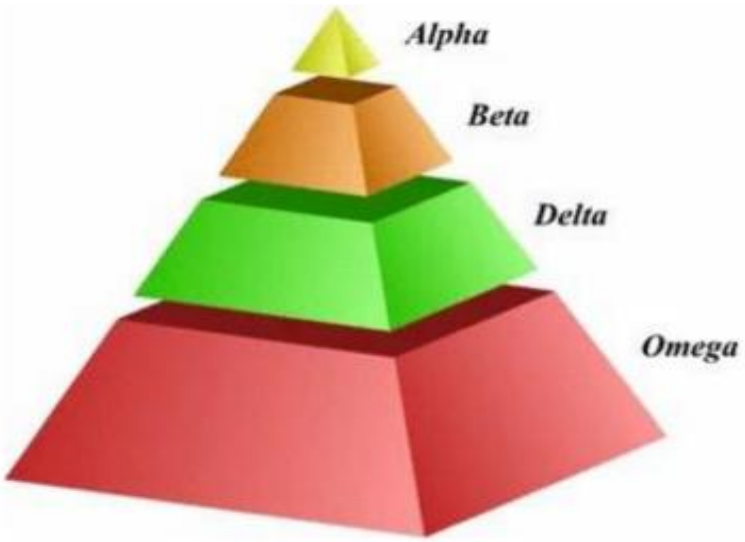


Figure 3.11 Hiérarchie sociale des loups gris

Plus précisément, la figure 3.12 présente l'organigrame de l'algorithme GWO:

Étape 1 : initialiser la population de loups avec des positions aléatoires ;
Étape 2 : les loups sont triés ;
Étape 3 : les loups alpha, bêta et delta sont sélectionnés. Alpha est le meilleur de tous les loups, Beta est son deuxième meilleur, et Delta son troisième meilleur ;
Étape 4 : les autres loups suivent les mouvements des loups alpha, bêta et delta pour améliorer leur solution.
Étape 5 : la position du loup est mise à jour et le processus est répété jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit trouvée.

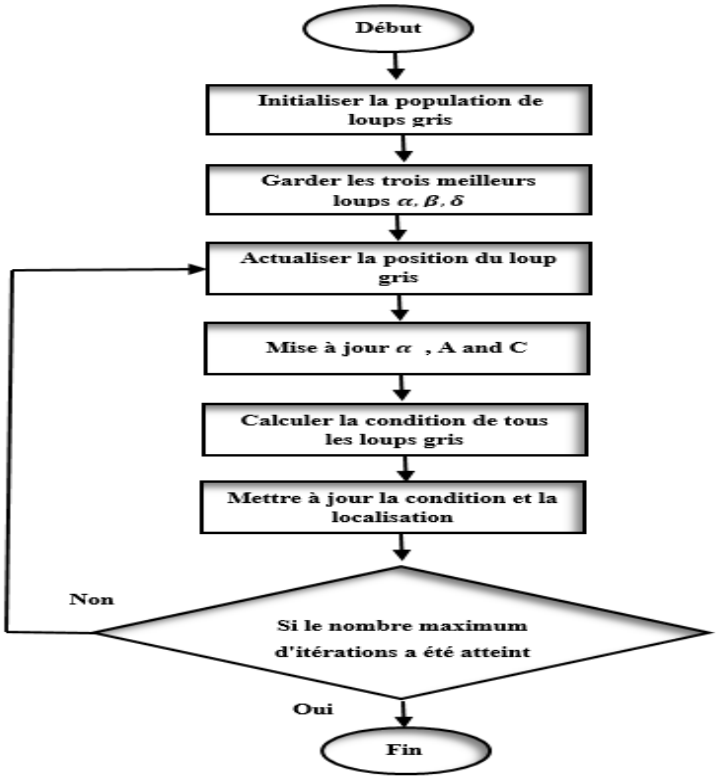


Figure. 3.12 Organigramme de l'algorithme GWO

Chaque loup encercle sa proie en se repositionne:

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_p}(t) + \vec{A}.\vec{D} \quad (3.14)$$

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\overrightarrow{X_p}(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (3.15)$$

Où, t est l'itération , $\overrightarrow{X_p}$ et $\vec{X}$ sont, respectivement , les positions de la proie et du loup gris .

Avec, A et C définit comme suit :

$$\vec{A} = 2\alpha.\overrightarrow{r_1} - \alpha \quad (3.16)$$

Où, $\alpha = 2 - t\frac{2}{Max_{iteration}}$ (3.17)

$$\vec{C} = 2\overrightarrow{r_2} \quad (3.18)$$

Où, ‘ r_1’et ‘r_2’ sont des nombres aléatoires générés entre « 0 » et « 1 », α contrôle linéairement la relation entre l'exploration et l'exploitation [139-141]. Dans la phase de chasse, toute la meute attaque la position qui a été repérée par alpha, beta et delta. La position attendue de la proie est :

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\overrightarrow{X_1}+\overrightarrow{X_2}+\overrightarrow{X_3}}{3} \quad (3.19)$$

Où, $\overrightarrow{X_1}, \overrightarrow{X_2}$ et $\overrightarrow{X_3}$ sont :

$$\begin{cases} \overrightarrow{X_1} = \left|\overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_1}.\overrightarrow{D_\alpha}\right| \\ \overrightarrow{X_2} = \left|\overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{A_2}.\overrightarrow{D_\beta}\right| \\ \overrightarrow{X_3} = \left|\overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_3}.\overrightarrow{D_\delta}\right| \end{cases} \quad (3.20)$$

$\overrightarrow{X_\alpha}$, $\overrightarrow{X_\beta}$ et $\overrightarrow{X_\delta}$ sont les meilleures solutions dans l'itération t et $\overrightarrow{D_\alpha}$, $\overrightarrow{D_\beta}$ et $\overrightarrow{D_\delta}$ sont comme suit :

$$\begin{cases} \overrightarrow{D_\alpha} = \left|\overrightarrow{C_1}.\overrightarrow{X_\alpha} - \vec{X}\right| \\ \overrightarrow{D_\beta} = \left|\overrightarrow{C_2}.\overrightarrow{X_\beta} - \vec{X}\right| \\ \overrightarrow{X_\delta} = \left|\overrightarrow{C_3}.\overrightarrow{X_\delta} - \vec{X}\right| \end{cases} \quad (3.21)$$

3.2.2.4 Méthode Horse Herd Optimisation

Les chevaux présentent un large éventail de comportements tout au long de leur vie. En moyenne, les chevaux vivent environ 25 à 30 ans. Pour classer les chevaux en fonction de leur âge, nous utilisons des symboles pour représenter les différents groupes d'âge [142]. δ pour les chevaux âgés de 0 à 5 ans, γ pour les chevaux âgés de 5 à 10 ans, β pour les chevaux âgés de 10 à 15 ans.

Cette recherche est basée sur les modèles de comportement des chevaux dans leur environnement naturel. Les plus typiques observés sont le rgard, la hiérarchie, la sociabilité, l'imitation, les mécanismes de défense et l'errance.

Les six comportements communs à des chevaux d'âges différents sont une source d'inspiration pour cette approche. Ils existent à chaque étape, selon l'équation suivante :

$$P_m{}^{iter,age} = V_m{}^{iter,age} + P_m{}^{(iter-1),age}, age = \alpha, \beta, \gamma, \delta \quad (3.22)$$

Dans cette équation :

$P_m{}^{iter,\ age}$: désigne la position du cheval ;

Age : indique l'âge de chaque cheval ;

iter : décrit le nombre actuel d'itérations ;

$V_m{}^{iter,\ age}$: illustre la vitesse du vecteur de ce cheval.

L'âge des chevaux implique une matrice complète de questions et de réponses. Cette matrice peut être organisée de manière à ce que les meilleures réponses soient classées en tête. Nous sélectionnons ensuite les 10 % de chevaux les mieux classés de cette matrice ordonnée en tant que α cheval. Les 20 % de chevaux suivants forment le groupe β, qui comprend les chevaux âgés de 10 à 15 ans.

Les chevaux restants sont répartis dans les groupes γ et δ, qui représentent 30 % et 40 % de la population, respectivement.

Pour calculer le vecteur vitesse, nous utilisons des méthodes quantitatives qui imitent les six (6) actions effectuées par chaque groupe de chevaux.

Ces méthodes permettent d'analyser et de mesurer les mouvements et les comportements spécifiques à chaque groupe d'âge [143].

$$\begin{cases} {Vel_m}^{iter,\alpha} = {Gra_m}^{iter,\alpha} + {DefMec_m}^{iter,\alpha} \\ {Vel_m}^{iter,\beta} = {Gra_m}^{iter,\beta} + {H_m}^{iter,\beta} + {Soc_m}^{iter,\beta} + {DefMec_m}^{iter,\beta} \\ {Vel_m}^{iter,\gamma} = {Gra_m}^{iter,\gamma} + {H_m}^{iter,\gamma} + {Soc_m}^{iter,\gamma} + {Imt_m}^{iter,\gamma} + {Ro_m}^{iter,\gamma} + {DefMec_m}^{iter,\gamma} \\ {Vel_m}^{iter,\delta} = {Gra_m}^{iter,\delta} + {I_m}^{iter,\delta} + {Ro_m}^{iter,\delta} \end{cases} \quad (3.23)$$

1. Le regard :

Les chevaux passent 16 à 20 heures par jour à fixer un champ. L'interprétation mathématique du regard est la suivante :

$$\begin{cases} {G_m}^{iter,A} = g_{iter}(\mu + \rho I)[{X_m}^{iter-1}] \\ {g_m}^{iter,A} = {g_m}^{(iter-1),A} \times \omega_g \end{cases} \quad (3.24)$$

Où, $G^{iter,\ A}{}_m$: indique le paramètre de mouvement du i cheval. La valeur de I peut être fixée à 0,95 et celle de m à 1,05. g, le coefficient, peut être fixé à 1,5 pour les chevaux de tous âges.

2. Hiérarchie :

Les chevaux passent toute leur vie à suivre un chef. Selon la loi de la hiérarchie, un étalon ou une jument adulte dans un troupeau de chevaux sauvages est également responsable.

Dans ce scénario, le coefficient (h) représente la prédisposition du troupeau à suivre le plus expérimenté et le plus fort. Selon des études, les chevaux ont suivi la loi de la hiérarchie à l'époque médiévale [144].

Les équations suivantes peuvent être utilisées pour définir la couche hiérarchique :

$$\begin{cases} {H_m}^{iter,A} = {h_m}^{iter,A}\left[{X_*}^{iter-1} - {X_m}^{iter-1}\right] \\ {h_m}^{iter,A} = {h_m}^{(iter-1),A} \times \omega_h \end{cases} \quad \text{Avec, A=}\alpha,\beta,\gamma \quad (3.25)$$

$H_m{}^{iter,\ A,}$ indique les effets de l'emplacement du meilleur cheval sur le paramètre de vitesse.

3. Sociabilité

Les chevaux sont des créatures grégaires, c'est pourquoi ils cohabitent parfois avec d'autres animaux. Il est préférable pour la sécurité du cheval de vivre dans un troupeau. La solitude dérange les chevaux. Ils apprécient la proximité d'autres animaux tels que le bétail et les moutons [145].

Ce comportement, indiqué par un facteur, suggère une migration vers un emplacement moyen d'autres chevaux. L'équation suivante représente la sociabilité des chevaux :

$$\begin{cases} S_m{}^{iter,A} = s_m{}^{iter,A}\left[\left(\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} X_j{}^{iter-1}\right) - X_m{}^{iter-1}\right] \\ s_m{}^{iter,A} = s_m{}^{(iter-1),A} \times \omega_s \end{cases} \quad \text{Avec, A= } \beta, \gamma \qquad (3.26)$$

Où, $S^{iter,\ A}$: est le vecteur de mouvement social du i^{th} cheval, $S_m{}^{iher,A}$ est l'orientation des chevaux vers le troupeau dans l'itert i^{ith} itération, et N est le nombre total de chevaux [186].

4. L'imitation

Les chevaux s'imitent les uns les autres. Ils apprennent les bonnes et les mauvaises habitudes des autres et découvrent leur lieu de pâturage idéal.

Le facteur (i) représente le comportement d'imitation.

$$\begin{cases} I_m{}^{iter,A} = i_m{}^{iter,A}\left[\left(\frac{1}{\rho N}\sum_{j=1}^{\rho N} X_j{}^{iter-1}\right) - X_m{}^{iter-1}\right] \\ i_m{}^{iter,A} = i_m{}^{(iter-1),A} \times \omega_i \end{cases} \quad \text{Avec, A= } \gamma \qquad (3.27)$$

Ici, $I_m{}^{iter,\ A}$ est le vecteur de mouvement du i^{th} cheval vers le meilleur cheval moyen avec l'emplacement X, ρN est le nombre de chevaux ayant les meilleurs emplacements, ρ est, en général, 10% des chevaux, ω_i : est le facteur de réduction par cycle [146] .

5. Mécanisme de défense

Il est bien connu que les chevaux se défendent par une réaction de fuite ou de combat. Ils tentent de fuir en premier et de se débattre lorsqu'ils sont pris au piège. Les chevaux sont en concurrence les uns avec les autres pour la nourriture et l'eau. Ils doivent également faire face à un environnement hostile ou dangereux.

Dans l'algorithme Horse Herd Optimisation (HHO), la stratégie de protection des chevaux consiste à fuir les chevaux qui ont un comportement inacceptable. Le mécanisme de défense est actif tout au long de la vie du cheval [147].

Le mécanisme de défense des chevaux est indiqué par les équations suivantes :

$$\begin{cases} {D_m}^{iter,A} = -{d_m}^{iter,A}\left[\left(\frac{1}{qN}\sum_{j=1}^{qN} {X_j}^{iter-1}\right) - X^{iter-1}\right] \\ {d_m}^{iter,A} = {d_m}^{(iter-1),A} \times \omega_d \end{cases} \quad \text{Avec, A= } \alpha, \beta, \gamma \qquad (3.28)$$

Où, ${D_m}^{iter,A}$, est le vecteur de fuite du i[th] : cheval à partir de la moyenne de certains chevaux ayant les pires emplacements, qui sont représentés par le vecteur X , qN est le nombre de chevaux ayant la plus mauvaise position, q est 20% du nombre total de chevaux, ω_d est le facteur de réduction par cycle pour l'itération d_{iter} .

6. Errance

C'est un fait que les chevaux errent à l'extérieur à la recherche de la nourriture. Un cheval peut soudainement se rendre quelque part pour brouter. Les chevaux sont généralement très curieux et se rendent dans de nouveaux endroits pour découvrir de nouveaux pâturages ou pour bien connaître leur voisinage. L'itinérance chez un cheval est généralement observée à un jeune âge et disparaît progressivement avec l'atteinte de la maturité. Les équations décrivant cette étape sont les suivantes :

$$\begin{cases} {R_m}^{iter,A} = {r_m}^{iter,A}\rho X^{(iter-1)} \\ {r_m}^{iter,A} = {r_m}^{(iter-1).A} \times \omega_r \end{cases} \quad \text{Avec, A=} \gamma, \delta \qquad (3.29)$$

Ou , R_m [iter,A] : est le vecteur de vitesse aléatoire du i [th] cheval pour une recherche locale et une fuite pour les vitesses des chevaux sous les catégories δ, γ ,β et α respectivement , les équations (3.27)-(3.29) donnent :

Vitesse des chevaux δ à l'âge de 0 à 5 ans :

$${V_m}^{iter,\delta} = \left[{g_m}^{(iter-1),\delta}\omega_g(\mu + \rho l){X_m}^{(iter-1)}\right] + \left[{i_m}^{(iter-1),\delta}\omega_i\left[\frac{1}{\rho N}\sum_{j=1}^{\rho N} X^{(iter-1)}\right]\right] + \left[{r_m}^{(iter-1),\delta}\omega_r\rho X^{(iter-1)}\right] \qquad (3.30)$$

Vitesse des chevaux à l'âge de 5-10 ans :

$$\boldsymbol{V_m}^{\boldsymbol{iter,\delta}} = \left[\boldsymbol{g_m}^{(\boldsymbol{iter-1}),\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\omega_g}(\boldsymbol{\mu}+\boldsymbol{\rho l})\boldsymbol{X_m}^{(\boldsymbol{iter-1})}\right] + \left[\boldsymbol{i_m}^{(\boldsymbol{iter-1}),\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\omega_i}\left[\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\rho N}}\sum_{\boldsymbol{j=1}}^{\boldsymbol{\rho N}}\boldsymbol{X}^{(\boldsymbol{iter-1})}\right]\right] +$$

$$\left[\boldsymbol{r_m}^{(\boldsymbol{iter-1}),\boldsymbol{\delta}}\boldsymbol{\omega_r}\boldsymbol{\rho X}^{(\boldsymbol{iter-1})}\right] \quad (3.31)$$

$$V_m^{\,iter,\gamma} = \left[g_m{}^{(iter-1),\gamma}\omega_g(\mu+\rho l)X_m{}^{(iter-1)}\right] + \left[h_m{}^{(iter-1),\gamma}\omega_h\left[X^{(iter-1)} - X_m{}^{(iter-1)}\right]\right] +$$

$$\left[s_m{}^{(iter-1),\gamma}\omega_s\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}X_j{}^{(iter-1)} - X_m{}^{(iter-1)}\right]\right] + \left[i_m{}^{(iter-1),\delta}\omega_i\left[\frac{1}{\rho N}\sum_{j=1}^{\rho N}X_j{}^{(iter-1)} - X_m{}^{(iter-1)}\right]\right] -$$

$$\left[d_m{}^{(iter-1),\gamma}\omega_d\left[\frac{1}{\rho N}\sum_{j=1}^{\rho N}X_j{}^{(iter-1)} - X^{(iter-1)}\right]\right] + \left[r_m{}^{(iter-1),A}\omega_r\rho X^{(iter-1)}\right] \quad (3.31)$$

$$V_m^{\,iter,\beta} = \left[g_m{}^{(iter-1),\beta}\omega_g(\mu+\rho l)X_m{}^{(iter-1)}\right] + \left[h_m{}^{(iter-1),\beta}\omega_h\left[X^{(iter-1)} - X_m{}^{(iter-1)}\right]\right] +$$

$$\left[s_m{}^{(iter-1),\beta}\omega_s\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}X_j{}^{(iter-1)} - X_m{}^{(iter-1)}\right]\right] - \left[d_m{}^{(iter-1),}\omega_d\left[\frac{1}{\rho N}\sum_{j=1}^{\rho N}X_j{}^{(iter-1)} - X^{(iter-1)}\right]\right]$$

$$\left[s_m{}^{(iter-1),\beta}\omega_s\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}X_j{}^{(iter-1)} - X_m{}^{(iter-1)}\right]\right] - \left[d_m{}^{(iter-1),}\omega_d\left[\frac{1}{\rho N}\sum_{j=1}^{\rho N}X_j{}^{(iter-1)} - X^{(iter-1)}\right]\right] \quad (3.32)$$

Les étapes suivantes consistent à calculer les valeurs d'aptitude ($P_{pv} = I_{pv} \times V_{pv}$) en fonction des conditions initiales. Les vitesses et les cycles de travail des chevaux sont mis à jour en conséquence. Les chevaux sont classés selon leur aptitude et des paramètres spécifiques (alphas, bêtas, gammas, deltas) sont attribués pour influencer leur comportement, y compris la pâture, les mécanismes de défense, la hiérarchie, la sociabilité, l'imitation, l'errance et la curiosité [148]. Dans ce contexte, l'algorithme assure la préservation de la meilleure position du cheval, maintenant ainsi le cycle de travail au meilleur cycle de travail global (gbest). Ce cycle se poursuit jusqu'à ce qu'une condition prédéfinie soit remplie, comme lorsque le compteur d'itérations atteint une limite fixée (compteur < iter=300).

a) Configuration de base : fourniture de variables avec une limite et d'autres facteurs.
b) Initialiser : créer un espace adapté avec une sélection aléatoire uniforme de chevaux.
c) Vérification de la condition physique : détermination du coût de chaque cheval, en fonction du lieu et de la fonction objectif.
d) Évaluation de l'âge : évaluer l'âge des chevaux (α , β , γ et δ).
e) Implémentez la vélocité : en fonction de l'âge de chaque cheval, appliquez la vélocité.
f) Réviser la position : mise à jour de la position de tous les chevaux dans l'espace de recherche.
g) Fin : si les critères d'arrêt ne sont pas remplis, passer à l'étape (c).
La figure 3.13 présente un organigramme qui illustre systématiquement le processus de contrôle, améliorant ainsi la compréhension de la procédure de recherche concernant le cycle de travail optimal.

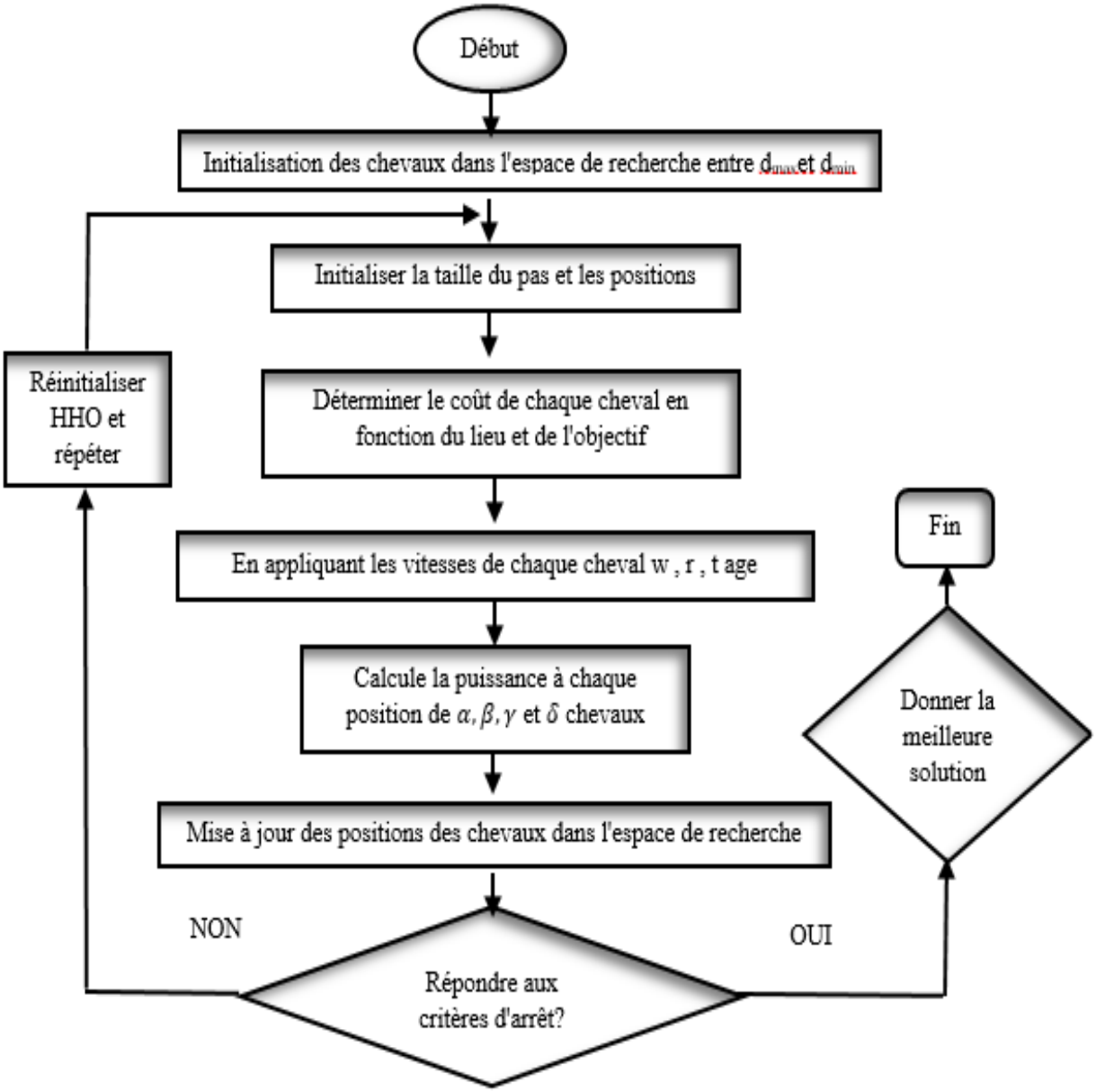


Figure 3.13 Organigramme de l'algorithme HOA

3.2.2.5 Méthode Particle Swarm Optimisation

L'objectif principal consiste à maximiser l'utilisation de l'irradiation disponible. Pour atteindre cet objectif, Un système de contrôle Maximum Power Point Tracking est mis en place en utilisant l'algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO) [149]. Inspiré des comportements collectifs observés dans la nature, comme les déplacements coordonnés des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux migrateurs, le PSO est une technique d'optimisation probabiliste (Figure 3.14). Il guide un ensemble de "particules" dans l'espace des solutions pour identifier la solution optimale.

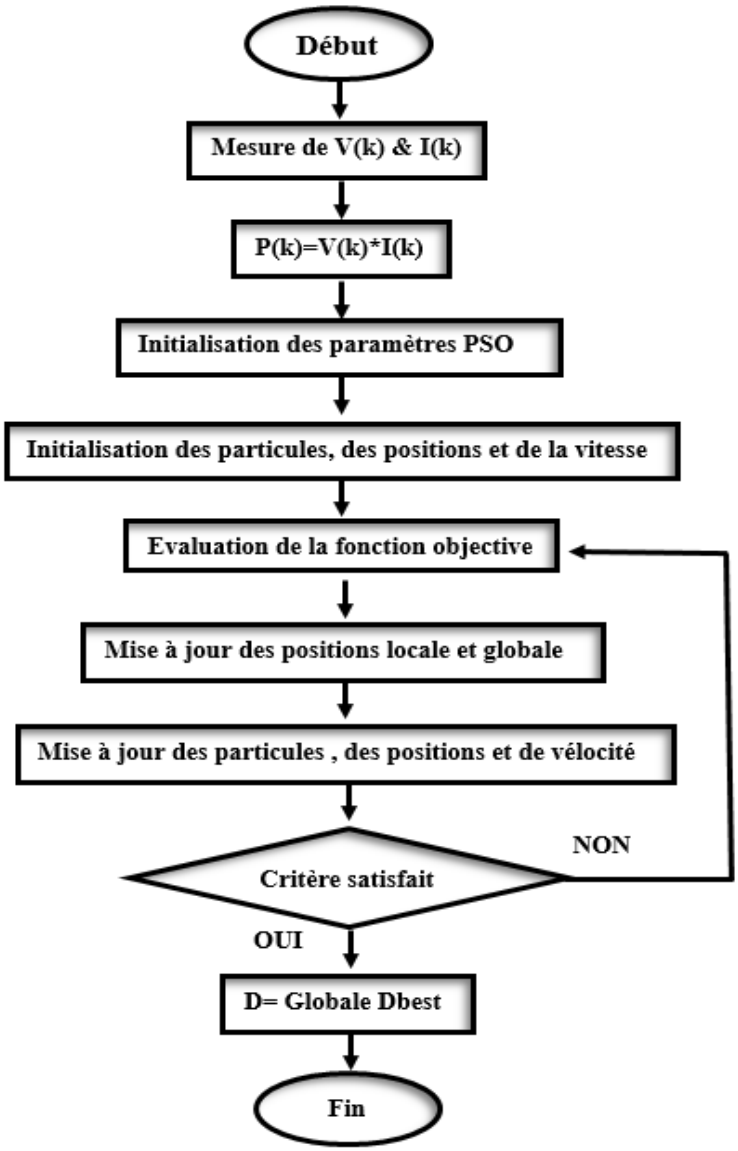


Figure 3.14 Organigramme de l'algorithme PSO

Le mouvement de chaque particule est guidé par ses vecteurs de vitesse et de position dans le but d'atteindre l'optimum global. La qualité de sa position est évaluée en fonction de la valeur de la fonction objective (F). Dans cette étude, nous adopterons comme critère d'optimisation la minimisation d'un critère quadratique, exprimé par la relation suivante :

$$F = \int_0^t e^2 dt = \int_0^t (P_O - P_i)^2 dt \quad (3.33)$$

Où , P_o est la puissance de sortie et P_i est la puissance d'entrée (puissance du générateur PV).

Le vecteur de position est déterminé à l'aide de la formule suivante [150, 151]:

$$V^{(k+1)}{}_i = \mathrm{w} * V^{(k)}{}_i + C_1 * rand(x) * \left(Pbest_i - K^{(k)}{}_i\right) + C_2 * rand(x) * \left(Gbest_i - K^{(k)}{}_i\right) K^{(k+1)}{}_i = K^{(k)}{}_i + V^{(k+1)}{}_i \quad (3.34)$$

Tableau 3.3 ; Paramètres de la méthode PSO

	Symbole	Valeur
Nombre d'essaims	essaims	10
Nombre d'itérations	Iter-max	200
Poids de l'information locale	C 1	1.6
Poids de l'information globale	C 2	2.5
Poids de l'inertie	w	0.4
Dimension du problème	Dim	1

3.2.2.5 Résultats de Simulation

Les quatres algorithmes sont appliqués pour le suivi du point de puissance maximale du système PV, sont testés par simulation MatLab sous quatre profils d'ombrage différents, comme le montre le tableau 3.4, pour un GPV composé de trois (3) modules solaires.

Table 3.4 Profiles type et spécifications

Profiles	G (W/m^2)	PG (W)
Profile 1	[1000 1000 1000]	250
Profile 2	[1000 1000 450]	160
Profile 3	[900 750 300]	125
Profil 4	[1000 1000 800]	212

Les résultats de simulation obtenus, en particulier de la tension et la puissance photovoltaïques, et du rapport de cycle de fonctionnement, sont présentés par les figures 3. 16, 3.17, 3.18 et 3. 19.

Il est à noter que le premier profile correspond à l'état sans ombrage (uniforme) , or que les autres profiles ont été choisis pour avoir un nombre différent de pics de puissances maximales, soient les $2^{ème}$ et $3^{ème}$ et $4^{ème}$ profiles . Sous l'effet de ces profiles les allures obtenues pour des caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$ sont représentées par la figure 3.15, permettent de noter que pour le 1^{er} profile un seul point max global apparait (PG) , la deuxième caractéristique obtenues sous le profile 2 présente deux (2) points de puissances maximale dont un global (PG1) et l'autre partiel (PP) quant la caractérisque du $3^{ième}$ profile , on enregistre trois (3) points maximaux donne un global (PG3) et deux (2) autres (PP1-PP2) .

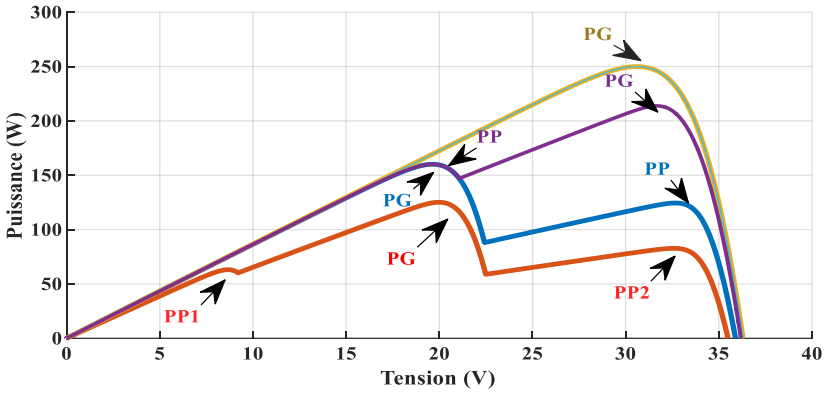


Figure 3. 15 Profiles étudiés

L'objectif est de s'assurer que le MPPT peut extraire la puissance maximale globale pour chaque algorithme méthaheuristique utilisé. Cependant, les résultats confirment notre intention, montrent que le système a fonctionné exactement au niveau des performances souhaités dans chaque test.

Comme le montre le tableau de comparaison 3.5, les performances de la méthode HOA sont évidentes. De manière impressionnante, cette méthode converge rapidement vers une GMPP.

Table 3.5. Tableau de comparison

	Méthodes Etudiées	**P_{max}**	**Raport Cyclique**	**Temps De réponses**	**Rendement (%)**
Profil 1	CS	250.21	0.50	0.31	91.60
	GA	250.15	0.49	0.4	94.01
	GWO	250.1	0.482	0.2	96.21
	HHO	250.02	0.503	0.026	99.20
	PSO	250.24	0.487	0.45	90.40
Profile 2	CS	160.12	0.604	0.38	92.50
	GA	160.15	0.596	0.45	91.63
	GWO	160.03	0.602	0.078	93.75
	HHO	160.10	0.6	0.03	98.82
	PSO	160.21	0.579	0.41	97.68
Profile 3	CS	124.97	0.545	0.3	97.62
	GA	124.89	0.5324	0.6	91.24
	GWO	125	0.542	0.07	98.90
	HHO	125.12	0.54	0.06	93.75
	PSO	124.95	0.562	0.28	96.97
Profile 4	CS	213.525	0.44	0.5	99.75
	GA	213.8	0.442	0.825	92.857
	GWO	213.61	0.441	0.47	99.246
	HHO	212.7	0.448	0.18	99.67
	PSO	213.3	0.432	0.73	98.59

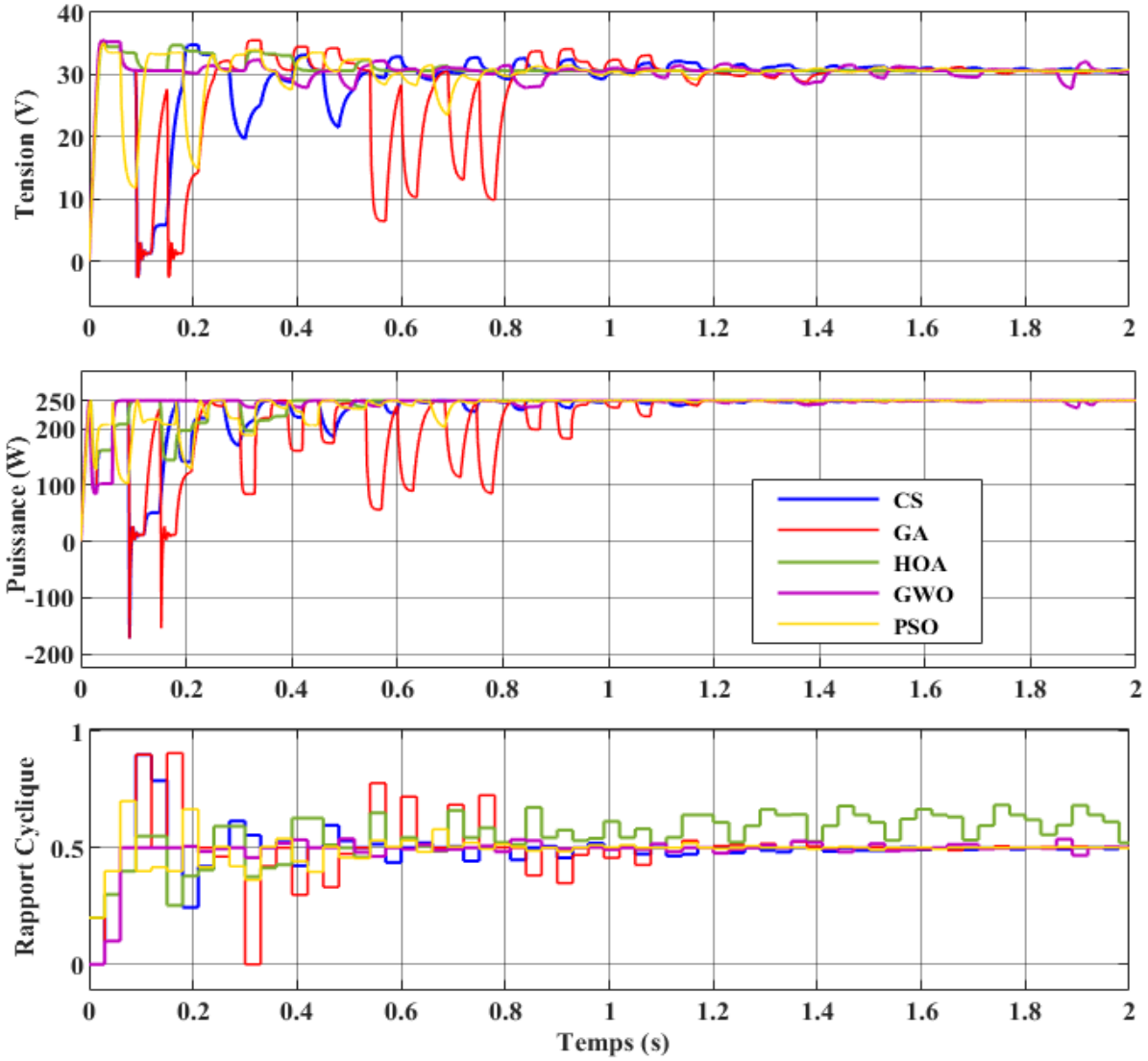


Figure 3. 16 Profile standard

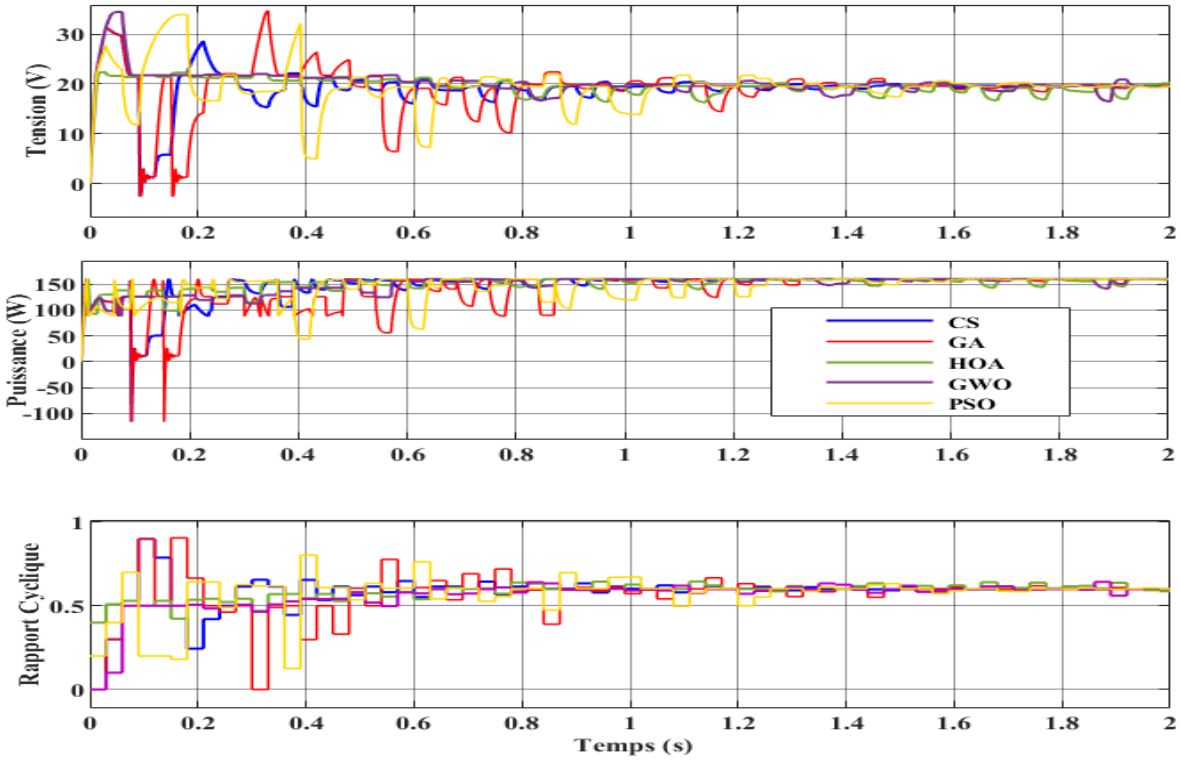


Figure 3. 17 1er Profile d'ombrage

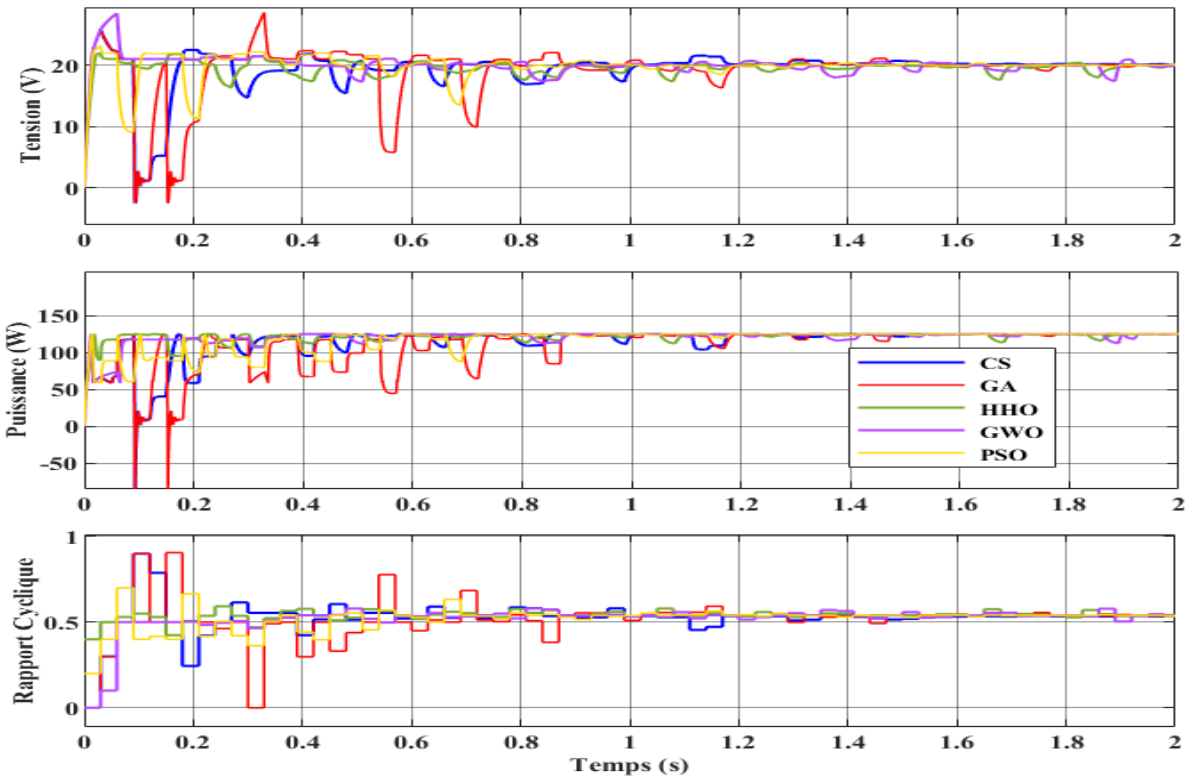


Figure 3. 18 2ème Profile d'ombrage

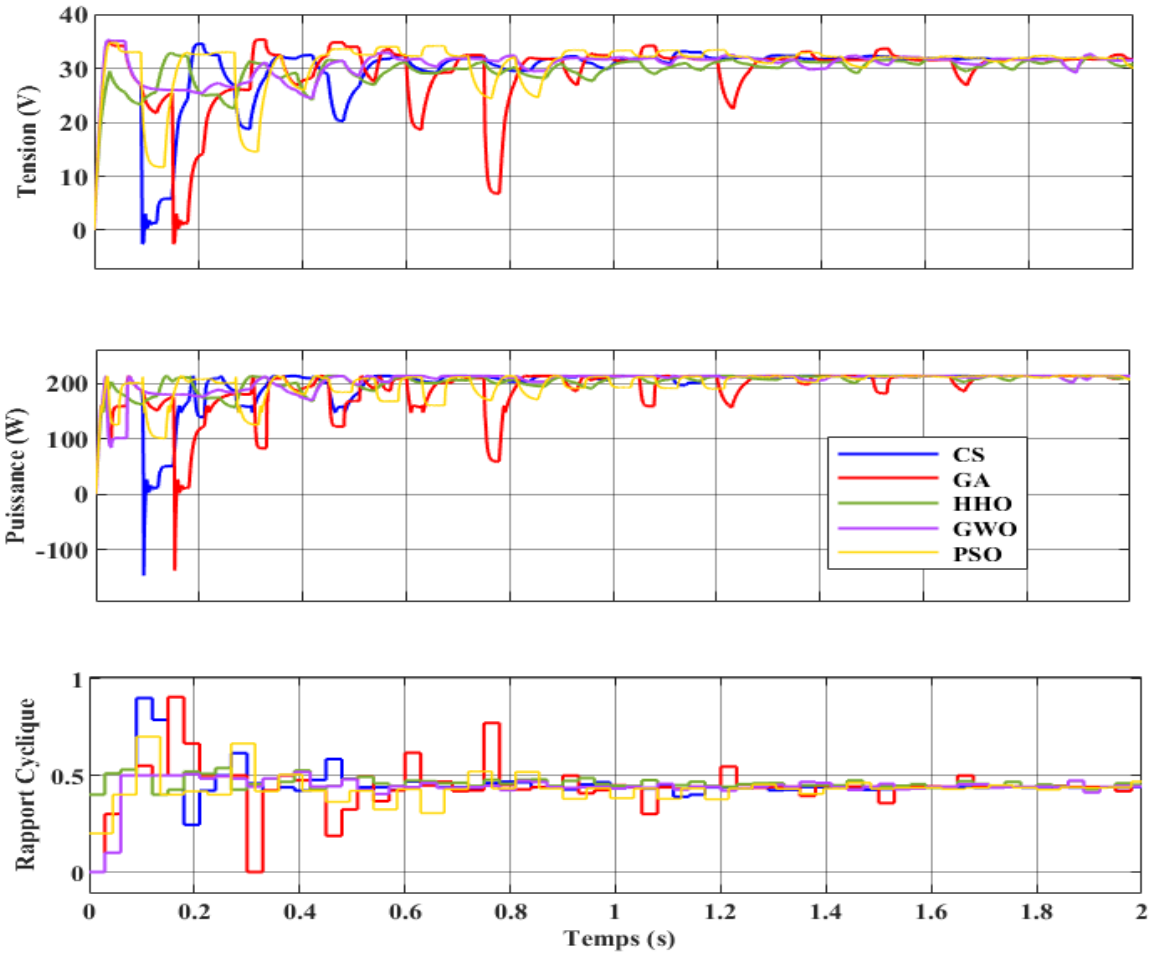


Figure 3.19 3ème Profile

Ces résultats soulignent l'efficacité et les prouesses de la méthode HOA dans l'optimisation du processus MPPT pour les systèmes photovoltaïques. En effet, la précision supérieure, la vitesse de convergence et le pourcentage d'efficacité de la méthode HOA soulignent son potentiel en tant que choix convaincant pour optimiser la production d'énergie et surmonter les problèmes d'ombrage dans les applications photovoltaïques. La méthode (PSO) se distingue par sa convergence et sa simplicité d'implémentation, ce qui le rend très lente pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans un système photovoltaïque ombré. Contrairement aux algorithmes comme Cuckoo Search (CS), qui nécessitent un grand nombre d'itérations pour une exploration approfondie, ou algorithme génétique (GA), qui est robuste mais lente à converger. Par rapport à Grey Wolf Optimization (GWO), qui équilibre bien l'exploration et l'exploitation mais peut être sensible aux paramètres initiaux, Enfin, bien que Horse Herd Optimization (HHO) offre une bonne adaptabilité aux variations d'ombre, il nécessite un ajustement fin des paramètres pour éviter une convergence prématurée. Le HHO s'impose

comme une solution rapide, fiable et facile à implémenter pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques en conditions d'ombrage avec ces oscillations contribuent à réduire l'efficacité énergétique globale.

3.2.3 Technique de commande des puissances

Dans cette thèse nous avons considérés deux (2) techniques pour controller les puissances active et reactive, les details sont présentés dans les paragraphes suivantes:

3.2.3.1 Commande orientée tension

La méthode la plus largement connue pour réguler les puissances active et réactive dans les applications connectées au réseau est la commande orientée tension (VOC: Voltage Oriented Control). Elle consiste essentiellement à aligner la tension du réseau avec l'axe direct du référenciel rotatif (d-q) afin de découpler ces puissances , ce qui permet de les contrôler séparément en utilisant les expresion suivantes :

$$P = \frac{3}{2}(V_d i_d) \tag{3.35}$$

$$Q = -\frac{3}{2}(V_q i_q) \tag{3.36}$$

De cette manière, la gestion de la puissance active est assurée en contrôlant directement le courant d'axe direct (i_d), tandis que la régulation de la puissance réactive se fait en utilisant le courant d'axe en quadrature (i_q). Pour atteindre un équilibre énergétique, le courant d'axe direct est généralement prélevé sur la connexion au bus continue, tandis que le courant d'axe en quadrature est réglé sur zéro pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Cependant, en ajustant la valeur du courant d'axe en quadrature, il est possible d'injecter et de soutenir le système avec de la puissance réactive, ce qui réduit la valeur de la puissance active pour éviter toute surcharge de l'onduleur [152] . Pour mettre en œuvre la stratégie VOC, une structure de boucle en cascade est utilisée avec des contrôleurs PI. Dans ce cas, la boucle extérieure fournit les courants de référence pour la boucle intérieure, qui calcule ensuite la tension de référence et l'applique à l'étage de modulation, comme le montre la figure 3.20.

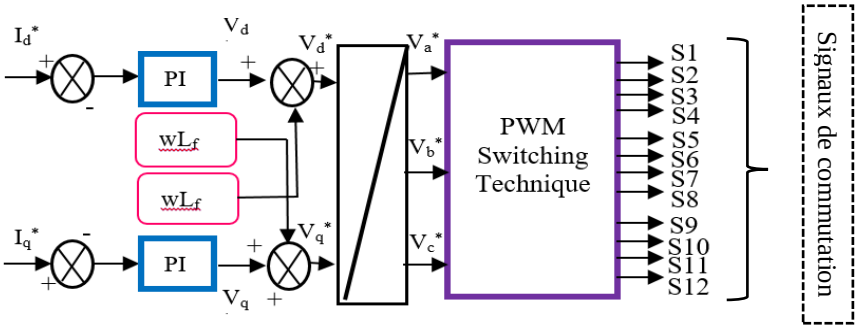


Figure 3.20 Schéma de la technique VOC

3.2.3.2 Controle de puissances avec la technique de FCS-MPC

La technique de "The Finite Control Set Model Predictive Control Current (FCS-MPCC) utilise une méthode heuristique pour sélectionner l'état de commutation optimal parmi les candidats finis. Cette sélection se fait en minimisant la fonction objective de la formulation du problème. Dans cette étude, la formulation de base du problème est examinée en détail pour mettre en évidence la propriété de fréquence de commutation variable du FCS-MPC [153-155].

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X(K+1)-X(K)}{T_s} \tag{3.37}$$

$$\begin{cases} i_\alpha(k+1) = \left(1 - \frac{R_f T_s}{L_f}\right) i_\alpha(k) + \frac{T_s V_{c1}(k)}{L_f} - e_\alpha \\ i_\beta(k+1) = \left(1 - \frac{R_f T_s}{L_f}\right) i_\beta(k) + \frac{T_s V_{c2}(k)}{L_f} - e_\beta \end{cases} \tag{3.38}$$

$$\begin{cases} V_{c1}(k+1) = V_{c1}(k) + \frac{T_s}{C} i_{c1}(k) \\ V_{c2}(k+1) = V_{c2}(k) + \frac{T_s}{C} i_{c2}(k) \end{cases} \tag{3.39}$$

$$i(k+1) = (1 - \frac{R_f T_s}{L_f}) i(k) + \frac{T_s v(k) - e(k))}{L} \tag{3.40}$$

i_d, i_q : courants de grille de l'axe d et de l'axe q ;

ω : fréquence angulaire de la grille ;

L_f : l'inductance du filtre ;

R_f : résistance du filtre ;

T_s : temps d'échantillonnage.

La fonction de coût (g) constitue le critère de sélection pour déterminer le signal de commutation optimal. En effet, elle est définie comme suit:

$$g = \gamma_1\left(|i^*{}_\alpha - i_\alpha(k+1)| + \left|i^*{}_\beta - i_\beta(k+1)\right|\right) + \gamma_2(|v^*{}_{dc} - v_{dc}(k+1)|) \tag{3.41}$$

La figure 3.21 montre le schéma fonctionnel du contrôleur FCS-MPC avec la formulation de base du problème. L'onduleur de tension triphasé à trois (3) niveaux est connecté au réseau,

régulant le courant de ligne i_{abc} pour se synchroniser avec la tension du réseau e_{abc} et transmettre toute la puissance réelle.

Le contrôleur (Finite-Control-Set) FCS-MPC sélectionne l'état de commutation optimal et envoie directement les sorties au circuit de commande des semi conductance de puissance. Cela entraîne des transitions de commutation indéfinies et une fréquence de commutation variable.

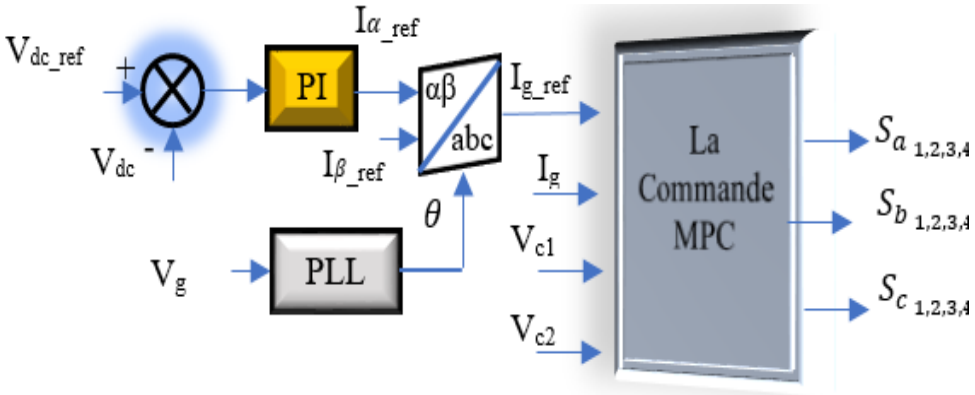


Figure 3.21 Bloc diagramme de la commande MPC

La structure de l'algorithme du FCS-MPCC pour l'onduleur PV est présentée par la figure 3.22.

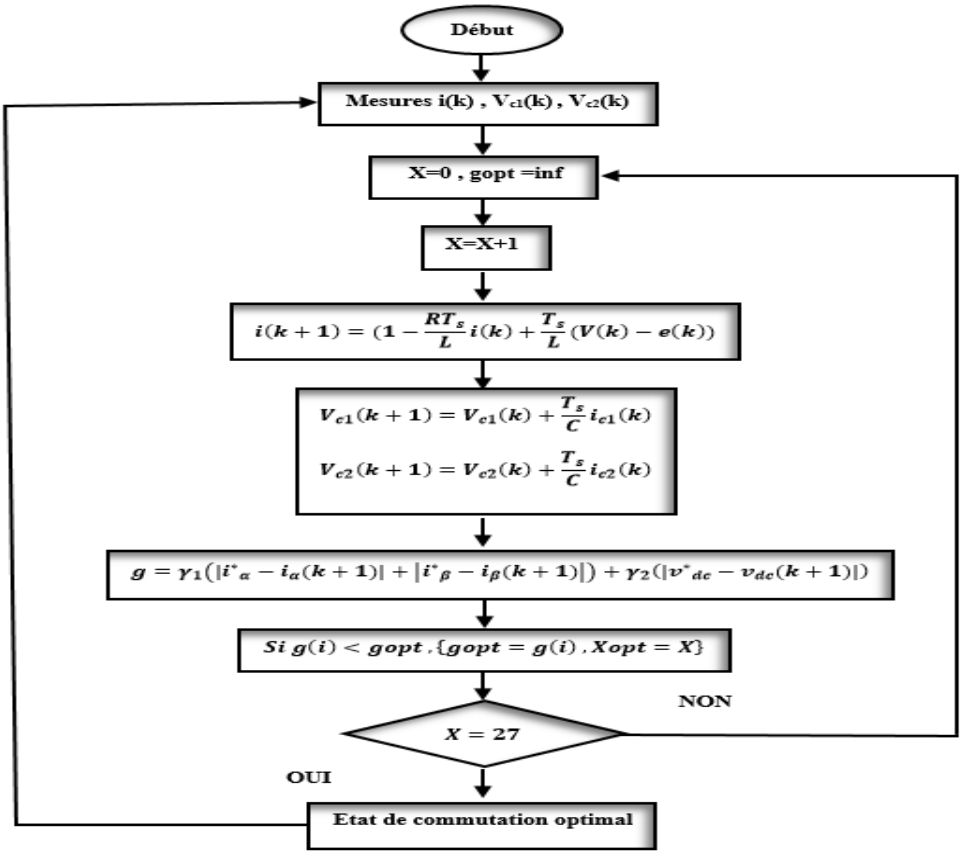


Figure 3.22 Algorithme de la commande MPC

Les détails de la stratégie de contrôle comprennent essenciellemnt les 6 parties suivantes : le module de mesure. Grâce aux mesures en temps réel des tensions du réseau, des courants de l'onduleur et des tensions du bus CC, les données de fonctionnement réelles sont transmises au système, tension du bus CC, les données d'exploitation réelles sont transmises au modèle de prédiction [156].

- Modèle de prédiction : le modèle de prédiction utilise la relation récursive de (3.39) pour calculer la valeur actuelle de celle de prédiction au temps k + 1 par la valeur mesurée du système au temps k.
- Optimiser la fonction de valeur : l'erreur quadratique du courant de référence et le courant prédit à l'instant k + 1 est prise comme fonction de valeur d'optimisation dans (3.40).
- Référence de courant : la référence du courant actif provient de la boucle de tension CC externe, c'est-à-dire que la tension de référence ($V_{dc_ref)}$ du module PV est générée par le contrôle MPPT.

3.2.4 Resultats de simulation

Cette section, consiste à analyser et évaluer les performances du système considéré en fonction du changement météorologique notamment la variation de l'irradiation. Comme base de cette analyse nous avons représenté par la figure 3.22 les caractéristiques des courants et des puissances en fonction de la tension du générateur photovoltaïque sous l'effet de quatre valeurs de l'irradiation : 300 w/m^2, 500 w/m^2, 700w/m^2 et sous une irradiation standard 1000 w/m^2. On remarque que les courants de court circuit (I_{cc}) et la puissance maximale développée avec l'augmentation du niveau de l'irradiation, comme on peut le consulter dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 Paramètres du courant et puissances du GPV sous differentes irradiations

Irradiation w/m^2	Icc(A)	Ppv _Max (w)
300	110.00	3.026e+04
500	185.00	5.075e+04
700	258.50	7.085e+04
1000	369.20	1.002e+05

Alors, pour prouver que le système fonctionne au point de la puissance maximale correspondante au niveau imposé de l'irradiation par la nature, nous avons testé le système sous un profile d'irradiation représenté par la figure 3.23. Ce profile montre que nous avons considéré des paliers où l'irradiation augmente ($0.2s \leq t \leq 0.6s$) et diminue ($1.2s \leq t \leq 1.6s$) progressivement et un palier de variation brusque à l'instant 2s. Le tracé de la puissance générée par le GPV est montré par la figure 3.24. On remarque bien que les puissances générées correspondent bien au niveau de l'irradiation correspondante comparativement à la figure 3.25 représentants P=f (V). Par contre les puissances réactive évoluent pour les deux méthodes VOC et FCS-MPCC au environ de zéro donc un facteur de puissance unitaire la figure 3.26. Finalement, la figure 3.27 montre clairement que la tension du bus continu suit parfaitement la valeur de référence imposée pour la tension d'entrée de l'onduleur et ce grâce au réglage de tension prévu en conséquence. Enfin, la figure 3.28 montre les courants de la phase 'a' et leurs zooms obtenus avec les deux techniques. Il convient de noter que les résultats obtenus avec MPC présentent moins d'oscillations et des temps de réponse plus rapides aux changements. Cela prouve la supériorité des performances du MPC.

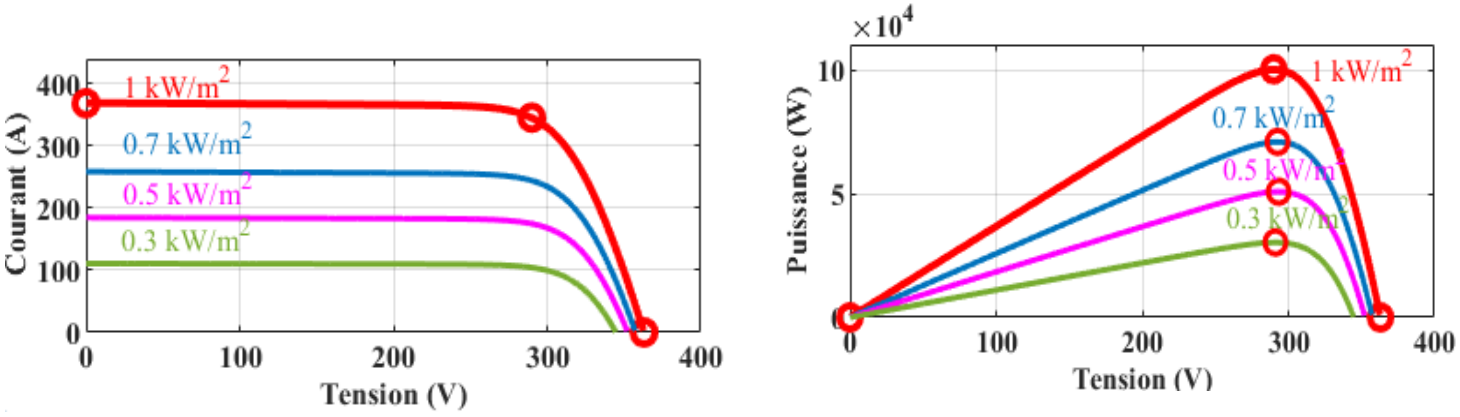


Figure 3.23 Profile sous irradiation variable

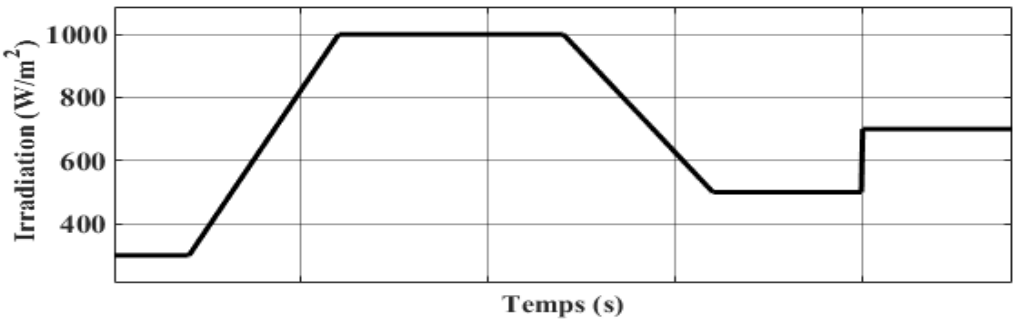


Figure 3.24 Profile d'irradiation

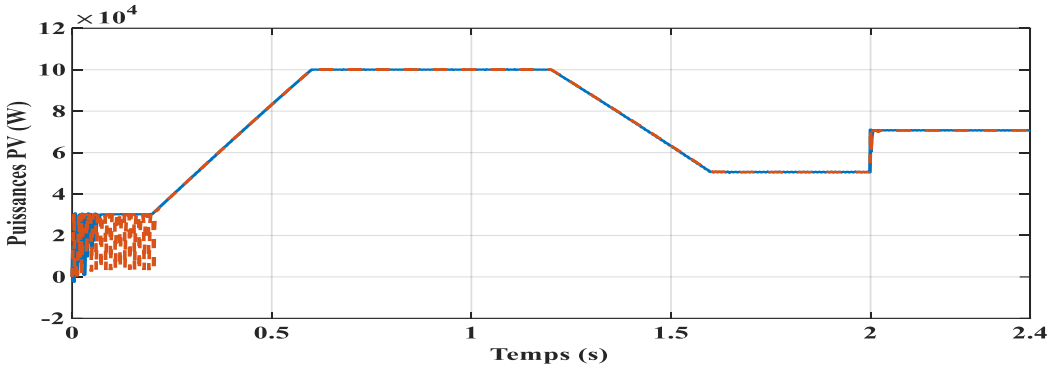


Figure 3.25 Puissance de GPV

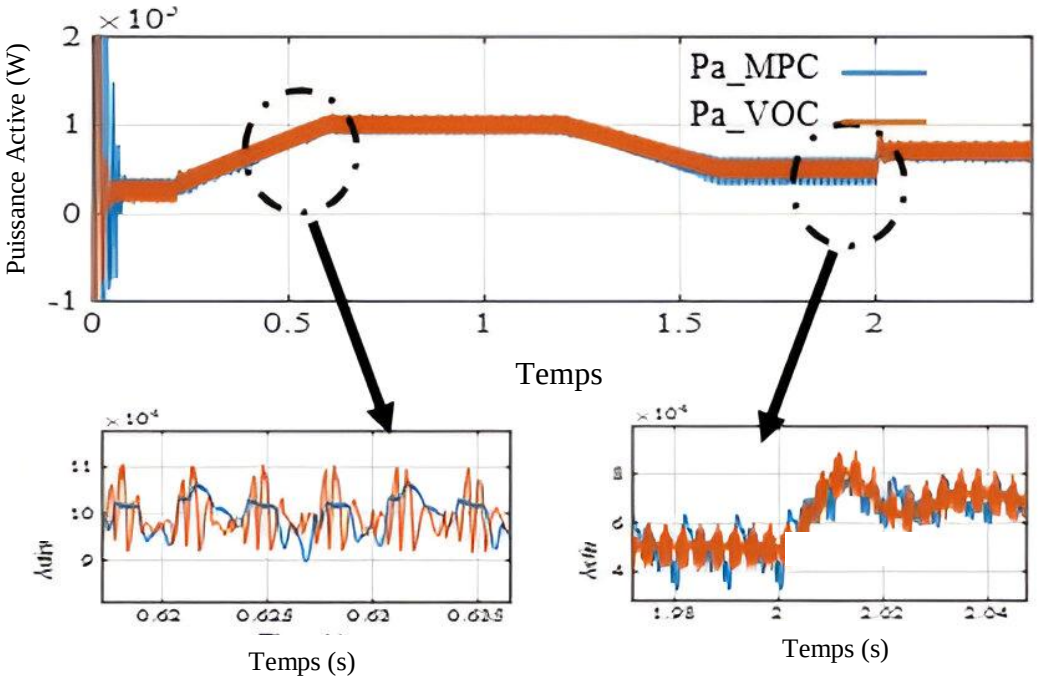


Figure 3.26 Puissance de GPV

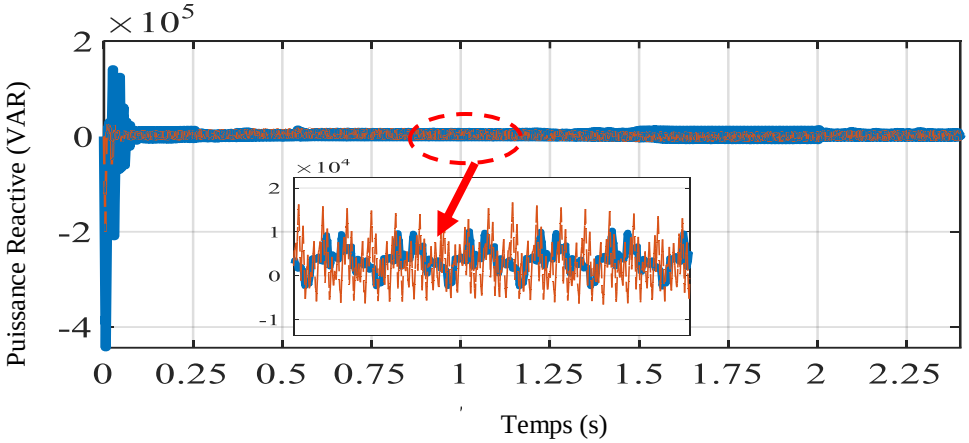


Figure 3.27 Puissance Réactive

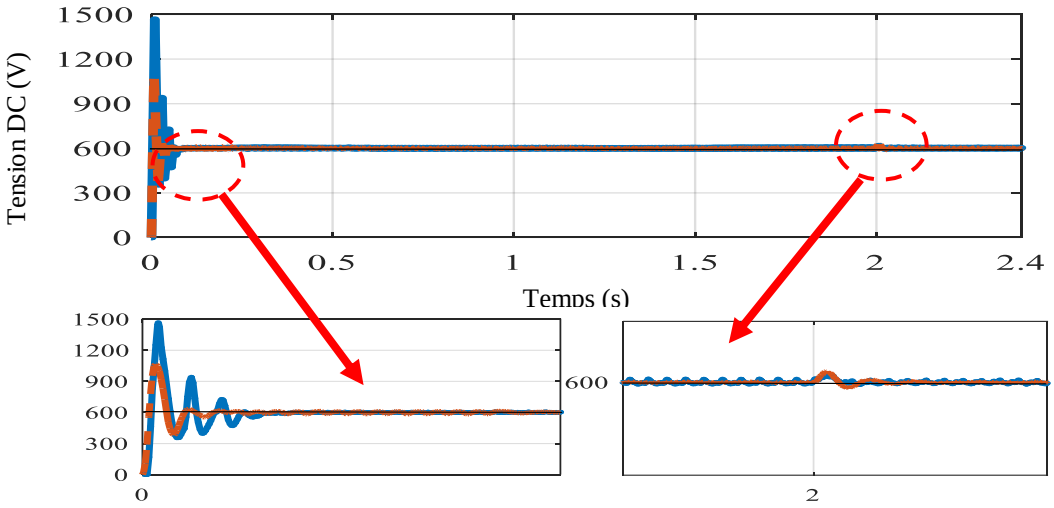


Figure 3.28 Tension DC

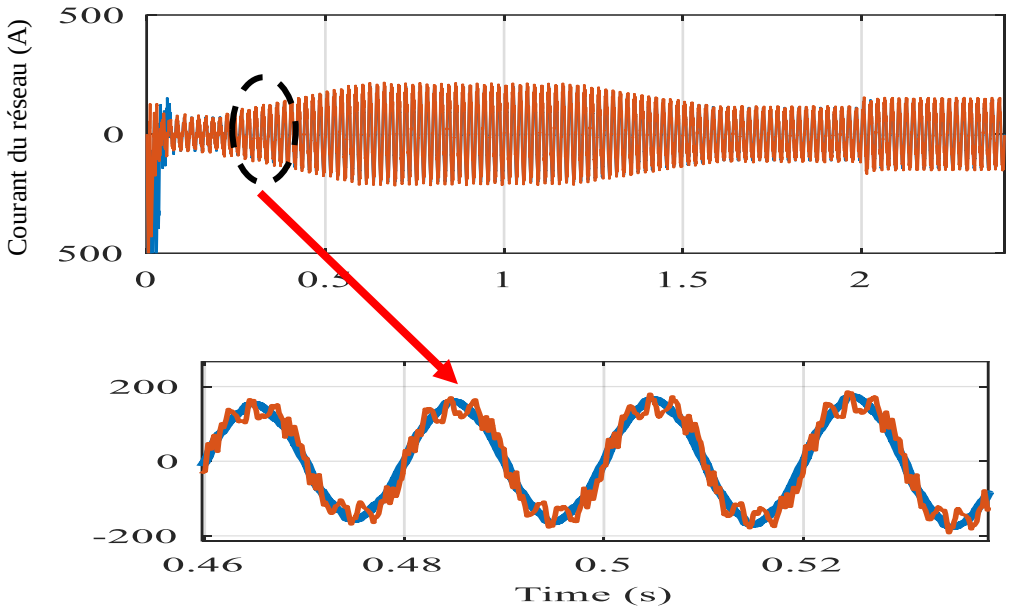


Figure 3.29 Courant de la phase (a)

La distorsion harmonique totale (THD) du courant du réseau est inférieure à 5 % , valeur correspondante à norme internationnale. Cela nous permet de répondre aux exigences de raccordement au réseau. Une comparaison de la THD du courant du réseau présentée dans les figures 3.28a et 3.28b montre que la THD du courant est de 21,19 % avec le contrôle PI de découplage traditionnel (VOC) à 4,43 % avec le système FCS- MPCC. Dans l'ensemble, la qualité des formes d'onde de sortie est grandement améliorée, de même que la précision.

Nous concluons donc que la méthode FCS-MPCC améliore considérablement la stabilité, la qualité et la précision du contrôle.

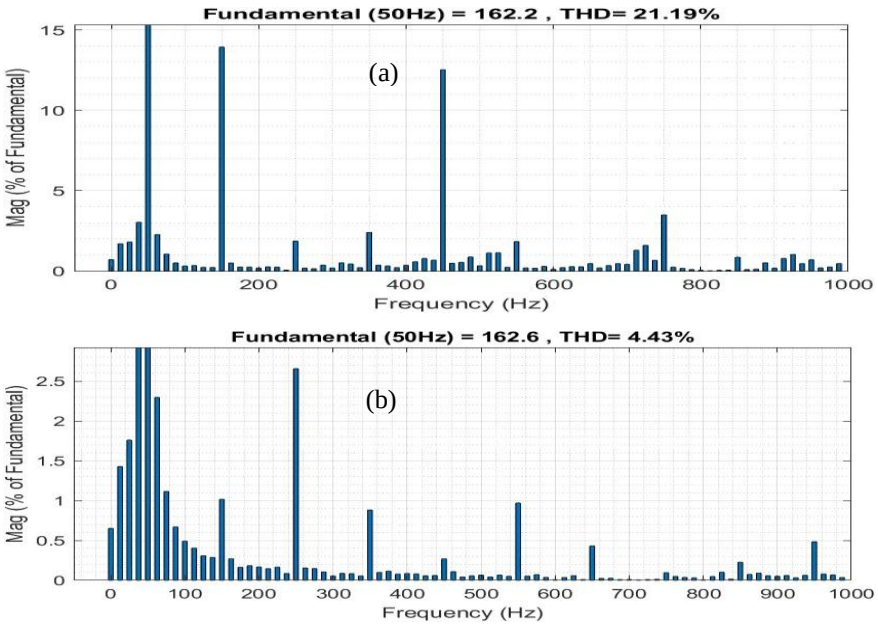


Figure 3.30 Analyse harmonique du courant de réseau en phase A: a) THD de la VOC, b) le THD de la FCS- MPC

3.3 Système eolien connecté au réseau

Le système éolien connecté au réseau consiste à un convertisseur Buck-To-Buck utilisé pour connecter le PMSG au réseau, comme le montre la figure 3.31. Pour extraire la puissance maximale, on utilise un régulateur flou type 2 optimisé par PSO, ainsi que pour injecter de la puissance active dans le réseau afin d'assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Pour cette partie, on considère deux (2) techniques de controles, la première est le contrôle backstepping , (machine-côté-réseau) et la deuxième la commande MPC (contrôle-côté-réseau).

.

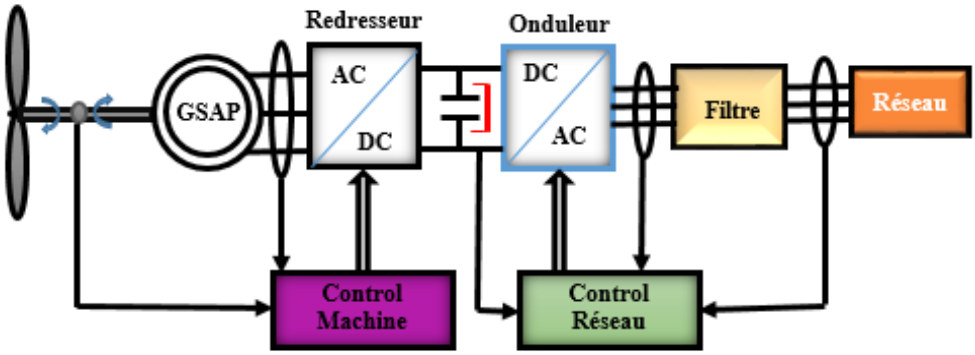


Figure 3.31 Système éolien connecté au réseau

3.3.1 Contrôle de la vitesse de rotation par PI- IT2FLC-PSO

Plusieurs techniques MPPT sont utilisées pour maintenir la puissance mécanique à sa valeur maximale quelque soit la vitesse du vent. La conception proposée du contrôleur de vitesse flou à intervalle de type 2. La boucle de contrôle de la vitesse qui fournit le couple de référence est la composante principale du schéma de contrôle de cette technique comme le montre la figure 3.32. La commande qui assure le suivi du point de puissance maximale (MPPT) détermine la vitesse de référence. En comparant la valeur de la vitesse de référence avec celle de la vitesse réelle mésurée, alors le signal d'erreur resultant assure à l'entrée du contrôleur FLC-T2I_PSO. Dans notre cas les paramètres (k_1, k_2, k_3) ont été déterminés par la méthode métaheuristique PSO [157].

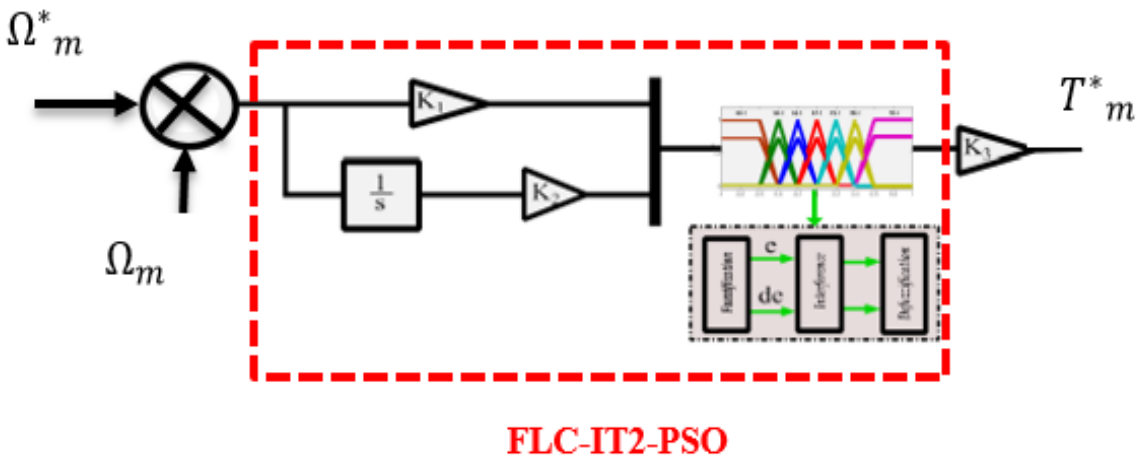
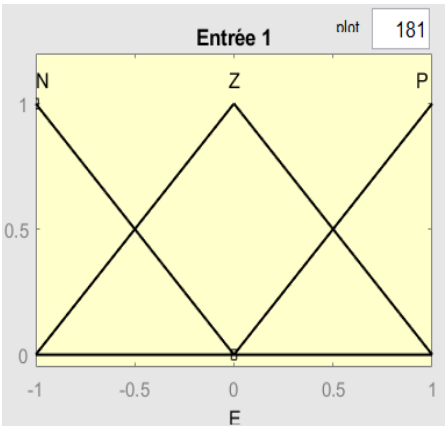
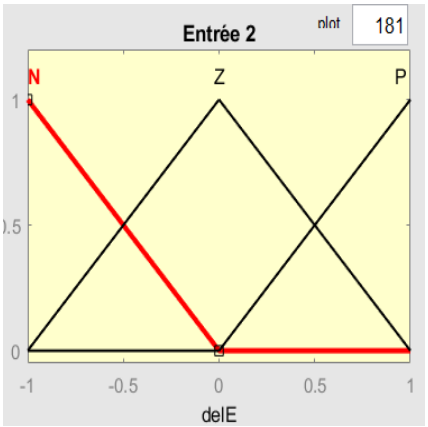


Figure 3.32 Structure du PI accordé FLC de type 2 à intervalles

La technique d'intelligence artificielle FLC-T2I_PSO peut être utilisée pour les systèmes électriques avec des contrôleurs conventionnels [158]:





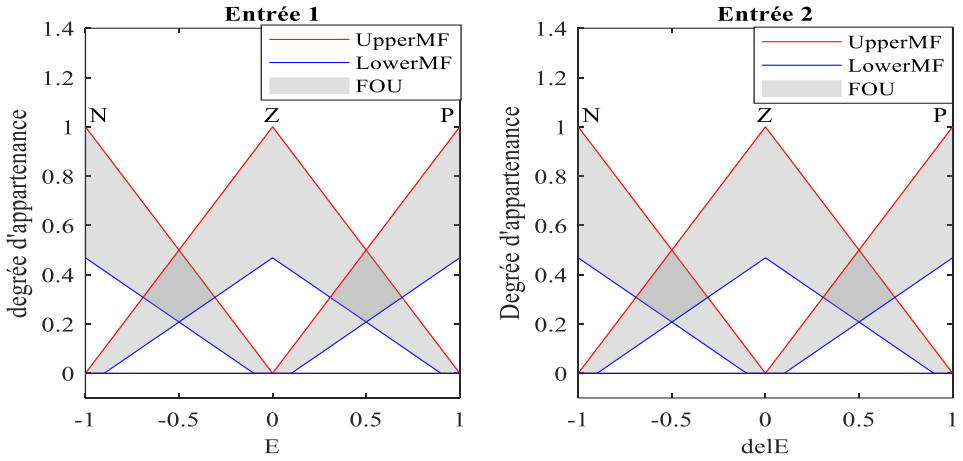


Figure 3.33 Incertitudes Flous pour IT2FLC.

La zone ombrée représente FOU, la fonction d'adhésion inférieure (LMF) représentée par une ligne pointillée, la fonction d'adhésion supérieure (UMF) représentée par une ligne continue et une FS intégrée représentée par une ligne ondulée. La zone située entre les fonctions des membres supérieurs et inférieurs est appelée (F) [206]. Elle offre un degré d'autonomie supplémentaire. Pour cette raison, un système de logique floue simple ou conventionnel avec le même nombre de fonctions d'appartenance ne peut pas obtenir le même résultat qu'un système de logique floue de type 2 [159-161].

La Figure 3.33 montre Organigramme de controleur IT2FLC-PSO [162]:

Étape 1 : Initialiser la population et les paramètres ω,c1,c2,r1,r2,T maximum.

Étape 2 :

2.1 Pour chaque particule :

- Calculer la valeur de la fonction d'intensité f_(i) à l'aide de l'équation .

- Si la valeur de la fonction d'intégrité est meilleure que la meilleure valeur de la fonction d'intégrité P . meilleure dans l'histoire :

Définir la valeur Fi actuelle de la fonction d'intégrité comme la nouvelle meilleure valeur g best.

2.2 Choisir la particule ayant la meilleure valeur d'intégrité Fi de toutes les particules comme étant la meilleure g.

2.3 Pour chaque particule : Calculer la vitesse de la particule et mettre à jour la position de la particule conformément.

2.4 Si (nombre de boucles.Tmaximum) ou (le critère d'erreur minimale est atteint), arrêter, sinon continuer.

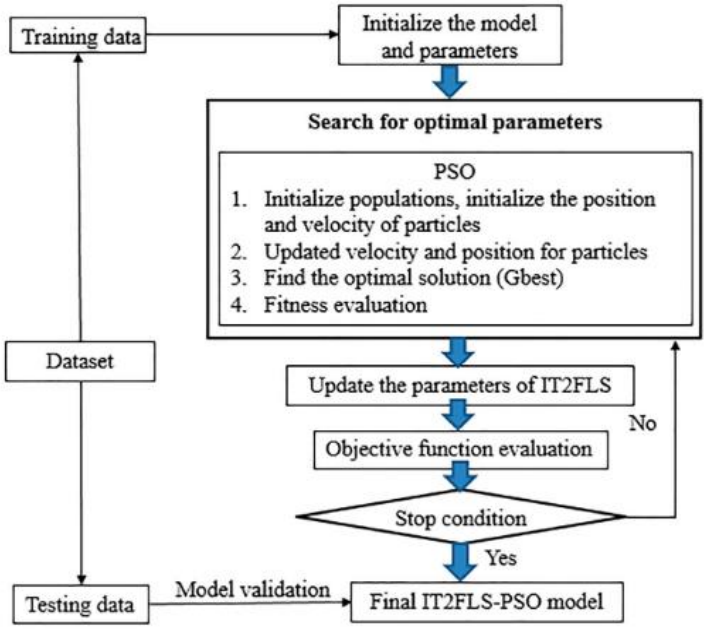


Figure 3.34 Organigramme de contrôleur IT2FLC-PSO [162]

3.3.2 Commande adaptative Backstepping côté machine

Pour le suivi du point de puissance maximale, les commandes de référence du GSAP sont définies comme la vitesse angulaire mécanique optimale, $\omega_{rm_ref} = \omega_{rm_opt}$ et le courant souhaité de l'axe d , $i_{d_ref} = 0$.

En tenant compte des erreurs de suivi suivantes:

$$\begin{cases} e_w = \omega_{rm_opt} - \omega_{rm} \\ e_d = i_{d_ref} - i_d \end{cases} \tag{3.42}$$

Ensuite, notre objectif est de concevoir des contrôleurs qui garantissent que les erreurs de suivi du système dans (3.40) atteignent les voisinages de l'origine malgré les incertitudes et les perturbations externes.

La sortie de contrôle du GSAP est calculée en appliquant un contrôle adaptatif à rebours et en générant une fonction de stabilisation [163-164]. La stratégie basée sur la passivité de la rétroaction linéaire est utilisée pour générer le contrôleur de courant id* est utilisée pour générer le contrôleur de courant iq*, dq* exprimé dans (3.41), représente la référence de courant pour le contrôleur en backstepping pour générer la fonction de stabilisation:

Tout d'abord, le vecteur d'erreur de suivi actuel est défini comme suit:

$$e_{dq} = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i^*{}_d - i_d \\ i^*{}_q - i_q \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

En utilisant la dérivée de (3.43) est calculée comme suit:

$$e^*{}_{dq} = \begin{bmatrix} e^*{}_d \\ e^*{}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_d} i_d - \frac{p\omega_m L_q}{L_d} i_q - \frac{v_d}{L_d} \\ R_s{}^{-1} \frac{d}{dt}\left(\left(-\varphi_q{}^* + p\omega_m \varphi_f\right) + K_f e_{fq}\right) - \left(-\frac{R_s}{L_q} + \frac{p\omega_m L_q}{L_q} - \frac{p\omega_m \varphi_f}{L_q} - \frac{v_q}{L_q}\right) \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

Pour concevoir le contrôleur V_{dq}, une fonction de Lyapunov est définie comme suit:

$$V_e = \frac{1}{2}\left(e^2{}_d - e^2{}_q\right) \tag{3.45}$$

La dérivée de (3.43) donne :

$$V_e = -k_1 e^2{}_d - k_2 e^2{}_q + e_d \left(\frac{R_s}{L_d} i_d - \frac{p\omega_m L_q}{L_d} i_q - \frac{v_d}{L_d} + k_1 e_d\right) + \left(\frac{R_s}{R_s + k_f L_q} \times \left[-R_s{}^{-1} \varphi^{\cdot *}{}_q + p\omega_m \varphi_f \left(\frac{f_{fv}}{JR_s} + \frac{1}{L_q}\right) + i_q \left(\frac{R_s}{L_q} - \frac{\left(p\varphi_f\right)^2}{JR_s}\right) + \frac{p\varphi_f}{JR_s} T_m - \frac{V_q}{L_q} + k_2 e_q \frac{R_s + k_f L_q}{R_s}\right]\right) \tag{3.46}$$

Après simplification, la fonction de Lyapunov (3.45) devient :

$$V_e = -k_1 e^2{}_d - k_2 e^2{}_q < 0 \tag{3.47}$$

Où $k_1 > 0$ et $k_2 > 0$. La stabilité asymptotique globale de la boucle fermée est garantie par (19) et le régulateur Vdq doit être choisi comme suit:

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d - p\omega_m L_q i_q + k_1 L_d e_d \\ v_q = R_s{}^{-1} L_q \varphi^{\cdot *}{}_f + p\omega_m \varphi_f \left(\frac{L_q f_{fv}}{JR_s} + 1\right) + i_q \left(R_s - \frac{L_q \left(p\varphi_f\right)^2}{JR_s}\right) + \frac{L_q p\varphi_f}{JR_s} T_m + k_2 L_q e_q \frac{R_s + k_f L_q}{R_s} \end{cases} \tag{3.48}$$

3.3.3 Commande prédective côté réseau

La technique de contrôle prédictif basée sur le modèle (MPCC) est appliquée au convertisseur de source de génération (GSC) pour gérer la puissance fournie au réseau électrique. Pour optimiser l'utilisation de la capacité du convertisseur et stabiliser la tension de fonctionnement, il est crucial que la tension de la liaison continue reste constant [165-167]. Ainsi, il est nécessaire d'atteindre un facteur de puissance unitaire, ce qui implique un échange nul de puissance reactive comme l'illustre la figure 3.35. Les tensions du GSC dans le système de coordonnées dq sont formulées par:

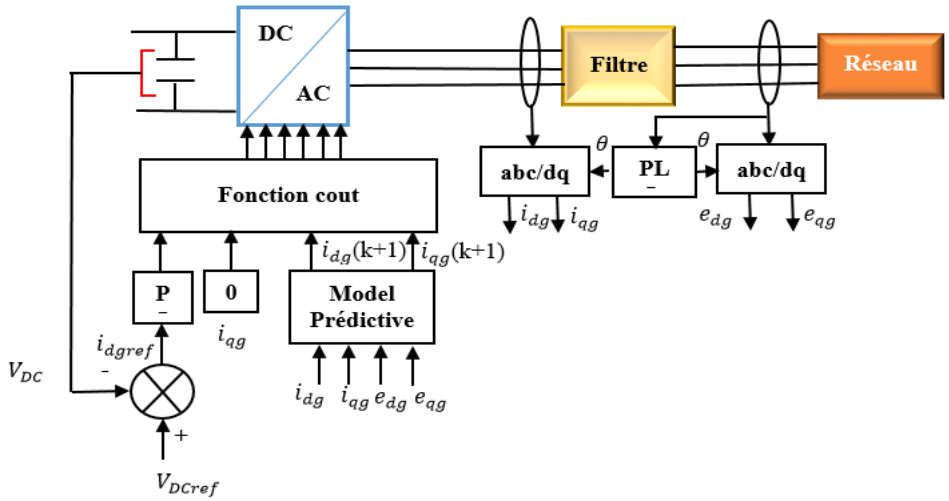


Figure 3.35 Schéma de Principe du système coté réseau avec la commande MPC

$$\begin{cases} v_d(k+1) = Ri_d(k) + L\frac{di_d}{dt} - \omega L i_q(k) + e_d(k) \\ v_q(k+1) = Ri_q(k) + L\frac{di_d}{dt} - \omega L i_d(k) + e_q(k) \end{cases} \quad (3.49)$$

Où ω_g représente la fréquence angulaire de la grille, i_{dg} et i_{qg} représentent les courants dq de réseau, L et R indiquent l'inductance et la résistance du filtre de la grille, e_d et e_q représentent les tensions dq de réseau. En appliquant la méthode FE à l'équation (3.49), le modèle DT des courants de réseau est donné par:

Une fois de plus, la méthode d'Euler est appliquée au GSC, le modèle discret du côté de la réseau peut être écrit comme suit:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R_f}{L_f}\right) i_d(k) + T_s\, \omega\, i_q(k) + \frac{T_s R_f}{L_f}(v_d(k) - e_d(k)) \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R_f}{L_f}\right) i_q(k) + T_s\, \omega\, i_d(k) + \frac{T_s R_f}{L_f}\left(v_q(k) - e_q(k)\right) \end{cases} \quad (3.50)$$

Où, e_d, e_q sont les composantes des tensions de l'axe d et de l'axe q de l'onduleur .

i_d, i_q : courants de grille de l'axe d et de l'axe q ;

ω : fréquence angulaire de la grille ;

L_f: l'inductance du filtre ;

R_f : résistance du filtre ;

T_s : temps d'échantillonnage ;

La fonction de coût conçue pour le GSC est formulée comme suit :

$$g = |i^*{}_d - i_d(k+1)| + \left|i^*{}_q - i_q(k+1)\right| \quad (3.51)$$

3.3.4 Résultats de simulation

Pour prouver la validité et l'efficacité du système, des simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Les paramètres du système étudié sont indiqués dans le tableau 3.7 .

Tableau 3.7 Paramètres de système éolien étudié

parametètre	**Valeur**
Résistance du stator (Rs)	6.25e-3 Ω
Inductance du stator (Ldq)	4.229e-3 mH
Rayon de l'éolienne (R)	55 m
Densité du vent (ρ)	1.22 kg/m2
Nombre de paires de pôles (p)	75
Liaison par flux (ϕ f)	11.1464 Wb
Inertie totale (J)	10000 kg m2
DC-link voltage (Vdc)	5000 V
DC-link capacitor (C)	0.06 F
Résistance du filtre (Rf)	0 pu
Inductance du filtre (Lf)	10e-3 pu

Pour étudier le suivi du MPP sous différentes variations de la vitesse du vent, la figure 3.34 montre le profil de la vitesse du vent. La figure 3.35 présente la vitesse mécanique et la figure 3.35 présente le couple électromagnétique.

La puissance active et réactive sont montrées par la figure 3.37 et la figure 3.38 illustre la tension de liaison CC, qui atteint son maximum lorsque la vitesse du vent varie.

La figure 3.39 montre la tension Vdc dans la liaison CC, qui varie avec une référence de 5000V, montrant chaque changement de vitesse du vent comme un pic de variation.

La figure 3.40 illustre le couple électromagnétique qui suit sa référence, et enfin le courant du générateur côté réseau qui varie en fonction de la variation de la vitesse du vent indiquée à la figure 3.34. La figure 3.41 presente le comportement des courants du reseau.

On peut donc noter que la réponse de la puissance était identique à la valeur de référence.

Concernant, l'annalyse de l'efficacité et la robustesse du contrôleur proposé dans le cas d'incertitudes paramétriques et de perturbations, nous constatons que le contrôleur PI conventionnel présente des erreurs de dépassement alors que le contrôleur proposé (IT2-FLC-PSO) est précis et exempt d'erreurs de dépassement, ce qui prouve sa robustesse face

aux changements rapides du signal de référence, et dans le cas de perturbations et de variations internes dans les paramètres du signal de référence, et dans le cas des paramètres du système.

Les résultats de la simulation permettent de conclure que le contrôleur proposé (IT2-FLC-PSO) s'est avéré être un meilleur choix dans le cas de variations des paramètres du système et d'incertitudes liées aux perturbations.

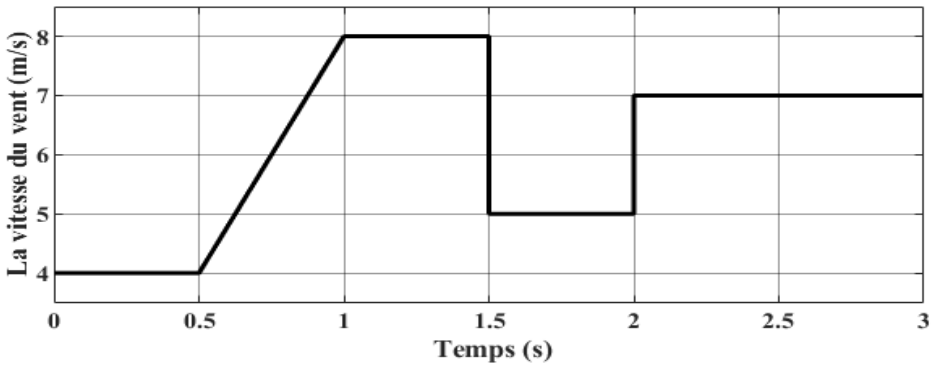


Figure 3.36 Profile de la vitesse du vent

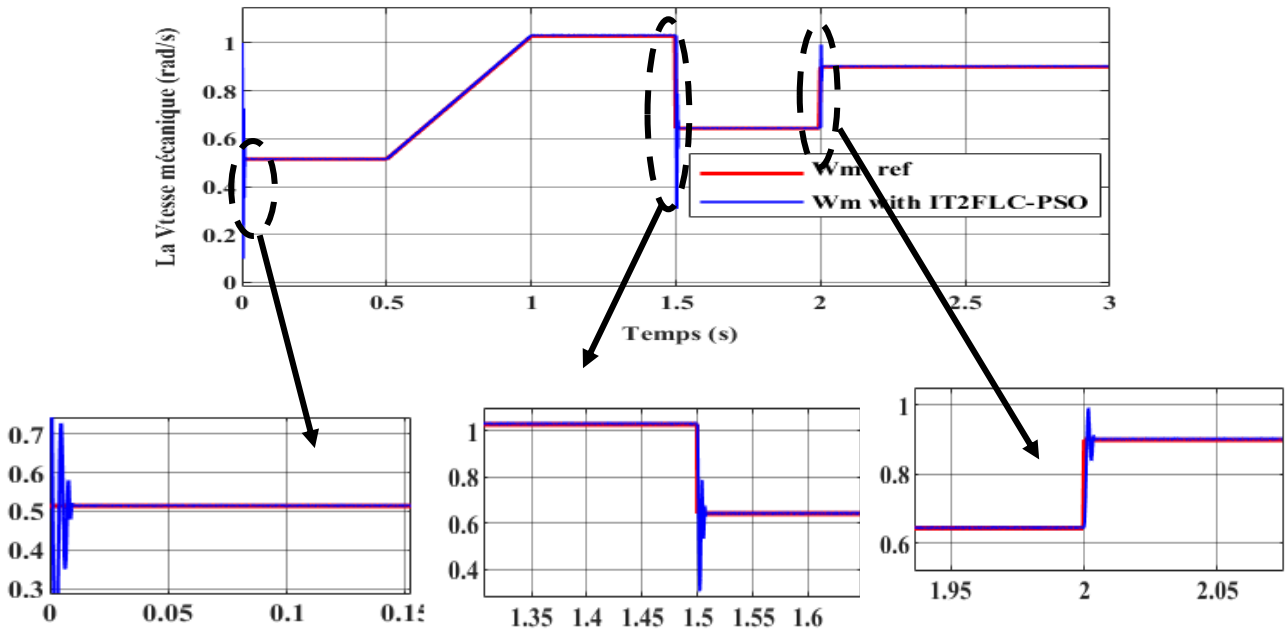


Figure 3.37 Vitesse de rotation

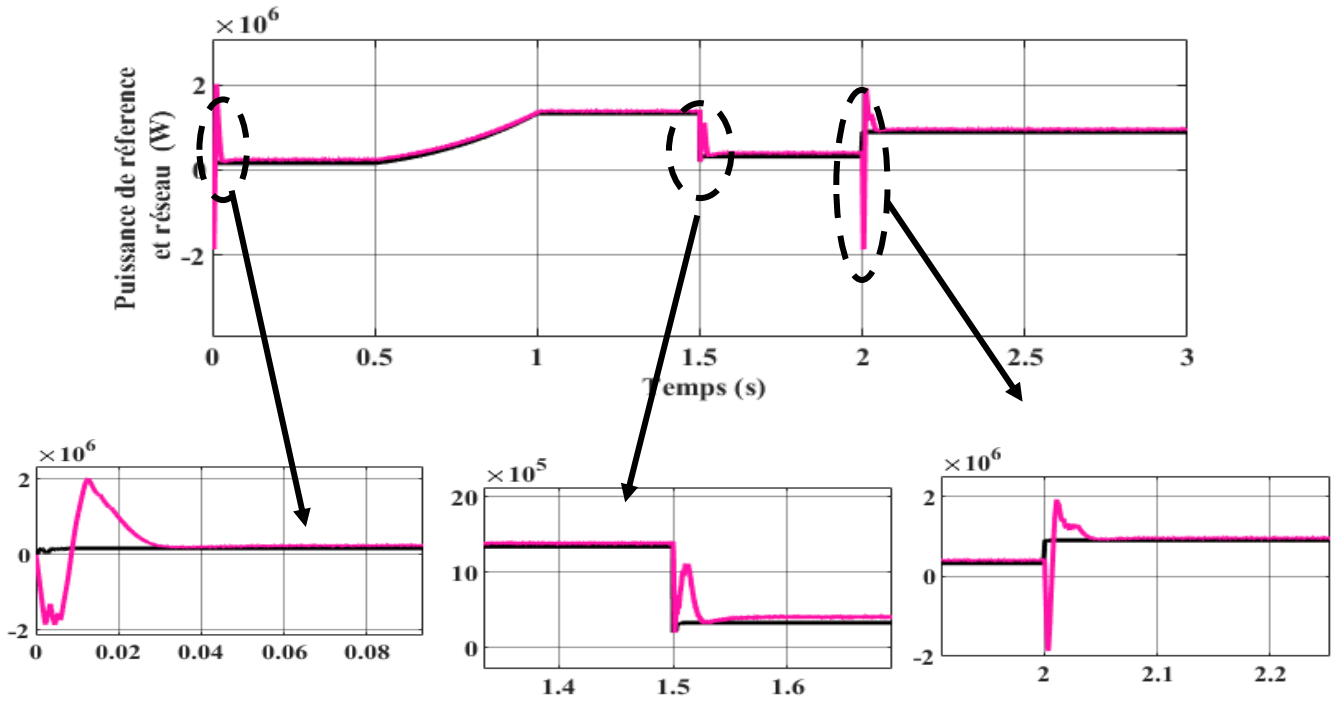


Figure 3.38 Puissance active sous vent variable

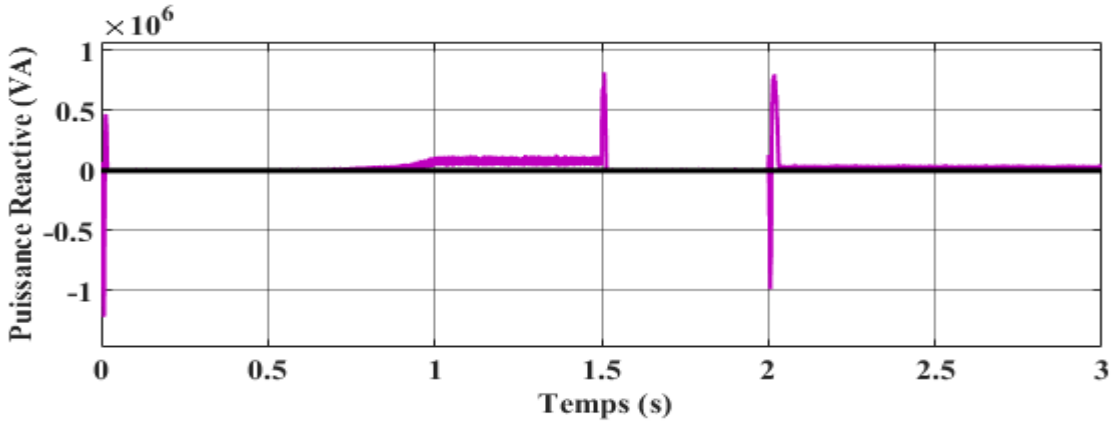


Figure 3.39 Puissance réactive sous vent variable

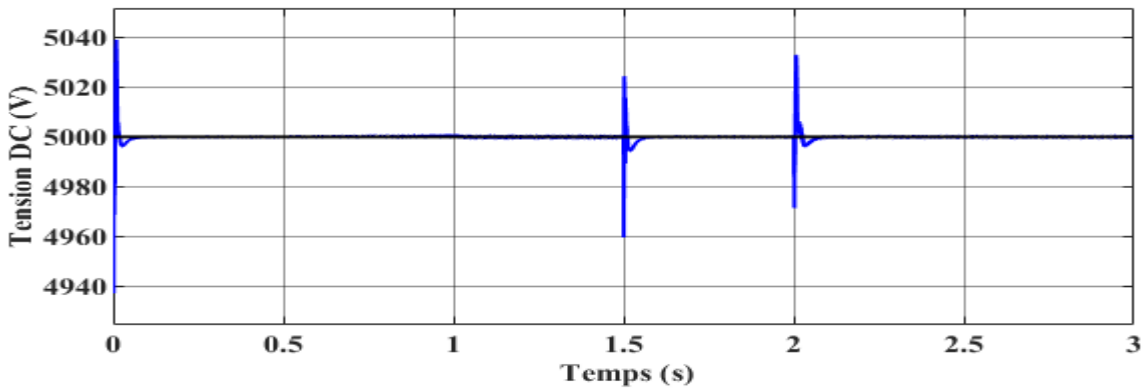


Figure 3.40 Tension DC

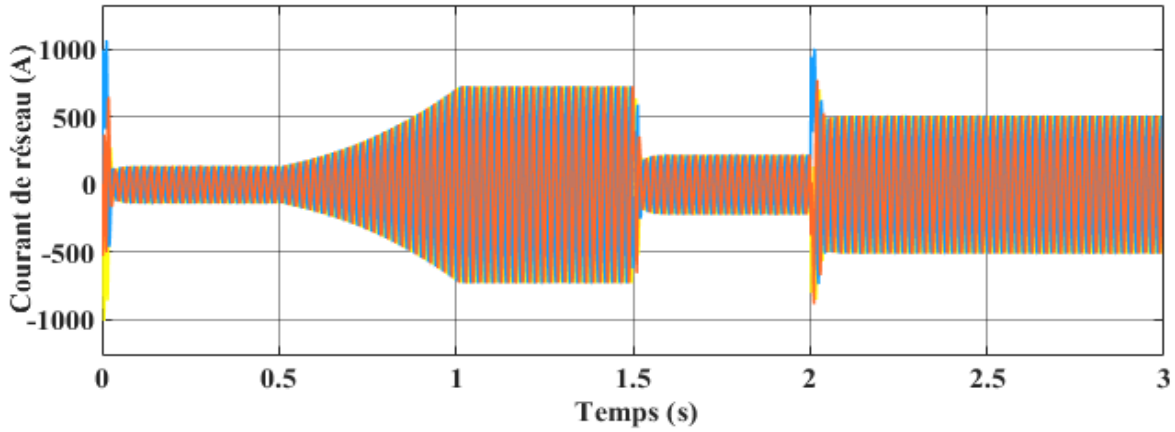


Figure 3.41 Courants de réseau

3.3 Conclusion

L'optimisation et le contrôle efficaces des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable nécessitent une approche intégrée, combinant des techniques de commandes avancées et des algorithmes d'optimisation performants. Cette intégration permet de maximiser la puissance extraite tout en garantissant une opération stable et fiable face aux fluctuations environnementales. Ce travail concerne le contrôle de la puissance maximale des panneaux photovoltaïques et de la vitesse des génératrices de turbines éoliennes en lien avec le réseau. L'utilisation d'un régulateur à structure variable pour le contrôle de la puissance maximale s'est révélée très efficace sous différentes conditions météorologiques (irradiation, température et vent). L'analyse des résultats de simulation est très concluante, ce qui rend la structure proposée très prometteuse.

CHAPITRE 4

GESTION ET STOCKAGE D'UN SYSTEME MULTI-SOURCES EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE

4.1 Introduction

L'incorporation des énergies renouvelables dans les systèmes hybrides exige une gestion optimisée afin de tirer le meilleur parti de la puissance disponible et d'améliorer l'efficacité énergétique globale. Les SMS combinant des sources solaires et éoliennes, doivent surmonter les défis posés par les changements des conditions climatiques, notamment l'ensoleillement et la vitesse du vent. Ainsi, les techniques de simulation jouent un rôle crucial dans ce contexte, car elles permettent d'anticiper le comportement du système sous différentes conditions météorologiques et scénarios de demande énergétique. En utilisant des méthodes avancées, il est possible de tester diverses configurations, analyser l'effet de diverses approches de gestion afin d'optimiser la conception et le fonctionnement du système tout en facilitant une prise de décision informée .

Ce chapitre aborde la conception et de la gestion des systèmes éolien-photovoltaïque et les batteries de stockage, les méthodologies de simulation utilisées pour optimiser leur fonctionnement en deux (2) modes : SMS connectée au réseau et un SMS autonomes, en utilisant un contrôle de gestion intelligent (Logique floue), pour une gestion efficace des ressources énergétiques renouvelables dans un cadre multi-sources.

4.2 Gestion et stockage d'un système multi-sources d'énergie

Le schéma-bloc global illustrant la stratégie de gestion de l'énergie conçue pour les sources renouvelables, comme l'énergie solaire et éolienne, ainsi qu'un système de stockage, est présenté dans la figure 4.1.

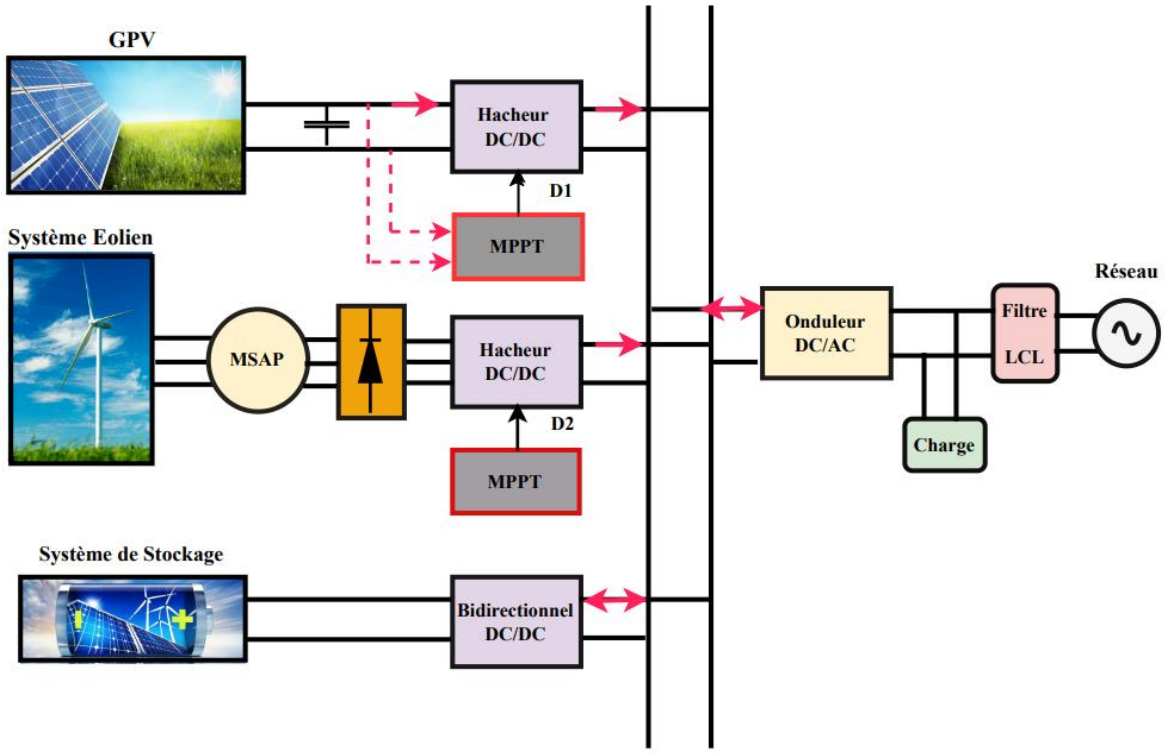


Figure 4.1 Schéma principale de la gestion

4.3 Contrôle de gestion du SMS basée sur la logique floue

L'objectif du système de contrôle est de réguler le courant de la batterie afin de délivrer la puissance requise qui est présentée dans la figure 4.2. Le modèle intègre également les limites de courant en charge et en décharge ainsi que les seuils maximaux du State of Charge (SOC). Le système de stockage par batterie (BESS) est relié au réseau en courant continu (CC) via un convertisseur bidirectionnel Buck-Boost CC/CC.

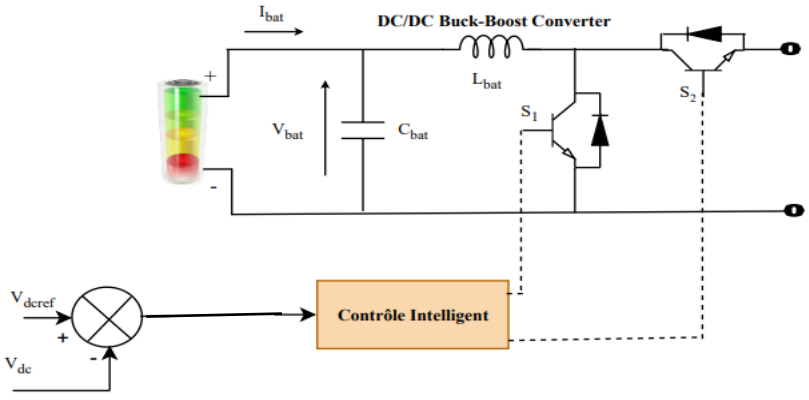


Figure 4.2 Contrôle de la batterie

L'utilisation de la logique floue améliore considérablement la performance et l'efficacité globales du système en permettant une coordination et une gestion efficaces de la distribution d'énergie [168]. Les systèmes flous (FS) reposent sur la théorie des ensembles flous, représentant une approche de contrôle non linéaire visant à appliquer les connaissances d'un utilisateur expérimenté à la conception d'un contrôleur basé sur la logique floue [169-171] :

a. Fuzzification.

b. Fuzzy rule evaluation (fuzzy inference engine).

c. Defuzzification.

La stratégie de gestion de système doit définir comment répartir la puissance entre les sources d'énergie, à savoir le photovoltaïque, l'éolien, le réseau, et la batterie, tout en veillant à répondre aux besoins énergétiques de la charge [174]. Étant donné la nature imprévisible de la demande d'électricité, soumise à des variations fréquentes, le profil de charge devient inévitable. Cette complexité est accentuée par la présence de sous-systèmes non linéaires au sein du SMS. C'est pourquoi il est pertinent de présenter une anticipation floue de la demande et un état de charge (EDC).

La Figure 4.3 illustre le système expert flou proposé, spécialement conçu pour s'adapter aux fluctuations météorologiques, aux variations de charge et à la consommation d'énergie.

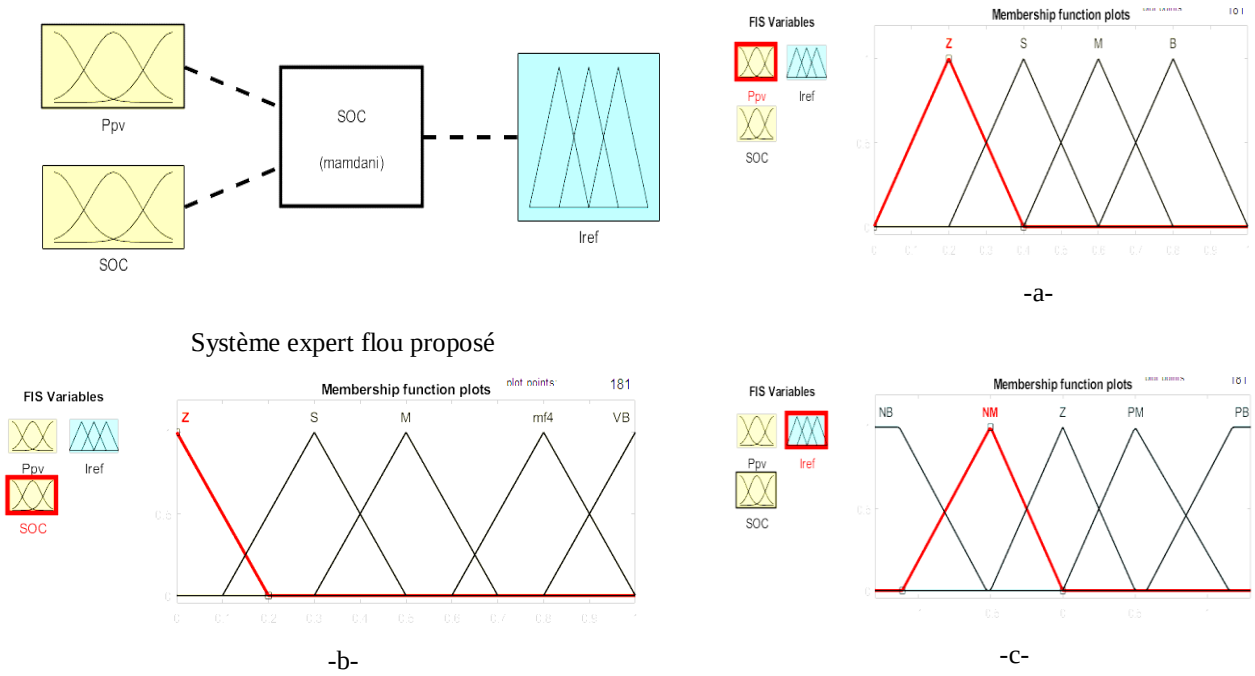


Figure 4.3 Fonctions d'appartenance du FLC.

(a). Puissance produite (b). Demande de charge (c). État de la batterie.

Le fonctionnement principal du contrôleur par logique floue (FLC) est de générer deux signaux de commande à partir de deux entrées, en utilisant la méthodologie de Mamdani pour construire l'inférence floue dans ce contexte [175] . Les entrées du régulateur flou sont répertoriées dans la figure 4.3 (a,b) et la sortie dans la figure 4.3 (c) et règles floues sont consignées dans le tableau 4.1.

En fonctionnement normal, la puissance du système change en douceur de sorte que l'écart du point de fonctionnement du réseau est minimisé. Le système de gestion de la batterie maintient l'état de la batterie à un niveau raisonnable 50%. Il protège également contre la chute de la tension en contrôlant le niveau de puissance requis de la batterie [176].

Tableau 4.1 Règles de logique floue

SOC \ P	Z	S	M	B
Z	NB	NB	NM	NM
S	NB	NB	NM	NM
M	NM	NM	PM	PM
B	PB	PM	PB	PB
VB	PB	PB	PB	PB

4.4. Stratégie de gestion du SMS connectée au réseau

Cette section a pour objectif de concevoir et de développer une stratégie de gestion optimisée pour un SMS (solaire, éolien, batterie, réseau). Des simulations et analyses permettent d'évaluer son efficacité sous différentes conditions (irradiation, température de 25°C, vitesse du vent) et de valider son fonctionnement dans des scénarios réels (Figure 4.4) .

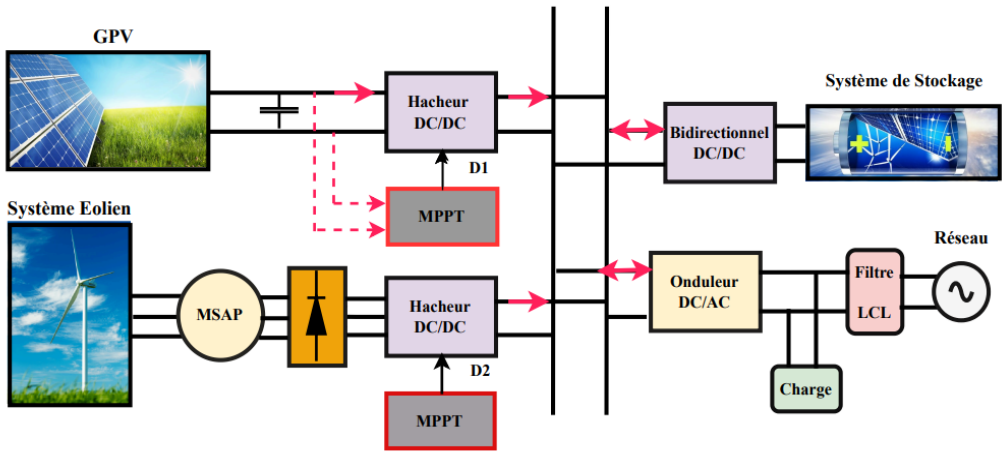


Figure 4.4 Schéma du SMS connecté au réseau

4.4.1 Mode de fonctionnement

Le principal objectif de la stratégie de gestion développée dans cette thèse est de définir des consignes de puissance pour les différentes sources (éolien, photovoltaïque et batterie), afin de garantir une alimentation continue et optimale de la charge [178]. Pour y parvenir, un algorithme de gestion des flux d'énergie entre les sources a été conçu. Celui-ci repose sur une logique de type "tout ou rien", permettant d'activer ou de désactiver les sources en fonction de l'état dynamique du SMS.

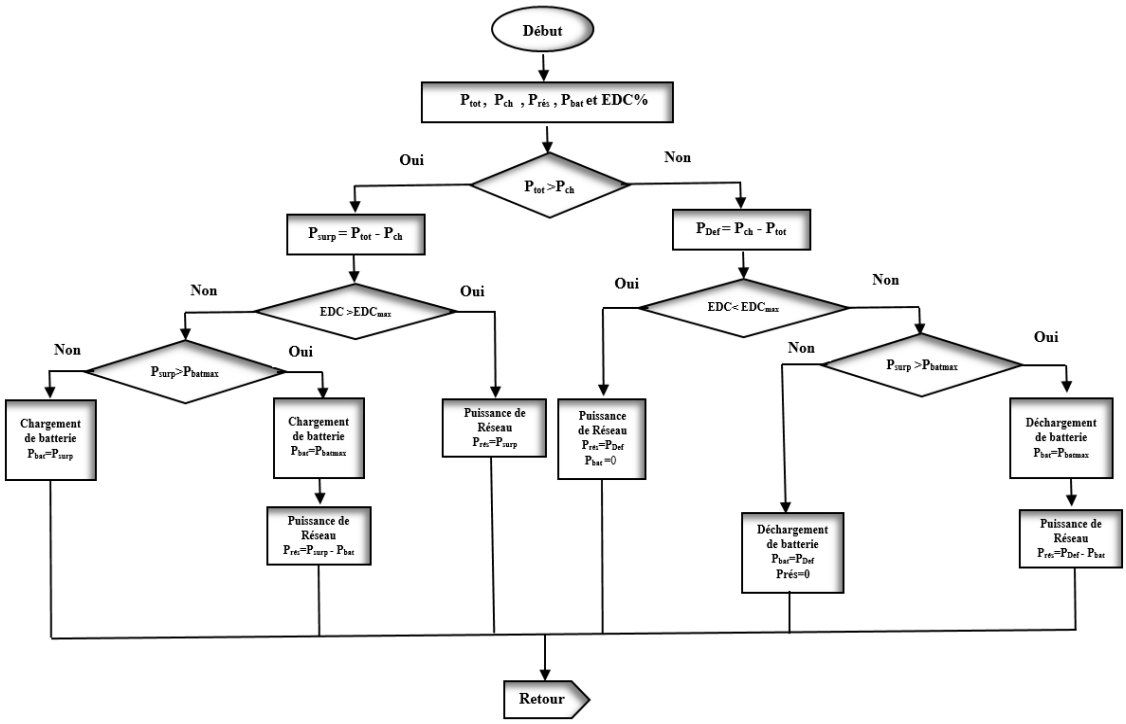


Figure 4.5 Organigramme de gestion d'un SMS connecté au réseau

La puissance totale générée par les sources d'énergie renouvelables :

(P_{wt}+P_{pv}) = P_{tot} est la puissance d'alimentation principale, qui a la priorité de satisfaire la demande de charge par rapport à celle fournie par le réseau électrique.

On a supposé que la consommation d'énergie du réseau devait être évitée car elle nécessite un paiement et des coûts supplémentaires [179] .

Si la puissance totale générée par les systèmes WT et PV ($P_{WT} + P_{PV}$) est supérieure à la demande de charge P_{Load} , la puissance excédentaire $P_{Sur} = P_{WT} + P_{PV} - P_{Load}$ a la priorité pour charger la batterie avec la puissance P_{Bat} . La batterie peut être chargée jusqu'à ce qu'elle soit complètement chargée. La totalité de la puissance excédentaire peut être fournie au réseau uniquement dans le cas où la batterie est complètement chargée $P_{Grid} = P_{Sur}$.

Étant donné que la batterie ne peut être chargée qu'avec la puissance maximale limitée P_{Batmax} , lorsque la puissance excédentaire est supérieure à P_{Batmax} , alors la batterie se charge avec sa puissance maximale et seul le reste de la puissance excédentaire est renvoyé au réseau électrique public $P_{Grid} = P_{Sur} - P_{Batmax}$.

Si la puissance totale générée par les systèmes WT et PV ($P_{WT} + P_{PV}$) est inférieure à la demande de charge P_{Load} , alors une puissance déficitaire $P_{Def} = P_{Load} - (P_{WT} + P_{PV})$ se produira dans SMS. La batterie a la priorité et lors de la décharge, elle est capable de fournir le complément à la demande de puissance de la charge. Cependant, lorsque la batterie est complètement déchargée, la puissance déficitaire doit être entièrement fournie par le réseau. Étant donné que la batterie ne peut être déchargée qu'avec la puissance maximale limitée P_{Batmax} , alors lorsque la puissance déficitaire est supérieure à P_{Batmax} , la batterie est utilisée lors de la décharge avec une puissance maximale et le reste de la puissance déficitaire doit être reçu du réseau électrique public $P_{res} = P_{Def} - P_{Batmax}$.

4.4.2 Résultats de Simulation

La figure 4.6 montre les profils d'irradiation solaire et de vitesse du vent utilisés pour les tests de simulation visant à analyser et à évaluer les performances du système de gestion adopté dans différents scénarios environnementaux.

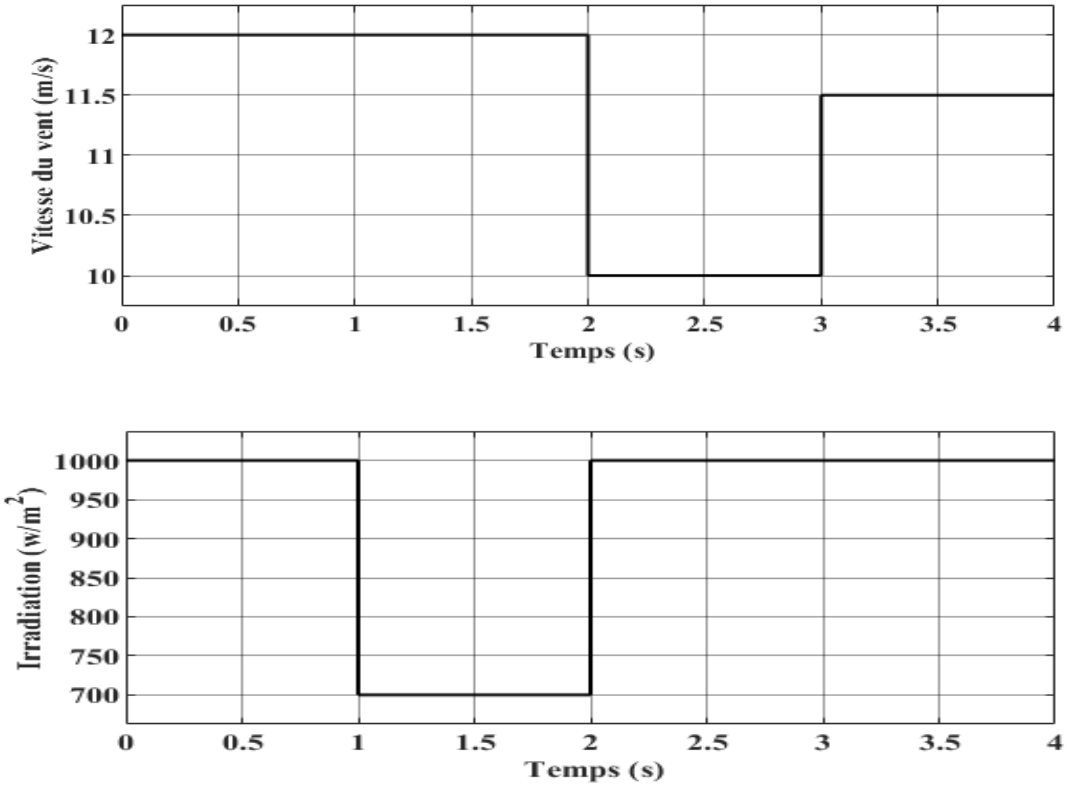


Figure 4.6 Profiles de la vitesse du vent et des niveaux d'irradiation solaire

Nous avons soumis le système à deux profiles différents et simulé numériquement son comportement pour deux scénarios de charge. Dans le premier cas, la puissance de la charge est maintenue constante, tandis que dans le second cas, elle est variable. L'analyse du comportement du système dans ces conditions est présentée ci-dessous :

Cas 1. Puissance de charge fixe

Les figures 4.7 et 4 .8 montrent respectivement l'évolution de la puissance de charge (P_{ch}) et celle produite par les sources d'énergie renouvelables (SER), notamment celles du générateur photovoltaïque (P_{pv}) et de l'éolienne (P_w) et le profile de l'état de charge.

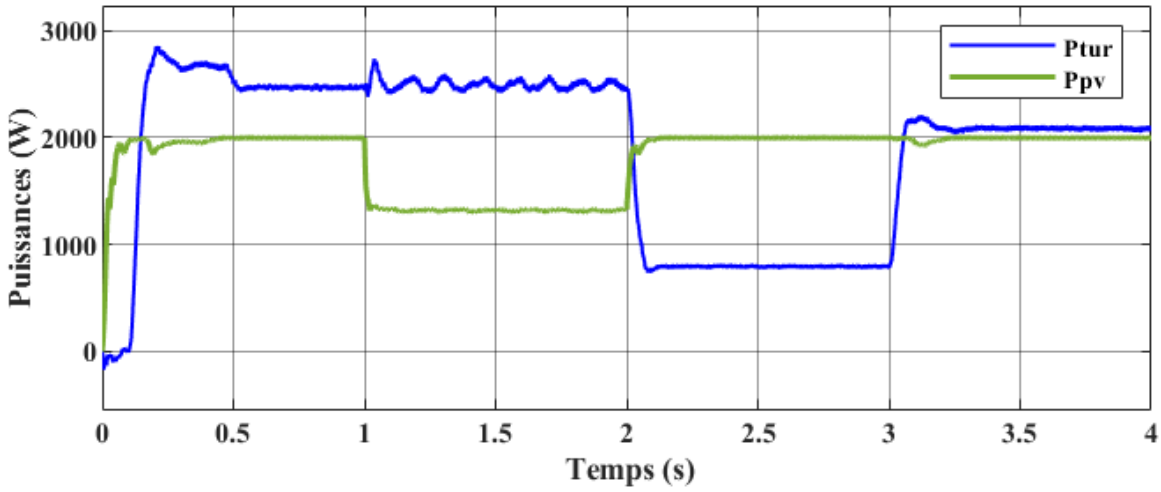


Figure 4.7 Puissance de phtotvoltaique et turbine

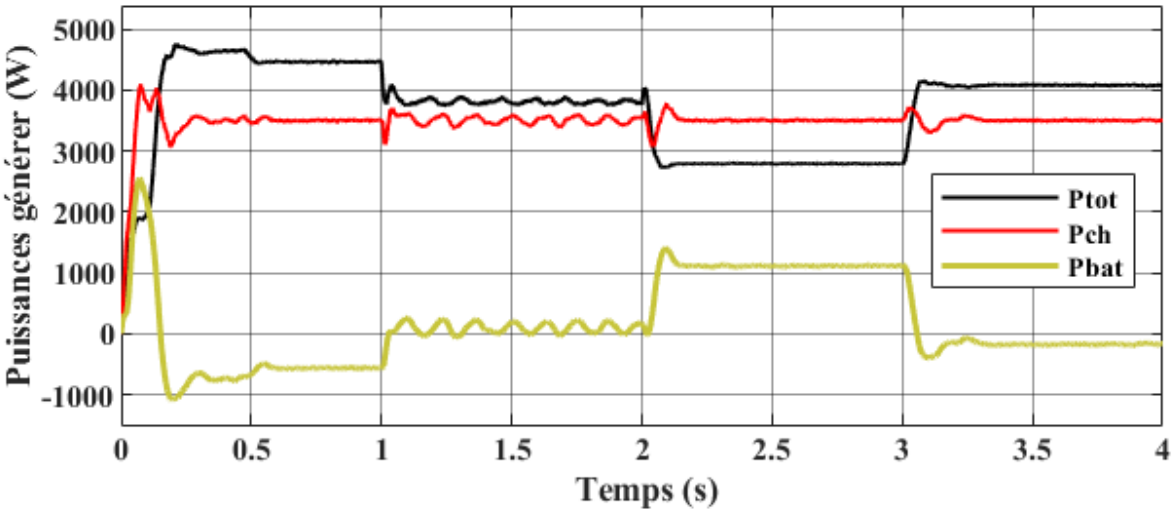


Figure 4.8 Puissances produites

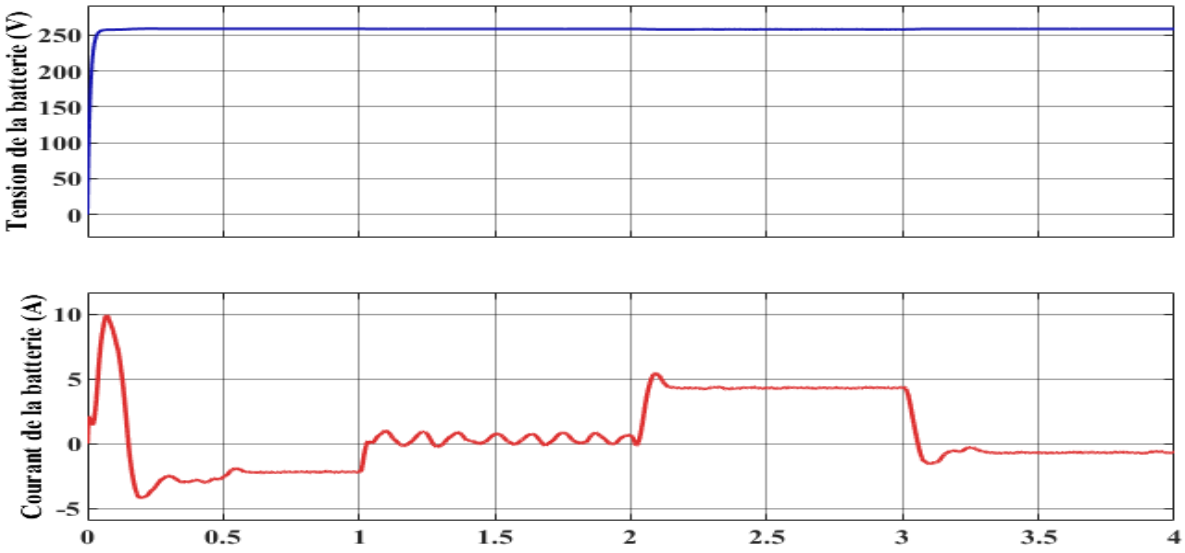


Figure 4.9 Courant et tension de la batterie

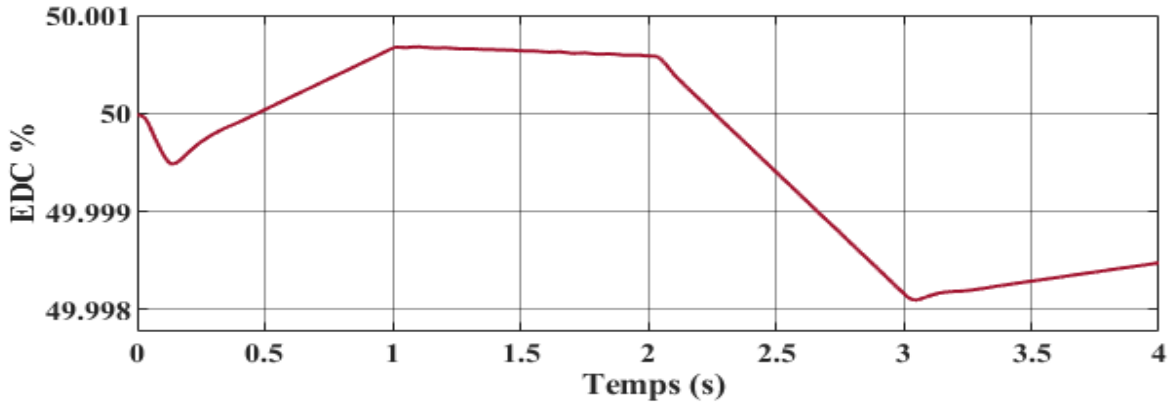


Figure 4.10 État de charge de la batterie pour une charge constante

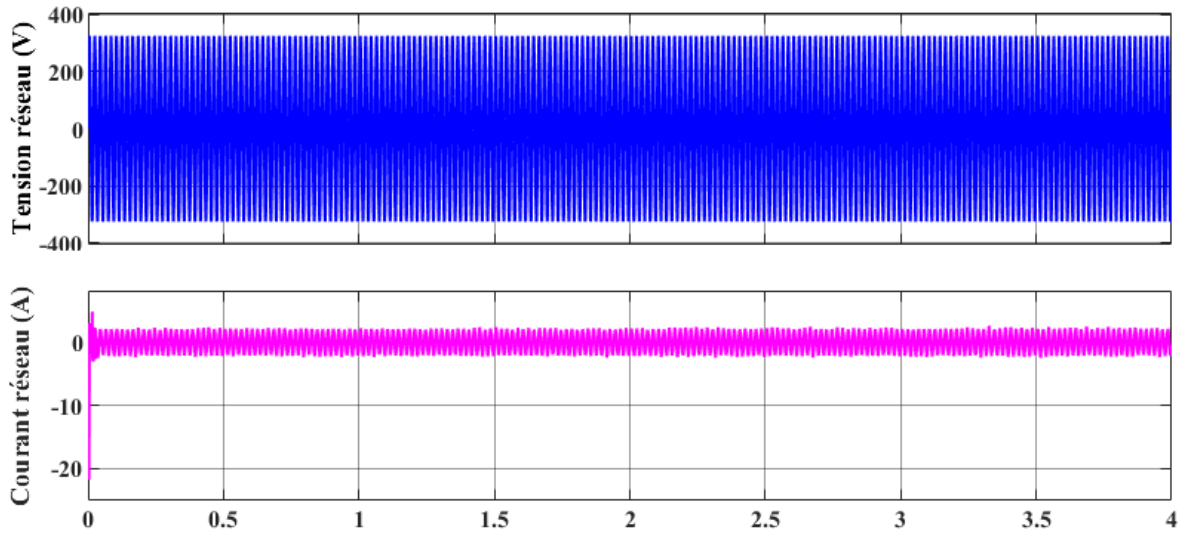


Figure 4.11 Courant et tension de réseau

Ainsi, pour chaque intervalle de temps, on observe que :

De 0 à 1s : la puissance du SER est de 4500 W, ce qui dépasse la demande de charge de 3500 W. Cette puissance excédentaire est utilisée pour charger la batterie, comme le montre la figure 4.10.

De 1s à 2s : pendant cet intervalle de temps, la puissance demandée par la charge reste de 3500 W, mais la somme des puissances produites par les SER est d'environ 3400 W. Par conséquent, pour satisfaire à la demande de puissance de la charge, la puissance manquante de 100 W est fournie par les batteries, comme on peut le voir sur la figure 4.10 pendant la période allant de 1s à 2 s.

De 2s à 3s : la somme des puissances produites par le SMS est de 2900 W, ce qui est inférieur à la demande de la charge de 3500 W. Par conséquent, les batteries continuent à se décharger (mode de décharge de la batterie, voir figure 4.10) pour fournir la puissance manquante de 600 W.

De 3 à 4 secondes : pour ce dernier intervalle de temps, la figure 4.8 montre que la somme des puissances produites par les SER est égale à 4100 W, ce qui est supérieur à la puissance requise pour la charge. Par conséquent, les batteries passent du mode décharge au mode charge, comme le montre la figure 4.10.

Cas 2. Puissance de charge variable

Dans le cas où la puissance de la charge varie, comme illustré à la figure 4.12, et dans les mêmes conditions d'irradiation et de changement de vent que précédemment. Les figures 4.13 et 4.14 représentent respectivement les puissances et l'état de charge des batteries (SOC).

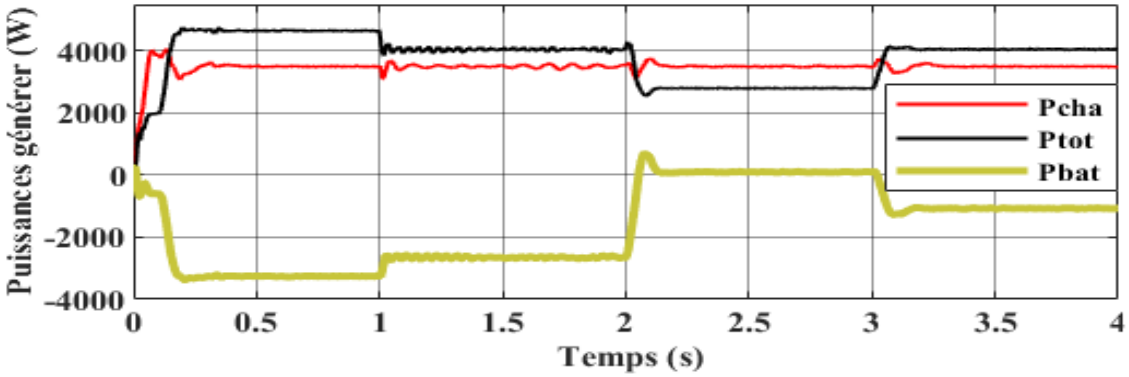


Figure 4.12 Puissance à différents endroits pour une charge variable

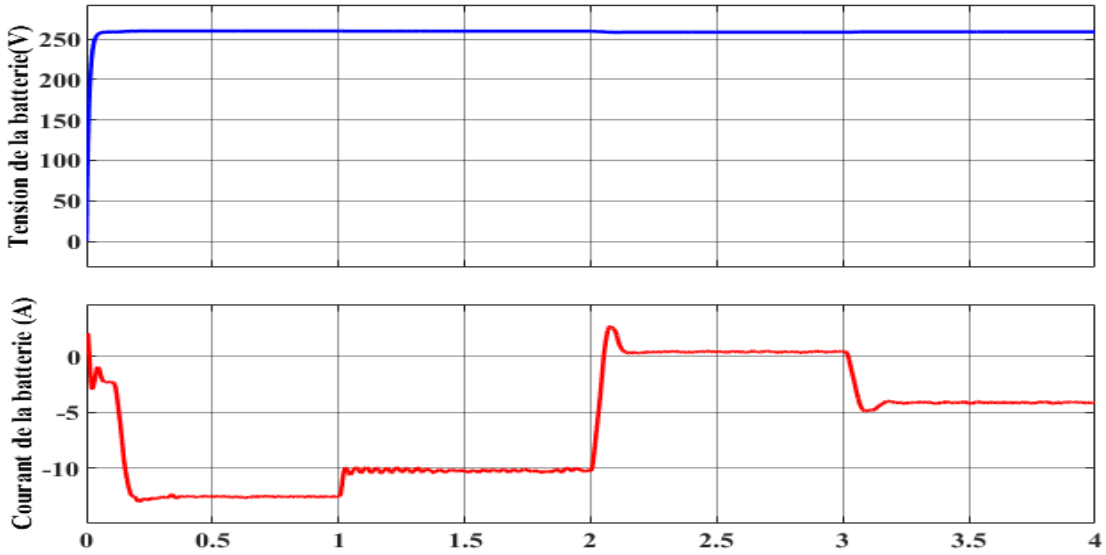


Figure 4.13 Courant et tension de la batterie

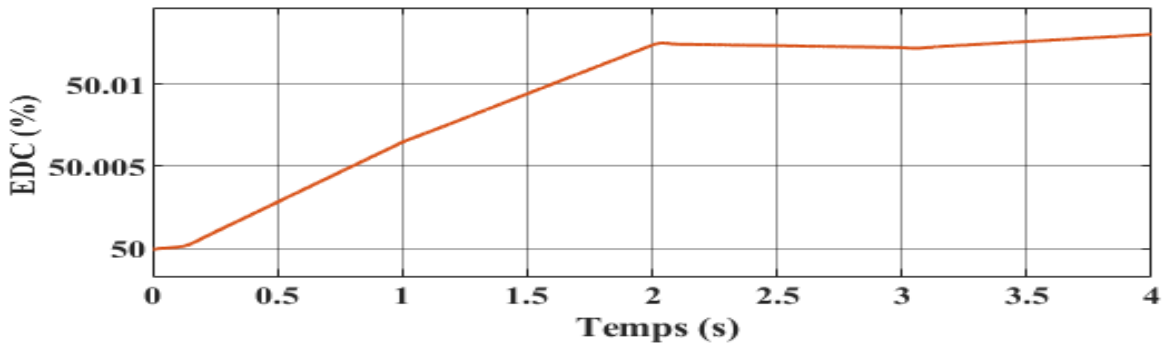


Figure 4.14 État de charge de la batterie pour une charge variable

Sur la base des deux figures précédentes, les observations suivantes peuvent être faites pour les quatre intervalles de temps :

De 0 à 1s : pendant cet intervalle de temps, la puissance de la charge est de 1000 W, alors que la somme des puissances produites par les sources est égale à 4600 W, ce qui est suffisant pour répondre aux besoins de puissance de la charge. La puissance excédentaire est alors stockée dans les batteries. Ceci est justifié par l'augmentation du SOC observée dans la figure 4.14.

De 1s à 2s : dans cet intervalle de temps, le niveau d'irradiation diminue, tandis que la vitesse du vent et la puissance de la charge restent inchangées par rapport à l'intervalle précédent. Ainsi, la somme des puissances produites est d'environ 3 900 W, ce qui est suffisant pour répondre à la demande de la charge et fournir l'excédent aux batteries, qui continuent à se charger comme le montre la figure 4.14.

De 2s à 3s : la puissance de la charge a augmenté pour atteindre 2900 W, alors qu'en raison des changements météorologiques, la somme des puissances des SER correspondant à cet environnement est de 2800 W.
Par conséquent, le manque de puissance pour satisfaire la demande de la charge est compensé par la transition du mode de charge de la batterie au mode de décharge, ce qui entraîne une diminution de l'état de charge.
De 3s à 4s : la puissance demandée par la charge est de 3200 W et la somme des puissances produites par les SER est de 4200 W, d'où un excès de puissance. Les batteries fonctionnent donc en mode charge, ce qui se justifie par l'augmentation du SOC dans la Figure 4.14.

Cependant, suite à cette analyse des différents scénarios proches de la réalité, il est prouvé que le système fonctionne correctement selon les spécifications.

4.5 Stratégies de gestion du SMS autonome

Dans cette partie, nous proposons une approche de gestion de l'énergie pour un SMS autonome intégrant des sources photovoltaïques et éoliennes [180]. Le principal enjeu de la gestion énergétique dans ce type de système est d'assurer un approvisionnement constant en énergie pour répondre aux besoins de la charge, malgré les fluctuations importantes de la production. Ces variations sont principalement causées par l'évolution des conditions météorologiques, telles que l'ensoleillement et la vitesse du vent, comme illustré dans la figure 4.15.

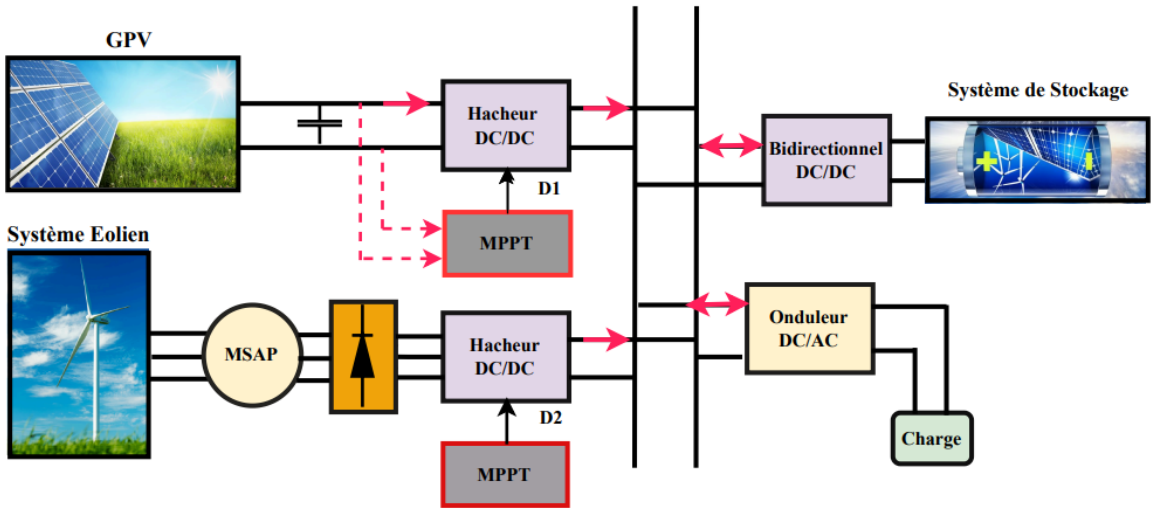


Figure 4.15 Système de conversion multi-sources autonome

4.5.1 Mode de fonctionnement du SMS Autonome

Dans le cadre de la stratégie élaborée pour la gestion de l'énergie, des systèmes multi-sources renouvelables autonomes ont été pris en compte. À cet effet, un algorithme dédié à la gestion de l'énergie a été mis au point pour maximiser les performances des systèmes photovoltaïque et éolien, en les exploitants à leur pleine capacité sous différentes conditions environnementales [181-183].

La Figure 4.16 présente l'organigramme du système de gestion, qui décrit les différents modes de fonctionnement à travers les étapes suivantes :

Étape 1 : Identifier et définir les différentes puissances en jeu dans le SMS.

Étape 2 : Si la puissance générée excède la puissance requise, l'excédent est dirigé vers le stockage dans la batterie.

Étape 3 : Si la puissance demandée est supérieure à la puissance produite, deux scénarios sont possibles : si l'état de charge (SOC) de la batterie est supérieur à 50%, les systèmes de stockage sont mis en service sinon, la batterie est désactivée, ce qui conduit à un délestage.

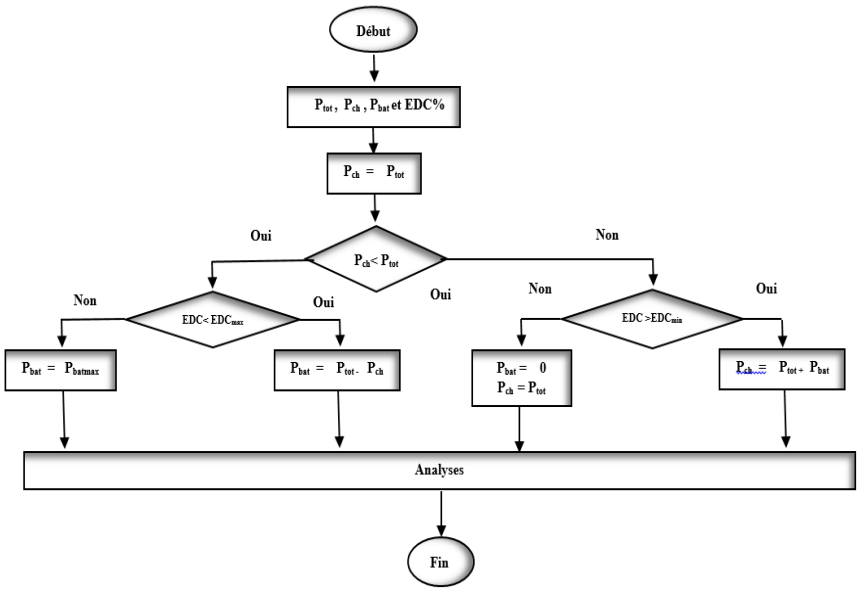


Figure 4.16 Organigramme de gestion d'un SMS autonome

Si la puissance totale générée par les systèmes WT et PV ($P_{WT} + P_{PV}$) est supérieure à la demande de charge P_{Load} , la puissance en surplus P_{sur} chargera la batterie lorsque la condition $P_{Sur} \leq P_{Batmax}$ est remplie . La batterie peut être chargée jusqu'à ce qu'elle soit complètement chargée. Une fois la batterie complètement chargée ou $P_{Sur} > P_{Batmax}$, la puissance excédentaire P_{Sur} ne peut pas être stockée et doit donc être limitée. Elle peut être obtenue en diminuant la production d'énergie renouvelable en empêchant les systèmes de contrôle de maintenir le fonctionnement à des points de puissance maximale ou simplement en éteignant certaines sources sélectionnées de production d'énergie renouvelable. La puissance

excédentaire peut également être déversée dans certaines charges énergétiques supplémentaires spécialement connectées au système dans ce cas.

Si la puissance totale générée par les systèmes WT et PV ($P_{WT} + P_{PV}$) est inférieure à la demande de charge P_{Load} , il y aura alors un déficit de puissance P_{Def} dans le SMS. La batterie sera déchargée afin de réduire ou de compenser le déficit de puissance. Cet état n'est possible que dans la période de temps déterminée en raison de la capacité limitée de la batterie. La capacité de la batterie doit être conçue pour la période projetée d'absence de production d'énergie ou de valeur réduite de l'énergie produite. Il est également recommandé de diviser les charges d'énergie utilisées en charges critiques, qui ne peuvent pas être désactivées, et en charges non critiques, qui peuvent être désactivées lorsque la quantité d'énergie produite dans le système est insuffisante. Une autre solution possible dans ce cas est d'utiliser une source d'énergie supplémentaire, par exemple un système de générateur électrique entraîné par un moteur à combustion interne.

4.5.2 Résultats de Simulation

Nous avons simulé le système global avec un pas de temps fixe sur une durée de 4 secondes. Pour démontrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans différents scénarios, comme illustré à la figure 4.17, nous avons varié le profil de la charge, ainsi que l'ensoleillement et la vitesse du vent. La température à la surface des panneaux photovoltaïques a, quant à elle, été maintenue constante à 25°C. Les profils utilisés pour la simulation sont détaillés dans le tableau suivant :

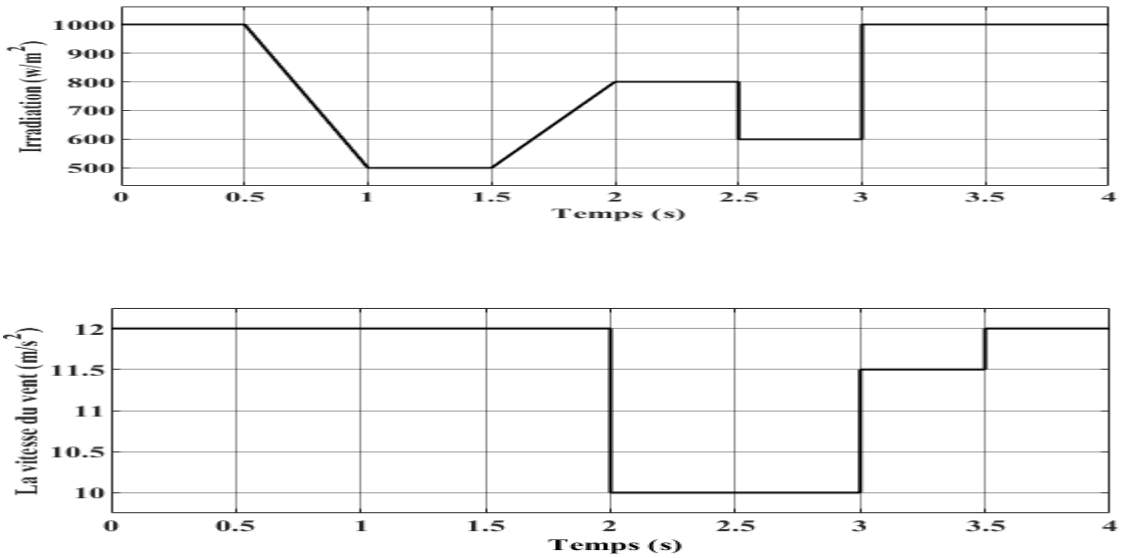


Figure 4.17 profils de l'irradiation et la vitesse du vent

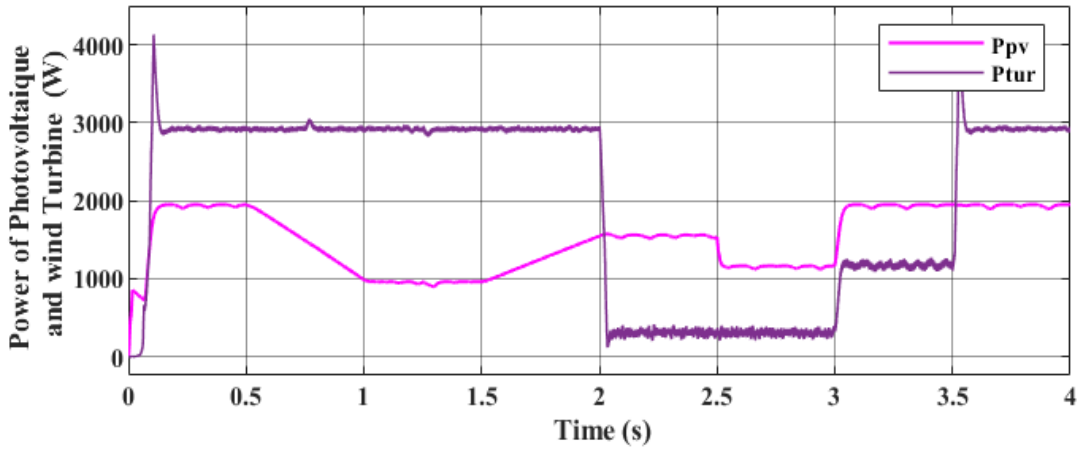


Figure 4.18 Puissances de photovoltaique et turbine

La figure 4.19 présente les puissances générées par les différents composants d'un système photovoltaïque-éolien-stockage, sur un même graphique. La puissance produite par le générateur photovoltaïque est d'environ 2 kW, tandis que celle du système éolien atteint 3 Kw .

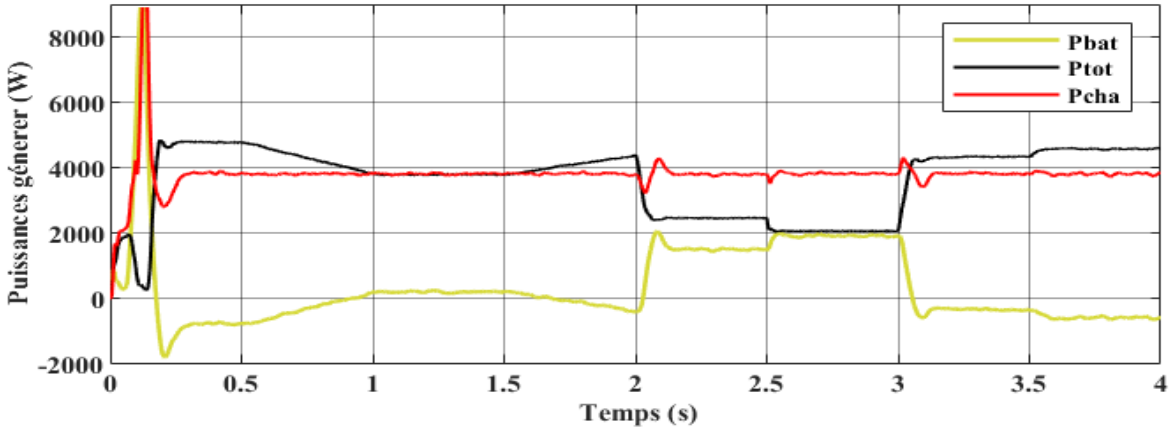


Figure 4.19 Puissances produites

La figure 4.20 illustre les variations du courant et de la tension des batteries au cours du temps. On remarque que les batteries alternent entre les phases de charge et de décharge, tout en maintenant une tension stable proche de la valeur nominale de 250 V. En revanche, le courant fluctue de manière significative. Un courant négatif indique que les batteries sont en état de stockage d'énergie, tandis qu'un courant positif signifie qu'elles sont en train de se décharger. Lors des phases de charge et de décharge, l'intensité du courant varie en fonction de l'énergie transférée, avec une augmentation ou une diminution de sa valeur absolue selon la quantité d'énergie échangée.

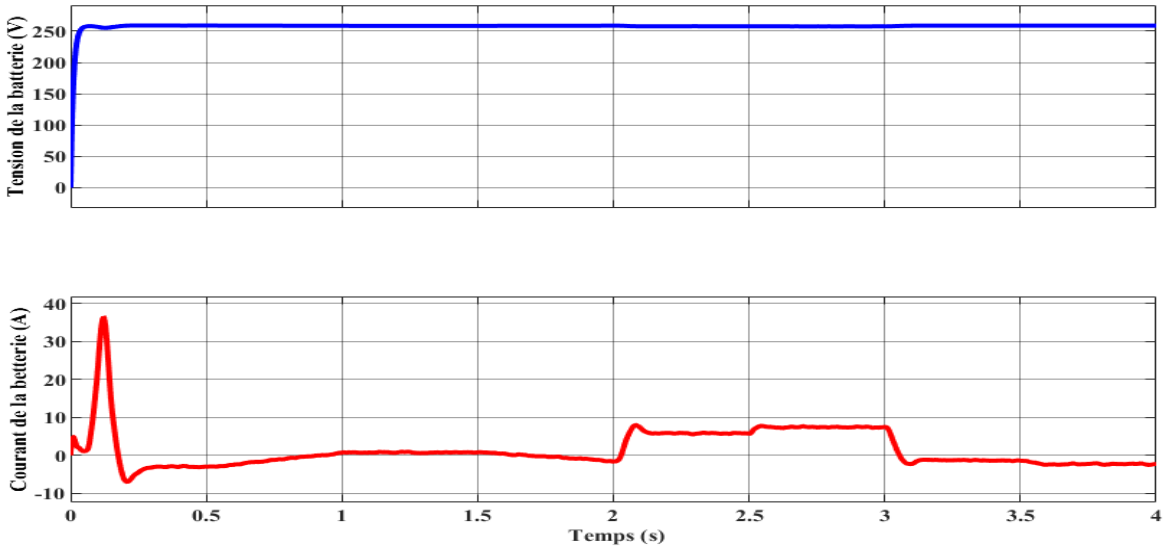


Figure 4.20 Courant et tension de la batterie

Le graphique 4.21 illustre l'évolution du niveau de charge des batteries, qui dépend étroitement des cycles de charge et de décharge. Cela met en lumière le comportement dynamique des batteries . la Figure 4.8 qui correspond parfaitement à la forme de l'état de charge (EDC) de la batterie. Pour la même figure, soit le mode charge pour les intervalles ($0s \leq t < 1s$) et ($1.5s \leq t < 2s$) et ($3s \leq t < 4s$) ainsi que le mode décharge pour ($2s \leq t < 3s$). Il ressort de cette analyse une bonne gestion de l'énergie entre les deux sources principales (Énergies photovoltaïque et éolienne) et une source auxiliaire (Batterie de stockage) du système hybride considéré.

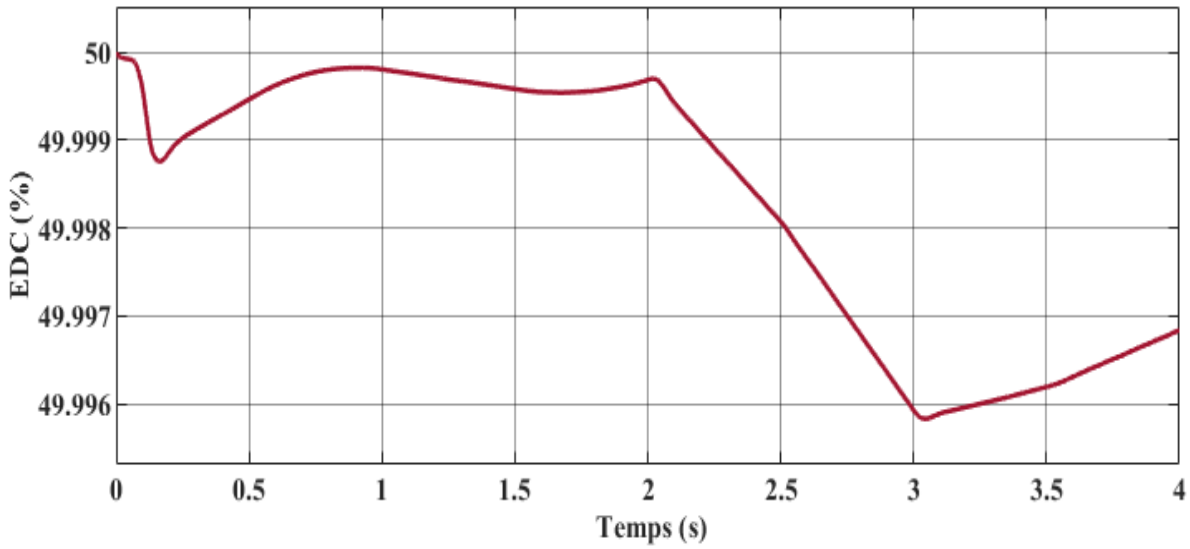


Figure 4.21 Production d'électricité du système hybride

4.6 Dimensionnement du système de gestion et stockage

4.6.1 Système Photovoltaique

Le modèle présenté a été développé et simulé grâce à l'outil MatLab/Simulink, en intégrant les paramètres spécifiés dans le tableau 4.2 .

Tableau 4.2. Paramètres de GPV

Caractéristiques du GPV	Valeur
Puissance maximale du panneau P_{mp}	250 W
Cellules par module N_{cell}	60
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	37.3 V
Courant de court-circuit (Isc)	8.66 A
Tension au point de puissance maximale (Vmp)	30.7 V
Nombre de module parallèles	1
Nombre de module Série	8

4.6.2 Convertisseur Boost connectée avec le GPV

P=2000W ; V_{in}=30.7*8 V ; F_s=10^3 HZ ; V_{out} = 400 V ;

$$\begin{cases} I_{outmax} = \frac{P}{V_{out}} \\ \Delta I_L = 0.01 * I_{outmax} * \left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \\ \Delta V_{out} = 0.01 * V_{out} \end{cases} \quad (4.1)$$

Donc,

$$\begin{cases} L = \frac{(V_{in}*(V_{out}-V_{in}))}{(\Delta I_L * F_s * V_{out})} \\ C = \frac{(I_{outmax}*\left(1-\left(\frac{V_{in}}{V_{out}}\right)\right))}{(F_s*\Delta V_{out})} \\ R = \frac{V_{out}}{I_{outmax}} \\ d = \frac{(V_{out}-V_{in})}{V_{out}} \end{cases} \quad (4.2)$$

4.6.3 Système éolien :

Les paramètres du système éolien utilisé dans ce travail sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.3. Paramètres du système éolien

Paramètres	Valeur
Puissance maximale	3 KW
Vitesse du vent	12 m/s
Rayon de l'éolienne (R)	5 m
Densité du vent (ρ)	1.22 kg/m^2
Maximum range	25 m/s

4.6.4 Dispositif de stockage

Les paramètres de la batterie sont définis dans le tableau 5.

Tableau 4.4 Paramètres de la batterie

Paramètres	valeur
Tension nominale	12×20 V
Capacité nominale	48 Ah
Soc initial	50%
Temps de réponse de la batterie	0.0001

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté la gestion et stockage par batterie des systèmes énergétiques. Par la suite, nous avons élaboré une approche de gestion de l'énergie adaptée à ses SMS intégrant une source photovoltaïque, une éolienne et un dispositif de stockage par batteries. Pour finir, nous avons exposé les résultats des simulations réalisées avec MatLab/Simulink. Ces simulations démontrent l'importance capitale de la méthode de gestion énergétique visant à maximiser l'efficacité et les performances globales du système. Elles démontrent également l'efficacité des stratégies de contrôle utilisées pour optimiser la génération d'énergie et valident l'importance cruciale du stockage dans le maintien de l'équilibre entre l'offre et la demande énergétiques. Grâce à cette approche, le système a pu s'adapter aux variations de production liées aux conditions climatiques, tout en assurant une alimentation fiable et ininterrompue des charges dans toutes les situations. L'analyse des résultats obtenus par simulation est très concluante et donc la structure proposée est très prometteuse.

CONCLUSION GENERALE

La production d'énergie électrique l'un des principaux du développement économique, de la sécurité, la stabilité et l'avancée technologique. Confrontée à la situation énergétique et environnementale mondiale, la transition vers des sources d'énergie renouvelables représente un enjeu crucial pour l'ensemble de la planète. Dans ce contexte, les systèmes de production d'électricité reposant sur les énergies renouvelables sont aujourd'hui au cœur de nombreuses recherches scientifiques, portant sur leur conception, leur dimensionnement, leur modélisation, leur optimisation et leur contrôle. L'utilisation de systèmes de conversion exploitant les énergies renouvelables s'impose comme une alternative prometteuse et incontournable par rapport aux énergies fossiles, notamment grâce à leurs avantages majeurs : leur disponibilité (sources durables et inépuisables) et leur propreté (absence d'émissions polluantes). Cependant, l'intermittence des énergies solaire et éolienne nécessite une approche innovante, où ces deux sources, couplée à un système de stockage, devient une solution d'une importance cruciale. Cette configuration est particulièrement pertinente pour les sites connecté au réseau et isolés, où un système multi-sources offre une solution optimale pour assurer une alimentation électrique continue et fiable. De plus, le système de stockage joue un rôle essentiel pour garantir la stabilité et la continuité de l'approvisionnement, notamment sous des conditions météorologiques variables.

Dans ce contexte, cette thèse apporte une contribution majeure à la compréhension et à la gestion des flux de puissance au sein d'un système multi-sources intégrant l'énergie photovoltaïque, éolienne et stockage par batterie. Les effets des variations de l'irradiation solaire, de la température et de la vitesse du vent sur le comportement du système ont été analysés et validés par des simulations réalisées sous l'environnement MatLab/Simulink. Les tests numériques, menés sous différents scénarios climatiques (variations d'irradiation, de température et de vent), ont mis en évidence les limites des algorithmes d'optimisation classiques, notamment en cas d'ombrage partiel, où ils ne parviennent pas à assurer un fonctionnement au point de puissance maximale. En revanche, les techniques méta-heuristiques ont démontré leur efficacité dans ces conditions complexes. Par ailleurs, bien que les méthodes conventionnelles offrent de bons résultats sous un éclairement uniforme, la commande DISMC s'est avérée supérieure dans le cas de variations uniformes de l'irradiation. En outre, l'algorithme MPPT proposé, basé sur HHO-,(Horse Herd Optimisation), présente une rapidité

de suivi accrue et une réduction significative des oscillations par rapport aux autres méthodes testées.
Le système étudié garantit ainsi une production d'énergie électrique optimale, tandis que la gestion des puissances entre les différentes sources renouvelables est assurée par des techniques de commande avancées.

Ce travail ouvre des perspectives prometteuses pour la poursuite des recherches dans ce domaine, avec l'objectif de valider expérimentalement les résultats obtenus et de contribuer à l'amélioration des systèmes multi-sources. La volonté de continuer à explorer ces axes de recherche reste intacte, avec l'ambition de concrétiser les avancées théoriques par des applications pratiques.

REFERENCES

[1] Adhikari, D. R., Techato, K., & Jariyaboon, R . A systematic literature review on renewable energy technologies for energy sustainability in Nepal: Key challenges and opportunities. International Journal of Renewable Energy Development, Vol 13, No 2 , 206-222 (2024). https://doi.org/10.61435/ijred.2024.60032

[2] Ms. Neha1, Mr Rambeer Joon2, '' Renewable Energy Sources: A Review'', International Conference on Recent Trends in Computing (ICRTCE-2021) , Journal of Physics: Conference Series , doi:10.1088/1742-6596/1979/1/012023 .

[3] J. Mohtasham, "Review Article-Renewable Energies," in Energy Procedia, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.774.

[4]] R. Kardooni, S. Yusoff, F. Kari, Renewable energy technology acceptance in Peninsular Malaysia, Energy Pol. 88 (2016) 1–10.

[5] Javid Mohtasham ,'' Review Article-Renewable Energies'' , International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15 , ELSEVIER Energy Procedia 74 (2015) 1289 – 1297 .

[6] K. Saidi and A. Omri, "The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energyconsuming countries," Environ. Res., vol. 186, p. 109567, 2020 .

[7] Bhandari, B., Lee, K.-T., Chu, W.-S., Lee, C. S., Song, C.-K., Bhandari, P., & Ahn, S.-H. (2017). Socio-economic impact of renewable energy-based power system in mountainous villages of Nepal. Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. 4, 37–44. https://doi.org/10.1007/s40684-017-0005-2

[8] Adhikari, S., Sopin, J., Techato, K. A., & Mudbhari, B. K. (2023). A Systematic Review on Investment Risks in Hydropower to Developing Sustainable Renewable Energy Systems. International Journal of Energy Economics and Policy, vol 24 No 2, 222 - 230. https://doi.org/10.32479/ijeep.14003

[9] S. L. Y. Lo, B. S. How, W. D. Leong, S. Y. Teng, M. A. Rhamdhani, and J. Sunarso, "Techno-economic analysis for biomass supply chain: A state-of-theart review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 135, p. 110164, 2021.

[10] BP's Statistical Review of World Energy, released, showing slight decline in share of fossil fuels but little decline in absolute use, https://ifrf.net/combustion-industry-news, 2022.

[11] Viktor Sebestyén , '' Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental impact networks of renewable energy power plants'', journal ELSEVIER , Renewable and Sustainable Energy Reviews , Volume 151, November 2021, 111626 .

[12] Yashwant Sawle , S.C. Gupta and Aashish Kumar Bohre , '' PV-wind hybrid system: A review with case study '' , Electrical & Electronic Engineering Research Article Sawle et al., Cogent Engineering (2016), 3: 1189305, http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2016.1189305 .

[13] A.B. Gallo , J.R. Simões-Moreira , H.K.M. Costa , M.M. Santos , E. Moutinho dos Santos , Energy storage in the energy transition context: A technology review , in Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol65, pp 800-822 ,2016.
[14] P. Rosado, M. Roser, H. Ritchie, Energy," Our World in Data, 2020 [Online]. Available: https://ourworldindata.org/energy. (Accessed 12 April 2022). Accessed.
[15] Akinwale Omowumi Ishola, '' Renewable portfolio standards, energy efficiency and air quality in an energy transitioning economy: The case of Iowa'', journal Green Technologies and Sustainability Volume 3, Issue 3, July 2025 .
[16] Mahjabeen , Syed Z.A. Shah , Sumayya Chughtai , Biagio Simonett , '' Renewable energy, institutional stability, environment and economic growth nexus of D-8 countries'' , journal ELSEVIER , Energy Strategy Reviews , Volume 29, May 2020 .
[17] Chouaib Ammari a,∗ , Djamel Belatrache b , Batoul Touhami c , Salim Makhloufia , '' Sizing, optimization, control and energy management of hybrid renewable energy system—A review '', Energy and Built Environment Volume 3, Issue 4, October 2022, Pages 399-411 , https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.04.002
[18] B.M. Eren, N. Taspinar, K.K. Gokmenoglu, The impact of financial development and economic growth on renewable energy consumption: empirical analysis of India, Sci. Total Environ. 663 (2019) 189–197, https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2019.01.323
[19] B.I Iormom, T.P. Jato, A. Ishola, K. Diyoke, Economic policy uncertainty, institutional quality and renewable energy transitioning in Nigeria, 2024, http: //dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-5348756/v1, Preprint,Version 1,available at Research Square.
[20] Susanna Dorigoni * , Giuseppe A. Anzalone, '' Production of energy from renewable sources and financial performance of European utilities: A panel-data analysis'' , journal ELSEVIER , Energy Policy Volume 194, November 2024
[21] Wadim Strielkowski , Lubomír Civín ALL , '' Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review'' , journal Energies vol 14 (2021) : ,
[22] Andrew Kumler , Ben Kravitz & ALL , '' Potential effects of climate change and solar radiation modification on renewable energy resources '' , journal ELSEVIER , Renewable and Sustainable Energy Reviews , Volume 207, January 2025, 114934
[23] F.I. Bappy, J. Islam, A.K. Podder, D.R. Dipta, H.M.R. Faruque, E. Hossain, Comparison of different hybrid renewable energy systems with optimised PV configuration to realise the effects of multiple schemes, in: Proceedings of the 2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT), Dhaka, Bangladesh, 2019, pp. 1–6. 3–5 May
[24] A.B. Gallo , J.R. Simões-Moreira , H.K.M. Costa , M.M. Santos , E. Moutinho dos Santos , Energy storage in the energy transition context: A technology review , in Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol65, pp 800-822 (2016).
[25] Vijay Prakash Sharma , Devendra Kumar Somwanshi & ALL , '' A Literature Review on Renewable Energy Resource and Optimization'' , Conf. Series: Earth and Environmental Science 1084 (2022) , doi:10.1088/1755-1315/1084/1/012002 .
[26] Srilakshmi, K. et al. Development of renewable energy fed three-level hybrid active flter for EV charging station load using Jaya grey wolf optimization. Sci. Rep. 14, 4429. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54550-7 (2024).

[27] P. Roy, J. He, T. Zhao, and Y. V. Singh, "Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review," IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 3, pp. 81-104, 2022.

[28] Stoyanov, Ludmil. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Diss. Université Pascal Paoli, 2011.

[29] K. S. Krishna and K. S. Kumar, "A review on hybrid renewable energy systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, pp. 907-916, 2015.

[30] Dipti, D. A Review on Unit Sizing, Optimization and Energy Management of HRES. Int. J. Trend Sci. Res. Dev. 2018, 2, 419–426.

[31] Roy, P.; He, J.; Zhao, T.; Singh, Y.V. Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review. IEEE Open J. Ind. Electron. Soc. 2022, 3, 81–104.

[32] Abba, S.; Najashi, B.G.; Rotimi, A.; Musa, B.; Yimen, N.; Kawu, S.; Lawan, S.; Dagbasi, M. Emerging Harris Hawks Optimization based load demand forecasting and optimal sizing of stand-alone hybrid renewable energy systems—A case study of Kano and Abuja, Nigeria. Results Eng. 2021, 12, 100260.

[33] Singh, R.; Bansal, R.C. Optimization of an Autonomous Hybrid Renewable Energy System Using Reformed Electric System Cascade Analysis. IEEE Trans. Ind. Inform. 2018, 15, 399–409

[34] Arabali A, Ghofrani M, Etezadi-Amoli M, Fadali MS. Stochastic performance assessment and sizing for a hybrid power system of solar/wind/energy storage. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2014;5(2):363-371

[35] F.S. Mahmoud, A.A.Z. Diab, Z.M. Ali, A.-H.M. El-Sayed, T. Alquthami, M. Ahmed, H.A. Ramadan, Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimisation algorithms, Energy Rep. 8 (2022) 4935–4956

[36] Das U, Nandi C, Bhattacharjee S,. et al. Energy impacts on climate change: issues, challenges and solutions with clean conversion technology. In: Leal FW, Manolas E (eds) Climate change in the mediterranean and middle eastern region. Climate change management. Switzerland: Springer, 2022, pp.133–149.

[37] Guezgouz M, Jurasz J, Bekkouche B,. et al. Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid renewable energy systems. Energy Convers Manage 2019; 199. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112046

[38] Das U, Mandal S, Bhattacharjee S,. et al. A review of different configuration of hybrid energy systems with case study analysis. International Journal of Environment and Sustainable Development 2022; 21: 116–137.

[39] Kaylie L. McTiernan1,*, Krish Thiagarajan Sharman , '' Review of Hybrid Offshore Wind and Wave Energy Systems'' , Journal of Physics: Conference Series 1452 (2020) 012016 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1452/1/012016.

[40] Natsheh, Albarbar "Hybrid Power Systems Energy Controller Based on Neural Network and Fuzzy Logic" Smart Grid and Renewable Energy, 2013, 4, 187-197.

[41] Dali, M., Belhadj, J., and Roboam, X., "Hybrid solar–Wind System with Battery Storage Operating in Grid-Connected and Standalone Mode: Control and Energy Management – Experimental Investigation," Energy, Vol. 35, No. 6, pp. 2587-2595, 2010.

[42] Aditi and Dr. Ashok Kumar Pandey , ‘’ A Review Paper on Hybrid Power System with Different Controllers and Tracking Methods ’’ , International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 IJERTV5IS010022 Vol. 5 Issue 01, January-2016 .

[43] International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Target Setting. 2015. Available online: https://www.irena.org/ publications/2015/Jun/Renewable-Energy-Target-Setting (accessed on 13 October 2022).

[44] Nouhaila Najmi andAhmed Rachid , ‘’ A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques’’ , Journal Energies, Volume:16 Number: 7960 , 2023 , https://www.mdpi.com/1996-1073/16/24/7960 .

[45] Najeem Olawale Adelakun And Banji A. Olanipekun , ‘’ A Review Of Solar Energy ’’ , Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST) ISSN: 2458-9403 Vol. 6 Issue 12, December – 2019 .

[46] N. O. Adeniji, J. A Akinpelu; S. O Adeola, and J. O. Adeniji, “Estimation of Global Solar Radiation, Sunshine Hour Distribution and Clearness Index in Enugu, Nigeria,” Journal of Applied Science and Environmental Management, Vol. 23 (2), Pp 345-349, 2019.

[47] . Nadarajah Kannan , Divagar Vakeesan , Solar energy for future world: - A review , in Renewable and Sustainable Energy Reviews , Vol 62, pp 1092-1105,(2016).

[48] Solangi, K.H.; Islam, M.R.; Saidur, R.; Rahim, N.A.; Fayaz, H. A review on global solar energy policy. Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, 15, 2149–2163.

[49] International Renewable Energy Agency. Future of Solar Photovoltaic. 2019. Available online:https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf (accessed on 13 October 2022).

[50] Nikolas G. Chatzigeorgiou * , Spyros Theocharides, George Makrides and George E. Georghiou , ‘’ A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector’’ , journal of Journal of Energy Storage , Volume 86, Part A, 1 May 2024, 111192 , https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192.

[51] Solar May Generate Half of World’s Power by 2050, Trina CEO Says. 2022. Available online: https://www.bloomberg.com/ news/articles/2022-04-20/solar-energy-may-generate-half-of-world-s-power-by-2050?leadSource=uverify%20wall (accessed on 13 October 2022).

[52] Nasser M, Hassan H. Techno-enviro-economic analysis of hydrogen production via low and high temperature electrolyzers powered by PV/Wind turbines/Waste heat. Energy Convers Manag 2023 ; 278 :116693. https://doi.org/10.1016/j. enconman.2023.116693.

[53] Izgheche yousra , Bahi Tahar & Lakhdara Amira, Analysis of Genetic and Cuckoo Search Algorithms for MPPT in Partial Shaded, International Journal of Smart Grid , Vol.8, No.1, March,2024, https://www.ijsmartgrid.org/index.php/ijsmartgridnew/article/view/329.

[54] World Wind Energy Association (WWEA), ⟨http://www.wwindea.org/the-worldsets-new-wind-installations-record-637-gw-new-capacity-in-2015/⟩

[55] Zeel Maheshwari, Kamgang Kengne and Omkar Bhat , ‘’ A comprehensive review on wind turbine emulators ‘’ , Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 180, July 2023, 113297.

[56] Montaser Mahmoud, Mohammad Ali Abdelkareem , Tabbi Wilberforce and Abdul Ghani Olabi , '' Chapter 3.4 - Review on wind energy systems '' , Renewable Energy - Volume 1 : Solar, Wind, and Hydropower Definitions, Developments, Applications, Case Studies, and Modelling and Simulation , Pages 347-361, 2023

[57] Abdelfattah A. Eladl , Samaa Fawzy , Elhossaini E. Abd-Raboh and all , … ,'' A comprehensive review on wind power spillage: Reasons, minimization techniques, real applications, challenges, and future trends'' , Electric Power Systems Research Volume 226, January 2024, 109915 .

[58] [GH] F. Porté-Agel, M. Bastankhah, and S. Shamsoddin, "Wind-turbine and wind-farm flows: A review," Boundary-layer Meteorol., vol. 174, no. 1, pp. 1–59, 2020.

[59] Q. S. Ali and M.-H. Kim, "Quantifying impacts of shell augmentation on power output of airborne wind energy system at elevated heights," Energy, vol. 239, p. 121839, 2022.

[60] Groppi D, Pfeifer A, Garcia DA,. et al. A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands. Renewable Sustainable Energy Rev 2021; 135: 110183.

[61] K. Shivarama Krishna, K. Sathish Kumar , '' A review on hybrid renewable energy systems '' , journal Renewable and Sustainable Energy Reviews , Volume 52, December 2015, Pages 907-916 .

[62] A. F. Agbetuyi, S. O. Oyedepo, C. O. A. Awosope, H. E. Orovwode, and J. O. Olowoleni, "The Vast Renewable Energy in Africa versus its Slow Pace of Harnessing," International Electrical Enginee

[63] Energy Storage News, Li-ion BESS costs could fall 47% by 2030, NREL says in longterm forecast update. https://www.energy-storage.news/li-ion-bess-costs-couldfall-47-by-2030-nrel-says-in-long-term-forecast-update/, 2023. (Accessed 30 July 2023).

[64] Energy Storage News, Residential battery installations grew 83% in Europe in 2022. https://www.energy-storage.news/residential-battery-installations-grew-83 -in-europe-in-2022/, 2023. (Accessed 30 July 2023).

[65] Belabbas B, Allaoui T, Tadjine M,. et al. Power management and control strategies for off-grid hybrid power systems with renewable energies and storage. Energy System 2019; 10: 355–384.

[66] S. Tamilselvi , S. Gunasundari , N. Karuppiah and all , . , '' A Review on Battery Modelling Techniques'' , Techniques. Sustainability 2021, 13, 10042. https://doi.org/10.3390/su131810042

[67] He, H.; Xiong, R.; Guo, H.; Li, S. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. Energy Convers. Manag. 2012, 64, 113–121.

[68] Energy Storage News, Global BESS deployments to exceed 400GWh annually by 2030, says Rystad Energy. https://www.energy-storage.news/global-bess-deplo yments-to-exceed-400gw-annually-by-2030-says-rystad-energy/, 2023. (Accessed 30 July 2023).

[69] Srilakshmi, K. et al. Performance analysis of artifcial intelligence controller for PV and battery connected UPQC. Int. J. Renew. Energy Res. 13(1), 2145. https://doi.org/10.2050/ijrer.v13i1.13523.g8672 (2023).

[70] Kumar, N. EV charging adapter to operate with isolated pillar top solar panels in remote locations. IEEE Transact. Energy Conv. 39(1), 29–36. https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3298817 (2024).

[71] A. Emrani , Y. Achour , M. J. Sanjari and A . Berrada , '' Adaptive energy management strategy for optimal integration of wind/PV system with hybrid gravity/battery energy storage using forecast models'' , ELSEVIER Journal of Energy Storage, Volume 96, 112613 (2024) .

[72] X. Huang, et al., Design optimization on solidification performance of a rotating latent heat thermal energy storage system subject to fluctuating heat source, Appl. Energy 362 (May 2024) 122997, https://doi.org/10.1016/j.

[73] X. Huang, R. Zhou, X. Luo, X. Yang, J. Cheng, J. Yan, Experimental research and multi-physical modeling progress of zinc-nickel single flow battery: a critical review, Advances in Applied Energy 12 (Dec. 2023) 100154, https://doi.org/ 10.1016/j.adapen.2023.100154.

[74] H .M .AbdAlhussain, N., Modeling and simulation of solar PV module for compar-ison of two MPPT algorithms (P&O & INC) in MATLAB/Simulink , in Baghdad, Iraq., vol 18, No. 2,pp. 666–677, (2020).

[75] E. Benkhelil , A. Gherbi, Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic generation system, Revue des Energies Renouvelables , SIENR'12 Ghardaïa , 295 – 306 , (2012).

[76] S. P. Tamas and M .Melhem ,Analyzing and modeling PV with "P&O" MPPT Algo-rithm by MATLAB/SIMULINK, in Debrecen. Form IEEE xplore, (2020).

[77] Kadeval , H. N. and Patel, V. K.., *Mathematical modelling for solar cell, panel and array for photovoltaic system*, in India ,vol 13, pp 937 – 943 , (2021).

[78] Kadeval , H. N. and Patel, V. K.., *Mathematical modelling for solar cell, panel and array for photovoltaic system*, in India ,vol 13, pp 937 – 943 , (2021).

[79] H . M . Abd Alhussain, and N., "Modeling and simulation of solar PV module for compar-ison of two MPPT algorithms (P&O & INC) in MATLAB/Simulink," , in Baghdad, Iraq., Vol. 18, No. 2,pp. 666–677, (2020).

[80] S. P. Tamas and M . Melhem , " Analyzing and modeling PV with "P&O" MPPT Algo-rithm by MATLAB/SIMULINK,", in Debrecen. Form IEEE xplore, (2020).

[81] Kadeval , H. N. and Patel, V. K.., "*Mathematical modelling for solar cell, panel and array for photovoltaic system*,".in India ,Vol 13, pp 937 – 943 , (2021).

[82] H. Yatimi and E.Aroudam, ", MPPT Algorithms based modeling and control for photovol-taic system under variable climatic conditions," in Turgi-Mures , roumania, ,(2018), pp. 757–764

[83] Haiying Sun , Changyu Qiu , & ALL ,…, '' Wind turbine power modelling and optimization using artificial neural network with wind field experimental data , applied energy Volume 280, 15 December 2020

[84] N. Rezaei & ALL , '' The Simulink Implementation of a MPPT technique and control system for a Variable Speed Wind Turbine PMSG '', International Journal of Modelling, Identification and Control (2017)

[85] Chaymae Boubii , Ismail El Kafazi & ALL , '' Synergizing Wind and Solar Power: An Advanced Control System for Grid Stability'' , Sustainability 2024, vol 16 N 2 , 815; https://doi.org/10.3390/su16020815

[86] K. A. Chinmaya and G. K. Singh, "Modeling and experimental analysis of grid-connected six-phase induction generator for variable speed wind energy conversion system," Electric Power Systems Research, vol. 166, pp. 151-162, 2019.

[87] M. Junaid Khanna , " An AIAPO MPPT controller based real time adaptive Maximum power point traching for winf turbine", https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.06.008 , pp 492–504, 2022.

[88] Zhang X, Jia J, Zheng L, Yi W, Zhang Z. Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Power Generation System: Review, Comparison and Analysis. Energy Sci Eng. 2023; 11: 430-444

[89] A.Soetedjo , A.Lomi and Widodo Puji Mulayanto, '' Modeling of Wind Energy System with MPPT Control'' , International Conference on Electrical Engineering and Informatics 17-19 July 2011, Bandung, Indonesia .

[90] Ichrak Eben Zaid1 , Daison Stallon2 , Yolanda Vidal2 , '' Wind Turbine Modeling, Maximum Power Point Tracking (MPPT), and Experimental Validation'' , 22nd International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'24) Bilbao (Spain), 26th to 28th June 2024 .

[91] Gaines, L. and Dunn, J. '' Lithium-Ion Battery Production and Recycling Materials Issues. VTO Annual Merit Review'' , Argonne National Laboratory, (2015) .

[92] H. Moghbelli & Sh; Sabzi, '' Analysis and Simulation of Hybrid Electric Energy Storage (HEES) System for High Power Application'' , 122nd ASEE Annual conference & exposition 14 june 2015 .

[93] M. Dubarrya , G. Baurea & C. Pastor-Fernández ,'' Battery energy storage system modeling: A combined comprehensive approach'', Journal of Energy Storage 21 (2019) 172–185

[94] A. Emrani, A. Berrada, A comprehensive review on techno-economic assessment of hybrid energy storage systems integrated with renewable energy, Journal of Energy Storage 84 (Apr. 2024) 111010, https://doi.org/10.1016/j. est.2024.111010.

[95] A. Emrani, A. Berrada, A. Arechkik, M. Bakhouya, Improved techno-economic optimization of an off-grid hybrid solar/wind/gravity energy storage system based on performance indicators, Journal of Energy Storage 49 (May 2022) 104163, https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104163.

[96] A. Djilali , A. Yahdou and ALL , '' Energy management of the hybrid power system based on improved intelligent Perturb and Observe control using battery storage systems'', journal Energy Reports Volume 11, Pages 1611-1626 (2024)

[97] K, Sarita , R. Devarapalli and P. Rai ,'' Modeling and control of dynamic battery storage system used in hybrid grid'' , journal Energy Storage, (2020) https://doi.org/10.1002/est2.146

[98] N. Shamarova , K. Suslov , P. Ilyushin and I. Shushpanov , '' Review of Battery Energy Storage Systems Modeling in Microgrids with Renewables Considering Battery Degradation'', journal Energies volumz 15, 6967, (2022). https://doi.org/10.3390/en15196967

[99] M. Schimpe, M. Naumann and ALL , '' Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis'' , journal Applied Energy , Volume 210, (2018) , Pages 211-229

[100] M.S. Reza a, M.A. Hannan a Pin Jern Ker & ALL , ‘’ Uncertainty parameters of battery energy storage integrated grid and their modeling approaches: A review and future research directions ‘’ , Journal of Energy Storage , Volume 68 , (2023) .

[101] Mahdi Rouholamini; Caisheng Wang; Hashem Nehrir , ‘’ A Review of Modeling, Management, and Applications of Grid-Connected Li-Ion Battery Storage Systems ‘’, IEEE Transactions on Smart Grid , Volume: 13 Issue: 6 (2022) , 10.1109/TSG.2022.3188598

[102] T. M. Gür, "Review of electrical energy storage technologies materials and systems: Challenges and prospects for large-scale grid storage", *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, pp. 2696-2767, Jul. 2018.

[103] M. Murarka , P. Purohit , D. Rakshit , A. Verma ,’’ Progression of battery storage technology considering safe and sustainable stationary application ‘’, Journal of Cleaner Production Volume 377, (2022) .

[104] N. B. Arias, J. C. López, S. Hashemi, J. F. Franco and M. J. Rider, "Multi-objective sizing of battery energy storage systems for stackable grid applications", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 3, pp. 2708-2721, May 2021.

[105] N. Yang, X. Zhang, B. Shang et al., "Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with parallel combination", Journal of Power Sources, *vol. 306, no. 29, pp. 733-741, Feb. 2016.*

[106] Hasanpour, S.; Siwakoti, Y.P.; Blaabjerg, F. A New High Efficiency High Step-Up DC/DC Converter for Renewable Energy Applications. IEEE Trans. Ind. Electron. 2023, 70, 1489–1500.

[107] Guru Kumar, G.; Sundaramoorthy, K.; Athikkal, S.; Karthikeyan, V. Dual input superBoost DC–DC converter for solar powered electric vehicle. IET Power Electron. 2019, 12, 2276–2284.

[108] Ayachit, A.; Kazimierczuk, M.K. Averaged Small-Signal Model of PWM DC-DC Converters in CCM Including Switching Power Loss. IEEE Trans. Circuits Syst. Ii Express Briefs 2019, 66, 262–266.

[109] Sarvi, M. & Azadian, A. A comprehensive review and classifed comparison of MPPT algorithms in PV systems. Energy Syst. 13(2), 281–320 (2022).

[110] Deraz, S.A.; Zaky, M.S.; Tawfiq, K.B.; Mansour, A.S. State Space Average Modeling, Small Signal Analysis, and Control Implementation of an Efficient Single-Switch High-Gain Multicell Boost DC-DC Converter with Low Voltage Stress. Electronics 2024, 13, 3264 ,

[111] K. Madhavi , S.Nagaraju , CH. Rao M. Boddepalli , ‘’ Modeling and Small Signal Analysis of Boost Converter for PV Applications’’ , International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), Volume 9, (2021)

[112] Guillermo Obregón-Pulido , Gualberto Solís-Perales , Jesús A. Meda-Campaña and Rodrigo Munguia , ‘’ Exact Sinusoidal Signal Tracking on a Modified Topology of Boost and Buck-Boost Converters’’ , Electronics 2024, 13, 793. https:// doi.org/10.3390/electronics13040793.

[113] Ahmed S. Khalifa and Ehab F. El-Saadany , “Control of Three Phase Grid Connected Pho-tovoltaic Power Systems,” , in Canada , IEEE (2010) .

[114] I. Hamdan · A. Maghraby and O.Noureldeen, “Stability improvement and control of grid connected photovoltaic system during faults using supercapacitor” , Springer Nature Switzerland (2019).
[115] M. Khawla , D. E. Chariag and L. Sbita , “A Control Strategy for a Three-Phase Grid Con-nected PV System under Grid Faults” , in Gabes , Tunisia , journal Electronic (2019).
[116] A. Mantilla , J.F. Petit , G. Ord´o˜nez , “Control of multi-functional grid-connected PV systems with load compensation under distorted and unbalanced grid voltage,” journal , www.elsevier.com/locate/epsr , (2020) .
[117] M.F. Schonardie, A. R. Roberto, F. Coelho and Denizar C , “Three-Phase Grid-Connected PV System With Active And Reactive Power Control Using dq0 Transformation” IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON (2010) .
[118] Shwetha, B., Sureshbabu, G. & Mallesham, G. Intelligent solar PV grid connected and standalone UPQC for EV charging station load. Res. Control Optim. 15(100420), 2666–7207. https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100420 (2024).
[119] P. Chandra , D. Kumar& ALL,…, ‘’ Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected Photovoltaic System with Advanced Controller considering Varying Environmental Conditions ‘’, International Journal of Energy Research, Volume 2023 , issu 1 , https://doi.org/10.1155/2023/1631605.
[120] A. Razmjoo , A. Ghazanfari , P. Alberg Østergaard and S.Abedi ,’’ Design and Analysis of Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems for Sustainable Development of Remote Areas’’ , Energies 2023, 16, 3181. https://doi.org/10.3390/en16073181 .
[121] M. Bajaj, S. Aggarwal, and A. K. Singh, “Power quality con-cerns with integration of RESs into the smart power grid andassociated mitigation techniques,” in 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), pp. 1–6, Sonepat,India, 2020 .
[122] S. P. Tamas and M . Melhem ,Analyzing and modeling PV with "P&O" MPPT Algorithm by Matlab/Simulink, in Debrecen. Form IEEE xplore, (2020).
[123] Annam, S., Srikrishna, S., Prabandhankam, S. R. & Sivarajan, G. A prospective study on perturb observe MPPT methods for photovoltaic systems. Instrum. Meas. Métrol. 22(2), 73 (2023).
[124] Kavya, M. & Jayalalitha, S. Developments in perturb and observe algorithm for maximum power point tracking in photo voltaic panel: A review. Arch. Comput. Methods Eng. 28, 2447–2457 (2021).
[125] Ali, Z. et al. A study of a generalized photovoltaic system with MPPT using perturb and observer algorithms under varying conditions. Energies (Basel) 16(9), 3638 (2023).
[126] Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O., and Adaramola, M. S. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (MPPT) techniques used in solar pv systems. Energies 16 (5), 2206. doi:10.3390/en16052206.
[127] Yousra Izgheche, Tahar Bahi , Performances of optimization techniques for tracking the maximamum power of a PV system under partial shading , 1st International Conference on scientific and Academic Research (ICSAR), December 10-13 2022 in Konya, Turkey
[128] Lamnadi, M., Trihi, M., Bossoufi, B., and Boulezhar, A. (2016). Comparative study of IC, P&O and FLC method of MPPT algorithm for grid connected PV module. J. Theor. Appl. Inf. Technol. 89 (1), 242–253.

[129] Chellal, M., Guimarães, T. F. and Leite, V. (2021). Experimental Evaluation of MPPT algorithms: A Comparative Study. International Journal of Renewable Energy Research, 11(1). doi: 10.20508/ ijrer.v11i1.11797.g8164.

[130] Benhadouga S, Belkaid A, Colak I, Meddad M, & Eddiai A. Experimental Validation of The Sliding Mode Controller to Improve The Efficiency of The MPPT Solar System. In: 2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA) (pp. 333-337). IEEE. (2021, September)

[131] Manuel, N. L., and İnanç, N. (2022). Sliding mode control-based MPPT and output voltage regulation of a stand-alone PV system. Power Electron. Drives 7 (1), 159–173. doi:10.2478/pead-2022-0012

[132] Izgheche yousra , Bahi Tahar, Studies And Analysis Of The Mppt Based Dismc Of PV Using Buck Converter Connected To Battery , International Journal of Automation and Safety, Volume 1, Numéro 0 , pages 22-26 10-09-2023 .

[133] CH. Hussain Bashar, R.CH. Naidu and S. Odofin, Development of Cuckoo Search MPPT Algorithm for Partially Shaded Solar PV, Jan 24, 2022.

[134] M. Mosaad ,M.MoussaouiAbdRaouf , M.AlAhmar and Fahd A . Banakher , Maximum power point tracking of PV system based Cuckoo Search Algorithm , in Procedia . 2000, paper 117-126, Elsevier (2019).

[135] J. Ahmed , Z. Salam , A Maximum Power Point Tracking for PV system using Cuckoo, In Journal Applied Energies , University Malaysia , pp 118-130 , Elsevier, 2013 .

[136] Dr.CH. Hussain Basha, R.CH. Naidu, S. Odofin, Development of Cuckoo Search MPPT Algorithm for Partially Shaded Solar PV, Jan 24 , 2022.

[137] F.K. Abo-E lyousr ,A.M. Abelshafy , A.Y.Abdelaziz , MPPT Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems, Springer Nature Switzerland,2020 https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_14 .

[138] Izgheche yousra (CONF CS) J. Ahmed and Z. Salam , “A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo” , in journal applied Energie university Malayza ,pp 118-130 , Elseiver (2013)

[139] F.K.Abo-E lyousr ,A.M.Abelshafy and A.Y.Abdelaziz , “MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems,” Springer Nature Switzerland AG 2020 https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_14

[140] Lasheen, Mohamed, Rahman, Ali K.Abdel, Abdel-Salam, Mazen, Ookawara, S., 2016. Performance enhancement of constant voltage based MPPT for photovoltaic applications using genetic algorithm. Energy Procedia (ISSN: 18766102) 100, 217–222. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.168.

[141] Kuei-Hsiang Chao and Muhammad Nursyam Rizal ,’’ A Hybrid MPPT Controller Based on the Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization for Photovoltaic Systems under Partially Shaded Conditions’’ , Energies 2021, 14, 2902. https://doi.org/10.3390/en14102902

[142] Silaa, M.Y.; Barambones, O.; Bencherif, A.; Rahmani, A. A New MPPT-Based Extended Grey Wolf Optimizer for Stand-Alone PV System: A Performance Evaluation versus Four Smart MPPT Techniques in Diverse Scenarios. Inventions 2023, 8, 142.

[143] Gao, Z.M., Zhao, J., Yang, Y., Tian, X.J. (2020). The hybrid grey wolf optimization-slime mould algorithm. Journal of Physics: Conference Series, Lanzhou, China, 1617: 012034.

[144] X.Ma, D.Jiandong, W.Xiao, S.Tuo and S.Ting, "Research of Photovoltaic Systems MPPT based on Improved Grey Wolf algorithm under partial shadding conditions", IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Beijing, Chaina, 20-22 October, 2018

[145] Yousra Izgheche &Tahar Bahi , Performance of optimization techniques of tracking the maximum power of a photovoltaique system under partial Shading , Fourth International Conference on Technological Advances in Electrical Engineering (ICTAEE'22.), may 23-24 2023 Skikda .

[146] S.Mohanty, B.Subudhi and P.K.Ray, "A New MPPT Design using Grey Wolf Optimization Technique for Photo Voltaic System under Partial Shedding Conditions", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.7, issue 1,pp. 181-188, .January 2016.

[147] MiarNaeimi, F.; Azizyan, G.; Rashki, M. Horse herd optimization algorithm: A nature-inspired algorithm for high-dimensional optimization problems Knowledge-Based. Systems 2021, 213, 106711.

[148] Mirza, A.F.; Ling, Q.; Javed, M.Y.; Mansoor, M. Novel MPPT techniques for photovoltaic systems under uniform irradiance and Partial shading. Sol. Energy 2019, 184, 628–648. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.034

[149] Yousra Izgheche, Tahar Bahi , Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic System based on metaheuristic Algorithm , 3rd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, January 14-17 2023 in Konya, Turkey.

[150] S. Sarwar 1 , M. A. Hafeez , & ALL , '' A Horse Herd Optimization Algorithm (HOA)-Based MPPT Technique under Partial and Complex Partial Shading Conditions '' , Energies 2022, 15, 1880. https://doi.org/10.3390/en15051880

[151] Yousra Izgheche,,Tahar Bahi , and Amira Lakhdara, Study of MPPT algorithm for PV systems under Partial Shading Conditions using Horse Herd Optimization , The 6th International Conference on Electrical Engineering and Control Application ICEECA'2024.University of Khenchela , November 19-21 , 2024, Springer. ISSN : 2773-3106, https://iceeca.org/

[152] Refaat, A.; Adnan, Q.A.; Elsakka, M.M.; Elhenawy, Y.; Majozi, T.; Korovkin, N.V.; Elfar, M.H. Extraction of maximum power from PV system based on horse herd optimization MPPT technique under various weather conditions. Renew. Energy 2024, 220, 119718

[153] Yousra Izgheche & Tahar Bahi , Performances and Analysis of Photovoltaic System Connected to Grid Smart Three Phase , 1 st International Conference on Sustainable Economy, Energy & Environmental -Prospective Modelling . (ICS3EPM'23) , Mars 6-7 2023 in Mascara.

[154] Yousri, D., Babu, T. S., Allam, D., Ramachandaramurthy, V. K., & Etiba, M. B. (2019). A novel chaotic flower pollination algorithm for global maximum power point tracking for photovoltaic system under partial shading conditions. IEEE Access, 7, 121432-121445.

[155] A. F. Shalal , M. Aljanabi and A. N. Al-Shamani , '' Modified tracking mechanism of horse optimization method (HOM) based MPPT technique for photovoltaic (PV) systems'' , 2nd International Conference on Engineering and Science , To achieve the sustainable development goals , Volume 3092, Issue 1, 8 March 2024 .

[156] Koganti Srilakshmi1 , Krishnaveni Kondreddi2 , N.VasanthaGowri2 , '' Optimal design of hybrid green energy powered reduced switch converter based shunt active power flter using horse herd algorithm'', Scientifc Reports, (2024) 14:20447 https://doi.org/10.1038/s41598-024-71100-3

[157] M. Ahmed, I. Harbi , R. Kennel, J. Rodríguez ,M. Abdelrahem , Evaluation of the Main Control Strategies for Grid-Connected PV Systems , Sustainability (2022) .

[158] E. Benkhelil , A. Gherbi, Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic generation system, Revue des Energies Renouvelables , SIENR'12 Ghardaïa , 295 – 306 , (2012).

[159] R. Palanisamy, P. Aravindh, K. Vijayakumar , Effectual SVPWM for 3-Level NPC-MLI with grid connected PV system , International Journal of Electrical Engineering and Technology (IJEET) , pp. 40-48 . (2020).

[160] R. Patel , A. Tatu, Solar Photovoltaic System Integration With Grid Using NPC Inverter, International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT) , 6, 1 , ISSN: 2320-2882 , (2018)

[161] A. Lakhdari , B. Benlahbib , T. Abdelkrim ,Control for Three-Phase Three-Level NPC Inverte Based APF Interfacing Single Stage Photovoltaic System to the Grid. Journal européen des systems Automatisés,55,1 , pp. 25–34 (2022).

[162] R. Pradhan , A. Panda, Modeling and Simulation of a MPC Based Grid-Tied PVDG system , International Journal of Renewable Energy Research , 12, 1 ,(2022)

[163] Yousra Izgheche , Tahar Bahi, Wind Turbine MPPT Based on Intelligent Method, 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic control and Computer Engineering. MISTA 2023 IEEE (LYBIA) , DOI: 10.1109/MI-STA57575.2023.10169165

[164]] Izgheche yousra & Bahi Tahar , Adaptive Backstepping And Pid Control Strategy With Genetic Algorithm For PMSG By A Grid-connected Wind Turbine , Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development , Volume 5, Numéro 2, Pages 127-135 2023-12-31 .

[165] Zahra, B., Salhi, H., and Mellit, A. (2017). "Wind Turbine Performance Enhancement by Control of Pitch Angle Using PID Controller and Particle Swarm Optimization," in 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B), Boumerdes, Algeria, 29–31.10.2017 (IEEE), 1–5. doi:10.1109/ICEE-B.2017.8192221.

[166] Yin, M., Xu, Y., Shen, C., Liu, J., Dong, Z. Y., and Zou, Y. (2017). Turbine StabilityConstrained Available Wind Power of Variable Speed Wind Turbines for Active Power Control. IEEE Trans. Power Syst. 32 (3), 2487–2488. doi:10.1109/ TPWRS.2016.2605012.

[167] Yousra Izgheche,Tahar Bahi , Controller Type-2 Fuzzy Logic – PSO Applied for Variable Speed Wind Turbines, IEEE 2nd International Conference on Electrical

Engineering and Automatic Control IEEE ICEEAC 2024, IeeeXplore, 12-14 Mai 2024, Setif, Algeria Web site: https://ieeexplore.ieee.org/document/10576292

[168] O. Noureldeen and I. Ahmed M. A. ,"Performance Analysis of Grid Connected PV/Wind Hybrid Power System During Variations of Environmental Conditions and Load," International Journal of Renewable Energy Research , Vols. Vol.8, , pp. 1-13, 2018.

[169] A. Jamali, N. M. Nor, and T. Ibrahim, ''Energy storage systems and their sizing techniques in power system—A review,'' in Proc. IEEE Conf. Energy Convers. (CENCON), Oct. 2015, pp. 215–220.

[170] Yousra Izgheche, Tahar Bahi, Amira Lakhdara, « Predictive Control for Storage Management in Hybrid Power Conversion », 12ème conference des Energies Renouvelables CIER'2024, 17&19 December 2024, Sousse, Tunisia.

[171] Belabbas B, Allaoui T, Tadjine M, Denai M. (2017). Power quality enhancement in hybrid photovoltaic-battery system based on three-level inverter associated with DC bus voltage control. Journal of Power Technologies 97(4): 272–282

[172] Das S, Akella AK. (2018). Power flow control of PV-wind-battery hybrid renewable energy systems for stand-alone application. International Journal of Renewable Energy Research 8(1): 36-43.

[173] Izgheche yousra , Bahi Tahar & Lakhdara Amira, Intelligent Power Management Control for Hybrid Wind Solar Battery Systems Connected to Micro-Grids, Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 57, No. 4, August, 2024, pp. 1225-1233, Journal homepage: http://iieta.org/journals/jesa

[174] Synergic Controller for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Array under Abrupt Irradiance Change. IEEE J. Photovolt. 023, 13, 305–314

[175] M . Patel and Sh . Bohra.'' Power management of grid-connected PV wind hybrid system incorporated with energy storage system'', International journal of Future Energy , Volume 02 , Issue 03 , Pages 07-19 and August 2023 .

[176] Yousra Izgheche, Tahar Bahi, Amira Lakhdara, « Predictive Control for Storage Management in Hybrid Power Conversion », 12ème conference des Energies Renouvelables CIER'2024, 17&19 December 2024, Sousse, Tunisia.

[177] Priyadarshi N. (2017). A hybrid firefly-asymmetrical fuzzy logic controller based MPPT for PV-wind-fuel grid integration. International Journal of Renewable Energy Research 7(4): 1546-1560

[178] Mazare, M., Taghizadeh, M., and Ghaf-Ghanbari, P. (2021). Pitch Actuator FaultTolerant Control of Wind Turbines Based on Time Delay Control and Disturbance Observer. Ocean Eng. 238, 109724. doi:10.1016/J.OCEANENG. 2021.109724.

[179] Yousra Izgheche & Tahar Bahi , Energy Management in Photovoltaic Battery and Supercapacitor Hybrid Storage System, The National Conference on Advances in Telecommunications, Electronics and Computer Engineering (ATECE'24), May 7th, 2024, University of Abbes Laghrour, Khenchela, Algeria

[180] Youssef A-R, Mohamed EE. Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system. Int J Electr Power Energy Syst 2019;108:218–31.

[181] The Nguyen H, Al-Sumaiti AS, Vu V-P, Al-Durra A, Do TD. Optimal power tracking of PMSG based wind energy conversion systems by constrained direct control with fast convergence rates. Int J Electr Power Energy Syst 2020;

[182] A. Benmouna, et al., Efficient experimental energy management operating for FC/ battery/SC vehicles via hybrid Artificial Neural Networks-Passivity Based Control, in: Renewable Energy 178, Elsevier, Nov. 2021, pp. 1291–1302, https://doi.org/ 10.1016/j.renene.2021.06.038.

[183] León Gómez, J. C., De León Aldaco, S. E. & Aguayo Alquicira, J. A review of hybrid renewable energy systems: Architectures, battery systems, and optimization techniques. Eng 4, 1446–1467 (2023).